



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE
DURANGO**

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DEL VALLE
DEL GUADIANA**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E
INVESTIGACIÓN**



**“Dispositivo de medición de variables físicas en
el ensilaje de maíz.”**

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestría en Ingeniería

Presenta:

David Orlando Romero Soto

Director de tesis:

Mérit Cisneros González

Co-Director:

Darío Cisneros Arreola

Durango, Dgo. México, abril, 2023.





**Dispositivo de medición de variables físicas en
el ensilaje de maíz.**

Presenta:

Ing. David Orlando Romero Soto

COMITÉ TUTORIAL

Dr. Mérit Cisneros González Director	 Firma
M.C. Darío Cisneros Arreola Codirector	 Firma
Dr. Manuel Ismael Mata Escobedo Asesor	 Firma
Dr. Aurelio Castillo Liñán Asesor	 Firma

M.C. Norma Alicia García Vidaña

Coordinadora del programa de la Maestría en
Ingeniería.

M.C. Adriana Eréndira Murillo

Jefa de la División de Estudios de Posgrado
e Investigación

Durango, Dgo. México

abril de 2023





TÍTULO DE LA TESIS:

**“DISPOSITIVO DE MEDICIÓN DE VARIABLES FÍSICAS EN EL ENSILAJE DE
MAÍZ.”**

Por

Ing. David Orlando Romero Soto

COMITÉ TUTORIAL

DIRECTOR DE TESIS

Dra. Mérit Cisneros González

ASESORES

M.C. Darío Cisneros Arreola

Dr. Manuel Ismael Mata Escobedo

M.C. Aurelio Castillo Liñán





Victoria de Durango, Dgo., a **23 / Mayo / 2023.**

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
DEPI / C / 164 / 23.

ASUNTO: Autorización de Tema de Tesis de Maestría.

C. DAVID ORLANDO ROMERO SOTO
No. DE CONTROL G11041066
P R E S E N T E .

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

“Dispositivo de medición de variables físicas en el ensilaje de maíz”

CONTENIDO:

	RESUMEN
CAPÍTULO I	INTRODUCCIÓN
CAPÍTULO II	MARCO TEÓRICO
CAPÍTULO III	METODOLOGÍA
CAPÍTULO IV	RESULTADOS
CAPÍTULO V	RESOLUCIÓN
	ANEXOS
	BIBLIOGRAFÍA

ATENTAMENTE.

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

C. ADRIANA ERÉNDIRA MURILLO
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN



AEM/ammc.



Punto de Inicio: 2012.12.31
Punto de Última Actualización: 2012.12.31
Punto de Terminación: 2012.12.31
RS/CE/ST





Victoria de Durango, Dgo., a **23 / Mayo / 2023.**

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
DEPI / C / 165 / 23.

ASUNTO: Autorización de Impresión de Tesis de Maestría.

C. DAVID ORLANDO ROMERO SOTO
No. DE CONTROL G11041066
PRESENTE.

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

"Análisis de la dinámica de la vida de anaquel de microorganismos en leche fermentada"

Sin otro particular de momento, quedo de Usted.

ATENTAMENTE.

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

C. ADRIANA ERÉNDIRA MURILLO
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN



AEM'ammc.





AGRADECIMIENTOS

Por medio de la presente, hago constar mis agradecimientos a quienes hicieron posible la realización de este trabajo.

A Dios por permitirme llegar hasta este punto de mi vida profesional y personal.

Al Tecnológico Nacional de México en sus sedes el Instituto Tecnológico de Durango y el Instituto Tecnológico del Valle del Guadiana como al CONACYT por proporcionarme la infraestructura y medios materiales para mi desarrollo profesional en pro del desarrollo científico, tecnológico y social.

A mis maestros de posgrado y comité tutorial que son base sólida de este trabajo, por su dedicación en el área agroindustrial me abrieron camino para poder desarrollar nuevos conocimientos y aplicar los que ya tenía en un área nueva para mí y que se ha convertido en una pasión, particularmente un agradecimiento a mi directora de tesis, la Dra. Mérit Cisneros González por todo su apoyo y guía a lo largo de estos años.

