

**Universidad Católica del Uruguay**  
**Facultad de Ingeniería y Tecnologías**



**Determinación del volumen foliar  
utilizando fusión de sensores.**

**Aplicación en atomizadores para la producción frutícola.**

**Ruben Deleón**

**Tutor: Phd. Ing. Matías Miguez**

**Memoria de grado presentada como requisito parcial para la obtención  
del grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería**

**Montevideo, Uruguay  
Diciembre 2023**

---

# Resumen

En la agricultura, el volumen foliar de cualquier especie determina la cantidad de tejido vegetal con que cuenta una planta. Dicho valor es clave a la hora de estimar la sanidad o realizar de forma correcta diferentes manejos, como fertilizaciones foliares, aplicaciones fitosanitarias, entre otros. Muchos de estos deben ser absorbidos por los tejidos de las plantas o realizar un cierto recubrimiento sobre ellas, por lo cual tener determinado el volumen foliar es un factor clave para que estos procedimientos sean correctos y eficientes.

En un trabajo previo (Atomizador Inteligente), se modificó un atomizador estándar para detectar el volumen de vegetación y aplicar el caudal adecuado en tiempo real. Este primer prototipo utilizaba sensores de ultrasonido en la determinación del volumen foliar. Utilizando éste como base en la detección de vegetación, esta etapa se enfocó principalmente en el estudio de diferentes sensores que pudieran obtenerla de forma correcta, a la vez de estipular cómo la fusión de varios de ellos podría mejorarla.

Se analizaron y probaron diferentes tipos de sensores, entre ellos ultrasonido, cámara NDVI, ópticos puntuales y LiDARs. Se determinó cuáles de estos respondían de mejor manera a la vegetación y se colocaron a trabajar en conjunto para observar su respuesta. Asimismo, se testearon diversas condiciones, tanto de campo como climáticas, investigando cómo afectan la sensibilidad y eficacia de los sensores. Al mismo tiempo, se examinaron algoritmos que recolectaran diferentes respuestas de los sensores logrando estimar óptimamente el volumen foliar.

Tomando una parcela de árboles de limón, se calcularon los volúmenes foliares por métodos tradicionales como TRV y Elipsoide. Estos son utilizados por Productores y Agrónomos a la hora de estimar el volumen foliar de manera manual, siendo el primero de más fácil obtención, pero de mayor error y el segundo más preciso pero complejo siendo solo realizado por un técnico calificado.

Como resultado obtuvimos que la recolección del volumen foliar mediante fusión de sensores tiene una gran similitud al resultado por el método del Elipsoide, lo que ratifica la buena estimación por parte de los sensores. Tomando como el método del elipsoide el más cercano a la realidad, el promedio de error comparando con los sensores es de un 12% y el error máximo un 17%. En cambio, comparando con el TRV tenemos una diferencia promedio de 56% y una diferencia máxima de 74%, lo cual muestra que el TRV es siempre excesivo.

Los resultados de TRV calculado para una fila de árboles, como es utilizado de forma convencional, nos da una diferencia entre este y el sensado de un 319 % mayor de vegetación obtenida por el TRV. Observando estos valores y sabiendo que las aplicaciones de fitosanitarios basan su dosis en el volumen de vegetación calculado en general por este

---

método, podemos inferir que estas dosis son mucho mayores que las realmente necesarias.

Este nuevo método resuelve el problema de obtención del volumen foliar ya que cualquiera que cuente con el equipo podría resolverlo de forma rápida y precisa. En este proyecto, se enfocó en el trabajo con árboles de cítricos y frutales, continuando el camino que se trazó en el primer proyecto. No obstante, esta forma de detección puede ser extrapolada a otros tipos de cultivos con otra forma física.

Palabras clave: Tecnología agropecuaria, Fruticultura, Cultivos, Caracterización de copa, Volumen de la Copa de árbol, Detección y medición de la luz (LiDAR), Sensor Ultrasonido, Índice normalizado de vegetación (NDVI).

---

# Abstract

In agriculture, the foliage volume of any species determines the amount of plant tissue that a plant has. This value is important when estimating health or correctly carrying out different treatments, such as foliar fertilizations, phytosanitary applications, among others. Many of these must be absorbed by the plant tissues or perform a certain coating on them, which is why having the foliage volume determined is a key factor for these procedures to be correct and efficient.

In previous work (Smart Sprayer), a standard sprayer was modified to detect the volume of vegetation and apply the appropriate flow rate in real time. This first prototype used ultrasound sensors to determine foliage volumes. Using this as a basis for detecting vegetation, this stage focused mainly on the study of different sensors that could obtain it correctly, and at the same time analyzing how the fusion of several of them could improve it.

Different types of sensors were analyzed and tested, including ultrasound, NDVI camera, fixed laser and LiDARs. It was determined which of these responded best to the vegetation and which can work together to improve their response. Likewise, various conditions, both on the field and climatic, were tested, looking at their effect on the sensitivity and effectiveness of the sensors. At the same time, algorithms that collected different responses from the sensors were examined, managing to optimally estimate the foliar volume.

Taking an allotment of lemon trees as the test target, foliar volumes were calculated by traditional methods such as TRV and Ellipsoid. These are used by Farmers and Agronomists when estimating foliage volume manually, the first being easier to obtain, but with greater error and the second being more precise but complex, and only being carried out by a qualified technician. As a result, we obtained where collection of leaf volume through sensor fusion has a great similarity to the result by the Ellipsoid method, which confirms their good estimation. Taking the ellipsoid method as the closest to reality, the average error compared to the sensors is 12% and the maximum error is 17%. On the other hand, comparing with the TRV we have an average difference of 56% and a maximum difference of 74%, which shows that the TRV is always excessive.

The results of TRV calculated for the row of tree as used by local farmers give us a difference between this and the sensed one of 319% greater vegetation obtained by the TRV. Observing these values and knowing that phytosanitary applications base their doses on the vegetation volume generally calculated by this method, we can infer that these doses are much higher than those necessary.

This new method solves the problem of obtaining foliage volume since anyone who has the

---

---

equipment could solve it quickly and accurately. In this project, he focused on working with citrus and fruit trees, continuing the path that was outlined in the first project. However, this form of detection can be extrapolated to other types of crops with another physical form.

Keywords:

Agricultural technology, fruit farming, crops, Canopy characterization, tree crown volume, light detection and ranging(LiDAR), Ultrasonic sensor, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI).

---

# Agradecimientos

Quiero dirigir mi agradecimiento a las siguientes entidades y personas que colaboraron para hacer posible el desarrollo de este proyecto:

En primer lugar a la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII) por la financiación de esta maestría a través de la convocatoria INOVAGRO, apoyo que fue fundamental para la realización de la misma. También a la Universidad Católica del Uruguay, por otorgarme la beca de Maestría y brindarme esta valiosa oportunidad.

Al equipo del Departamento de Maquinaria de Facultad de Agronomía (UDELAR) y al Departamento de Fruticultura del Instituto Nacional de investigación Agropecuaria (INIA), que me brindaron herramientas tanto materiales, de apoyo humano e intelectuales para poder desarrollar este proyecto de categoría.

Mi gratitud es dirigida también al PhD. Ing. Matías Miguez por haber ofrecido su tutoría al proyecto y guía durante este proceso. También por disponer de su conocimiento en ingeniería y experiencia en el desarrollo de proyectos, fue de gran ayuda y seguridad a la hora de afrontar los desafíos.

Por último a mi familia, pareja y amigos que me brindaron su apoyo de diversas formas y alentaron la voluntad de seguir adelante, así como supieron comprender mis ausencias y frustraciones.

A todos aquellos mencionados anteriormente les quiero dar las gracias.

Ruben Deleón.

---

# Índice

<b>1. Introducción</b> .....	<b>11</b>
1.1. Motivo de la investigación.....	11
1.2. Auspiciante.....	12
1.3. Obtención de volúmenes foliares tradicionales.....	12
1.4. Problema a resolver.....	14
1.5. Descripción del trabajo realizado.....	15
1.6. Resumen del documento.....	16
<b>2. Estado del arte</b> .....	<b>17</b>
2.1. Caracterización mediante ultrasonido.....	17
2.2. Caracterización mediante sensores ópticos.....	20
2.3. Caracterización mediante métodos NDVI.....	23
2.4. Fusión de sensores.....	24
<b>3. Sistema de adquisición de datos</b> .....	<b>26</b>
3.1. Sensores.....	27
3.2. Módulo de procesamiento.....	35
3.3. Integración del sistema de adquisición.....	36
3.1. Desviaciones.....	39
<b>4. Lugar de experimentación.</b> .....	<b>41</b>
4.1. Medidas realizadas en la parcela de experimentación.....	43
4.2. Medidas de los diferentes sensores.....	45
<b>5. Fusión de sensores de ultrasonido con cámara NDVI</b> .....	<b>52</b>
5.1. Señal de salida.....	52
5.2. Calibración.....	54
5.3. Código fuente implementado.....	55
5.4. Trabajo en parcela de experimentación.....	58
5.5. Comparación árbol muerto y árbol vivo.....	61
<b>6. Conclusiones</b> .....	<b>62</b>
6.1. Conclusiones sobre resultados.....	62
6.2. Publicaciones.....	64
6.3. Futuras mejoras.....	64
<b>7. ANEXOS</b> .....	<b>65</b>
7.1. Fuentes de Alimentación.....	65
<b>8. Bibliografía</b> .....	<b>67</b>

---

# Índice de Figuras

Figura 1-1 Forma de obtención del volumen foliar mediante elipsoide ay, bx, cz son los ejes de la elipse.....	13
Figura 1-2 Calculo TRV (Doruchowski, 2003).....	13
Figura 2-1 Esquema de funcionamiento de los sensores.....	18
Figura 2-2 Diagrama del principio de detección del espesor de la copal; (b) señal de eco ultrasónico y tiempo de intervalo de eco.....	19
Figura 2-3 Plataforma de ensayo diseñada tanto para la medida de distancia de campo como para los ensayos de interferencia (a) y secuencia del procedimiento de evaluación de distancia (b, c, d y e).....	20
Figura 2-4 (a) LiDAR colocado en el tractor. (b) Nube de puntos LiDAR obtenidos escaneando tres árboles de la misma fila. ....	23
Figura 2-5 (a) Ejemplo de una cámara utilizada (b) esquema de la vista superior de las cámaras y la posición de LiDAR en el sistema de pulverización. ....	25
Figura 3-1 Sensor MB7139 en distintas presentaciones.....	27
Figura 3-2 Tiempos de operación para MB7139 – XL (Maxbotix).....	28
Figura 3-3: Patrón de Haz de MB7139- XL (Maxbotix).....	29
Figura 3-4 Funcionamiento del LiDAR de estado solido (Francisca Rosique, Pedro Javier Navarro Lorente, Carlos Fernandez , 2019).....	30
Figura 3-5 Comparación de la situación real (arriba), la imagen de profundidad de CE30-C (centro) y la nube de puntos (abajo).....	31
Figura 3-6 Interpretación del valor de NDVI (El Agrario, Luciano Barrenechea, 2020) .....	33
Figura 3-7: Raspberry Pi 4.....	35
Figura 3-8 Sistema de adquisición tractor.....	36
Figura 3-9 Sistema de adquisición tractor.....	37
Figura 3-10(a) plataforma móvil (b) plataforma móvil adaptada al tractor.....	38
Figura 3-11 Diagrama de componentes de la plataforma móvil.....	39
Figura 3-12 a) Plataforma de adquisición con LiDAR, b) Panel de calibración, b) Visualización en PC.....	40
Figura 4-1 Lugar de experimentación.....	42
Figura 4-2 Imagen que muestra a su derecha la imagen que toma la cámara y la que luego es procesada.....	51
Figura 5-1 Configuración de los sensores.....	52
Figura 5-2 Ejemplo de la salida del sistema. Se puede observar las 4 secciones del árbol, el ancho promedio del árbol en cada zona y el volumen total.....	53
Figura 5-3 Esquema de funcionamiento.....	54
Figura 5-4 Placa de Calibración.....	55
Figura 5-5 Diagrama de flujo del programa.....	56
Figura 5-6 Comparación entre árbol sano y árbol muerto.....	61
Figura 7-1 Regulador de entrada a 12V implementado en el PCB.....	65
Figura 7-2: Regulador de entrada a 5V implementado en el PCB.....	66



---

# Índice de Tablas

Tabla 1-1 Índice de ajuste de densidad foliar (Uruguay).....	14
Tabla 3-1 Rango de medida del sensor.....	35
Tabla 4-1 Cálculo de volumen foliar de cada árbol. ....	43
Tabla 4-2 Cálculo Elipsoide y TRV de la fila .....	44
Tabla 5-1 Volumen de cada planta.....	60
Tabla 6-1 Comparación entre las diferentes formas de obtención de los volúmenes .....	62
Tabla 6-2 Comparación entre volumen sensado y TRV Calculado para toda la fila .....	63

---

# Índice de Gráficos

Grafica 3-1 Error con el sensor expuesto a la luz solar.....	32
Grafica 3-2 Grafica de filtro colocado en la lente. (AgroCam, 2023) .....	34
Grafica 4-1 Medidas observadas de ancho del árbol LiDAR Garmin lite v3.....	45
Grafica 4-2 Medidas observadas de ancho del árbol LiDAR Benewake TF02.....	46
Grafica 4-3 Representación de los diferentes arboles.....	47
Grafica 4-4 Vegetación en 3 franjas .....	48
Grafica 4-5 Vegetación 3 franjas un solo árbol.....	48
Grafica 4-6 Sensores ultrasonido.....	49
Grafica 4-7 Toma de un solo árbol.....	50
Grafica 4-8 Comparación entre la medida central de ultrasonido y LiDAR. ....	50
Grafica 5-1 Volumen de vegetación para cada sector lado derecho.....	59
Grafica 5-2 Volumen de vegetación para cada sector lado izquierdo.....	59
Grafica 5-3 Volumen total de la fila.....	60

---

# 1. Introducción

## 1.1. Motivo de la investigación.

La agricultura de precisión ha revolucionado la forma de cultivar en el mundo, logrando imponerse en el ámbito de la investigación. La base fundamental de la Agricultura de Precisión es aplicar los insumos en cantidades que puedan ser aprovechados en su totalidad, donde cada área del lote exprese el máximo potencial económicamente posible (INTA).

Observando el cultivo como un sistema donde los agricultores pueden variar las entradas, aplicación de semillas, fertilizantes, pesticidas, agua, siembra, labranza, manejando la variabilidad del suelo y las condiciones del cultivo a lo largo del predio (sistema) obteniendo luego la cosecha más óptima (salida). Medir todas estas variables de forma que puedan ser visualizadas, es donde entran en juego los sensores y la forma de adquisición de los datos.

Los sensores pueden ser fijos (humedad, nutrientes, temperatura, etc.) o acoplados a tractores, robots o drones (cámaras, LiDARs, ultrasonidos, velocímetros, etc.). Ambos envían datos sobre el cultivo o la labranza a un ordenador donde se pueden tomar decisiones en tiempo real para actuar en el manejo que se está realizando, o ser guardados para usar como información en equipos o estadísticas para el agricultor mejorando futuros cultivos.

Encontrar estos sensores y adaptarlos al uso, es un área de investigación que se ha desarrollado en los últimos años. Buscar en el mercado o fabricar sensores que puedan transmutar las diferentes variables fenológicas o ambientales de los cultivos a señales eléctricas ha sido todo un desafío ya que muchos de los testeados funcionan en lugares de luz, humedad y otras variables controladas cosa que en general no pasa cuando son usados en el campo en condiciones reales.

Por lo tanto, cuando observamos la ficha técnica de un sensor determinado, podemos encontrar su adaptabilidad a los requerimientos principales, pero a la hora de probarlo e investigar en campo, la gran variabilidad de este último puede darnos como resultado un sensor no adaptable para este funcionamiento.

Esta investigación busca fusionar varios tipos de sensores usando sus mejores puntos de funcionamiento y obtener una mejor determinación de la medida. Esta tesis se enfoca en captar el volumen foliar al ser una de las variables de nuestro sistema pudiéndola usar luego para variar nuestras entradas de fertilizantes, pesticidas, agua, etc.

Por ejemplo, el volumen foliar determina la cantidad de agua y producto necesaria en cada aplicación de pesticidas, por lo que sobreestimar su valor aumentaría directamente la contaminación ambiental y costos de aplicación (lo que ocurre en la mayoría de las

---

aplicaciones hechas por productores uruguayos), mientras que subestimarlos podría causar pérdida de producción.

## 1.2. Auspiciante

Esta investigación para tesis de Maestría se engloba dentro del proyecto ANII **“Impacto de nuevas tecnologías de aplicación de plaguicidas biológicos y convencionales en la inocuidad de frutas, hortalizas y la contaminación ambiental”**, financiado por el fondo INNOVAGRO de ANII.

Este proyecto se focaliza en las aplicaciones de plaguicidas debido a su fuerte relación con la inocuidad de frutas y hortalizas, la salud de los trabajadores y la contaminación ambiental. Una parte de este proyecto busca la mejora del prototipo “Atomizador inteligente” para la reducción del uso de plaguicidas en diferentes situaciones productivas, donde los sensores de follaje cumplen un papel muy importante.

La propuesta involucra a cuatro equipos de investigación, INIA, Facultad de Ingeniería (UdelaR), Facultad de Agronomía (UdelaR) y el departamento de Ingeniería (UCU). Se cuenta con el apoyo de DGSA (Dirección General de Servicios Agrícolas) y DIGEGRA (Dirección General de la Granja), con sus respectivos referentes técnicos.

La compra del equipamiento para realizar los ensayos se realizó por parte del proyecto general, los que fueron utilizados además en el “Atomizador Inteligente”.

## 1.3. Obtención de volúmenes foliares tradicionales.

Para tener una referencia de los volúmenes foliares en los árboles frutales contenidos en una parcela periódicamente, una vez al año, se utilizan métodos manuales de obtención del mismo, siendo el más usado TRV (Tree Row Volume) y en ámbitos principalmente académicos el método Elipsoide (Homer, I.; Olivet, J.; Riquelme J., 2010) (Sergio Vélez , Rubén Vacas, Hugo Martín, David Ruano-Rosa , Sara Álvarez , 2022).

Estos métodos tradicionales se basan en asumir una copa de árbol como una figura geométrica regular, en el último caso un elipsoide y en el primero un paralelogramo.

El elipsoide, es una superficie curva cerrada cuyas tres secciones ortogonales principales son elipses Figura 1-1, una vez medidos los tres semiejes, se calcula inmediatamente el volumen. La fórmula de volumen se muestra en la imagen. Nótese que en la parte 3 de la figura algunas partes el elipsoide muestra ramas y hojas desprendidas de la superficie, esto se debe a que el elipsoide obtenido por el método tradicional toma un valor medio para cada eje. (Carmen Marín-Buzón, Antonio Pérez-Romero, Fabio Tucci-Álvarez and Francisco Manzano-Agugliaro, 2020)

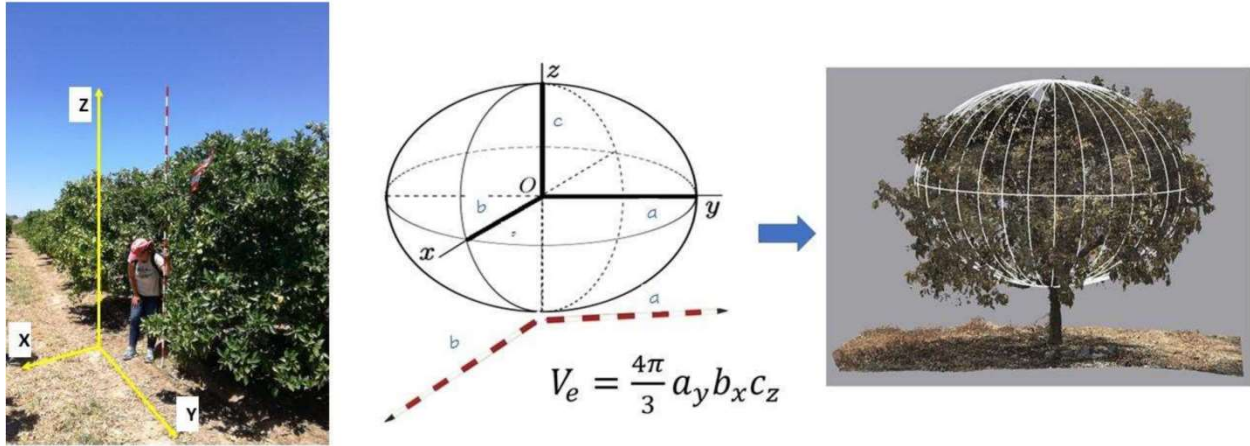


Figura 1-1 Forma de obtención del volumen foliar mediante elipsoide ay, bx, cz son los ejes de la elipse.

Este volumen luego se extiende a una hectárea para poder ser utilizado en diferentes manejos como es la atomización. Para calcular el volumen foliar con el método del elipsoide ( $V_{F_{Elipsoide}}$ ) se multiplica por el valor en metros cuadrados de una hectárea y se divide entre la distancia entre filas ( $E_p$ ) y entre plantas ( $E_p$ ):

$$V_{F_{Elipsoide}} = \frac{4\pi \times a(m) \times b(m) \times c(m) \times 10000(m^2)}{3 \times E_p(m) \times E_p(m)}$$

Para el caso del TRV se calcula el volumen de un paralelogramo correlacionándolo con el volumen de una fila de árboles.

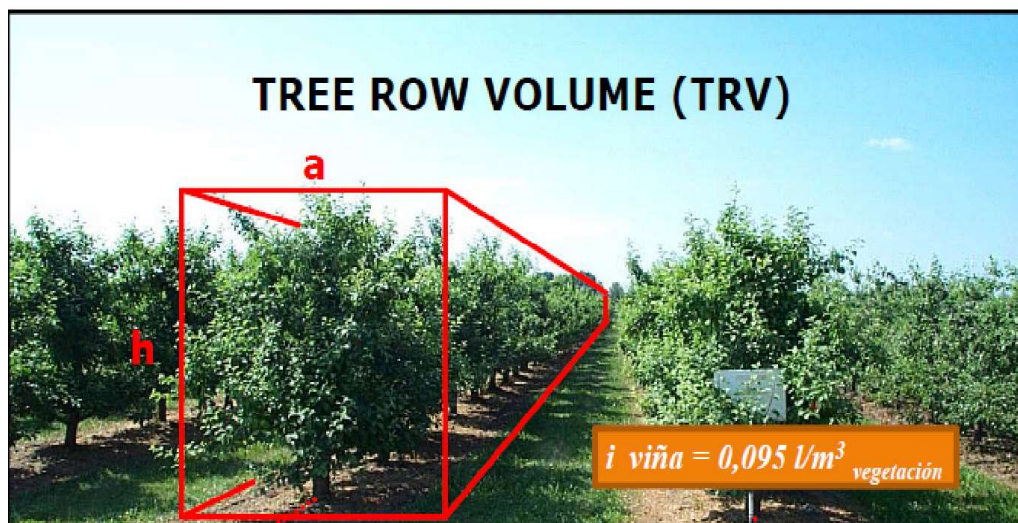


Figura 1-2 Calculo TRV (Doruchowski, 2003)

Al igual que el anterior para diferentes manejos del cultivo se necesita este volumen por

---

hectárea por lo que se traspasa a este valor calculando el índice de vegetación por hectárea.

$$T.R.V = \frac{h(m) \times a(m) \times 10000(m^2)}{C(m)}$$

En la anterior ecuación se muestra el cálculo de T.R.V donde h es la altura del árbol, a el ancho del árbol y C la Distancia entre filas. Además de las medidas anteriores se utiliza una serie de valores para adecuar el índice al tipo de árbol dependiendo de cuanto frondoso es su follaje.

I	DESCRIPCIÓN DEL ÁRBOL
0.70	Extremadamente abierto, la luz penetra a través de todo el árbol, o árboles jóvenes.
0.75	Muy abierto, buena penetración de luz, dardos vigorosos dentro de la copa.
0.80	Bien podado, adecuada luz en la planta, dardos vigorosos en toda la copa. Muchos espacios libres en el follaje que permite la entrada de luz.
0.85	Moderadamente bien podado, población razonable de dardos en la copa. Follaje no permite la entrada de luz en los dos tercios inferiores del árbol.
0.90	Podado minimamente. Dardos dentro de la copa débiles por falta de luz. Muy pocos espacios para que penetre la luz.
0.95	Poco o nada podado. Dardos muertos o muy débiles en la copa. Muy poca luz visible a través del árbol.
1.00	No podado. Sin penetración de luz en la copa. Árboles de más de 6.1 m de altura.

*Tabla 1-Índice de ajuste de densidad foliar (Uruguay)*

Estos dos métodos serán utilizados como la base para comparar cada uno de los valores obtenidos por los sensores utilizados.

#### 1.4. Problema a resolver

El método de TRV, como comentábamos anteriormente, es el más utilizado por Productores y Agrónomos por su fácil obtención, pero es el que en mayor medida sobrestima el volumen foliar. En el caso de este trabajo se encontró una sobrestimación promedio del 36%, por encima del tomado por el método del elipsoide. Además, al calcular el TRV se utiliza el peor caso de los calculados por lo que el error en general es mayor al 50%.