A mi familia, mi madre María por su comprensión y constancia, a mi padre José por su arduo trabajo y apoyo, a mi hermano David por la orientación y a mi novia Idalia por su apoyo, paciencia y palabras de ánimo.

A todos, muchas gracias.



Resumen

El presente proyecto presenta el desarrollo y prueba de un dispositivo capaz de obtener mediciones de variables físicas dentro de un silo de maíz (*Zea Mays*). Las variables que fueron propuestas a medir son: temperatura, humedad, pH y dióxido de carbono (CO_2). Estas variables se seleccionaron debido a que la revisión bibliográfica destaca estas cuatro como magnitudes que están presentes en el proceso de maduración de un silo. El objetivo del dispositivo fue determinar el comportamiento de estas variables con respecto a las etapas de fermentación del silo y con ello poder compararas con los tiempos de destape del silo. Para la construcción y operación del dispositivo de medición de variables físicas en el maíz se contempló la construcción del prototipo y prueba de diferentes tarjetas de desarrollo electrónicas junto con sensores para encontrar la configuración electrónica adecuada que pueda adaptarse mejor a las condiciones de trabajo que exige un silo, como lo son: la variación en la temperatura, la resistencia mecánica, el contacto constante con polvo y humedad y resistir estas condiciones durante el tiempo que tarda en madurar el maíz forrajero. El dispositivo fue probado en un micro silo por 30 días, recopilando datos de las variables cada 60 minutos arrojando como resultado el indicador de una relación entre la temperatura y el pH, además, por medio de un estudio bromatológico un promedio de proteína cruda del 5.98 % al momento del destape del silo. Se concluyó el desarrollo siendo útil el dispositivo de medición para el monitoreo constante en el proceso de maduración del ensilaje.

Abstract

This project presents the development and testing of a device capable of obtaining measurements of physical variables inside a corn (*Zea Mays*) silo. The variables proposed to be measured are: temperature, humidity, pH and carbon dioxide (CO₂). These variables were selected because the literature review highlights these four as magnitudes that are present in the maturation process of a silo. The objective of the device was to determine the behavior of these variables with respect to the fermentation stages of the silo and thus be able to compare them with the silo uncovering times. For the construction and operation of the device for measuring physical variables in corn, the construction of the prototype and testing of different electronic development boards together with sensors was contemplated in order to find the appropriate electronic configuration that could better adapt to the working conditions required by a silo, such as: temperature variation, mechanical resistance, constant contact with dust and humidity, and resist these conditions during the time it takes for the forage corn to mature. The device was tested in a micro silo for 30 days, collecting data on variables every 60 minutes, resulting in the indicator of a relationship between temperature and pH, and also, by means of a bromatological study, an average crude protein of 5.98% at the time of uncovering the silo. The development was concluded and the measuring device was useful for the constant monitoring of the silage maturation process.

Índice general

Resumen	I
Abstract	II
1 Introducción.	1
1.1 Antecedentes.	2
1.2 Justificación.	4
1.3 Objetivos.	7
1.3.1 Objetivo general.	7
1.3.2 Objetivos específicos.	8
1.4 Delimitación.	8
2 Marco Teórico.	9
2.1 Ensilaje.	9
2.1.1 Elaboración del ensilaje de maíz.	9
2.1.2 Etapas de fermentación del ensilaje.	12
2.1.3 Etapa de deterioro aeróbico.	13
2.1.4 Aditivos.	13
2.2 Agricultura de precisión.	14
2.3 Dispositivos electrónicos.	14
2.3.1 Sensores.	15
2.3.2 Sistemas embebidos.	18
3 Metodología.	22
3.1 Materiales.	22