El método del elipsoide es mucho más preciso que el TRV, pero es intensivo en mano de obra por tener que tomar mayor cantidad de medidas de los árboles.

Esta sobrestimación produce una utilización mayor de insumos como son fitosanitarios y fertilizantes, incrementando costos de producción y riesgos de contaminación. Esta contaminación podemos observarla claramente los últimos años, en la floración de

---

cianobacterias producidas en las riveras de ríos y arroyos dadas por los escurrimientos de fertilizantes utilizados en la agricultura. Estos escurrimientos son generados por a sobrestimación de la cantidad a utilizar de los mismos, siendo lo no absorbido por las plantas escurrido a los afluentes.

Observando estos problemas este trabajo desarrolla un método que por medios electrónicos consiga una mejor estimación del volumen foliar, buscando disminuir luego los anteriores problemas.

## 1.5. Descripción del trabajo realizado

Se comenzó investigando diferentes tipos de sensores que logran captar el volumen de vegetación, y se recolecto información sobre trabajos similares que hubieran funcionado en este tipo de ambientes. Además, se contaba con experiencia en el uso de ultrasonido utilizado para obtener la vegetación en el proyecto anterior (Gabiél Vicente, Diego Medina, Ruben Deleon, 2017).

Observando las fortalezas y debilidades detectadas en la experiencia con ultrasonido se enfocó la búsqueda de sensores que pudieran suplir las debilidades de este, tales como, una respuesta lenta o ciertos errores cuando se trabajaba en algunas configuraciones especiales.

El testeo de los nuevos sensores se realizó de forma individual buscando sus pro y desventajas comparando estas con los del ultrasonido. En total fueron testeados cuatro tipos de sensores: cámara NDVI, sensores ópticos puntales, sensores LiDAR y ultrasonido.

Los sensores se colocaron en una barra construida para su alojamiento que esta acoplada en un tractor agrícola. La razón de ello es que las muestras fueran tomadas en condiciones de trabajo normales, donde los sensores puedan estar actuando en distintos equipos como el caso del “Atomizador Inteligente”, estando sujetos a vibraciones, condiciones climáticas variadas, ruidos, etc. Todas estas condiciones podrían estar influyendo sobre las medidas realizadas, por lo cual es importante testear de esta manera.

La información enviada por cada sensor se guardaba por medio de una placa Raspberry PI para luego ser analizada.

El campo de trabajo fue dividido en dos tipos “natural” y “artificial”, en el campo de trabajo natural los sensores toman muestras de los árboles en un monte frutal y en el artificial se crean diferentes formas para que el sensor pueda captar. Esto se realiza para observar los comportamientos en los dos esquemas, pudiendo sacar conclusiones sobre distorsiones dadas por los arboles a sensar y comparar con superficies ya prediseñadas

Luego de la obtención de los datos con diferentes sensores se procedió a la reconstrucción del volumen foliar, visualizándolo a diferentes alturas del árbol por medio de gráficas.

---

Observando las mismas se buscó la combinación de dos diferentes sensores pudiendo suplir algunos problemas que encontramos en un sensor específico, con la superposición de otro donde la combinación de ambos logre una mejor estimación del volumen foliar.

En una primera evaluación se decidió combinar el sensor LiDAR con la cámara NDVI. Para esto se construyó una plataforma con ruedas la cual pudiera ser ubicada frente a los diferentes árboles y ser medidos sin depender del tractor. Cuando se comenzó a tomar las medidas el sensor LiDAR dejó de funcionar. Contactando al fabricante se buscaron alternativas para ser reparado o sustituido sin encontrar respuesta satisfactoria por el fabricante, por lo que se debió descartar su uso.

Buscando una nueva alternativa con los sensores que se contaban se decidió combinar cuatro ultrasonidos con la cámara NDVI (el ultrasonido funcionando en lugar del LiDAR). Para ello se toma una imagen y se divide en cuatro sectores asignándole a cada uno un ultrasonido, con este último se logra el ancho de vegetación y con el valor NDVI de cada pixel en ese sector de la imagen encontramos si hay vegetación o no. Con estas medidas podemos crearnos una medida 3D de la sección del árbol que estamos observando.

En la plataforma se colocó un Raspberry PI para obtener la combinación de medidas de los ultrasonidos y la cámara además de la recolección de los datos. Se creó una placa donde se pudieran conectar al Raspberry PI las entradas y salidas de los Ultrasonidos, pudiendo dar alimentación a estos y la CPU convirtiendo la tensión de una batería en los requeridos por cada componente.

Por último, se analizó los datos obtenidos con esta combinación de sensores, y se compararon con los valores determinados manualmente.

De esta manera, se logró implementar un sistema multisensor que podía determinar el volumen foliar que puede ser usado en condiciones reales de funcionamiento.

## **1.6. Resumen del documento**

En la próxima Sección se hará un análisis del estado del arte, tanto en Uruguay como en el mundo. En la tercera sección, se discutirán los requerimientos de los sensores así como los modelos de los mismos que fueron utilizados.

En la Cuarta Sección se describirá el lugar donde se realizaron los diferentes ensayos, de qué forma y cuáles fueron los materiales empleados, detallando las medidas tomadas a mano y por cada sensor individualmente. En la Quinta sección describe la fusión de los dos sensores elegidos, mostrando la señal que dan como salida, su calibración, código implementado y el trabajo realizado en los ensayos

En la Sexta Sección se muestra las conclusiones obtenidas, y por ultimo un anexo con diferentes datos del trabajo.



---

## 2. Estado del arte

La exactitud en la detección de características de la copa del árbol es la base de los diferentes manejos realizados al cultivo, tal como es la fumigación variable precisa. Las características de la copa, como la densidad, el grosor y el volumen, son necesarias para variar la cantidad de fitosanitario, el flujo de la niebla y el aire. Por ello se pueden encontrar diferentes proyectos que buscan esta caracterización.

Tomando como base el proyecto ya nombrado “Atomizador Inteligente” donde se obtenía una aproximación del volumen foliar mediante el uso de sensores de ultrasonido, caracterizando el árbol para luego actuar sobre el caudal del atomizador, se siguió trabajando sobre la base del mismo desarrollando la investigación en los ultrasonidos y buscando otros de sensores como cámaras NDVI, sensores ópticos y LiDARs siendo capaces de trabajar sobre la vegetación.

A continuación, se detallan algunos de los trabajos de los últimos años más relevantes.

### 1.7. Caracterización mediante ultrasonido

Este tipo de caracterización es el que hace más tiempo se implementa principalmente porque necesita poco poder de cómputo y su costo es accesible.

El espesor de la copa es una dimensión importante para el cálculo del volumen del árbol. Al observar el fenómeno de las ondas ultrasónicas con reflejos múltiples y el análisis posterior de las señales de eco, encontramos que existe una relación proporcional entre el espesor de la copa y el tiempo de intervalo de eco.

- ***Atomizador Inteligente (UCU, Montevideo, Uruguay, 2017)***

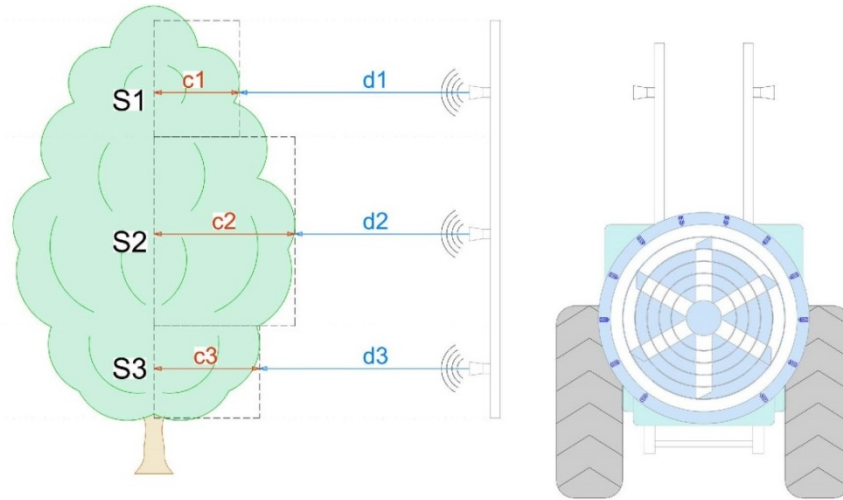
Este atomizador basa su funcionamiento en la detección de secciones transversales de las copas de los árboles a distintas alturas y pulverizar un caudal proporcional a las dimensiones de vegetación. La detección se realiza por medio de ultrasonidos, señal que toma como entrada una unidad electrónica y tiene como salida el control de válvulas hidráulicas que varían un caudal de caldo fitosanitario a pulverizar.

Este equipo utiliza el sensor MB7139-XL-TrashSonar™-WR™-MaxBotix, el que tiene la capacidad de detectar objetos en un rango de 0 a 350 cm, con una apertura de haz de un valor cercano a los 60 cm durante casi todo su rango de trabajo Figura 2-1. Otra característica del MB7139 es su muy buen filtrado de la medida, reportando el rango al primer objetivo detectable ignorando objetos de tamaño despreciable. Esto ayuda a filtrar en la vegetación pequeñas hojas que puedan estar delante de la masa de vegetación

---

principal, que es realmente lo que se necesita considerar.

Los sensores ultrasónicos toman la distancia entre la máquina y la planta, entonces para determinar el ancho del árbol se descuenta el ancho entre fila a esta medida. Este equipo cuenta con tres sensores de cada lado estimando el ancho del árbol en tres sectores distintos esto se puede observar en la siguiente figura (Gabiél Vicente, Diego Medina, Ruben Deleon, 2017).



*Figura 2-1 Esquema de funcionamiento de los sensores*

El proyecto fue defendido en 2017 y se tomó como base para el proyecto de INOVAGRO y para esta tesis de maestría.

- ***Método para estimar el espesor de Copa utilizando tecnología de sensores de ultrasonido (UJS Jiangsu, China, 2021)***

Los resultados de este trabajo muestran que se puede estimar con precisión el espesor de la copa cuando la distancia de detección, la densidad del mismo y el espesor están entre 0.5 y 1.5 m, 1.2 y 1.4 y 0.3 y 0.6 m, respectivamente. El error relativo entre el valor estimado y el valor real del espesor de la copa simulada no es superior a 8,8%. Para comparar los resultados del laboratorio con los árboles en el campo, midieron el espesor de tres árboles de Olivo fragante. Los resultados muestran que la media de los errores relativos de tres árboles son 19,2%, 19,4% y 18,8%, respectivamente.

Estos resultados pueden ser utilizados para mejorar las mediciones de la producción agrícola que incluye tanto huertos como instalaciones proporcionando un punto de referencia para la aplicación precisa de pulverización variable (Huitao Zhou, Weidong Jia, Yong Li and Mingxiong Ou, 2021).

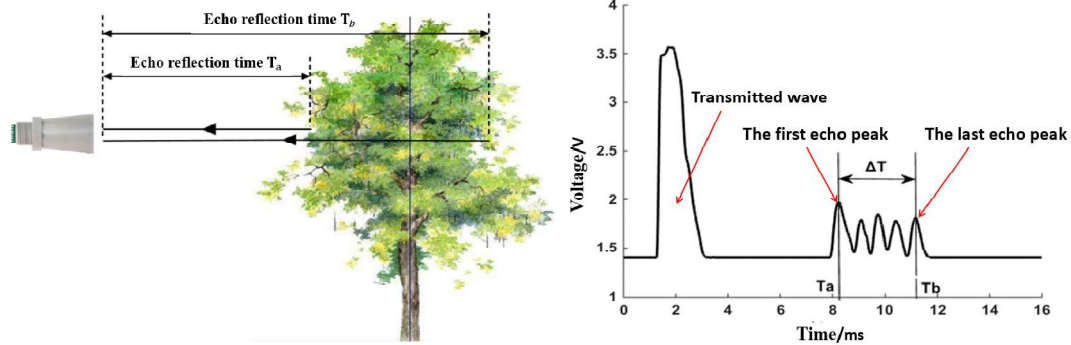


Figura 2-2 Diagrama del principio de detección del espesor de la copa; (b) señal de eco ultrasónico y tiempo de intervalo de eco.

- **Testeo de precisión en sensores de ultrasonido de largo rango en olivares (UCO, Córdoba, España, 2014)**

El trabajo busca testear el uso de sensores de ultrasonido en las condiciones especiales que el olivo requiere como son sensores de largo alcance los que son menos precisos y más rápidos que los más comunes. Los objetivos principales del estudio fueron determinar la idoneidad del sensor en términos de determinación de cono de sonido, errores de ángulo, errores de diafonía y mediciones de campo.

Este equipo realizó diferentes pruebas de laboratorio para verificar la idoneidad de un sensor ultrasónico comercial de largo alcance, como son la determinación experimental del diámetro del cono de sonido, la influencia del ángulo de incidencia de onda de sonido y la precisión, en varias distancias para varios materiales objetivo. Además se determinó el comportamiento de los errores debidos a interferencia entre sensores para diferentes distancias para dos materiales distintos y la precisión del sensor en condiciones reales.

Los resultados muestran que el sensor estudiado es apropiado para olivos porque el cono de sonido es más estrecho para este árbol que para los otros materiales estudiados, la copa del olivo no tiene una gran influencia en la precisión del sensor con respecto a la distancia y el ángulo y los errores de interferencia (Juan Luis Gamarra-Diezma, Antonio Miranda-Fuentes, Jordi Llorens, Andrés Cuenca, 2015).

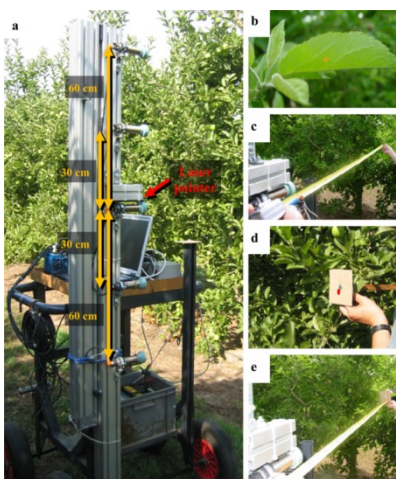
- **Rendimiento de sensor ultrasónico en copas de árboles de manzana (UDL Lleida, España, 2011)**

El objetivo de este trabajo fue evaluar el rendimiento de un sensor ultrasónico en condiciones de laboratorio y de campo para proporcionar estimaciones fiables de las medidas de distancia a las copas de los manzanos. Para ello, diseñaron una metodología para analizar el rendimiento de los sensores en relación con el alcance del follaje y las interferencias con sensores adyacentes cuando trabajan simultáneamente.

---

Los resultados muestran que el error promedio en la medición de distancias por el sensor ultrasónico en condiciones de laboratorio es de  $\pm 0,53$  cm. Sin embargo, el aumento de la variabilidad en las condiciones de campo reduce la precisión de este tipo de sensores al estimar distancias de las copas. El error medio en tales situaciones es de  $\pm 5,11$  cm. Al analizar interferencias de sensores adyacentes separados 30 cm, el error promedio es de  $\pm 17,46$  cm. Cuando los sensores están separados 60 cm, el error promedio es de  $\pm 9,29$  cm.

Se ha demostrado que el sensor ultrasónico probado es adecuado para estimar distancias al dosel en condiciones de campo cuando los sensores están separados por 60 cm o más y, por lo tanto, podría usarse en un sistema para estimar los parámetros estructurales del dosel en horticultura de precisión. (Alexandre Escolà ,Santiago Planas, Joan Ramon Rosell, Jesús Pomar, Ferran Camp , Francesc Solanelles , Felip Gracia, Jordi Llorens and Emilio Gil, 2011)



*Figura 2-3 Plataforma de ensayo diseñada tanto para la medida de distancia de campo como para los ensayos de interferencia (a) y secuencia del procedimiento de evaluación de distancia (b, c, d y e).*

## 1.8. Caracterización mediante sensores ópticos.

Este tipo de sensor está siendo más utilizado en los últimos años principalmente por baja en sus costos, su precisión y la disponibilidad de procesadores potentes. Por lo mismo es que se encuentran más trabajos recientes.

- ***Pulverizador Inteligente con sistema llamado Smart-Apply con detección de copa mediante LiDAR. (ISU Iowa, USA, 2022)***

El pulverizador inteligente que utiliza un sistema de control de rociado de precisión guiado por láser es una tecnología de pulverizado revolucionario para árboles frutales, de nueces, de vivero y cultivos de vid perenne.

Esta tecnología modifica un pulverizador de chorro de aire estándar, colocando un kit con un sistema de escaneo LiDAR (Light Detección and Ranging) que crea un mapa 3D de copa del monte. Una computadora usa la información de escaneo 3D para calcular cuánto

---

producto aplicar y dónde aplicarlo. La computadora controla un conjunto de válvulas de solenoide que abren y cierran boquillas individuales para que el rociado coincida con la forma, el tamaño y la ubicación del dosel del cultivo.

Los estudios en montes de manzanas de Ohio e Iowa en 2020 y 2021 mostraron una reducción en el volumen de rociado de 40 a 80 % cuando se usa el pulverizador inteligente, en comparación con uno de chorro de aire estándar que aplica 100 galones por acre. A pesar de esta importante reducción en el volumen de rociado, el uso del rociador inteligente logró un rendimiento comercializable y un control de plagas y enfermedades equivalente al uso del rociador de chorro de aire estándar. (Jose Gonzalez, Mark Gleason, Olivia Meyer, 2022)

Este equipo cuenta con un producto comercial llamado Smart-Apply, el cual cuenta con equipos funcionando en establecimientos frutícolas. (SmartApply, 2023)

- ***Nube de puntos 3D para caracterizar el tamaño y forma de los arbustos. (UGA Georgia, USA, 2019)***

El tamaño y la forma son propiedades importantes de los arbustos como los arándanos, pueden ser particularmente útiles para una evaluación adecuada de la arquitectura de arbustos en la cosecha mecánica. El objetivo general de este estudio fue desarrollar un enfoque 3D para medir rasgos relacionados con el tamaño y la forma del arbusto que son relevantes para la cosecha mecánica.

Por medio de LiDAR se adquirieron nubes 3D para 367 arbustos de cinco grupos de genotipos. Los datos de la nube de puntos fueron pre procesados para descartar puntos erróneos del arbusto y caracterizar de forma precisa la arquitectura del arbusto (altura, ancho y volumen), tamaño de la corona y descriptores de forma (curva de trayectoria  $\lambda$  y cinco índices de forma)

Los resultados estadísticos demostraron que los cinco grupos de genotipos eran estadísticamente diferentes en tamaño de corona y forma de arbusto. Las diferencias coincidieron con la evaluación humana con respecto a la arquitectura óptima del arbusto para la cosecha mecánica. (Yu Jiang, Changying Li, Fumiomi Takeda, Elizabeth A. Kramer, Hamid Ashrafi & Jamal Hunter, 2019)

- ***Caracterización de la copa de los árboles basada en LiDAR bajo condiciones simuladas, condición desigual del camino, avance en el monte medición de perfil (ZJU, Zhenjiang, China, 2017)***

En la detección real del perfil de la cubierta exterior de la copa del árbol, la precisión de un escáner LiDAR para medir la estructura de la cubierta se ve afectada por potencial

---

irregularidad de la misma. El nivel de error asociado con los ángulos de incidencia dado por ondulaciones en la superficie del suelo puede reducirse mediante el desarrollo de un algoritmo de corrección adecuado.

Este artículo propone un algoritmo de corrección de compensación de ángulo de incidencia fuera de línea basado en una transformación de coordenadas 3D. La validez del algoritmo de corrección se verifica realizando un experimento en interiores. El experimento se llevó a cabo en una plataforma de medición del perfil de una copa especialmente diseñada.

Durante el experimento, un árbol artificial y un tablero tallado en forma de árbol se escanearon continuamente a una velocidad de desplazamiento del LiDAR y distancias de detección constantes en condiciones simuladas de caminos llenos de baches. Los datos sin procesar del LiDAR adquiridos se procesaron fuera de línea mediante un programa MATLAB excepcionalmente desarrollado.

Los resultados obtenidos antes y después del método de corrección muestran que el método de corrección de compensación de ángulo de incidencia es capaz de corregir los puntos de datos distorsionados en la medición del perfil de tablero tallado en forma de árbol, con un error relativo del 5%. Mientras que el método de corrección es capaz de reducir el error asociado a la desviación del ángulo de incidencia, corrigiendo a la posición ideal del escáner, con un error relativo del 7 %. (Yue Shen, Destaw Addis and Fida Hussain, 2017)

- ***Optimización de medición del volumen de corona de olivo (UCO Córdoba España 2015).***

Con este fin este trabajo evalúa tres métodos y compara con las mediciones de LiDAR para determinar su precisión: método de área proyectada de corona vertical (VCPA), método de volumen de elipsoide (VE) y método de volumen de silueta de árbol (VTS). Los ensayos se realizaron en tres tipos diferentes de plantaciones de olivos: intensivo, adaptado de un solo tronco tradicional y tradicional. En total, se caracterizaron 55 árboles. Los resultados muestran que los tres métodos son apropiados para estimar la corona. (Antonio Miranda-Fuentes, Jordi Llorens, Juan L. Gamarra-Diezma, Jesús A. Gil-Ribes and Emilio Gil, 2015)

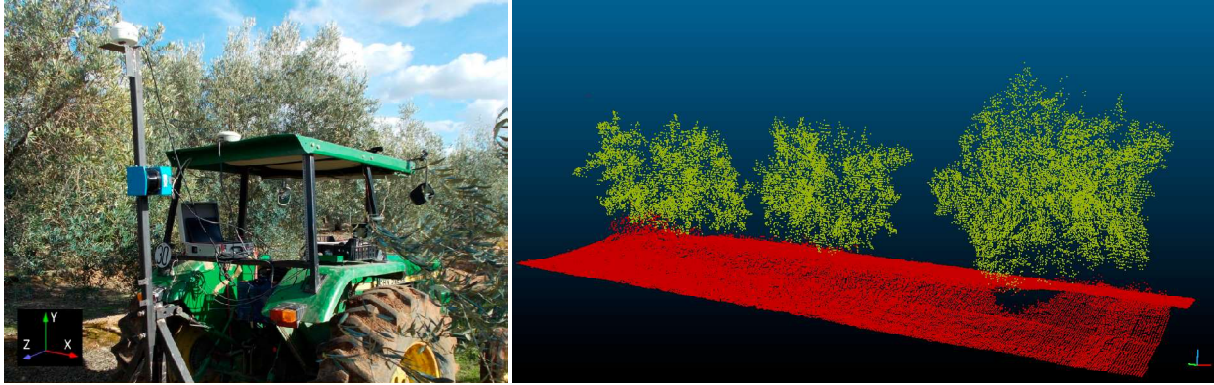


Figura 2-4 (a) LiDAR colocado en el tractor. (b) Nube de puntos LiDAR obtenidos escaneando tres árboles de la misma fila.

## 1.9. Caracterización mediante métodos NDVI

El índice de diferencia de vegetación normalizado (NDVI) obtenido por teledetección se usa ampliamente para monitorear cultivos anuales, pero pocos estudios han investigado su uso en forma terrestre y en cultivos frutales. Estos pocos estudios están principalmente enfocados a observar el vigor y los cambios fenológicos de los árboles, pero no la detección de la cantidad de follaje en un árbol.

- ***NDVI obtenido por sensor remoto superficial para caracterizar ciclo en vid. (UFRGS, Rio Grande, Brasil, 2017)***

El objetivo de este estudio fue determinar el perfil temporal NDVI durante el ciclo de la vid en viñedos establecidos en sistemas de formación horizontal. Los datos NDVI fueron obtenidos por sensor remoto terrestre por medio de un equipo Greenseeker en Viñedos Chardonnay y Cabernet Sauvignon ubicados en la región de Serra Gaúcha, Rio Grande do Sul, Brasil, de septiembre a junio en temporadas vegetativas 2014/2015 y 2015/2016.

Las copas de la vid se manejaron en sistemas de conducción horizontal (T e Y) Los resultados indicaron que los valores temporales de NDVI variaron durante el ciclo de la vid (0.33 a 0.85), reflejando el cambio en vigor y acumulación de biomasa que resultó de las etapas fenológicas y prácticas de manejo.

Los perfiles temporales de NDVI fueron similares a ambos sistemas de conducción horizontal. Los valores de NDVI fueron más altos a lo largo del ciclo para Cabernet Sauvignon en comparación con Chardonnay indicando Cabernet Sauvignon como el cultivar con mayor vigor vegetativo.

El NDVI obtenido por sensor terrestre es rápido y no destructivo para monitorear y caracterizar la copa del árbol en tiempo real, compilando en un solo dato varios parámetros relacionados con desarrollo de la vid, como las condiciones meteorológicas y las prácticas de gestión que son difíciles de cuantificar juntas. (Amanda Heemann Junges, Denise Cybis

---

Fontana, Rafael Anzanello, Carolina Bremm, 2017)

- ***Monitoreo y fumigación de precisión para plantaciones de orquídeas con cámaras web inalámbricas (RMUTT Thanyaburi, Thailand 2017)***

Mediante el procesamiento de imágenes tomadas de Webcam inalámbricas en la plataforma de detección remota de baja altitud (LARS), esta investigación monitoreó información sobre el crecimiento de cultivos, plagas y enfermedades en una plantación de orquídeas dendrobium.

Los técnicos vinculados al proyecto estudiaron índices vegetativos para distinguir las diferentes etapas de crecimiento del cultivo y la densidad de infestación de plagas y enfermedades. Los datos de la imagen se procesaron a través de un algoritmo creado en MATLAB®. De acuerdo con la etapa de crecimiento de la orquídea y su densidad de infestación, se administraron niveles variables de fertilizantes e inyecciones químicas.

Las imágenes LARS adquiridas de las Webcam inalámbricas se posicionaron mediante georreferenciación y finalmente se procesaron para estimar los índices vegetativos (Rojo = 650 nm y NIR = 800 nm centro de la banda). Obtuvieron buenas correlaciones y un claro rango de conglomerados en gráficos característicos del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y el índice de vegetación de diferencia normalizada verde (GNDVI) contra el contenido de clorofila.

La aplicación Webcam, les proporciono insumos aceptables para el procesamiento de imágenes. La plataforma LARS dio mejor desempeño a una altura de 1,2 m sobre la fila. El software de procesamiento de imágenes basado en imágenes LARS proporcionó resultados satisfactorios en comparación con las mediciones manuales. (Grianggai Samseemoung, Peeyush Soni and Chaiyan Sirikul, 2017)

## **1.10. Fusión de sensores**

- ***Pulverizador inteligente de cultivos de árboles que utiliza fusión de sensores e inteligencia artificial (UFL Immokalee, Florida, USA, 2021)***

El grupo de investigación que realizó este trabajo, diseñó y evaluó un sistema de detección inteligente de bajo costo para controlar los rociadores de cultivos arbóreos usando cítricos como un estudio de caso.

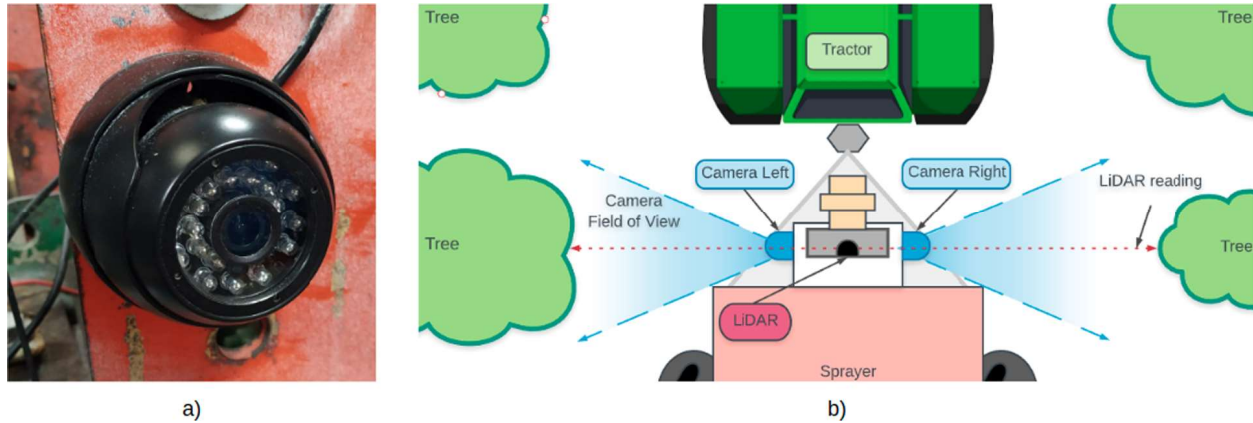
El prototipo comprende un LiDAR, visión artificial, GPS, medidores de flujo, para escanear árboles en busca de altura, clasificación de árboles y conteo de frutas. Específicamente, este sistema de detección inteligente puede detectar y clasificar objetos en árboles o no árboles (por ejemplo, humanos, construcciones de campo), medir la altura de los árboles y la



---

densidad de la copa, y detectar y contar frutos. Basándose en esta información, controla las boquillas de pulverización para optimizar las aplicaciones de pulverización.

El software novedoso en C++ se ejecuta en una computadora integrada Nvidia Jetson Xavier NX procesa y controla los datos utilizando técnicas de IA y fusión de datos.



*Figura 2-5 (a) Ejemplo de una cámara utilizada (b) esquema de la vista superior de las cámaras y la posición de LiDAR en el sistema de pulverización.*

Los resultados del sistema de detección inteligente para la estimación de la altura de los árboles indicaron un error promedio relativamente bajo del 6 %. Se utilizó una red neuronal convolucional (CNN) para realizar la clasificación de árboles con una precisión promedio del 84 % al clasificar las imágenes recopiladas en objetos maduros, jóvenes, muertos y que no son árboles. El módulo de conteo de frutas (también una CNN) obtuvo una puntuación del 89 %, en comparación con las imágenes de frutas cítricas maduras e inmaduras etiquetadas en el suelo. Finalmente, la adopción de este nuevo método de detección redujo el volumen de rociado en un 28 %, en comparación con las aplicaciones de rociado tradicionales. (Victor Partel, Lucas Costa, Yiannis Ampatzidis)

Cabe destacar que este sistema no utiliza cámara NDVI sino una cámara RGB normal.

---

## 3. Sistema de adquisición de datos

Para poder determinar el volumen foliar, en esta sección se describen los modelos de los sensores que están disponibles en el mercado, sus características y requerimientos para su funcionamiento. Además, se mostrará cómo se conectaron los diferentes sistemas para tomar medidas específicas.

Se utilizaron tres tipos distintos de sensores, Ultrasonido, LiDAR y NDVI. En el ultrasonido el sensor emite una onda ultrasónica y recibe la onda reflejada que retorna desde algún objeto que se encuentre delante, midiendo la distancia al objeto contando el tiempo entre la emisión y la recepción.

El sensor LiDAR (Light Detección And Ranging) emite un haz de luz que es reflejado en los objetos y retornando al dispositivo siendo este capaz de medir el tiempo entre la emisión y la recepción. Estos sensores pueden medir esto en un punto fijo o generar por medio de diferentes dispositivos una nube de puntos y ser visualizado en un mapa de distancias.

El NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) es un índice espectral de vegetación que se obtienen midiendo la luz reflejada en los vegetales en diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético, para ellos en general se utiliza una cámara IR, G, B donde se mide la diferencia entre los colores visibles G y B (Green and Blue) y el IR (Infrared).

---

## 1.11. Sensores

### *Sensor MB7139-XL-TrashSonar™-WR™-MaxBotix inc.*

Este sensor funciona mediante ultrasonido y tiene la capacidad de detectar objetos en un rango de 0 a 350 cm, con una apertura de haz alrededor de los 60 cm, esto se logra gracias al sistema de direccionamiento que ya viene integrado.



*Figura 3-1 Sensor MB7139 en distintas presentaciones*

Tiene un grado de protección IP67, el cual lo hace más que adecuado para trabajar bajo las condiciones reales de funcionamiento.

El fabricante lo recomienda para trabajar en ambientes con ruido eléctrico y acústico considerables.

En la Figura 3-1 puede observar los diferentes encapsulados de los sensores, en nuestro caso para obtener un mejor haz de lectura utilizamos el full

Horn (enconado).

Otra característica por la que se eligió el MB7139 es que tiene muy buen filtrado de la medida, reportando el rango al primer objetivo detectable, ignorando objetos de tamaño despreciable. Esto ayuda a filtrar en la vegetación pequeñas hojas que puedan estar delante de la masa de vegetación principal, que es realmente lo que se necesita considerar.

## Sensor Free-Run Timing

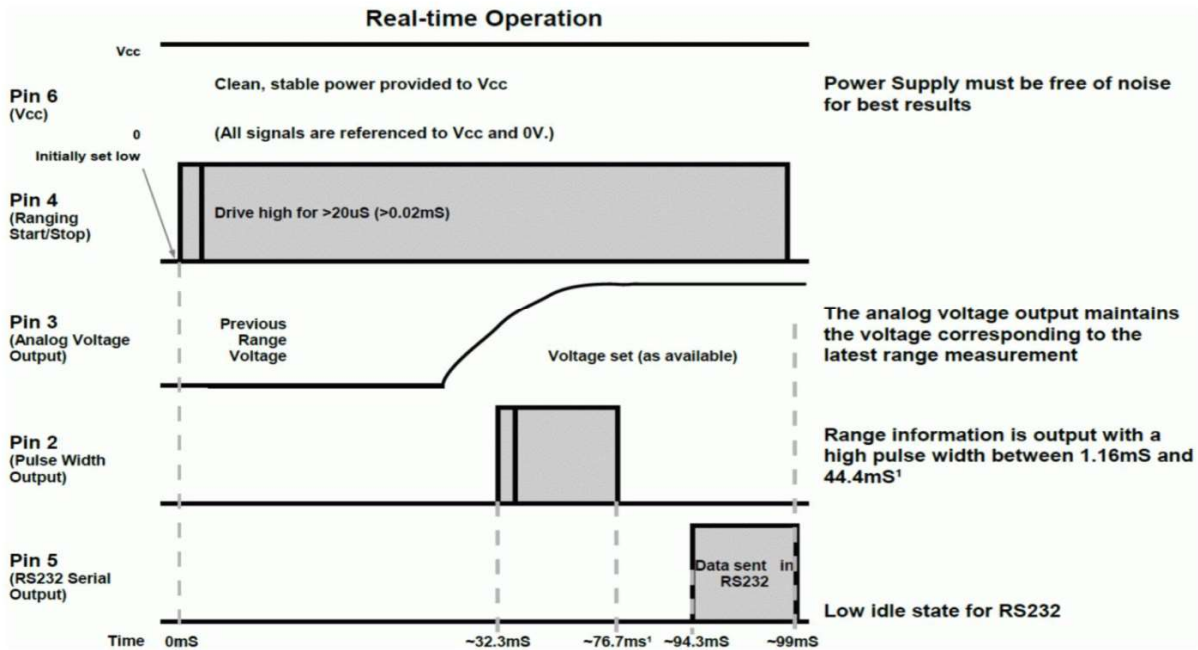
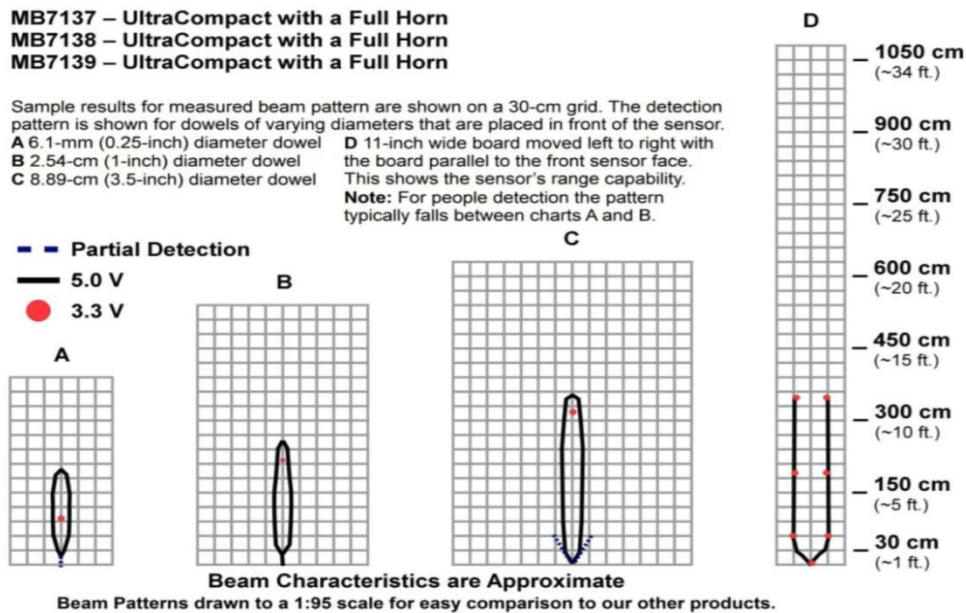


Figura 3-2 Tiempos de operación para MB7139 - XL (Maxbotix)

La Figura 3-2 muestra el esquema de tiempos de operación del sensor, este cuenta con una salida PW, una analógica y otra serial RS232. En nuestro caso se decidió utilizar la salida PW por facilidad de implementación y porque es la salida más precisa. Para utilizar esta salida, se debe mantener el Pin-4 en alto (un tiempo de  $20\mu\text{s}$  o mayor), el sensor tomará una lectura de rango. Los datos de rango se pueden adquirir una vez cada  $99\text{ms}$ . El Pin 2 se establece en alto durante un periodo de tiempo entre  $1.16\text{ms}$  y  $44.4\text{ms}$  dependiendo de la distancia.



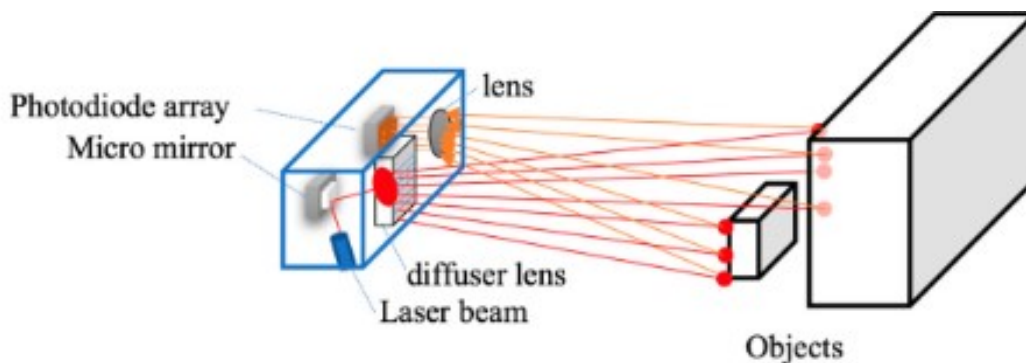
*Figura 3-3: Patrón de Haz de MB7139- XL (Maxbotix)*

En la Figura 3-3 se muestra el patrón de haz para la detección de barras de distinto diámetro. Este parámetro es importante en la elección del sensor ya que no podía ser muy abierto por que se cruzaría su medida con los otros sensores (no pudiendo obtener una buena imagen del árbol a sensar), ni ser muy puntual ya que la medida se fuera errónea al encontrar huecos en la vegetación del árbol. El ámbito de trabajo donde funciona nuestro sensor detectando el árbol se aproxima a la gráfica D ya que la copa se puede aproximar a un plano con medida mayor a 28cm (11 pulgadas), con esto resulta en un haz de casi un mismo ancho (60 cm) para diferentes distancias.

### ***LiDAR Benewake CE30 C Solid State Array.***

CE30 es un LiDAR de estado sólido con gran campo de visión que genera al mismo tiempo información en escala de grises y profundidad dentro de un FOV (campo de visión) horizontal de 132 ° y un FOV vertical de 9 °. Una gran ventaja, es que permite una representación 3D de la escena alrededor del LiDAR sin el uso de partes móviles en el dispositivo.

Micro espejos MEMS (scanning micro mirror) realizan la sincronización con un rayo láser para escanear el FOV horizontal en líneas múltiples. Para eso, los micro espejos reflejan el haz sobre una lente difusora, creando una línea vertical que llega a los objetos, la luz reflejada es capturada por una lente y se envía a un foto detector construyendo una matriz 3D con los array del haz. El proceso se repite hasta que una nube de puntos de la escena es creada.

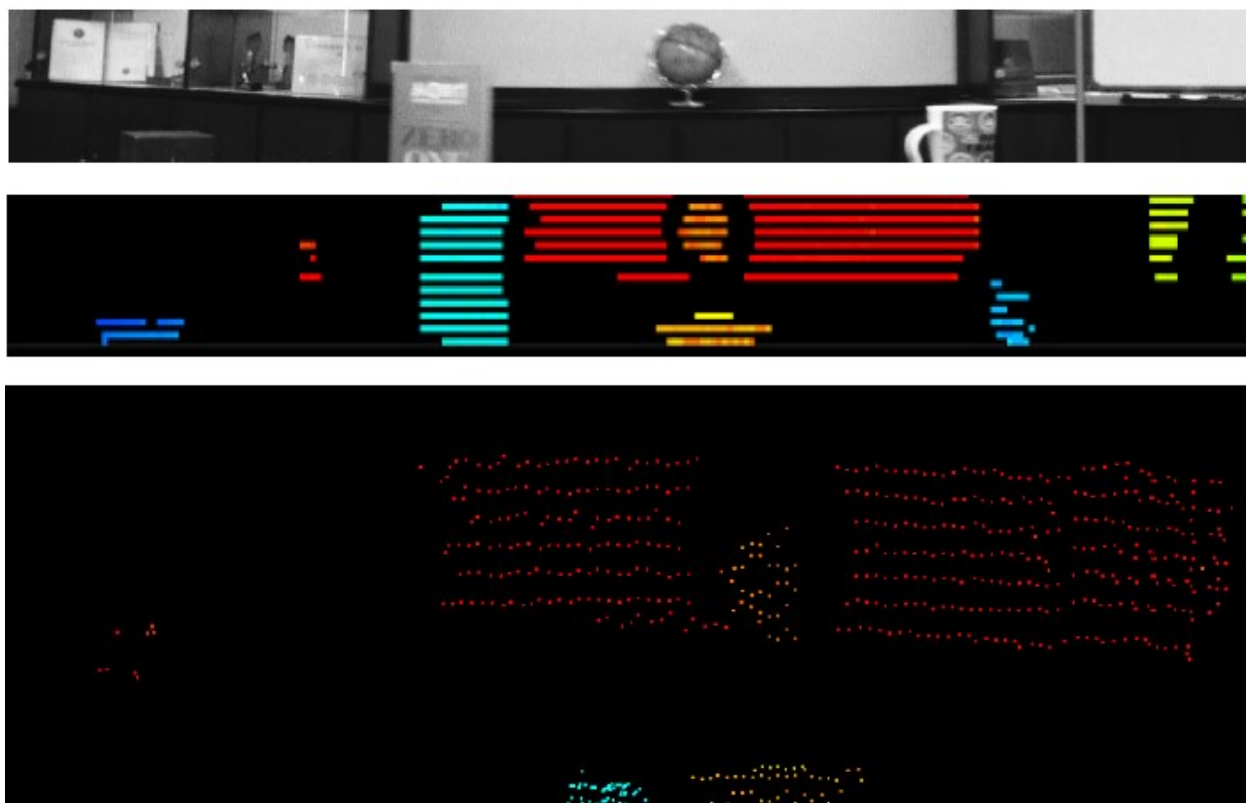


*Figura 3-4 Funcionamiento del LiDAR de estado sólido (Francisca Rosique, Pedro Javier Navarro Lorente, Carlos Fernandez, 2019)*

El tiempo de vuelo (TOF) es otra característica importante de los LiDAR. La luz infrarroja modulada es emitida por el CE30 donde al ser reflejada por un objeto y recibida nuevamente por el mismo, calcula la diferencia de fase y la diferencia de tiempo entre la luz emitida y recibida.

Por defecto el CE30 emite una imagen de profundidad y los datos de intensidad correspondientes para cada píxel en cada medición. El valor de cada píxel en la imagen de profundidad significa la distancia de proyección desde el punto de detección hasta la superficie frontal de LiDAR.

La Figura 3-4 muestra la escena real capturada por la cámara de escala de grises normal (arriba), la misma escena capturada por CE3 y mostrada a través de la imagen de profundidad (centro), y la nube de puntos basada en la imagen de profundidad de CE30 C (abajo).



*Figura 3-5 Comparación de la situación real (arriba), la imagen de profundidad de CE30-C (centro) y la nube de puntos (abajo)*

Los píxeles que reciben la luz infrarroja reflejada dentro del campo de visión por objetos lejanos y cercanos al mismo tiempo, tendrán datos de distancia de salida con un mayor error. Por lo tanto, el programa que reside en el CE30 eliminará esta parte de los datos y establecerá la salida de píxeles correspondiente a cero, formando el mapa de profundidad de la Figura 3-5. Este procesamiento provoca el fenómeno de que algunos bordes de los objetos no tienen datos conduciendo a irregularidades en los bordes de los objetos detectados.

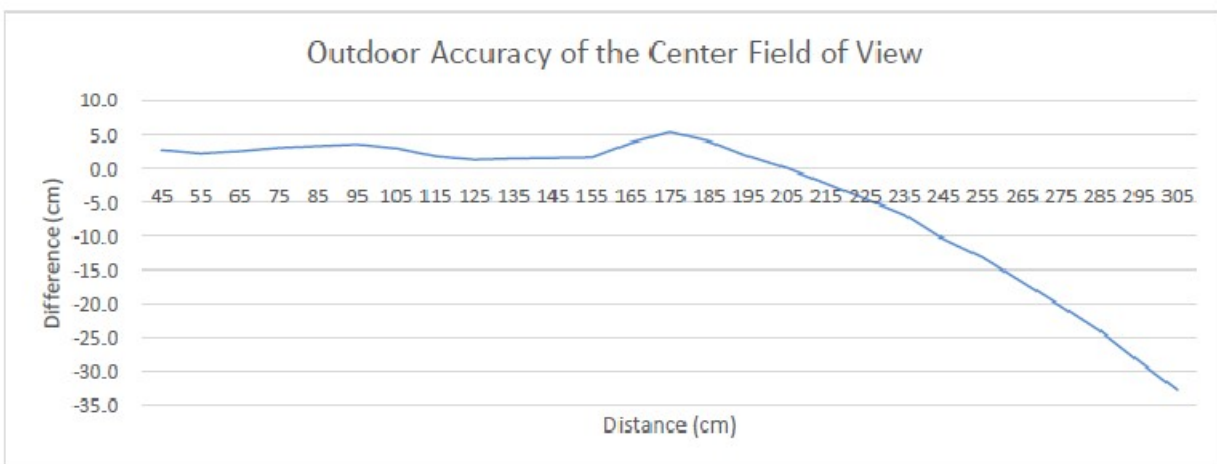
La medición de profundidad también utiliza la tecnología de alto rango dinámico (HDR) para expandir el rango de medición. Para ello el tiempo de exposición de cada fila adyacente de píxeles se establece en un período diferente, uno largo y otro corto.

Los píxeles con un tiempo de exposición más largo pueden medir de manera confiable objetos distantes, pero existe una sobreexposición cuando mide objetos de corto alcance. Los píxeles con un tiempo de exposición más corto pueden detectar objetos de manera confiable a corta distancia, pero estarán subexpuestos cuando miden objetos distantes. Por lo tanto, cuando se mide un objeto a una cierta distancia, generalmente solo una fila de píxeles en cada fila adyacente de dos píxeles tiene salida de datos normal, formando los patrones de franjas negras de la imagen de profundidad que se muestra en la Figura 3-5.

---

Para verificar su precisión el fabricante muestra datos de un ensayo realizado donde se registran 50 cuadros de datos utilizando el CE30 para detectar la pared blanca (90% de reflectividad). El error entre el valor promedio de cada columna de píxeles y la distancia real se utiliza para representar la precisión, La desviación estándar del valor promedio de cada columna de píxeles se toma entre cuadros para representar la repetitividad.

En nuestro caso pusimos foco en su uso para ambientes exteriores, en este caso debido a la interferencia de la luz ambiental la zona ciega cercana de CE30 C, el error de medición y la desviación estándar aumentan. La prueba en esta sección se realiza con luz ambiental de 30kLux colocando el sensor al sol detectando la pared blanca de 90% de reflectividad e iluminada por la luz solar. En la Grafica 3-1 se pueden observar los resultados.



*Grafica 3-1 Error con el sensor expuesto a la luz solar*

Los datos que emite el sensor por medio de un puerto TCP se organizan en forma de matriz unidimensional. La secuencia se organiza de izquierda a derecha y de arriba abajo el píxel en la esquina superior izquierda de la imagen es el punto de origen.

Los valores indican las distancias desde el objeto detectado al plano de la cámara expresados en cm por cada píxel a través del formato de datos de 16 bits sin signo tipo int.

### ***AgroCam Pro NDVI.***

El Índice NDVI estima la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación por medio de sensores remotos. El pigmento en las hojas de las plantas, la clorofila, absorbe fuertemente la luz visible (VIS de 0.4 a 0.7  $\mu\text{m}$  de longitud de onda) para uso en la fotosíntesis. La estructura celular de las hojas, por otro lado, refleja fuertemente la luz del infrarrojo cercana (NIR de 0.7 a 1.1  $\mu\text{m}$  de longitud de onda). Cuantas más hojas tenga una planta, más se verán afectadas estas longitudes de onda de luz, respectivamente.



Para conseguir el valor NDVI se realiza el siguiente cálculo ( $NDVI = \frac{NIR-V}{NIR+V}$ ) este se realiza en programas fuera de la cámara luego de tomada la imagen. En general este tipo de sensor contienen dos cámaras una toma el espectro visible y otra el infrarrojo cercano.