3.2	Desarrollo del proyecto.	23
3.2.1	Programación de elementos electrónicos.	25
3.2.2	Diseño de carcasa.	30
3.3	Prueba de campo.	31
3.3.1	Prueba 1: Arduino Nano®.	32
3.3.2	Prueba 2: STM32®.	33
3.3.3	Prueba 3: ESP32®.	36
3.4	Prueba en micro silo.	38
4	Resultados.	41
4.1	Medición de Temperatura.	41
4.2	Medición de Humedad.	42
4.3	Medición de pH.	42
4.4	Medición de CO ₂	43
4.5	Dispositivo de medición.	45
4.6	Análisis bromatológico.	46
4.7	Discusión	46
5	Resolución.	49
5.1	Recomendaciones	49
5.2	Conclusiones	50
[]	Referencias	50
A	Sensor SHT10.	51
B	Sensor pH PH-S RS485.	53
C	Sensor CO ₂ MH-Z16.	55
D	Sensor CO ₂ MG811.	57
E	Datos recolectados.	59
F	Programación de Dispositivo.	75
G	Diagrama de conexión.	88

Índice de tablas

2.1 Especificaciones ArduinoNano®.	19
2.2 Especificaciones STM32F103C8 Blue Pill.	20
2.3 Especificaciones ESP32 WROOM.	21
3.1 Tabla de Materiales.	23
3.2 Resultados 30 días de trabajo con STM32®.	35
3.3 Resultados 30 días de trabajo con ESP32.	37
4.1 Matriz de correlación entre las variables.	43
4.2 Análisis bromatológico.	46

Índice de figuras

1.1	Esquema del dispositivo de medición de variables físicas.	6
2.1	Forraje picado. (<i>Proain, 2020</i>).	11
2.2	Compactado con tractor. (<i>DEKALB, 2020</i>).	11
2.3	Sensor pH PH-S RS485. (<i>Alibaba, 2022</i>).	16
2.4	Sensor pH 3 en 1.	17
2.5	Sensor de CO ₂ MH-Z16.	18
2.6	ArduinoNano®. (<i>Arduino, 2019</i>).	19
2.7	STM32 Blue Pill. (<i>Uelectronics, 2020</i>).	20
2.8	ESP32 Wroom. (<i>TDE, 2022</i>).	21
3.1	Diagrama del dispositivo de medición.	24
3.2	Sensor SHT10®.	25
3.3	Lectura de milivoltios de buffers de pH.	27
3.4	Curva promedio de calibración.	28
3.5	Pantalla OLED 128*64. (<i>AITEXM, 2022</i>).	29
3.6	Dimensiones del dispositivo.	30
3.7	Partes de la carcasa del dispositivo.	31
3.8	Silo de maíz.	32
3.9	Maíz forrajero.	38
3.10	Ensilaje de maíz en bolsa.	39
3.11	Silos de Maíz en Día 0 de Ensilado.	40
3.12	Dispositivo en funcionamiento.	40
4.1	Comportamiento de la Temperatura.	41

4.2	Comportamiento de la Humedad.	42
4.3	Comportamiento del pH.	42
4.4	Comportamiento del CO ₂	43
4.5	Mapa de calor: Correlación entre variables.	44
4.6	Mapa de calor organizado con respecto a la temperatura.	45
4.7	Dispositivo de medición de variables físicas en el ensilaje de maíz.	45

Capítulo 1

Introducción.

Cada vez que se ha enfrentado la humanidad a un problema, la creatividad, el análisis e implementación de técnicas han dado como resultado avances tecnológicos que han resuelto problemas a nivel local como global (Press, 1988). La agricultura y otras técnicas como la ganadería han dado paso a una actividad agroindustrial que busca el desarrollo de la tierra en beneficio de la humanidad de una manera sustentable (Rockström et al., 2017). Por las razones anteriores, el estudio de la agricultura a nivel tecnológico es esencial para mejorar el manejo del producto del campo (King, 2017).

El impacto de la tecnología en el sector agroindustrial se ve reflejado en su producto final, aumentando las ganancias económicas y proveyendo la facilidad a una expansión agrícola (Sánchez & Mendoza, 2019). Uno de los motivos más importantes de utilizar tecnologías digitales en el sector agroindustrial es la generación de datos en tiempo real que permitan una mejor administración de los recursos (Shamin et al., 2019).