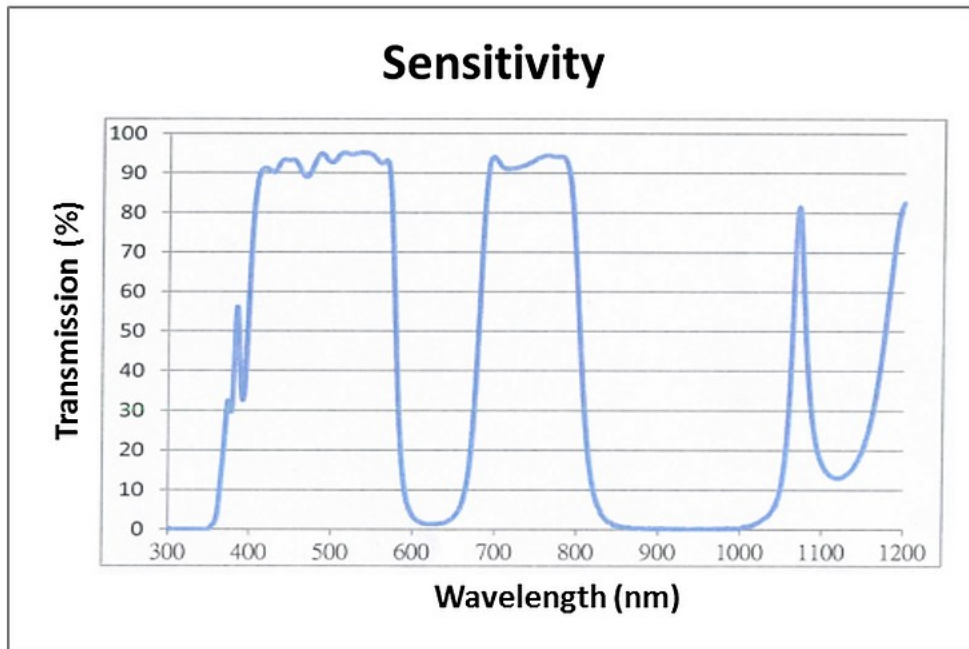
Como se puede observar en la Figura 3-6 se puede ver el valor de NDVI para los diferentes estados de la planta.



Figura 3-6 Interpretación del valor de NDVI (El Agrario, Luciano Barrenechea, 2020)

Para obtener un sensor de menor costo la “AgroCam Pro NDVI” como otras cámaras NDVI contiene una sola cámara con un sensor RGB donde se coloca un filtro que suprime la banda del rojo y deja pasar el infrarrojo cercano. Los píxeles que tomarían el rojo, con este filtro toman el NIR entonces el cálculo se realiza de esta forma ( $NDVI_{blue} = \frac{NIR-azul}{NIR+azul}$ ) tomando en lugar de todo el espectro visible solo el azul, también se puede realizar una variante y tomar la proporción de banda verde o la suma azul y verde

En la Grafica 3-2 se puede observar las bandas que el filtro colocado en la lente, 70° Ultra low distortion glass lens / F2.8 Aperture contiene.



*Grafica 3-2 Grafica de filtro colocado en la lente. (AgroCam, 2023)*

### **LiDAR puntual Benewake TF02, LiDAR Garmin lite v3.**

Estos LiDAR se caracterizan por su baja apertura de haz; pero su bajo costo hace de interés observar su funcionamiento.

Estos dispositivos miden la distancia calculando el retraso de tiempo entre la transmisión de una señal láser NIR y su recepción luego de reflejar en un objetivo, es realizado con un solo haz de luz y enviado en una dirección fija, traduciendo esto en distancia usando la velocidad conocida de la luz.

Uno de los LiDAR utilizados el GARMIN LiDAR-Lite v3 con un rango de medida de 5 cm - 40 m, una resolución de 1cm, una apertura óptica de 12 x 2 mm y una frecuencia de actualización de 500 Hz.

Este sensor cuenta con una autocalibración donde al encender corrige los niveles de luz ambiental, permitiendo el máximo sensibilidad, luego el dispositivo envía una señal de referencia directamente desde el transmisor al receptor estableciendo ese retraso de tiempo para "cero" distancia.

En cada medición se realizan una serie de adquisiciones con el objetivo de calibrar la intensidad del haz que emite el sensor. Primero se emite una transmisión del láser grabando la señal de retorno en el receptor. Si hay una señal consistente, el resultado se almacena en la memoria como un registro de correlación. Haciendo repetidas adquisiciones el dispositivo logra identificar mediciones que son ruido y observando la distancia que es correspondiente con el registro de correlación. El dispositivo integra adquisiciones hasta el pico de señal en la correlación alcanza un valor máximo. Si la señal devuelta no es lo suficientemente fuerte para que esto ocurra, el dispositivo se detiene en una adquisición máxima predeterminada.

---

El Benewake TF02 tiene un rango de medida 1-22m, una resolución de 1cm, una amplitud de medida de 3 grados y una frecuencia de trabajo de 100 Hz.

El ángulo de detección del LiDAR es 3°. Las longitudes laterales de los diferentes rangos de detección de distancia (el rango de detección adquiere una forma cuadrada) se muestran a en la.

Distance/m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Detection Range Side Length	5	10	16	21	26	31	37	42	47	52

*Tabla 3-1Rango de medida del sensor.*

En general, la longitud lateral del objeto detectado debe ser mayor que la del rango de detección, solo de esta manera los datos de salida de LiDAR pueden ser confiables. Cuando la longitud lateral del objeto detectado es menor que la del rango de detección, los datos de salida del LiDAR no son estables y el error aumenta.

Una de las mejores características de este sensor es su alta inmunidad a la luz ambiental (operable bajo 100kLux de luz ambiental)

## 1.12. Módulo de procesamiento

### *Raspberry Pi 4*

Raspberry Pi es un ordenador de placa única de bajo costo desarrollado en el Reino Unido por la Raspberry Pi Fundación (ORG, 2023), con el objetivo de estimular la enseñanza de informática en las escuelas.

El software es de código abierto, siendo su sistema operativo oficial una versión adaptada de Debian, denominada Raspbian, aunque permite usar otros sistemas operativos, incluido una versión de Windows 10. En todas sus versiones, incluye un procesador Broadcom, memoria RAM, GPU, puertos



*Figura 3-7: Raspberry Pi 4*

---

USB, HDMI, Ethernet (el primer modelo no lo tenía), 40 pines GPIO (desde la Raspberry Pi 2) y un conector para cámara.

Ninguna de sus ediciones incluye memoria, siendo esta en su primera versión una tarjeta SD y en ediciones posteriores una tarjeta MicroSD.

Raspberry Pi 4 la última actualización cambio de procesador a un ARM Cortex-172 con cuatro núcleos a 1,5 GHz, se puede adquirir con 3 diferentes capacidades de memoria RAM 1 GB / 2 GB / 4 GB

Se utilizó este modelo, por ser de bajo costo y capaz de procesar las señales de los sensores en tiempo real.

### 1.13. Integración del sistema de adquisición.

#### *Adquisición en tractor.*

Este sistema de adquisición se construyó pensando en cómo podrían ser utilizados los datos recolectados por los sensores para controlar un equipo colocado en el tractor. Por ello los sensores se conectaron sobre un tractor agrícola con unidades de procesamiento y guardado de datos locales.

El sistema cuenta con 6 sensores de ultrasonido 3 de cada lado del tractor a diferentes alturas, dos LiDARs CE30-C a cada lado, los LiDARs puntuales Garmin lite v3 y Benewake TF02 también uno a cada lado y una cámara NDVI.

Estos se fijaron a una barra metálica de 2 metros de largo amurado mediante bulones a la parte delantera del tractor, esta forma de adquisición ayuda a utilizar las diferentes velocidades del tractor para observar el comportamiento de los sensores, revisando como vibraciones y diferencias en el terreno pueden repercutir en el sistema.

Como módulo de procesamiento se utilizó un Raspberry Pi 4 el cual realiza el manejo de cada sensor y recolecta los datos suministrados por los mismos.

Se diseñó y fabricó una placa electrónica llamada Placa de Adaptación donde se conectaron los sensores y el módulo Raspberry, esta convierte la tensión suministrada por el tractor a la utilizada



*Figura 3-8 Sistema de adquisición tractor*

---

por cada sensor y el Raspberry, además adapta las señales de salida de cada sensor a las que el Raspberry Pi puede tomar como entradas.

La salida de los LiDARs CE30-C son mediante puerto Ethernet, por lo tanto para que el Raspberry pueda manejar los dos sensores a la vez estos son conectados mediante un Router, el que también cuenta con una conexión WI-FI permitiendo comunicarnos con el modulo de procesamiento mediante este y manejarlo remotamente.

Todo ello fue montado dentro de una caja estanca en la barra metálica haciendo que todo el sistema sea fácil de montar y desmontar sobre el tractor, teniendo que darle solo alimentación desde la batería del mismo Figura 3-8.



*Figura 3-9 Sistema de adquisición tractor.*

En la Figura 3-9 se puede observar una imagen del interior del sistema de adquisición mostrando un diagrama con cada componente. Dentro de la caja estanca vemos el Router wifi, el Raspberry PI y la placa de adaptación; fuera observamos los diferentes sensores que fueron utilizados LiDARs, ultrasonido y cámara NDVI.

---

### *Adquisición por plataforma móvil.*

Luego que se eligiera los tipos de sensores a ser testeados en forma conjunta, se construyo una plataforma con ruedas para no depender del uso del tractor.

En principio se instalaron en la plataforma el sensor LiDAR y la cámara NDVI pero luego por inconvenientes se debió sustituir el LiDAR por los ultrasonidos por lo que hubo que también modificar la misma.

Esta plataforma cuenta con cuatro sensores de ultrasonido, colocando uno más que las pruebas en el tractor buscando mejorar la precisión de los cálculos. Estos se amuraron a diferentes alturas tales que puedan ser orientados a secciones del árbol, logrando tomar la totalidad del mismo, y una cámara NDVI la cual también es enfocada tal que tome toda una sección vertical del árbol.

Los ultrasonidos se colocaron en una barra metálica distanciados 50 cm entre ellos con la cámara NDVI en el centro, estos se conectaron a un Raspberry PI el cual procesa y integra en una sola salida, los dos tipos de señales.



*Figura 3-10(a) plataforma móvil (b) plataforma móvil adaptada al tractor*

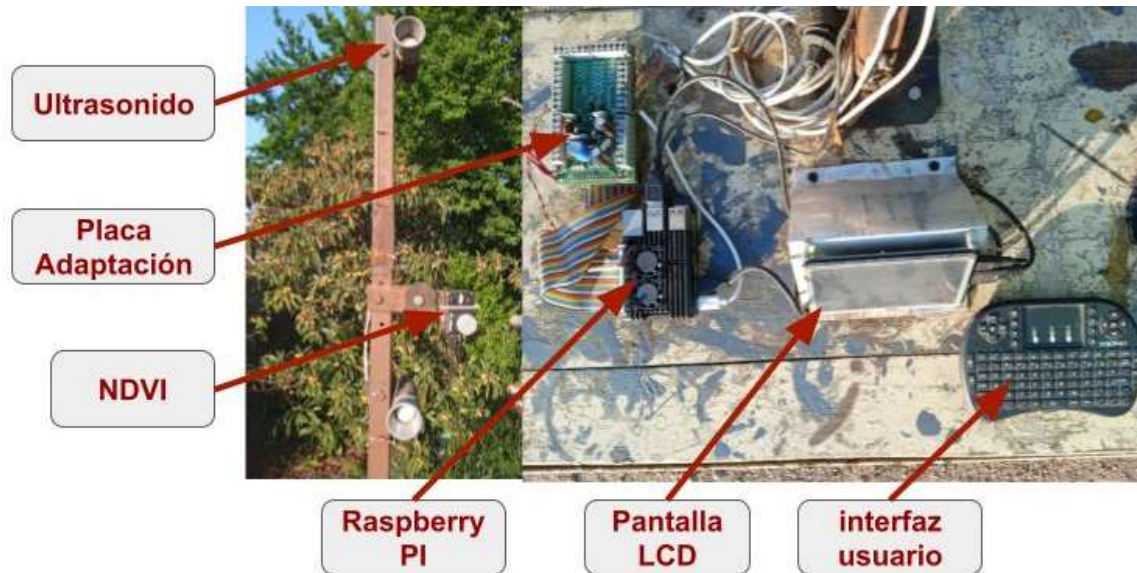
Además para poder alimentar desde una batería de 12v se colocó un módulo llamado “Placa de Adaptación” que adapta las tensiones de cada componente y las señales de los ultrasonidos a las utilizadas por el Raspberry, conectando estos además de forma robusta al raspberry.

Mediante una pantalla LCD se puede observar lo sensado y el funcionamiento del programa además con un teclado de interfaz usuario se puede poner a funcionar o para el programa y

---

hacer variantes dentro de este.

Luego de las calibraciones se adaptó la plataforma para que pueda ser transportada por el tractor, este tipo de modalidad ayuda a poder trabajar en la parcela de experimentación trabajando con el tractor a una velocidad fija Figura 3-10.



*Figura 3-11 Diagrama de componentes de la plataforma móvil.*

En la Figura 3-11 se puede observar los componentes de la plataforma, sobre ella visualizamos el Raspberry PI, pantalla LCD y interfaz usuario; amurados a la barra se puede ver los sensores ultrasonido y la cámara NDVI.

## 1.1. Desviaciones

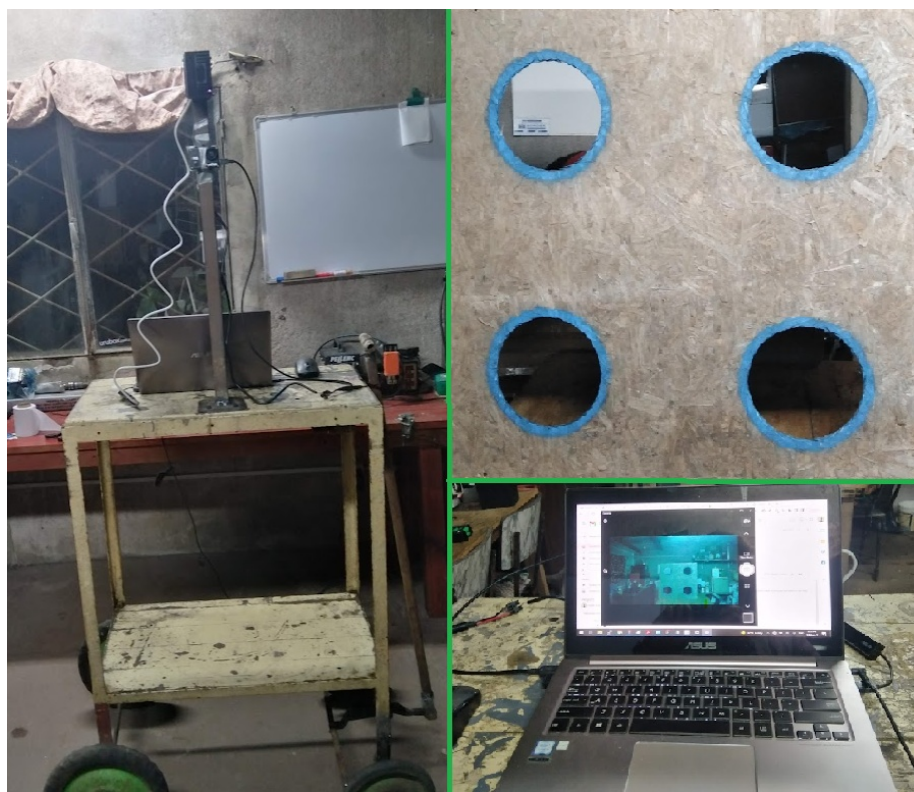
La principal desviación del trabajo fue la utilización del LiDAR. Cuando se concluyó el análisis de los sensores, se optó por la fusión del LiDAR y la cámara NDVI por la buena precisión en sus medidas.

Para la calibración de los dos sensores se creó un panel con 4 círculos perforados y su contorno pintado de azul. La idea era detectar con el LiDAR las perforaciones dadas por el cambio en la distancia al sensor y encontrar el centro de cada círculo en la nube de puntos. Para la cámara NDVI detectar en la imagen el contorno pintado de azul y luego calcular el centro de cada círculo. Con esta información se haría corresponder el centro de los círculos tanto en la nube de puntos como en la imagen encontrando un pixel común para cada uno, pudiendo luego encontrar la correspondencia con cada pixel de la nube de puntos con la

---

imagen. De esta forma se crearía una imagen que en cada pixel tendría 4 valores Rojo, Verde, Azul y distancia.

Para realizar la correspondencia entre los círculos tomados por la cámara y el LiDAR se investigó y se comenzó a trabajar con el algoritmo RANSAC, este es utilizado principalmente para resolver el problema de correspondencia y estimar la matriz fundamental relacionada con cámaras estéreo, pero también se revisaron trabajos que buscaban encontrar esta correspondencia entre cámara y LiDAR. (G Ajay Kumar, Jin Hee Lee, Jongrak Hwang, Jaehyeong Park, Sung Hoon Youn and Soon Kwon, 2020)



*Figura 3-12 a) Plataforma de adquisición con LiDAR, b) Panel de calibración, b) Visualización en PC*

Cuando las pruebas de calibración se comenzaron a realizar el LiDAR dejó de funcionar, se contactó al fabricante el que no dio respuestas satisfactorias para su reparación. Según esté el problema se encontraba en el programa que reside en el sensor.

Al desarmar el sensor se encontró que utiliza el mismo procesador del Beaglebone Black el que utiliza como memoria una Micro SD, al quitar esta se descubrió que la misma no funcionaba. La solución posible era volver a montar el sistema operativo, de la misma forma que se realiza en Beaglebone y conseguir por medio del fabricante el programa que hace funcionar el sensor. Después de muchos intentos se consiguió que este enviara el programa.



---

Al contar con el programa se intentó hacer funcionar el sensor sin ningún éxito. Contactando nuevamente al fabricante buscando si este podía tener alguna solución al problema ya que se habían adquirido 2 sensores y los dos dejaron de funcionar, este se disculpó, alegando que el sensor se discontinuó por problemas en el stock de piezas para su construcción debido a la pandemia SARS COV 2, por lo que tampoco podía enviar uno nuevo y se habían desarmado las plataformas de calibración del mismo perdiéndose también la forma de programación. Por lo tanto, no me podía ayudar en su reprogramación.

Estas desviaciones llevaron a un retraso de por lo menos 6 meses entre la detección del problema y su intento de solución.

## 4. Lugar de experimentación.

Para realizar los experimentos de adquisición de volúmenes foliares se utilizaron árboles previamente delimitados y caracterizados. Primero se delimitaron 50m de largo en una fila de un monte de limones conteniendo 16 plantas de diferentes morfologías, se eligió esta especie porque mantiene una forma foliar estable a lo largo del año por ser de hoja perenne, lo que nos permite repetir experimentos sobre plantas bastante similares durante un periodo largo de tiempo. La parcela se ubica en la posición geográfica 34°41'15.6"S 56°21'08.7"W

Según el marco de plantación del monte tiene 3m de distancia entre plantas lo que para 50m nos daría 17 plantas, en este caso no se cumple ya que el monte cuenta con una salida de desagüe faltando una planta, esto nos da entre la planta 15 y 16 un hueco conocido que nos ayuda en la interpretación de los datos obtenidos. Además en cada extremo se colocaron paneles de madera que nos dan una medida conocida de ancho simulando un árbol 1.5 m de vegetación Figura 4-1.

La elección se realizó en conjunto con el equipo de FAGRO tal que la elección tuviera fundamentos agronómicos. Cabe destacar que en este lugar se llevaron a cabo los ensayos y calibraciones del *Atomizador Inteligente* que desarrollaba el proyecto INNOVAGRO.



*Figura 4-1 Lugar de experimentación.*

Se realizaron también experimentos, luego que se fusionaran los dos sensores, en un monte de ciruelos y duraznos observando el comportamiento en este tipo de cultivares ya que estos, si varían la cantidad de masa foliar a lo largo del año.

Para comparar las adquisiciones realizadas por los sensores con volúmenes medidos de forma tradicional, se caracterizaron los árboles contenidos en los 50 metros de fila de experimentación con sistemas estándar de medidas de volumen foliar los que se describen a continuación

## 1.2. Medidas realizadas en la parcela de experimentación.

En la Tabla 4-1 se muestran las diferentes medidas realizadas a cada planta contenida en la parcela.

Utilizando la forma de calcular los volúmenes que se mostraron anteriormente, pero en este caso realizándolos para cada planta en particular.

Árbol	Ancho sentido avance [a](m)	Altura copa(m)	Altura tronco (m)	Ancho sentido transversal al avance (m)	Volumen elipsoide (m <sup>3</sup> )	TRV(m <sup>3</sup> )
1	2.5	1.75	0.6	2.6	5.96	7.48
2	2.35	1.75	0.3	2.5	5.38	8.52
3	2.9	1.65	0.5	2.7	6.76	9.00
4	2.2	1.75	0.4	2.3	4.64	6.83
5	2.15	1.8	0.45	2.4	4.86	6.97
6	2.5	1.65	0.45	2.6	5.62	7.80
7	2.6	1.8	0.45	2.4	5.88	8.42
8	2.6	1.7	0.45	2.6	6.02	8.45
9	2.4	1.85	0.5	2.8	6.51	9.07
10	2.75	1.8	0.5	2.8	7.26	10.01
11	2.35	1.7	0.45	2.55	5.33	7.49
12	2.45	1.7	0.5	2.6	5.67	7.64
13	2.5	1.65	0.5	2.9	5.72	7.62
14	2.5	1.65	0.4	2.8	6.05	8.75
15	2.4	1.75	0.55	2.7	5.39	7.06
16	0	0	0	2.6	0.00	0.00
17	2.6	1.7	0.5		6.02	8.11
				<b>Total</b>	<b>93.06</b>	<b>129.22</b>

*Tabla 4-1 Calculo de volumen foliar de cada árbol.*

En este caso no se utilizaron los volúmenes por hectárea porque se pretendía medir cada planta de la parcela para ver cómo se comportaban los diferentes sensores al obtener su volumen foliar.

Como se puede observar en la tabla se tomó el volumen por los diferentes métodos midiendo su follaje, sumando luego encontramos el volumen total para el conjunto.

Cabe destacar que el método de elipsoide en este tipo de montes de conducción libre se aproxima mucho más al volumen real que el método de TRV el cual toma como base un

---

prisma rectangular dando colocando vegetación donde no la existe.

Si en lugar de calcular el TRV o el Elipsoide para cada árbol lo calculamos para toda la fila, el procedimiento que realmente se realiza, podemos observar la siguiente Tabla 1-1.

Largo de la fila (m)	Ancho sentido avance máximo (m)	Altura máxima (m)	Ancho sentido transversal máximo (m)	Elipsoide fila (m3)	TRV fila (m3)
51	2.9	1.85	2.8	133.71	264.18

*Tabla 4-2 Calculo Elipsoide y TRV de la fila*

Para el cálculo se utilizan las alturas máximas, el ancho máximo y sentido de avance máximo ya que se calcula el peor caso, pensando sobre todo en las aplicaciones de fitosanitarios. Estas aplicaciones en general no varían el caudal en función del follaje, por lo que utilizar un promedio causaría que las plantas de mayor follaje quedarán con una baja de concentración de producto y no controlarán la plaga. Este volumen luego se extiende a una hectárea.

Observando la Tabla 4-1 donde se realizó el método del TRV y Elipsoide planta a planta sumándolo luego y la Tabla 4-2 donde se tomó el volumen de toda la fila por los procedimientos que se realizan en las aplicaciones reales, nos da un 280% mayor el TRV de la fila que el volumen real calculado planta a planta por Elipsoide, siendo el TRV por este procedimiento el utilizado generalmente observando la sobrestimación del volumen foliar. Esto origina luego una aplicación de fitosanitarios y fertilizantes mayor a la realmente necesaria.

En el caso del Elipsoide, que es el menos utilizado, igualmente comparando las tablas observamos un 140% de sobrestimación del realizado para toda la fila que el realizado sumando cada planta.

---

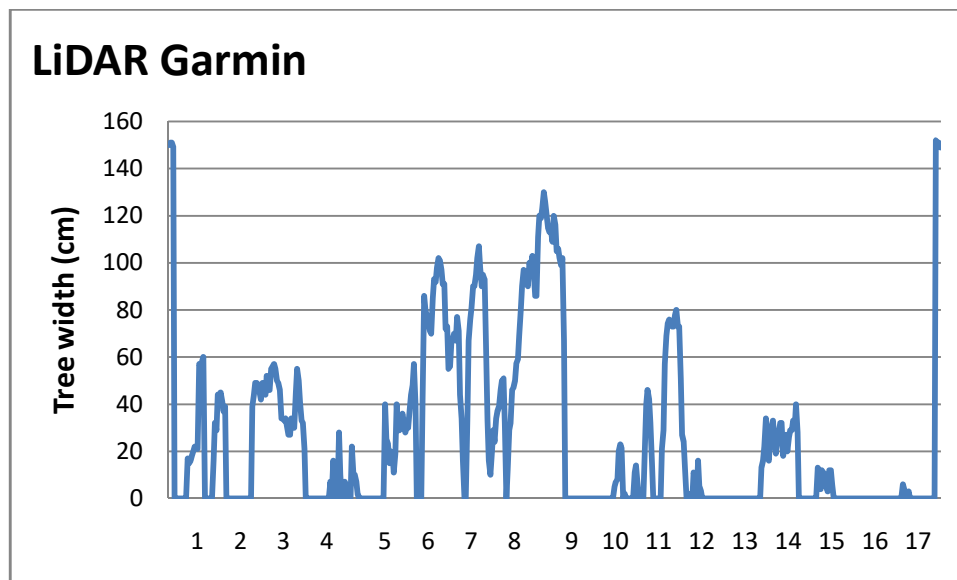
### 1.3. Medidas de los diferentes sensores

En esta sección mostramos las diferentes medidas realizadas por los sensores.