Específicamente, en el área de forrajes que es donde compete esta investigación, la tecnología también ha impactado logrando mejorar su rendimiento. Cuando se busca conservar la cosecha por largos periodos de tiempo y que al mismo tiempo mantenga propiedades nutritivas para ser utilizado en consumo pecuario, se ha recurrido comúnmente al proceso de ensilaje. Dicho proceso genera pérdidas mínimas, representando una fuente de alimento hasta un año después de haberse cosechado el forraje.

1.1. Antecedentes.

Para llevar a cabo el ensilado, se utilizan silos que por lo general son estructuras de diferentes formas y tamaños que se adecuan a las necesidades de cada productor (Savoie & Jofriet, 2015). Incluso algunos estudios han mostrado como es que el ensilaje en bolsas plásticas es rentable siempre y cuando no exista permeabilidad en las mismas (Ashbell et al., 2001).

El estudio de aditivos en el ensilaje es frecuentemente analizado debido a los aportes nutricionales que puedan brindar, paralelamente los aditivos de estabilización y estimulantes protegen y ayudan a acelerar el proceso de fermentación, dando lugar a productos mucho más eficientes para su uso agrícola (Kung et al., 2003).

Ante la disposición de los métodos de ensilaje y de aditivos en el ensilaje, la necesidad de comprender cómo se comporta la calidad nutricional se hace notar y por tanto es el momento de comenzar una estandarización de tiempos óptimos de mantener el silo cerrado. Esta etapa es esencial ya que permitirá al ganadero darle alimento de alta calidad nutricional a su ganado y por ende, los subproductos que se obtienen de los animales son en mayor cantidad y mejor calidad nutricional.

Diferentes investigadores (Souza et al., 2022), (Assis et al., 2014), (Burns et al., 2018) han estudiado el ensilaje de maíz a diferentes tiempos de maduración, empíricamente en zonas rurales del Estado de Durango, México, que se maneja pasados los 25 días de haberse montado el ensilaje es el momento óptimo de destape. Por otra parte, los investigadores sugieren que el momento óptimo de destape se debe realizar entre las 8 y 9 semanas después de haberse realizado el ensilaje (Pereira et al., 2015).

También es necesario destacar cómo se comporta el ensilaje cuando se le han agregado

aditivos y los resultados muestran que ciertos aditivos pueden mejorar la calidad del maíz durante largos periodos de fermentación (Mier, 2009)

Un punto importante para grandes granjas bovinas que producen leche, es determinar constantemente las propiedades del ensilaje que se da como alimento a las vacas con el objetivo de tener la mejor calidad de leche y al mismo tiempo en mayor cantidad. Los nutriólogos se encargan de realizar los balances diarios de nutrientes que requieren los rumiantes, pero desafortunadamente por el tiempo que requieren las pruebas de laboratorio resulta poco práctico llevarlas a cabo, por lo que se determinan las raciones diarias por medio de una sola muestra sacada al momento del destape.

Para facilitar el trabajo a los nutriólogos y veterinarios, se han desarrollado dispositivos NIR (near-infrared, infrarrojo cercano por sus siglas en inglés) el cual es un análisis espectral por infrarrojo que es capaz de detectar múltiples variables por medio de un receptor que detecta la longitud de onda del infrarrojo. Las aplicaciones de estos dispositivos son variadas y en el caso de la industria agropecuaria han sido aplicados y estudiados. Sin embargo, se ha demostrado que los dispositivos NIR tienen un desempeño menor a comparación de un equipo de laboratorio. Dicho dispositivo tiene la flexibilidad de realizar pruebas no destructivas del producto y además la posibilidad de tener el análisis en campo, que resulta como la mejor opción para obtener datos en tiempo real (Teixeira et al., 2013).

Actualmente empresas como Dinamic Generale® dedicada al diseño y fabricante de soluciones electrónicas y de sensores en el campo y de análisis NIR, en conjunción con AB Vista® compañía dedicada a la creación de productos y servicios técnicos relacionados a la nutrición animal, han trabajado para el desarrollo y mejora de los NIR portátiles. Esto debido a que es un campo de oportunidad dentro del sector ganadero al proporcionar información de suma importancia en tiempo real acerca del contenido de humedad, almidón, proteína y contenido de fibra en ensilajes (Vista, 2019).