#### *LiDAR puntual Garmin lite v3 y Benewake TF02.*

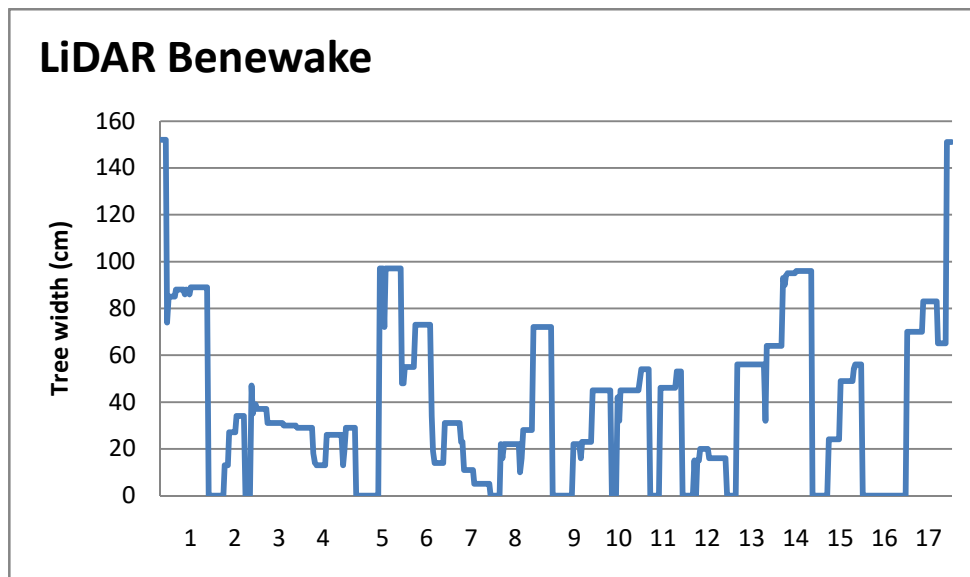
Estos dos sensores fueron los primeros probados cuando se comenzaron a seleccionar los diferentes tipos. Esto se debe a su bajo costo ya que rondan los U\$S 100, en comparación con los LiDAR multipunto, son al menos 10 veces más económicos.

Las dos graficas de los sensores muestran las características de la parcela de experimentación, las dos placas en los extremos y el faltante de la planta 16.



*Grafica 4-1 Medidas observadas de ancho del árbol LiDAR Garmin lite v3.*

Cuando observamos las Grafica 4-1 y Grafica 4-2 e interpretamos la señal obtenida de cada árbol, inferimos que el LiDAR Garmin tiene una respuesta con un “ruido” de una componente bastante alta. Este ruido dificulta la correcta medición del follaje global del árbol ya que toma muchas medidas que son reflejadas por hojas internas del árbol confundiendo cual es la periferia del follaje. Podemos visualizar esto específicamente en la planta 2 en la que el ancho nos da cero, observando la planta en campo, vemos que a la altura donde está el sensor se encuentra un pequeño hueco en la vegetación, el que correspondería con la medición obtenida. Necesitamos que los sensores a utilizar no tomen estos pequeños huecos en la vegetación y tomen una medida más global, por lo que este sensor no lo encontramos óptimo para este uso.



*Grafica 4-2 Medidas observadas de ancho del árbol LiDAR Benewake TF02.*

En el LiDAR Benewake encontramos un mejor desempeño en la medición la que se observa en una gráfica más estable, eso lo podemos ver claramente en la planta 2 donde si este sensor nos da un ancho. Igualmente, como se puede ver en la gráfica, encuentra muchos 'huecos' en el follaje los que se ven con medida cero. Cuando medimos el follaje global en la realidad la medida es correcta en cada punto, pero no refleja la globalidad del árbol induciendo también a errores.

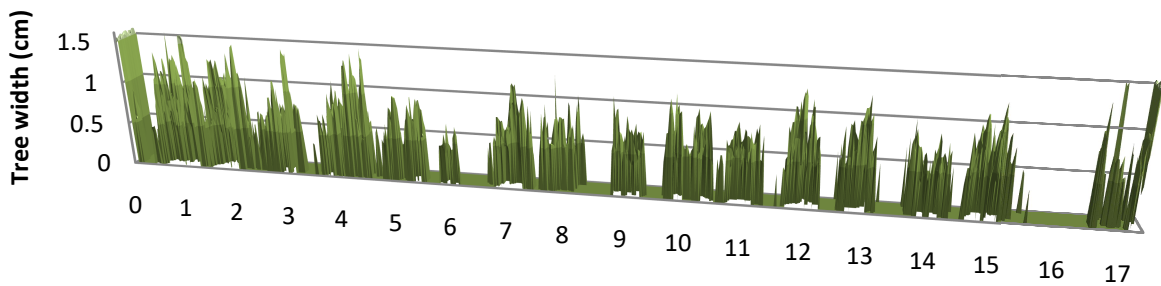
Por lo anteriormente nombrado estos dos sensores, fueron descartados ya en las primeras pruebas.

### *LiDAR Benewake CE30 C Solid State Array.*

Utilizando este LiDAR de estado sólido encontramos una buena representación de los árboles. Para nuestro caso donde buscamos representarlos en tiempo real este sensor muestra una buena interpretación de la vegetación y de una manera rápida en la que llegar a actuar en equipos.

En la Grafica 4-3 se observa la representación de la medida de vegetación de una mitad del árbol en cortes horizontales al mismo. Se representan los 17 árboles que están en el lugar de experimentación representados junto con los paneles colocados en los extremos, uno de estos árboles en la realidad no existe, generándose un hueco que es de ayuda para la experimentación.

## LIDAR Benewake CE30 C



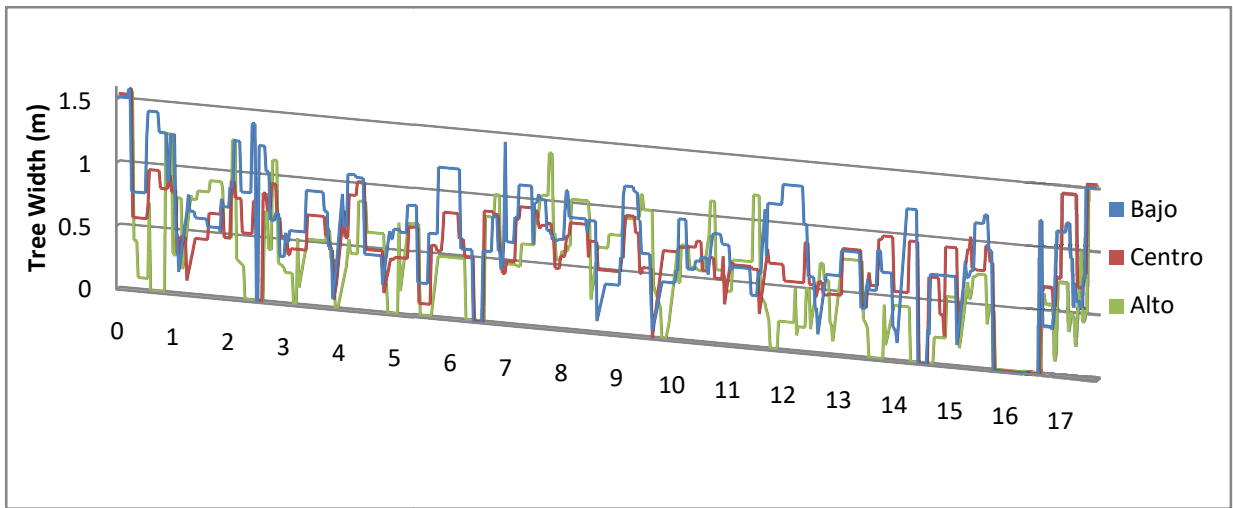
*Grafica 4-3 Representación de los diferentes arboles.*

En esta grafica si tomamos un corte transversal de la misma tenemos representadas 22muestras a diferentes alturas de la mitad de ancho del árbol, estas se consiguen a partir de la matriz que el sensor entrega de 660x24 quitando los valores que son cero en cada fila que contiene 24 valores y promediando entre ellas, consiguiendo un array de 660 valores. Luego se realiza un promedio de a 30 muestras y con ella se obtienen las 22.

En los extremos de la grafica podemos ver los paneles de 60 cm de ancho que además de ser utilizados para calibraciones del sensor nos delimitan donde comienza y termina los árboles en que se realiza el experimento.

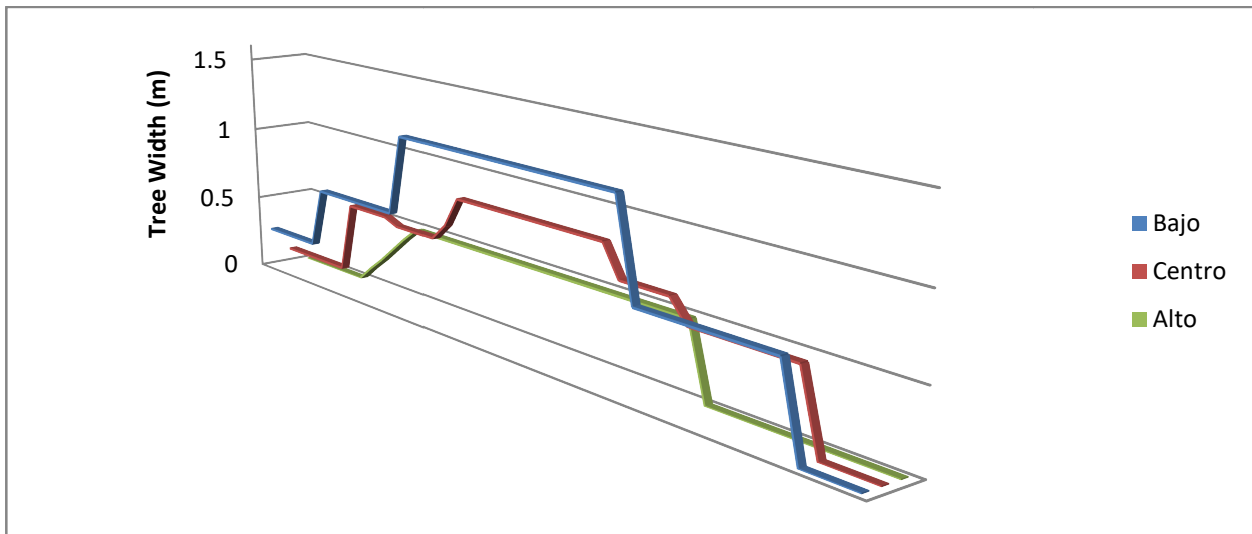
Para una aplicación práctica los picos que muestra la gráfica no pueden ser utilizados por un equipo ya que la respuesta del mismo es más lenta que el tiempo que estos se producen, por ejemplo en el Atomizador Inteligente, en donde este sensor se estuvo utilizando, cuando se caracteriza la planta buscamos una medida más global de la misma y no tan puntual.

Para el caso del Atomizador implementado, la pulverización se realizó en tres franjas distintas, las 22 muestras se agruparon en tres grupos de trabajo quitando los valores cero, aplicando un filtro, promediando y recortando los picos Grafica 4-5. Esta agrupación de boquillas para la pulverización se dio por las características constructivas del atomizador implementado, con la cantidad de datos que obtenemos del LiDAR estas se podrían controlar de forma individual obteniendo una pulverización más adaptada al follaje de cada árbol.



*Grafica 4-4 Vegetación en 3 franjas*

Para obtener una mejor resolución tomamos el árbol número 6 y representamos lo que el equipo ve como ancho en el momento de la pulverización, estas medidas se encuentran en la Grafica 4-7.



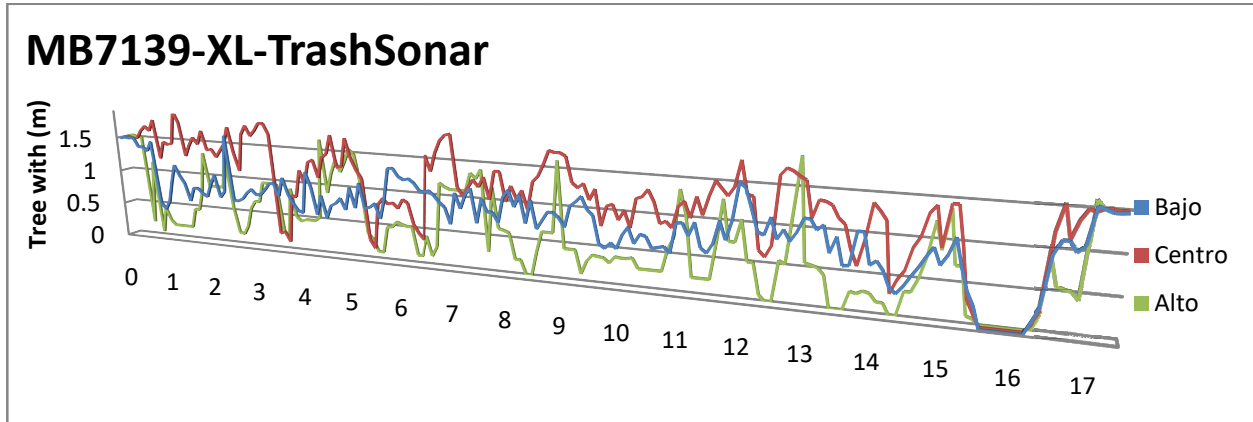
*Grafica 4-5 Vegetación 3 franjas un solo árbol.*



---

### *Sensor Ultrasonido MB7139-XL-TrashSonar™-WR™-MaxBotix inc.*

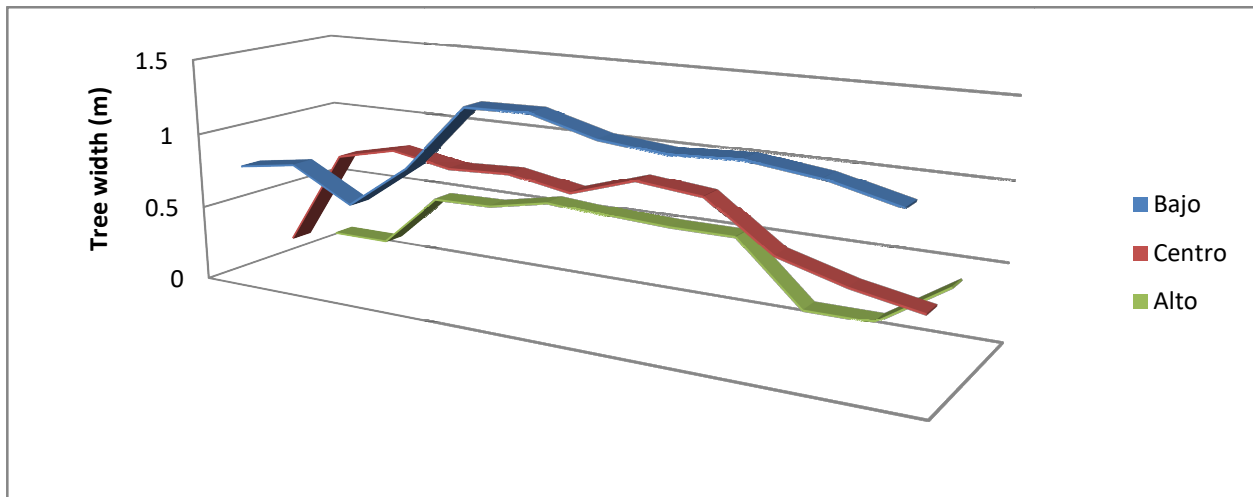
El sensor de Ultrasonido por su funcionamiento toma muestras más espaciadas entre ellas, obteniendo una menor cantidad de datos de ancho por cada árbol, esto da lugar a la generación de picos por el cambio de vegetación de un punto a otro. El Ultrasonido pierde algunos lugares de vegetación aumentando los errores respecto al LiDAR.



*Grafica 4-6 Sensores ultrasonido*

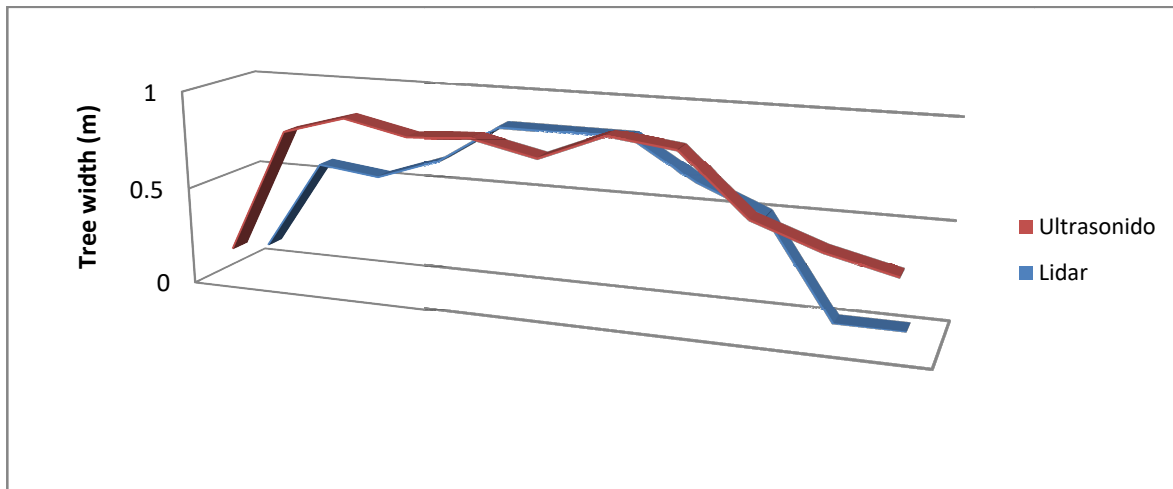
La forma de funcionamiento de este sensor nos da un valor más alto en promedio ya que toma la medida del obstáculo más cercano al mismo. Por ejemplo, si una pequeña rama sobresale del árbol el sensor toma esta medida y no el grupo que está en el árbol. Este efecto se ve aumentado frente al LiDAR ya que toma más puntos, cuando se realiza el promedio para obtener información en tres franjas del árbol las medidas de rama en la periferia del árbol se promedian con otras más internas.

Igualmente, toma en su globalidad una medida certera al tener en cuenta que en general estos sensores alimentan equipos mecánicos hidráulicos y estos no pueden ejecutar cambios bruscos en la señal que están dados en estos casos por una mayor precisión. El árbol al contar con menos datos de ancho, encontramos más tiempo entre el cambio de una medida a otra dando tiempo a los actuadores mecánicos.



*Grafica 4-7 Toma de un solo árbol.*

En la Grafica 4-7 muestra la señal entregada por los sensores para una planta en este caso nuevamente la número 6, si comparamos esta con la del LiDAR observamos claramente que principalmente cuando comienza y termina la planta, el ultrasonido da medidas más alejadas de cero que el LiDAR.



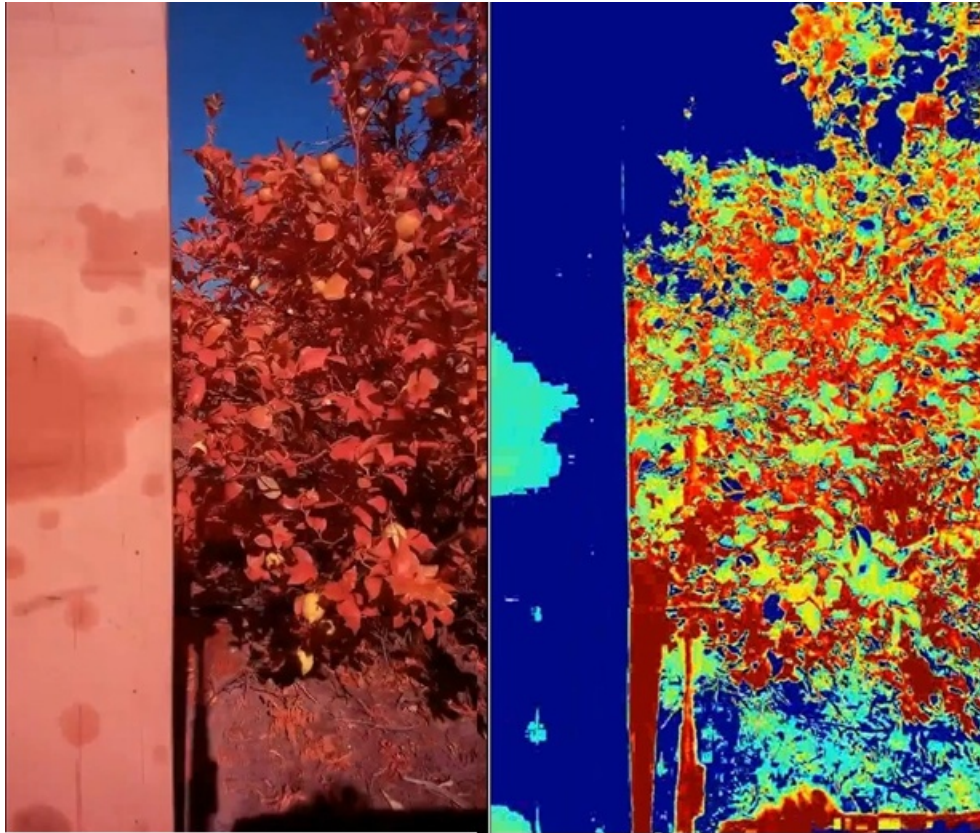
*Grafica 4-8 Comparación entre la medida central de ultrasonido y LiDAR.*

Observando la Grafica 4-8 donde se muestran las medidas en el centro de la planta, sensadas tanto por el LiDAR como por el Ultrasonido y comparando las mismas vemos como el LiDAR encuentra las medidas más cercanas a cero que el Ultrasonido. Esto se debe al promedio que el sensor de Ultrasonido realiza con pequeñas ramas que pueden estar un poco más alejadas del principal foco de vegetación de la planta. Igualmente vemos que las medidas se acercan entre los dos sensores.

---

### *Cámara AgroCam Pro NDVI.*

Esta cámara toma el índice de vegetación NDVI en cada pixel, según este índice podemos inferir si hay vegetación o no y el vigor que tiene esta, por lo tanto, no da una medida de ancho de la vegetación, pero si donde esta se encuentra.



*Figura 4-2 Imagen que muestra a su derecha la imagen que toma la cámara y la que luego es procesada*

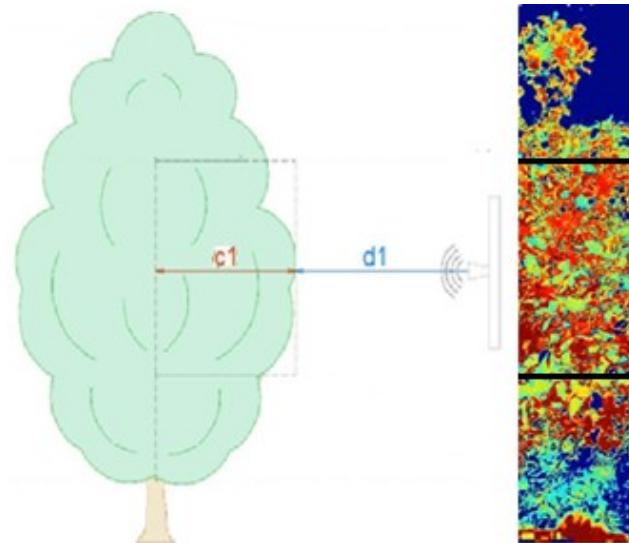
Para poder realizar esta discriminación de donde hay follaje y donde no, la imagen obtenida por la cámara (Figura 4-2, izquierda), que paso por el filtro óptico que ella cuenta, se le aplica la ecuación de cálculo de NDVI antes nombrada.

Contando con el índice NDVI en cada pixel se genera una imagen gradiente la que nos ayuda a visualizar donde el valor es más alto, con colores más cercanos al rojo y menores más cercanos al azul, como muestra la Figura 4-2 a la derecha. Como podemos observar quitando algunos errores, como por ejemplo la sombra del mismo sensor, encontramos tonalidades desde el amarillo al rojo donde encontramos vegetación y tonalidades azules donde esta no se encuentra.

---

## 5. Fusión de sensores de ultrasonido con cámara NDVI

Como se comentó anteriormente se decidió por último la fusión de estos dos sensores primero por su buen comportamiento al adquirir la vegetación y en el caso del ultrasonido por problemas con los sensores LiDAR los cuales fueron los primeros seleccionados.

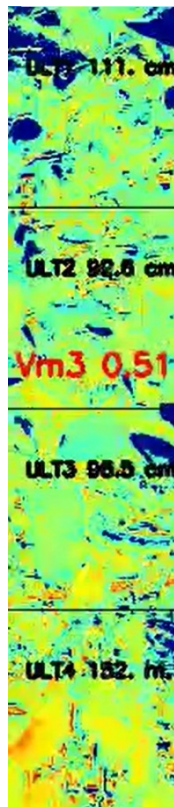


*Figura 5-1 Configuración de los sensores*

### 1.4. Señal de salida

Para la combinación de los dos sensores se buscó crear una salida en volumen de vegetación expresado en  $m^3$ , utilizando 4 sensores de ultrasonido para cuatro sectores distintos del árbol y la cámara NDVI.

Para la visualización de la salida, se generó una imagen con un mapa de calor donde los lugares en rojo se encuentra el mayor valor de NDVI, dividido además en cuatro sectores distintos donde se toman el ancho de árbol por los sensores de ultrasonido. Por último, en el centro de la imagen ubicamos el valor instantáneo de volumen foliar en  $m^3$ .



*Figura 5-2 Ejemplo de la salida del sistema. Se puede observar las 4 secciones del árbol, el ancho promedio del árbol en cada zona y el volumen total.*

Para mejorar la precisión se decidió tomar secciones del árbol por lo que se recortó la imagen generando una nueva de 100x480 pixeles.

Los sensores de ultrasonido toman el ancho del árbol midiendo la distancia desde ellos a la vegetación y descontando la distancia de estos al centro de la planta Figura 5-1, por lo que para estas medidas lo que finalmente estamos viendo es una sección tomada desde el centro del árbol.

Con el sensor NDVI obtenemos en cada pixel de la cámara un valor entre -1 y 1, donde tomando como umbral 0.66, los valores mayores a este número tienen vegetación y los menores no. Con esto tenemos el valor de área de la foto donde encontramos vegetación.

Por último se multiplica el área de vegetación tomada por el NDVI por el ancho de vegetación tomada en cada sección y por último se suman todas las secciones para saber la vegetación total en ese lugar. En la Figura 5-3 se puede observar un esquema básico de funcionamiento.

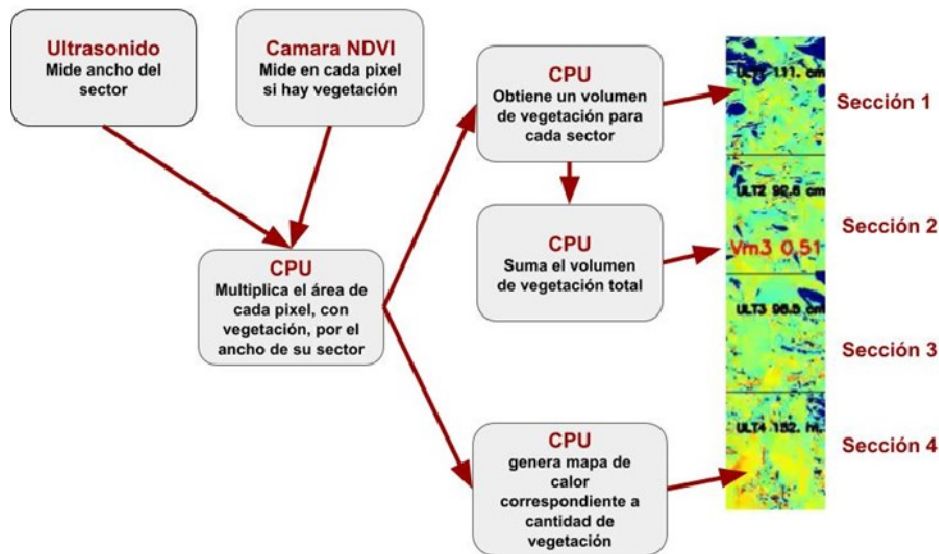


Figura 5-3 Esquema de funcionamiento.

## 1.5. Calibración

Para la calibración se utilizó un panel graduado identificando las cuatro secciones de la imagen para poder medir que área ocupan cada uno de ellos, ubicando además la posición y área de cada píxel .

Además, para observar la respuesta de los ultrasonidos, el panel se colocó de forma que simule una planta de 50cm de ancho con lo que podemos calibrar y observar la precisión de los mismos.

Como se puede observar en la imagen sobre tiras de papel blanco se colocaron marcas distanciadas 2.5 cm entre ellas, pudiendo identificar qué área ocupa cada una de las cuatro divisiones realizadas en la imagen las cuales pertenecen a un sector de ultrasonido.

Con esta calibración se intenta observar si el lente de la cámara influye en el área de cada sector. Observando la imagen podemos concluir que su influencia es menor y despreciable para el tipo de medida que se desea.

Utilizando la tira graduada podemos verificar para una distancia de 1.5 m al objetivo cada sector aproximadamente tiene un área de 19x16 marcas distanciadas 2,5 cm entre cada una, lo que nos da 1900 cm<sup>2</sup>.

La distancia de 1.5 m al objetivo, se eligió por ser una distancia promedio de trabajo desde el borde de la vegetación del árbol al centro de la fila, donde se aloja el sensor. Además se vario esta distancia al objetivo en +- 30cm encontrando que el área tomada en la placa graduada no se modifico considerablemente.

Cada sección ocupa en la imagen un sector de 100x120 pixeles, con los datos obtenidos se puede concluir que cada pixel de la imagen ocupa aproximadamente 16 mm<sup>2</sup>.

Observando la ventana de trabajo de los sensores obtenemos un área total de 76x40cm

Con lo anterior obtenemos la medida de área de cada pixel, multiplicando la cantidad de estos que pasan cierto umbral de NDVI indica existencia de vegetación en ese lugar, resultando un área para cada una de las secciones. Luego se multiplica esta por el ancho que nos da para esa sección, el ultrasonido, resultando los m<sup>3</sup> de vegetación en la misma. Para saber el total de volumen foliar por último se suman los cuatro valores de cada sección.



Figura 5-4 Placa de Calibración

$$Vol. Seccion = (Ancho seccion)(cm) \times \sum_{pixel\ seccion} \begin{cases} NDVI > 0.66 & 0.16 \\ NDVI < 0.66 & 0 \end{cases}$$

$$Vol. total = Vol. seccion\ 1 + Vol. seccion\ 2 + Vol. seccion\ 3 + Vol. seccion\ 4$$

## 1.6. Código fuente implementado

Se desarrolló un código en Python el cual pudiera interpretar las salidas de los dos sensores y convertirlas en un solo valor de volumen de vegetación, además de generar una imagen donde se apreciara visualmente lo que los sensores observan en cada momento Figura 5-5.

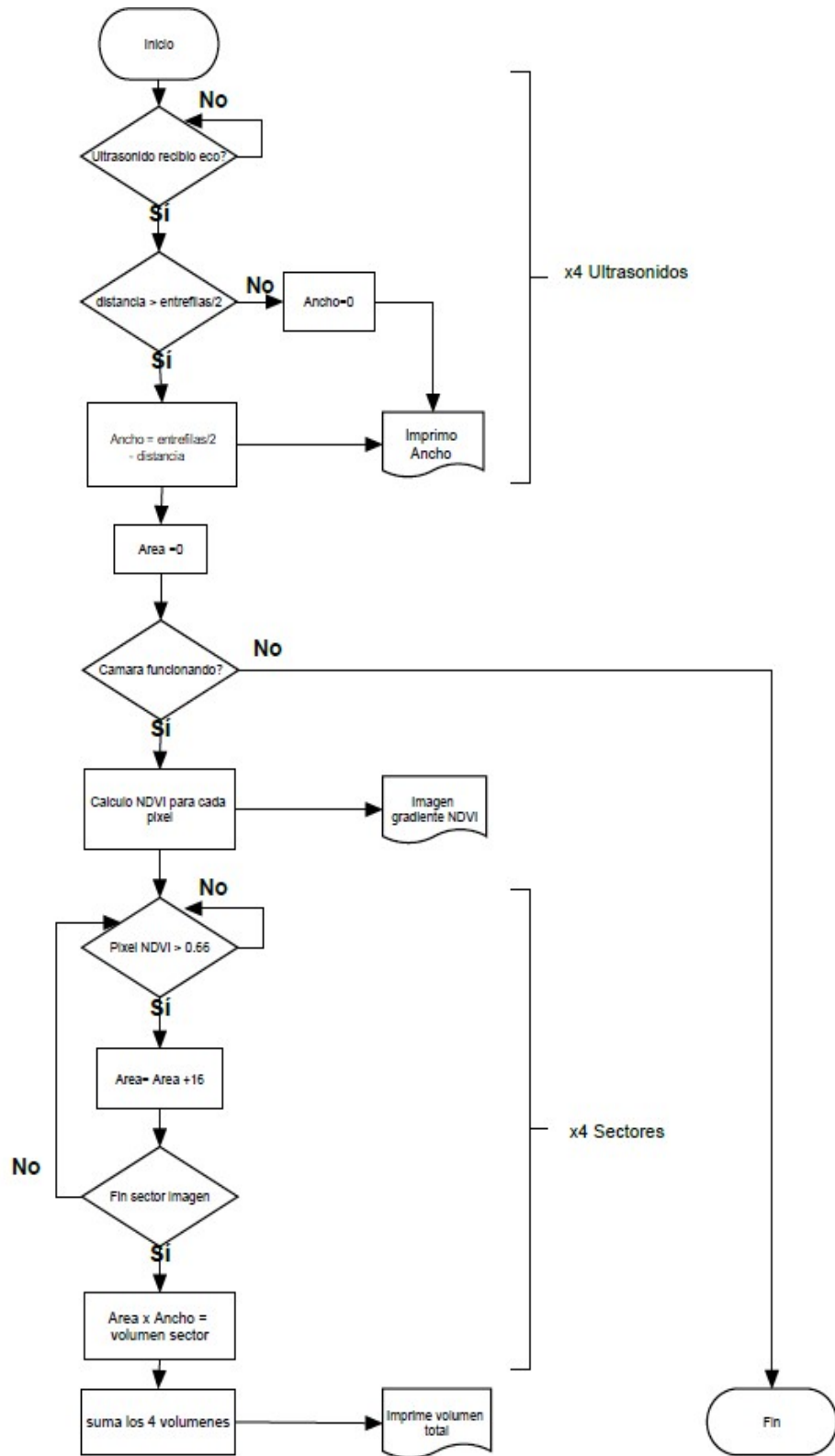


Figura 5-5 Diagrama de flujo del programa



---

Cuando se comenzó a trabajar en el código se tuvieron ciertos inconvenientes con el Ultrasonido ya que se pretendía generar uno propio que pudiera poner en funcionamiento el sensor. El problema con esta implementación reside en el sistema operativo del Raspberry generando interrupciones para trabajar sobre otros programas que se encuentran corriendo en él y variando los tiempos de escucha del sensor. Para evitar este posible error, se usó la librería GpioZero que tomaba en cuenta estos problemas con las interrupciones la cual se implementa:

**DistanceSensor** (echo, trigger, \*, queue\_len=30, max\_distance=1, threshold\_distance=0.3, partial=False, pin\_factory=None)

**Echo:** Se coloca un pin número de GPIO al que se conectara el pin 2 del sensor el cual tiene la salida PWM

**Trigger:** Como el anterior solo que este corresponderá a una salida y estará conectada al pin 4 del ultrasonido, el que le da la señal para que comience a medir

**Max\_distance:** Este tiene como valor la máxima distancia que el sensor puede ver en nuestro caso es la mitad del ancho entre filas de árboles.

El resto de los parámetros no son utilizados en el programa.

Para acceder a la distancia se utiliza el nombre que se le dio al sensor seguido de la palabra distance, ej. sensor3.distance, este nos devuelve la distancia en centímetros al objeto observado por el ultrasonido, para obtener el ancho a la mitad de distancia entre filas se resta la variable distance.

$$\text{Ancho} = \frac{\text{entrefilas}}{2} - \text{distance}$$

Para lo obtención y procesamiento de la imagen se utiliza la librería Opencv obteniendo el video por parte de la función cv2.VideoCapture() y read(). Luego tomando la imagen como una matriz tridimensional se descompone en cada uno de los canales azul verde y rojo el cual para nuestro caso es el infrarrojo cercano “NIR”, realiza el cálculo del valor de NDVI para cada pixel realizando las siguientes operaciones:

$$\text{VIS} = (\text{blue} + \text{green}) / 2$$
$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{VIS}) / (\text{NIR} + \text{VIS})$$

Esto genera una nueva matriz con valores entre -1 y 1, para poder visualizarla y trabajar con ella se multiplica por 255 generando una imagen en escala de grises que luego por la función applyColorMap() podemos generar un mapa de calor donde los valores de NDVI son mayores el que después podemos ver a medida que el programa es ejecutado.

Por otro lado tomando la matriz NDVI la cual tiene un formato de 480x640 se recorta tomando sus columnas centrales y transformándola en una de 100X480 y a su vez esta

---

misma se divide en cuatro sectores iguales de 100x120 los que se asigna a cada ultrasonido. Los valores entre cero y uno de cada uno de los cuatro sectores de esta matriz se discriminan entre los mayores 0.66 y tomando que en ellos se encuentra vegetación sana se suman para cada sector, el valor de NDVI de referencia se toma de la siguiente gráfica.

El recorte de la imagen consiguiendo una de 100X480, se debe a mejorar la precisión, ya que al tomar un tamaño menor al original un árbol es obtenido con mayor cantidad de imágenes, lo que da también una mayor cantidad de medidas de ancho dadas por los ultrasonidos.

Luego se suman en cada sector y se multiplica por el valor calculado de área ocupado por cada pixel (16mm<sup>2</sup>), tomando como referencia el valor calculado en la calibración estableciendo que la distancia aproximada de 2.5m al objetivo se sigue cumpliendo, esto se cumple principalmente por la distancia entre filas utilizado. Con esto obtenemos el área de vegetación para cada uno de los cuatro sectores de la imagen.

Contando con el área en cada sector se multiplican por el valor de ancho de árbol, el cual se obtiene restando el valor de distancia que está dando el sensor en ese momento a la distancia desde el centro del árbol al sensor. Con esto tenemos el valor volumen de vegetación para ese sector. Sumando los cuatro sectores obtenemos el volumen total

Para poder obtener una salida visual, a partir de la imagen de calor generado a partir del valor de NDV utilizando herramientas de Opencv (CV, 2023) se le agrega a cada sector el valor instantáneo de ancho de árbol y en el centro de la imagen se coloca el valor de volumen foliar total.

Además, se genera un registro de cada valor de NDVI calculado para que luego pueda ser estudiado y comparado con otros.

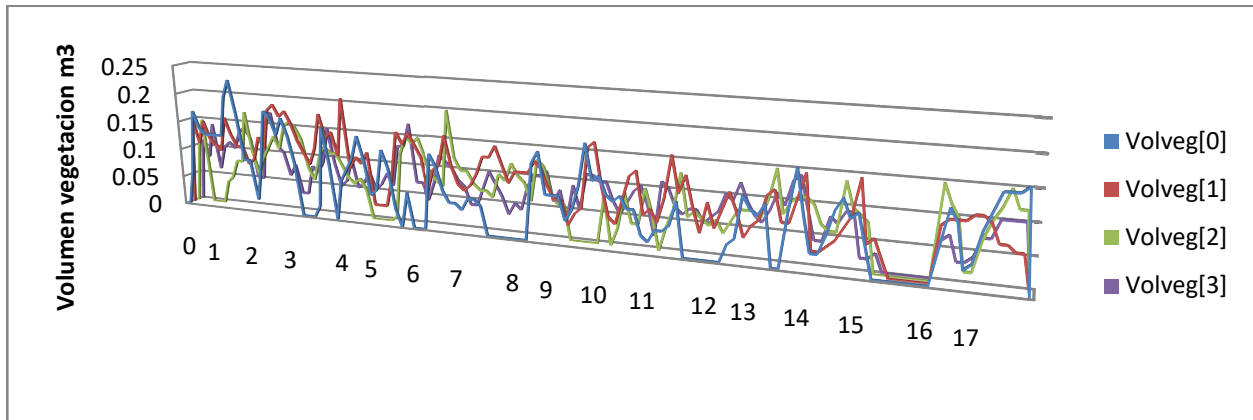
## 1.7. Trabajo en parcela de experimentación

Trabajando sobre la parcela de experimentación antes nombrada de 50m de largo que cuenta con 16 plantas, utilizando la plataforma móvil tirada por el tractor se tomó su volumen foliar.

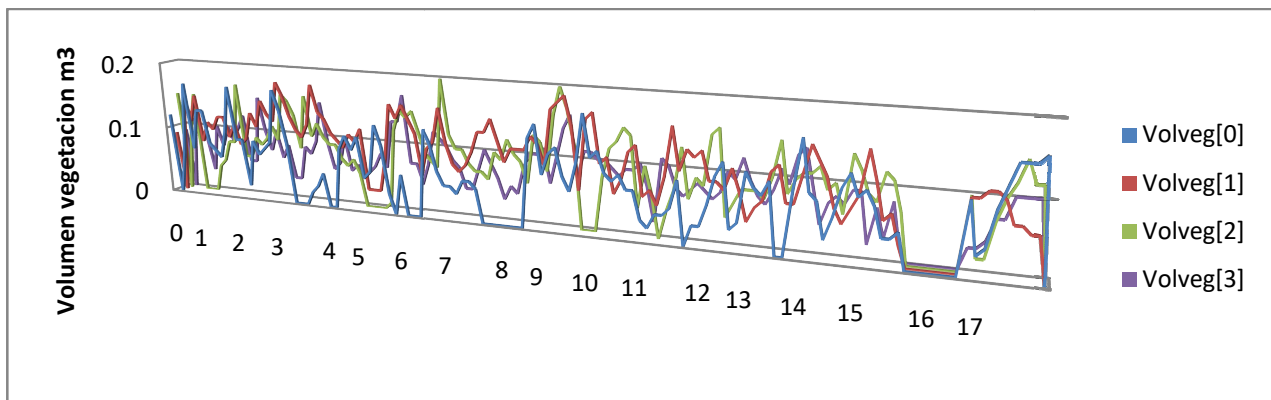
Para ello se utilizó una velocidad de 4.1 km/h las que el tractor las da en la tercera velocidad a 1500 revoluciones, esto fue tomado desde el manual del tractor y corroborado por GPS. Siendo el ancho de la ventana de trabajo que toma el conjunto de sensores de 40 cm para tomar todas las plantas de la parcela de experimentación necesitamos 125 muestras.

Estas muestras se tomaron de derecha e izquierda de la fila pudiendo entonces sumar cada

volumen parcial consiguiendo un total pudiendo comparar al tomado manualmente en la parcela



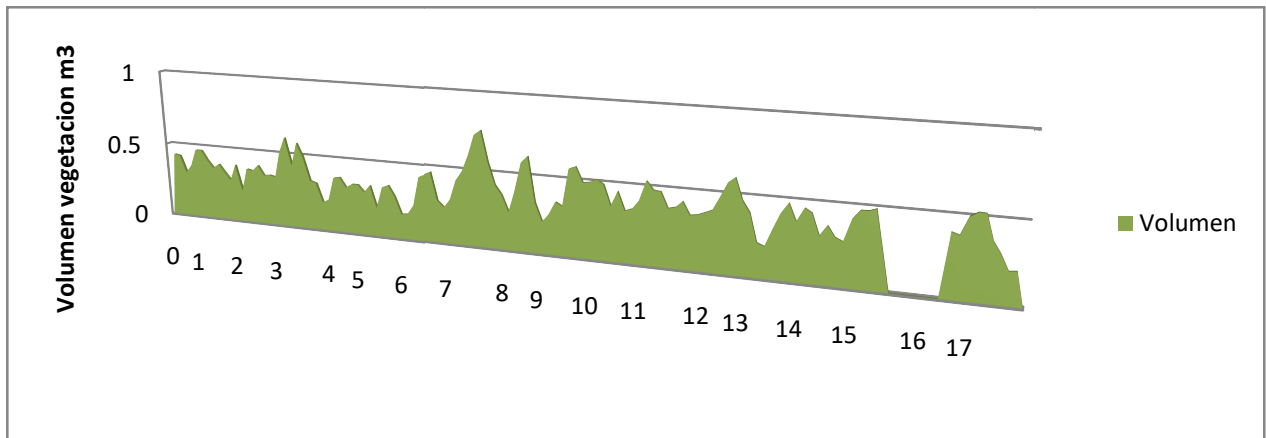
*Grafica 5-1 Volumen de vegetación para cada sector lado derecho.*



*Grafica 5-2 Volumen de vegetación para cada sector lado izquierdo.*

En las Grafica 5-1 y Grafica 5-2 podemos observar el volumen de vegetación para cada lado de la fila. Cada árbol se encuentra implantado a una distancia de 3m, el cual es el espacio que cada uno tiene para desarrollarse. Tomando las 125 muestras que tiene cada fila y los 51m totales de ella, nos da que para cada árbol corresponden 7 muestras.

Si sumamos las graficas de lado derecho e izquierdo y todos los sectores no da como resultado los m3 de follaje para cada planta.



*Grafica 5-3 Volumen total de la fila.*

En la gráfica anterior podemos observar el volumen de vegetación de la fila completa tomando los dos lados, sumando todos los valores de volumen foliar nos da 83 m<sup>3</sup> de vegetación en toda la parcela el que es coherente con las medidas tomadas manualmente. Este valor es un 89% del tomado por el método del elipsoide y un 64% por el método de TRV, realizados estos planta a planta

Árbol	Volumen calculo sensores (m3)
1	5.27
2	4.89
3	6.12
4	4.25
5	4.21
6	4.84
7	5.13
8	5.45
9	6.00
10	6.19
11	4.93
12	4.94
13	5.00
14	5.44
15	4.94
16	0.00
17	5.34
<b>Total</b>	<b>82.92</b>

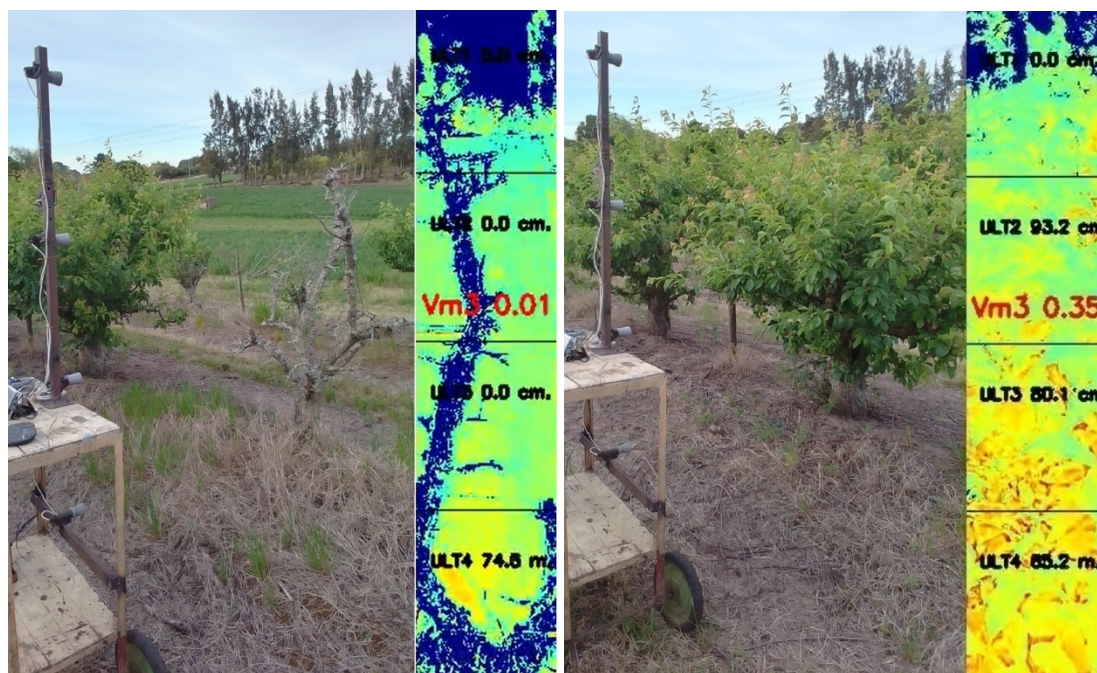
*Tabla 5-1 Volumen de cada planta*

---

En la Tabla 5-1 se puede observar el volumen calculado por los sensores para cada planta esto lo utilizamos luego para la comparación entre los diferentes métodos para cada árbol.

## 1.8. Comparación árbol muerto y árbol vivo

Se decidió hacer esta prueba para observar más gráficamente como la fusión de los dos sensores ayuda a mejorar la resolución de la salida.



*Figura 5-6 Comparación entre árbol sano y árbol muerto*

En el primer cuadro de la Figura 5-6 se puede observar como tomando por los sensores el árbol muerto en la salida podemos ver uno de los ultrasonidos da una medida de ancho de árbol, al medir una rama muerta que sobresale, pero la imagen nos muestra colores que indican un NDVI menor a 0.5 lo que termina dando un salida de volumen foliar muy cercana a cero. Igualmente, como detrás encontramos otra fila con follaje la cámara nos detecta algo de este por lo que no es un cero absoluto, pero claramente el sistema puede indicar que en este caso no se debe aplicar ningún fitosanitario, fertilizante, etc.

En la planta viva podemos observar como cada sensor da un ancho de árbol a su vez la cámara también toma el valor NDVI superiores al 0.66 los que son de un tono de amarillo hacia arriba. El último sensor nos da un ancho de cero y la cámara igualmente indica que existe follaje este corresponde a la otra mitad de la planta, por lo que para esa sección el volumen foliar nos da cer

---

## 6. Conclusiones

### 1.9. Conclusiones sobre resultados

Esta tesis buscaba fusionar distintos tipos de sensores tal de mejorar la precisión a la hora de encontrar las características de la masa foliar del árbol frutal. En la fruticultura cuando se calibran equipos que actúan sobre la masa foliar como son los atomizadores se utiliza en general el método de TRV por su practicidad para ser calculado pero sobreestima en gran nivel la cantidad real de masa foliar. Otros más precisos como el elipsoide son más usados en ámbitos de investigación, pero mínimamente por los productores.

En casos como los proyectos anteriores donde solo se utilizaron ultrasonidos el método de cálculo se parece mucho al TRV al cuadrricular el árbol sobrestimando la masa foliar. En este caso al incorporar la cámara NDVI podemos encontrar mejor el contorno de la planta y los huecos donde no hay vegetación, mejorando sensiblemente la estimación del árbol.

Árbol	Volumen elipsoide (m <sup>3</sup> )	TRV(m <sup>3</sup> )	Volumen calculo sensores (m <sup>3</sup> )	Diferencia entre volumen elipsoide y sensado (%)	Diferencia entre volumen TRV y sensado (%)
1	5.96	7.48	5.27	13.08	41.92
2	5.38	8.52	4.89	10.01	74.10
3	6.76	9.00	6.12	10.58	47.20
4	4.64	6.83	4.25	9.06	60.69
5	4.86	6.97	4.21	15.54	65.50
6	5.62	7.80	4.84	16.04	61.19
7	5.88	8.42	5.13	14.55	64.08
8	6.02	8.45	5.45	10.50	55.18
9	6.51	9.07	6.00	8.43	51.12
10	7.26	10.01	6.19	17.29	61.79
11	5.33	7.49	4.93	8.28	52.06
12	5.67	7.64	4.94	14.68	54.61
13	5.72	7.62	5.00	14.51	52.43
14	6.05	8.75	5.44	11.25	60.96
15	5.39	7.06	4.94	9.06	42.83
16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
17	6.02	8.11	5.34	12.78	52.05
<b>Total</b>	<b>93.06</b>	<b>129.22</b>	<b>82.92</b>	<b>12.22</b>	<b>55.83</b>

*Tabla 6-1 Comparación entre las diferentes formas de obtención de los volúmenes*

Como podemos observar en la Tabla 6-1, la diferencia promedio entre los volúmenes tomados planta a planta entre el sensado y el método Elipsoide es de un 12% con una diferencia máxima 17%, tomando como el volumen real el Elipsoide nos da valores comparables. En cambio, cuando comparamos el volumen sensado con el método del TRV observamos una diferencia del 56% y una diferencia máxima de un 74%, lo que da una gran sobrestimación al utilizar este método.

Si tomamos el método tradicional de TRV y calculamos para una fila de árboles como es el método en realidad y no árbol a árbol, este método nos da todavía valores mucho peores.

Cantidad de plantas	Largo de la fila (m)	Altura máxima (m)	Ancho transversal máximo (m)	TRV fila (m3)	Volumen calculo sensores (m3)
17	51	1.85	2.8	264.18	82.92

*Tabla 6-2 Comparación entre volumen sensado y TRV Calculado para toda la fila*

En la Tabla 6-2 vemos el TRV calculado para la fila usando la altura máxima y el ancho máximo como este se calcula en la realidad, la diferencia entre este y el sensado es de un 319 % para el TRV que el sensado. Observando estos valores sabiendo que la aplicación de fitosanitarios basa su dosis en el volumen de vegetación calculado en general por este método podemos inferir que estas dosis son de mucho mayores que las realmente necesarias.

Este trabajo al llevarse a cabo en paralelo con el proyecto INOVAGRO de mejoramiento del Atomizador Inteligente, se contó con ayuda de miembros de la Cátedra de Maquinaria de la Facultad de Agronomía, trabajando sobre la misma parcela de experimentación y utilizando los datos recogidos por los sensores en el Atomizador.

Sumando el volumen foliar total por cada método nos da que los sensores captaron un 89% del volumen por el método del elipsoide, encontrando entonces que las medidas son coherentes con lo visualizado en el campo, además la fusión de sensores logro encontrar mejor el contorno y huecos de la vegetación mostrando la reducción en el volumen foliar.

Al realizar la comparación con el método del TRV encontramos una gran reducción de la masa foliar, siendo la tomada por los sensores un 319% de la calculada en la fila por el método tradicional, como decíamos al principio de este capítulo este método en el más utilizado por los fruticulturas pero también el que mayor sobrestima la cantidad de masa foliar.

Por último, este método puede ser utilizado de forma fácil por el productor y da valores similares al Elipsoide que es complejo y prácticamente impracticable de hacerlo árbol por árbol, por el tiempo en que lleva aplicarlo y teniendo que realizarlo un agrónomo.

---

## 1.10. Publicaciones

Se realizaron dos publicaciones mientras se llevaba adelante el trabajo con los resultados parciales del mismo, a partir de la conclusión del mismo se está desarrollando una tercera.

“Real time tree row volume estimation for efficient application of phytosanitary in fruit trees” publicado en el IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS) 2019, special session FoodCAS (Matias Miguez; Ruben Deleón; Gabriel Vicente; Roberto Zoppolo, 2019).

“LiDAR based, tree row volume estimation for phytosanitary products reduction in fruit trees orchards” publicado en el IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS) 2020, special session FoodCAS (Ruben Deleón; Gabriel Vicente; Roberto Zoppolo; Alfredo Arnaud; Matias Miguez, 2020).

Los mismos se encuentran en el Anexo.

## 1.11. Futuras mejoras

Como trabajo futuro podemos plantear la creación de un módulo que contenga 2 sensores de diferentes tipos como son LiDAR y cámara NDVI. Estos dos sensores no se pudieron testear en vegetación juntos, pero de forma aislada son los que mostraron un mejor desempeño.

Este módulo contaría con un procesador interno que tome los datos de los dos sensores, los interprete y tenga una salida en señal que sea fácilmente utilizable por actuadores, como puede ser un nivel de tensión o PWM. Esta señal estaría correlacionada con el volumen foliar detectado por el sensor. Por ejemplo, para el uso en un atomizador de 7 boquillas por lado, se pudieran generar 7 sectores distintos en el sensor donde cada uno tenga una salida para cada boquilla.

Este módulo podría utilizar para detectar tiempos fenológicos del árbol frutal como son la floración o la cosecha pudiendo variar su salida en función de la cantidad de fruta o flores en la planta. Lo que podría ayudar en tareas de raleo o cosecha.

Otra aplicación sería la detección de malezas pudiendo detectar y calcular su masa foliar generando una salida que al ser tomada por un pulverizador aplicara herbicidas en cantidad y forma selectiva.



---

Desde el punto de vista de la investigación, un trabajo futuro sería realizar un estudio estadístico estudiando la diferencia entre el método del elipsoide y lo obtenido por los sensores observando si estos son comparables, ampliando las variedades de arboles y sistemas de conducción en r. frutales.

## 7. ANEXOS

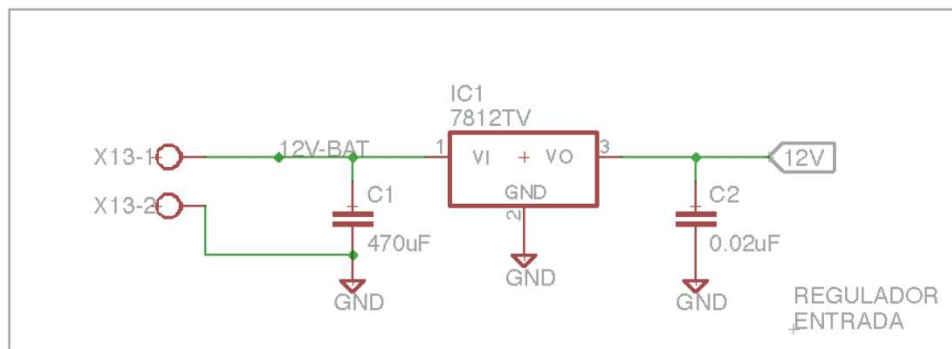
### 1.12. Fuentes de Alimentación

La fuente de alimentación del sistema es el conjunto del alternador/batería del tractor. El alternador, o la batería en su defecto, entregan una señal bastante imprecisa en torno a los 14V en el caso del alternador, y entre 11 y 13V en el caso de la batería (dependiendo de la carga.). No es recomendable trabajar con dichas variaciones para el equipamiento 12V como los LiDARs y se deben hacer reducciones de tensión en otros como los módulos de comunicación y el procesador, por lo cual se debió dotar de reguladores de tensión al sistema de adquisición.

#### *Alimentación 12v*

Para alimentar los LiDARs, es necesario hacerlo con 12V, para ello se utiliza un LDO, modelo L7812TV, el cual tiene la característica de regular a 12V su salida a partir de la entrada sin regular del conjunto alternador/batería.

Esta tensión regulada de 12V se utiliza exclusivamente para alimentar ambos LiDARs.



*Figura 7-1 Regulador de entrada a 12V implementado en el PCB*

La Figura 7-1 muestra el esquemático implementado en el PCB, siendo "X13" los conectores con tornillos por los cuales la placa recibe la alimentación y la etiqueta "12V" representa la salida regula. Los valores seleccionados para los capacitores C1 y C2 son los recomendados por el fabricante para este tipo de aplicación.

---

## Alimentación 5V

Para la obtención de los 5V a partir de la fuente de alimentación se utiliza un Step-Down por contar con una mejor eficiencia que un regulador lineal y soportar corrientes más elevadas que el anterior. En el caso del Raspberry su consumo para un LDO genera un calor elevado en el mismo el que da algunos problemas por más que se le coloquen disipadores (en las primeras pruebas se utilizó un LDO).

Los reguladores LM2576 son circuitos integrados ideales para el diseño fácil y conveniente de un Step-Down de conmutación (buckconverter), capaces de impulsar una carga de 3,0 A con una excelente regulación de línea y carga. Estos dispositivos están disponibles en voltajes de salida fijos de 3.3V, 5V, 12V, 15V y una versión de salida ajustable.

Estos reguladores fueron diseñados para minimizar la cantidad de componentes para simplificar el diseño de la fuente de alimentación, incluyendo una tolerancia garantizada de  $\pm 4\%$  en la salida voltaje dentro de los voltajes de entrada especificados y las condiciones de carga de salida, y  $\pm 10\%$  en la frecuencia del oscilador ( $\pm 2\%$  sobre  $0^\circ\text{C}$  a  $125^\circ\text{C}$ ). (ON semiconductor)

Esta tensión es utilizada para alimentar los sensores de ultrasonido que también funcionan con 5v.

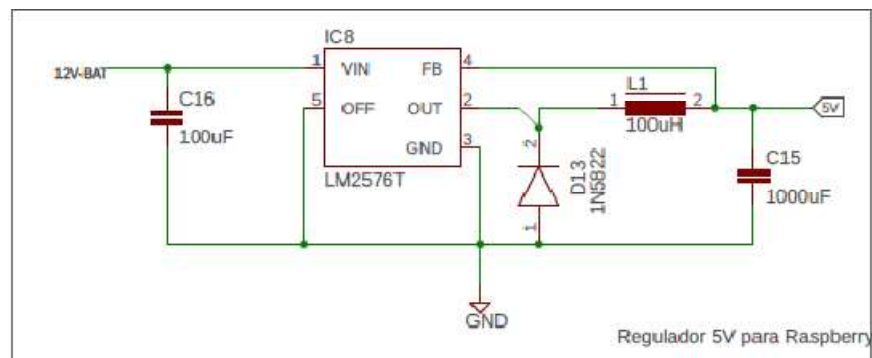


Figura 7-2: Regulador de entrada a 5V implementado en el PCB

---

## 8. Bibliografía

AgroCam. (2023, 12 26). <https://www.agrocam.eu/products>.

Alexandre Escolà ,Santiago Planas, Joan Ramon Rosell, Jesús Pomar, Ferran Camp , Francesc Solanelles , Felip Gracia, Jordi Llorens and Emilio Gil. (2011). *Performance of an Ultrasonic Ranging Sensor in Apple Tree Canopies*. <https://www.mdpi.com/1424-8220/11/3/2459/htm>.

Amanda Heemann Junges, Denise Cybis Fontana, Rafael Anzanello, Carolina Bremm. (2017). *Normalized difference vegetation index obtained by ground-based remote sensing to characterize vine cycle in Rio Grande do Sul, Brazil*. [https://www.researchgate.net/publication/321088898\\_Normalized\\_difference\\_vegetation\\_index\\_obtained\\_by\\_ground-based\\_remote\\_sensing\\_to\\_characterize\\_vine\\_cycle\\_in\\_Rio\\_Grande\\_do\\_Sul\\_Brazil](https://www.researchgate.net/publication/321088898_Normalized_difference_vegetation_index_obtained_by_ground-based_remote_sensing_to_characterize_vine_cycle_in_Rio_Grande_do_Sul_Brazil).

Antonio Miranda-Fuentes, Jordi Llorens, Juan L. Gamarra-Diezma, Jesús A. Gil-Ribes and Emilio Gil. (2015). *Towards an Optimized Method of Olive Tree Crown Volume Measurement*. <https://www.mdpi.com/1424-8220/15/2/3671>.

Carmen Marín-Buzón, Antonio Pérez-Romero, Fabio Tucci-Álvarez and Francisco Manzano-Agugliaro. (2020). *Assessing the Orange Tree Crown Volumes Using Google Maps as a Low-Cost Photogrammetric Alternative*. <https://www.mdpi.com/2073-4395/10/6/893/htm>.

CV, O. (2023, 12 26). <https://opencv.org>.

Doruchowski. (2003). *Direct and Indirect Impacts of Integrated Pest Management on Pesticide*.

El Agrario, Luciano Barrenechea. (2020, 04 09). <https://www.elagrario.com/agricultura-ndvi-todo-sobre-la-tecnologia-que-esta-revolucionando-el-agro-10512.html>. *NDVI: todo sobre la tecnología que está revolucionando el agro* .

FoodCAS. (2023, 12 26). <https://www.knt.co.jp/ec/2019/foodcas/>. Retrieved from FOODCAS Electronic for Better Quality Foods.

Francisca Rosique, Pedro Javier Navarro Lorente, Carlos Fernandez . (2019). *A Systematic Review of Perception System and Simulators for Autonomous Vehicles Research*.

G Ajay Kumar, Jin Hee Lee, Jongrak Hwang, Jaehyeong Park, Sung Hoon Youn and Soon Kwon. (2020). *LiDAR and Camera Fusion Approach for Object Distance Estimation in Self-Driving Vehicles*. [https://www.researchgate.net/publication/339505716\\_LiDAR\\_and\\_Camera\\_Fusion\\_Approach\\_for\\_Object\\_Distance\\_Estimation\\_in\\_Self-Driving\\_Vehicles](https://www.researchgate.net/publication/339505716_LiDAR_and_Camera_Fusion_Approach_for_Object_Distance_Estimation_in_Self-Driving_Vehicles).

---

Gabiel Vicente, Diego Medina, Ruben Deleon. (2017). *Atomizador Inteligente*.

Grianggai Samseemoung, Peeyush Soni and Chaiyan Sirikul. (2017). *Monitoring and Precision Spraying for Orchid Plantation with Wireless WebCAMs*.  
[https://www.researchgate.net/publication/320339655\\_Monitoring\\_and\\_Precision\\_Spraying\\_for\\_Orchid\\_Plantation\\_with\\_Wireless\\_WebCAMs](https://www.researchgate.net/publication/320339655_Monitoring_and_Precision_Spraying_for_Orchid_Plantation_with_Wireless_WebCAMs).

Homer, I.; Olivet, J.; Riquelme J. (2010). Regulación de equipos pulverizadores.

Huitao Zhou, Weidong Jia, Yong Li and Mingxiong Ou. (2021). *Method for Estimating Canopy Thickness Using Ultrasonic Sensor Technology*.  
[https://www.researchgate.net/publication/355371488\\_Method\\_for\\_Estimating\\_Canopy\\_Thickness\\_Using\\_Ultrasonic\\_Sensor\\_Technology](https://www.researchgate.net/publication/355371488_Method_for_Estimating_Canopy_Thickness_Using_Ultrasonic_Sensor_Technology).

INTA. (n.d.). *Red Agricultura de Precision* . Retrieved from Tecnología de Aplicación Variable de Insumos : <http://www.agriculturadeprecision.org/articulos/dosis-variable/Tecnologia-De-Aplicacion-Variable.asp>

Jose Gonzalez, Mark Gleason, Olivia Meyer. (2022). *Getting it right: Pesticide mixing tips when spraying with the Intelligent Sprayer*.  
<https://www.smartapplespray.plantpath.iastate.edu/post/getting-it-right-pesticide-mixing-tips-when-spraying-intelligent-sprayer>.

Juan Luis Gamarra-Diezma, Antonio Miranda-Fuentes , Jordi Llorens , Andrés Cuenca. (2015). *Testing Accuracy of Long-Range Ultrasonic Sensors for Olive*.  
[https://www.researchgate.net/publication/271964783\\_Testing\\_Accuracy\\_of\\_Long-Range\\_Ultrasonic\\_Sensors\\_for\\_Olive\\_Tree\\_Canopy\\_Measurements](https://www.researchgate.net/publication/271964783_Testing_Accuracy_of_Long-Range_Ultrasonic_Sensors_for_Olive_Tree_Canopy_Measurements).

Matias Miguez; Ruben Deleón; Gabriel Vicente; Roberto Zoppolo. (2019). *Real Time Tree Row Volume Estimation for Efficient Application of Phytosanitary Products in Fruit Trees*.  
<https://ieeexplore.ieee.org/document/8702561?denied=>.

Maxbotix. (n.d.). Retrieved from [http://www.maxbotix.com/Ultrasonic\\_Sensors/TrashSonar-Sensors.htm](http://www.maxbotix.com/Ultrasonic_Sensors/TrashSonar-Sensors.htm)

Maxbotix. (n.d.). *TrashSonar-WR\_Datasheet*.

ON semiconductor. (n.d.). LM2576 3.0 A, 15 V, Step-Down.

ORG, R. (2023, 12 26). <https://www.raspberrypi.com/>.

Ruben Deleón; Gabriel Vicente; Roberto Zoppolo; Alfredo Arnaud; Matias Miguez. (2020). *LIDAR Based, Tree Row Volume Estimation for Phytosanitary Products Reduction in Fruit Trees Orchards*. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9181291>.

Sergio Vélez , Rubén Vacas, Hugo Martín, David Ruano-Rosa , Sara Álvarez . (2022). A Novel Technique Using Planar Area and Ground Shadows Calculated from UAV RGB Imagery to Estimate Pistachio Tree (*Pistacia vera* L.) Canopy Volume.

---

---

SmartApply. (2023, 12 26). *INTELLIGENT SPRAY CONTROL SYSTEM™*. Retrieved from <https://smartapply.com/>.

Uruguay, F. d. (n.d.). *Departamento de Protección Vegetal*. Retrieved Mayo 2017, from [http://www.infoagro.com/documentos/aplicacion\\_terrestre\\_plaguicidas\\_hay\\_que\\_cambiar\\_forma\\_trabajar.asp](http://www.infoagro.com/documentos/aplicacion_terrestre_plaguicidas_hay_que_cambiar_forma_trabajar.asp)

Victor Partel, Lucas Costa, Yiannis Ampatzidis. *Smart tree crop sprayer utilizing sensor fusion and artificial intelligence*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169921005731>.

Yu Jiang, Changying Li, Fumiomi Takeda, Elizabeth A. Kramer, Hamid Ashrafi & Jamal Hunter. (2019). *3D point cloud data to quantitatively characterize size and shape of shrub crops*. <https://www.nature.com/articles/s41438-019-0123-9>.

Yue Shen, Destaw Addis and Fida Hussain. (2017). *Measurement, A LIDAR-Based Tree Canopy Characterization under Simulated Uneven Road Condition: Advance in Tree Orchard Canopy Profile*. <https://www.hindawi.com/journals/js/2017/8367979/>.

# Real time tree row volume estimation for efficient application of phytosanitary in fruit trees

Matias Miguez\*, Ruben Deleón\*, Gabriel Vicente\*, Roberto Zoppolo†  
Email: mmiguez@ucu.edu.uy

\*Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Católica del Uruguay.

†Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, Uruguay.

**Abstract**— Fruit plantations in Uruguay is done mainly by small-scale producers, where a single sprayer is used for all the phytosanitary applications. For proper protection of the fruit trees, the broth concentration (the phytosanitary is diluted in water) must be adjusted according to the volume of vegetation of the trees. In most farms, this concentration calibration is done once per year for the worst case scenario. Therefore, excessive doses of pesticides are applied to the trees with lower vegetative mass. This over application increases the cost of production and can also potentially pose risks for the consumers and/or environment. A low cost system adaptable to a standard sprayer capable of measuring the Tree Row Volume (TRV) in real time and adjusting the corresponding dose was developed. Initial on field test show a reduction of between 30%-60% for different fruits, reducing the environmental risk of contamination, lowering cost and reducing the risk of pesticide residues on fruit for the final consumer. The system also includes a GPS, to determine from its position the kind of tree its spraying and to function as a data logger to have more traceability of past applications. Further research in the use of a multi-sensor solution, as well as extensive testing in real conditions is being conducted.

**Keywords**—tree row volume – distance measurement

## I. INTRODUCTION

In fruit production, periodic phytosanitary products applications must be carried out, to ensure a healthy fruit. Most orchards in Uruguay use the self-propelled sprayers whose output regulation depends on the fruit tree, product to be applied and the dose required. This is generally performed annually where the amount of broth (water plus phytosanitary product) per hectare is defined, considering the most demanding trees, and applying this conditions for all the orchard.

The Tree Row Volume (TRV) is used to determine the volume of vegetation per unit area, which can be calculated for each patch of trees. From this value, the dose can be selected by the professional and the amount of broth determined. Generally, this is done annually for the quadrant (cultivated plot of the same species, variety and year) with more vegetation as equipment's regulation must be carried out by trained personnel and is time consuming. This results on over application of phytosanitary products which increases costs and may pose a risk for consumer and the environment. Similar works [1] have been focused on developing new sprayers, but this system can be adapted to

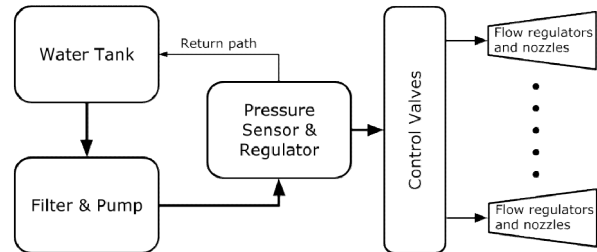


Fig. 1. Simplified diagram of the hydraulic circuit. 12 nozzles are commanded to properly spray all the neighboring trees. almost any existing conventional sprayer, which the farmer already has, though reducing the cost for installation.

## II. SYSTEM DESCRIPTION

The complete sprayer consists of an hydraulic circuit that is controlled by an electronic system.

The hydraulic circuit has 12 controllable nozzles that regulate the amount of broth that is applied. A simplified diagram of the hydraulic circuit is shown in Fig 1. It consists of a tank for holding the product, a pump to provide flow and pressure, a filter, an electric regulated pressure valve, a pressure sensor, a pressure gauge, electrically driven flow valves, and the nozzles which actually spray the broth. This allow for a constant pressure and a regulated flow to be delivered by the nozzles. The nozzles can be turned on/off to select the area of application

Furthermore, an electronic system was implemented using a standard microcontroller. This microcontroller receives the data from the sensors, and from the GPS module and commands the actuators which control de nozzles. A simple user interface allows for the monitor and setting of the pressure and allows for the emergency shutdown or even standard manual use of the sprayer. The parameters of each application are logged in a SD card which can help in future traceability of this applications, while the information about each quadrant (tree type, distance between tress, etc.) is also recorded in the card. A diagram of this interactions is shown in Fig 2.

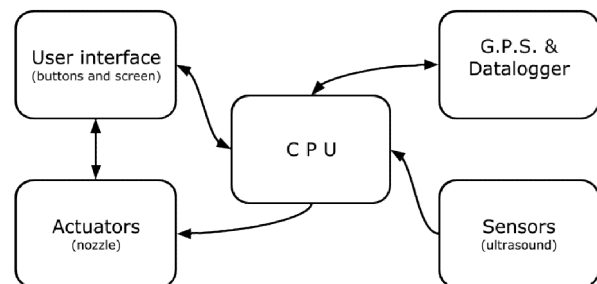


Fig. 1. Simplified diagram of the electronic circuit. The user interface can directly cut the nozzle, as an emergency shutdown.

Fig. 3. On the left the position of the ultrasound sensors relevant to the tree: three sectors are defined. On the right, an image of the sprayer and the location of the 12 nozzles.

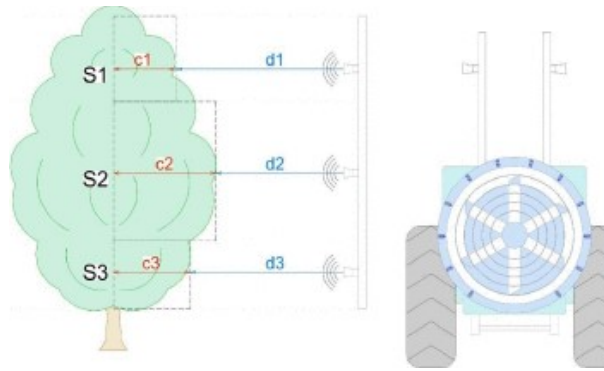


Fig. 3. On the left the position of the ultrasound sensors relevant to the tree: three sectors are defined. On the right, an image of the sprayer and the location of the 12 nozzles.

To determine the TRV, 6 ultrasonic sensors were used, 3 for each side of the sprayer, as shown in Fig. 3. The sprayer drives between two rows of trees, and the distance between the centres of these trees is known (it is fixed for each quadrant, and using the GPS, the system knows in which quadrant it is located), therefore measuring  $dx$  we can determine  $cx$ , for three different heights ( $x=1-3$ ), which are used to command the different nozzles.

For each side of the tree, three sectors are defined, with its corresponding nozzles: for sector S1, just the top nozzle is assigned, for sector 2, the next 3 nozzles, while the last sector correspond to the bottom 2 nozzles. This granularity was selected after on site testing as the best to guarantee proper application, and as most of the leaves are located in sector 2.

The main CPU determines the TVR of the trees for each sector and using the information from the GPS and data loggers select the appropriate flow for each nozzle. To control the amount of broth sprayed, the standard nozzles (originals from the traditional sprayer) were modified, adding a direct drive valve. This valve is controlled using a 5Hz PWM which is fast enough for all the leaves to be treated, but slow enough for the valve to close when instructed. A smaller microprocessor is used for generating all the necessary control signals. The system is monitoring the pressure sensor and using a simple PID controller, maintains the pressure at the user defined value.

A modified mean filter was implemented in the microcontroller, to reduce noise and have a smoother application (noise is caused by the small size of leaves and its variability). The 11 sample median filter was tweaked for faster detection of the first tree, by amplifying a sudden change from no detection, to guarantee complete coverage of broth application at the start of the tree. To reduce the chance of the end of the tree being not completely sprayed (the nozzles are at the back of the sprayer) a delay is added to the complete shutdown of the valves.

### III. FIELD TESTING

A prototype of the system was installed and tested in three different fruit quadrants with different distances

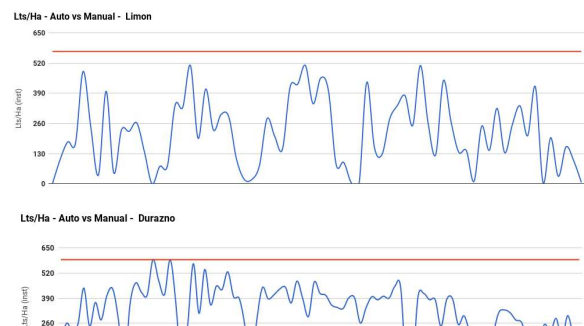
between rows, distance between trees in the same row and different fruits: lemon (5m / 3m) and peaches (5m / 2.5m). In Fig. 4 an image of the field test being conducted by the authors can be seen, where all the right side nozzles are turned off because it's the final row, and the top left one is also off, as the tree is not tall enough for it to be required. Water sensitive paper was used to measure coverage and drop size, and results were within specification. Initial results show a reduction in the amount of broth used of 33% in lemon and 55% in peaches, as shown in Fig. 5; in red the standard manual system where a constant amount is sprayed, in blue the amount of broth used by the proposed system.

### IV. MULTI-SENSOR VERSION

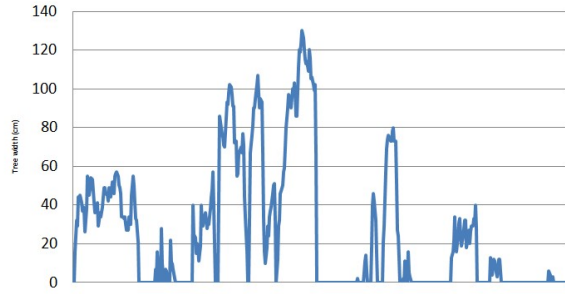


This first initial testing shows the real time estimation of TRV can be used to reduce the amount of phytosanitary used in orchards, but further testing is necessary before it can be massively used. During testing, some kinds of trees gave better results, and special care must be taken for deciduous trees. To improve results for these different cases, a multi-sensor approach was selected.

For better estimation of the distance between the leaves and the sprayer, laser distance sensors and LIDARs were tested. The main problem with the first is that it only measures at one height, with a really small angle, and initial results show performances that are similar than the current ultrasound sensor [2]. LIDARs on the other hand can generate a much better 3D model of the tree, but will require a much bigger processing unit. One of the issues is as leaves are small, there can be great variation of the measured



### LIDAR Garmin



### LIDAR Benewake

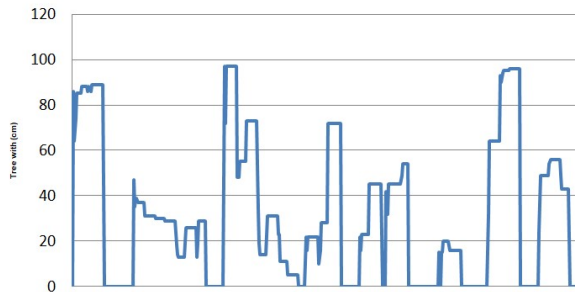


Fig. 6. Measured distance from tree to sprayer for two different LIDAR.

distance when the sensor light detects the leaves not in the periphery of the tree. Initial test for two different LIDARs can be seen in Fig. 6 where the Benewake one is better suited for this application than the Garmin one, but further processing is still needed. A multi-point LIDAR will also be tested in the near future, similar to [3] but used outside a greenhouse.

A different approach would be using normalized difference vegetation index (NDVI) cameras. NDVI is an index that estimates the amount of live green vegetation, by measuring the response to both light wavelength blue and green (BLUE&GREEN) and near infrared (NIR):

$$NDVI = \frac{NIR - (BLUE \& GREEN)}{NIR + (BLUE \& GREEN)} \quad (1)$$

By using different filters, a camera can be used to take photos in both BLUE&GREEN and NIR, and the green part of the tree can be used to determine the presence or absence of the tree.

In Fig. 7, a normal photograph of the orchard and a NDVI with a minimum processing is shown. It can be seen that the presence or absence of trees can be easily determined.

### V. CONCLUSIONS

A prototype of sprayer for orchards was installed and tested in both lemon and peaches quadrants. The system estimates TRV using ultrasonic distance measurements and initial results show reduction of broth used of 33% in lemon

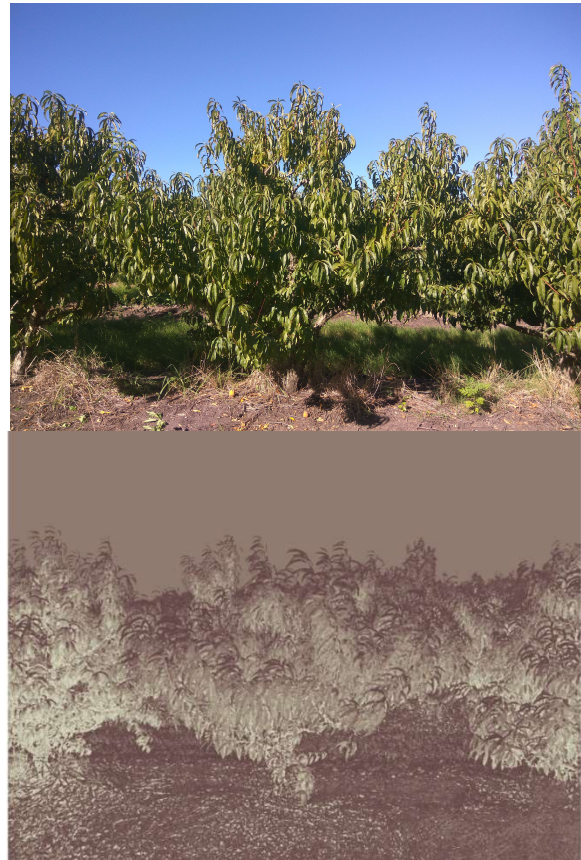


Fig. 6. Normal Photograph, and NDVI processed photograph. The presence of tree can be determined easily.

and 55% in peaches. The coverage and size of drop were within acceptable values.

To continue testing, this year more quadrants will be sprayed only with the prototype, while control quadrants will be placed beside them, so that the health of the tree and quality of the fruits can be compared.

As further improvements, a multi sensor solution, where either LIDARs or the ultrasound sensors are used to measure the distance and NDVI cameras are used to improve presence of trees is being developed.

This low cost IoT system could be used to reduce the use of agrochemicals and costs, even for small scale producers as it can be easily adapted to the already present sprayer.

### REFERENCES

- [1] P. Fede, K. Elissa, "Pulverizadora H3O", [online] Available: <http://www.fedepulverizadores.com>
- [2] Llorens, Jordi; Gil, Emilio; Llop, Jordi; Escolà, Alexandre. 2011. "Ultrasonic and LIDAR Sensors for Electronic Canopy Characterization in Vineyards: Advances to Improve Pesticide Application Methods." *Sensors* 11, no. 2: 2177-2194.
- [3] Llop, Jordi; Gil, Emilio; Llorens, Jordi; Miranda-Fuentes, Antonio; Gallart, Montserrat. 2016. "Testing the Suitability of a Terrestrial 2D LIDAR Scanner for Canopy Characterization of Greenhouse Tomato Crops." *Sensors* 16, no. 9: 1435.



# LIDAR Based, Tree Row Volume Estimation for Phytosanitary Products Reduction in Fruit Trees Orchards

Ruben Deleón\*, Gabriel Vicente\*, Roberto Zoppolo†, Alfredo Arnaud\*, Matias Miguez\*

Email: mmiguez@ucu.edu.uy

\*Departamento de Ingeniería, Universidad Católica del Uruguay.

†Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, Uruguay.

**Abstract**— Many fruit orchards in Uruguay are small-scale producers, where a single sprayer is configured once a year and used for all the applications of the phytosanitary products. To conduct a successful application for ideal results, the broth concentration (the phytosanitary product is diluted in water) should be determined depending on the volume of vegetation of the fruit trees. In small orchards, this calibration is only done once per year, and is determined for the most voluminous trees in the orchard. This results in excessive doses of pesticides sprayed to all the other trees, that have lower vegetative volume. This excessive application not only has an increase in the cost of the fruits, but and can also pose potential risks for the environment and/or consumers. An adaptable system which can be used with common sprayer already employed in the orchards, capable of determining the Tree Row Volume (TRV) in real time and reducing the amount of product would be a solution to reduce phytosanitary application at a reduced cost. LIDAR (Light Detection and Ranging) technology can be used to measure length in the farm environment and has had a huge reduction in cost in the last few years, mainly for its use in autonomous cars. A prototype system was designed and its currently being tested in the field.

**Keywords**— tree row volume – distance measurement - LIDAR

## I. INTRODUCTION

Orchards for fruit production require the periodic application of phytosanitary products applications to guarantee a healthy fruit production. In Uruguay, most orchards are small and/or family owned which only have access to one self-propelled sprayer, whose optimal output regulation can vary depending on the type of the fruit tree, the exact product to be applied and the size of the particular tree. The common practice is to annually calibrate the system, where the amount of broth (water plus phytosanitary product) per hectare is selected for each orchard. As this is a single value that has to work for all the orchard, this calibration is done for the most demanding trees, and applied to all the orchard.

To determine the amount of phytosanitary product, the Tree Row Volume (TRV) has been used by agronomist to determine the amount of vegetation per unit area. This value can be determined for each patch of trees, as shown in fig. 1:

$$TRV = \frac{a \times h \times 10000}{c} \quad (1)$$

Where  $a$  is the tree canopy diameter,  $h$  is the three height and  $C$  the distance between the tree rows. A trained specialist, can determine the TRV for a tree patch, select the dose, determine the amount of broth and set the sprayer. As this require special training and can be time consuming, it is

generally only done annually and for the quadrant (cultivated plot of the same species, variety and year) with the highest value of TRV. The final outcome is the application of excessive amounts of phytosanitary products, increasing costs and potentially putting at risk the consumer and the environment. Some previous works [1] have focused on developing new sprayers which solve this problem, but the cost associated with a completely new equipment, is generally too high for most small orchards. In this case, a completely adaptable system, which can be used with the already existing sprayers was developed. By reusing most of the already available equipment the initial investment cost is greatly reduced, enabling more farmers to use the product.

In recent years the use of LIDAR technology has been increasing and thus its cost has been reduced, mainly because of its use in autonomous vehicles [2]. This work proposes to improve on [3] by taking advantage of the reduced cost of LIDARs to replace the ultrasound sensors. The advantage of this change is mainly that it enables a finer detection of the tree size and shape, while reducing the number of sensors, thus simplifying the installation and making it more robust. This is similar to [4] and [5] but used on the outside of greenhouse. The main difference is that inside a greenhouse the ambient light can be better controlled, thus making it easier to work with LIDAR technology.

The developed system can determine in real time the equivalent TRV seen by each of the 12 nozzles and adjust the amount of product used dynamically, reducing the waste in applied phytosanitary products.

## II. SYSTEM DESCRIPTION

A sprayer can be modeled as a hydraulic circuit, which is controlled by an electronic system on the top of a moving vehicle. To maximize the reuse of existing farm equipment, the vehicle and the hydraulic circuit will be only slightly

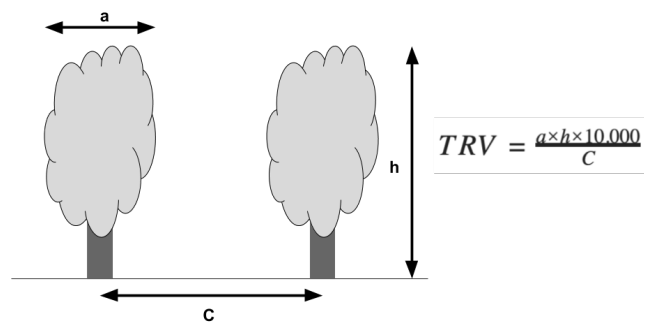


Fig. 1. Tree Row Volume Calculation. All variables expressed in meters.

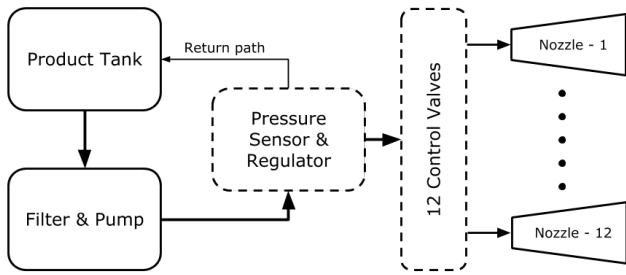


Fig. 2. Tree Row Volume Calculation. All variables expressed in meters.

modified, while the electronic system will be completely replaced and enhanced.

### A. Hydraulic System

A standard sprayer has 12 manually controllable nozzles that can regulate the amount of broth that is applied and are normally regulated once a year. The simple modification to the system, as shown on the diagram of fig. 2, consists of including 12 electric regulated flow valves (one on each nozzle) and a pressure sensor. If we modify the electronic system so that it can also control the pump, a constant pressure with a regulated flow in each nozzle can be achieved. The individually controlled nozzles are though turned off or on with different flows, enabling complete control of the amount and the area to be sprayed.

### B. Electronic System

To determine the TRV, the size of the tree must be measured, determining  $a$ ,  $h$  and  $C$  from (1). The system incorporates a GPS, to determine in which quadrant it is located. From this data, both the type of the tree and  $C$  can be retrieved from the previously inserted data by the farmer or technician (this has to be done only once for each quadrant and will be unchanged for several years). To determine  $a$ , two Benewake CE30-C LIDAR [6] (one for each side of the vehicle) were added to the front of the vehicle as can be seen in fig. 3. The main requirements for the LIDAR were to have a resolution of less than 5cm, high immunity to ambient light (as it will work outdoors) and to allow work at 1Hz or higher. The selected LIDAR has a 1cm resolution, works with ambient light of 30klx and can work at 20Hz. By measuring the distance between the center of the vehicle and the leaves



Fig. 3. Sprayer with the LIDARs mounted on the front.

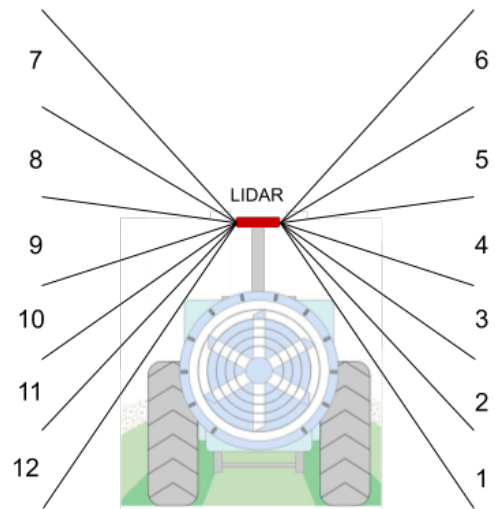


Fig. 4. Zones where each nozzle sprays. The LIDARs get an average distance for each of the different zones.

of the tree, this value can be determined. In this case, 12 different values were measured (6 on each side), one for each of the zones that is sprayed by each nozzle, as shown in fig. 4. In this way  $h$  is not directly measured, but a fixed  $h$  is used for the 12 different areas, and instead of only one TRV for the whole tree, 12 different ones are calculated, and the flow for each of the areas is varied accordingly.

The complete electronic system diagram is shown in fig. 5. It consists of a minicomputer (raspberry pi 4 [7]), a GPS receiver, 2 LIDARs, the pressure sensor and regulator, a microcontroller that handles the control of the 12 nozzles (Arduino UNO [8]) a simple user interface and a datalogging system. Using a smaller microcontroller for handling the details of 12 valves, allows for the raspberry pi to work faster with the rest of the system. The LIDARs must be installed on the front of the vehicle, but all the other systems are on the back (where there is also more room), so the LIDARs are connected by a wireless link (using a private WiFi network generated by the raspberry pi), to simplify the installation. Datalogging capabilities were included to help the farmer

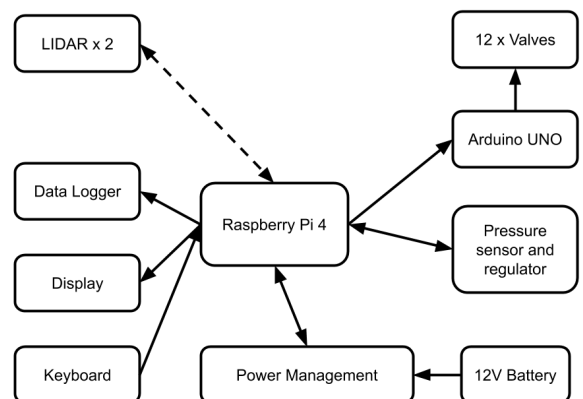


Fig. 5. Complete Diagram of the system. The Power management blocks provides power for all blocks. The LIDARs are installed in the front of the vehicle and conect by a wireles link to the Raspberry Pi.

keep track of all the different applications. On the moment, no digital traceability system is required for fruit production in Uruguay, but it was decided to include this capability as it could benefit both producers and employers. A simple display and small keyboard were included in the system, enabling the easy use by minimally trained users, and to allow for the system to be overruled, and the sprayer used in the standard manual use.

### C. Nozzle flow control

To control properly the flow in each of the nozzles, two different approaches were followed, using a different nozzle or adding an on/off valve.

A special nozzle was modified, using a stepper motor to move a small needle and vary the size of the hole, thus changing the amount of broth applied to the plants (see fig. 6). This allowed to control the flow between 600ml/min and 2000ml/min but requires the extra cost of the nozzles.

The second option was using an on/off valve and controlled with a PWM signal to control the amount of broth applied. The main problem of this method was that the time constant of the system only allowed a maximum frequency of 5Hz which reduced the precision of the control. Finally, by reducing the pressure of the broth from 10bar to 5 bar, the frequency was increased to 10Hz and the flow was linearly dependent on the duty cycle as can be seen in the measurements shown in fig. 7. This second option was selected as it has good flow control with less change to existing equipment.



Fig. 6. Implemented nozzle than can vary its flow using a stepper motor. On the left, all the different parts, on the right the ensambled system.

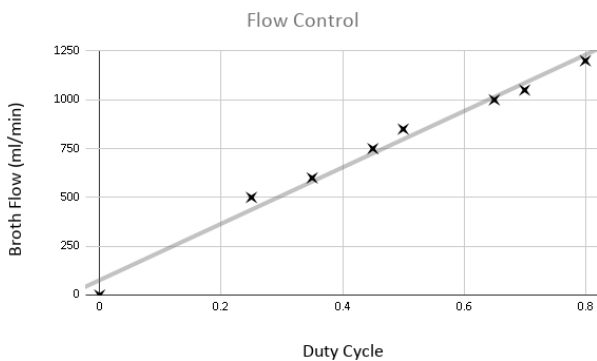


Fig. 7. Measured broth flow through the nozzle for different duty cycles.

## III. PRELIMINARY RESULTS

The prototype was implemented and tested in a farm near Montevideo, Uruguay. Using moist sensitive paper, attached to leaves, size of drop and coverage was tested for all zones. The vehicle moves at a constant speed (typically 2km/h), and information from the LIDAR was averaged for each zone and updated every 0.75 second (approximately every 40 cm), and the corresponding duty cycle for each nozzle was adjusted. In fig. 8 the image from the LIDAR and a standard photograph are shown, where the correspondence between the values measured and the shape of the tree can be seen.

The system was testing during cloudy and sunny days, and even with the sun setting down, the LIDAR worked correctly. By installing the LIDAR on the front of the vehicle, it was not hindered by the floating drops generated in the back of the vehicle. Initial measurements show a reduction of over 50% in applied broth, but further testing is needed to validate these results, with several more quadrants, different kinds of tree and during several planting seasons.

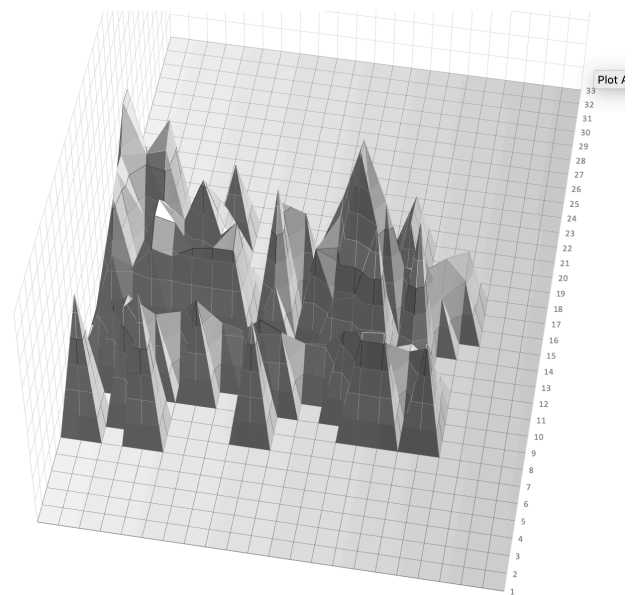


Fig. 8. Lidar measurements and photograph of the tree. The end of the tree can be seen clearly on the right as well as the tallest peak with the biggest branches.

#### IV. CONCLUSIONS

A system to adapt traditional sprayer for orchards so they can reduce the amount of phytosanitary product applied was developed, installed and is currently being tested in a small farm near Montevideo. The system determines the equivalent TRV for different height using LIDAR distance measurements and adapts the amount of broth sprayed by each of the 12 nozzles independently to reduce waste. A PWM based flow control that is easily installed in existing sprayers was designed and measured. The LIDAR system was tested in several weather conditions, and works in all cases, and final testing require several planting seasons.

#### REFERENCES

- [1] P. Fede, K. Elissa, "Pulverizadora H3O", [online] Available: <http://www.fedepulverizadores.com>
- [2] Andrew A. Chesworth, Jeremy Huddleston, "Precision optical components for lidar systems developed for autonomous vehicles," Proc. SPIE 10561, Next-Generation Optical Communication: Components, Sub-Systems, and Systems VII, 105610J (January 2018)
- [3] M. Miguez, R. Deleón, G. Vicente and R. Zoppolo, "Real Time Tree Row Volume Estimation for Efficient Application of Phytosanitary Products in Fruit Trees," *2019 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, Sapporo, Japan, 2019, pp. 1-3.
- [4] Llorens, Jordi; Gil, Emilio; Llop, Jordi; Escolà, Alexandre. 2011. "Ultrasonic and LIDAR Sensors for Electronic Canopy Characterization in Vineyards: Advances to Improve Pesticide Application Methods." *Sensors* 11, no. 2: 2177-2194.
- [5] Llop, Jordi; Gil, Emilio; Llorens, Jordi; Miranda-Fuentes, Antonio; Gallart, Montserrat. 2016. "Testing the Suitability of a Terrestrial 2D LiDAR Scanner for Canopy Characterization of Greenhouse Tomato Crops." *Sensors* 16, no. 9: 1435.
- [6] Datasheet available in: <http://en.benewake.com/>
- [7] Datasheet available in: <https://www.raspberrypi.org/>
- [8] Datasheet available in: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>