1.2. Justificación.

Tomando en cuenta los antecedentes, se analiza que el impacto de la tecnología en el área agroindustrial es fundamental para un óptimo aprovechamiento de los recursos de la agroindustria. En la actualidad, los datos son esenciales en todas las ramas de la industria y la ciencia, el empleo de estos tiene una finalidad de interpretación estadística. Con esa interpretación de datos se procede a desarrollar conclusiones y decisiones que ayuden en el desarrollo de un proyecto (Barreto-Villanueva, 2012). De hecho, la recolección de datos e interpretación está ligada a la ciencia de datos que busca la automatización en la toma de decisiones y con ello facilitar el trabajo del hombre (Arriagada-Benítez & Arriagada-Benítez, 2020).

En la agroindustria, a la combinación de la recolección de datos, análisis, interpretación y acción de toma de decisiones se le conoce como agricultura de precisión, la cual tiene como objetivo el aprovechar de la manera más eficiente los recursos que se tienen a disposición (Chen et al., 2021). La agricultura de precisión está siendo un tema importante en la actualidad ya que se le ha comparado a lo que las máquinas realizaron con la revolución industrial por lo cual tiene un gran impacto en la producción y aprovechamiento agrícola (Himesh, 2018). Cabe señalar que la agricultura de precisión se apoya fuertemente en la tecnología (Cabrera & Daza, 2016), ejemplo tales como: internet, sistemas GPS, sensores, sistemas de comunicación de radio, software, entre otros. Utilizando tales elementos tecnológicos en un sistema que los comunique entre ellos se logra esta revolución tecnológica en el campo (Liaghat & Balasundram, 2010).

Poniendo el tema de la agricultura de precisión en México, la oficina de Información Científica y Tecnológica para el Congreso de la Unión, encargada de analizar y proporcionar información relevante de ámbito científico, reveló en su Nota INCyTU destaca la necesidad inmediata de realizar recolección de información vital del sector agrario de forma digital utilizando la agricultura de precisión (INCyTU, 2018). Es importante avanzar y aplicar la tecnología en el campo mexicano haciendo que productores puedan acceder a

la misma y beneficiarse de ello.

Siendo más específicos para fines de este proyecto, el dispositivo desarrollado enfocó su implementación en el análisis del maíz forrajero (*Zea Mays*) ya que sus características nutricionales como la cantidad de biomasa que desarrolla son ideales para la alimentación bobina (Khan et al., 2015). Por lo que la aplicación de este dispositivo tiene intereses socio económicos dentro de la región que se desarrolló en Durango, México. Tales intereses atienden a que en Lerdo y Gómez Palacio son dos municipios donde se concentra la mayor producción de maíz forrajero con un valor de producción en el año 2020 de 996,688,310.00 MXN (SIAP, 2020) por lo cual es importante atender con nuevas técnicas y tecnologías las fortalezas regionales.

El proyecto que se presenta en este documento es el diseño y desarrollo de un dispositivo que tenga la función de registrar temperatura, humedad, dióxido de carbono y pH dentro de un silo de maíz. Esto con el fin de determinar cómo interactúan estas variables y sus características al momento de la maduración del ensilaje. Algunos estudios de laboratorio demuestran que hay una interacción entre variables físicas y desarrollo microbiológico en silos de forrajes (Borreani & Tabacco, 2010) y con ello dan como resultado un buen (o mal) aprovechamiento en un ensilado (Koc et al., 2009), de hecho, la temperatura es una variable muy importante en el desarrollo de las bacterias anaerobias (Ferrero et al., 2021). La finalidad de este dispositivo es que sea implementado en ensilaje de forrajes (en este caso, maíz forrajero) para determinar tiempos óptimos de fermentación dentro del silo para su posterior destape.

Gracias a este dispositivo de medición se permitirá la detección de maduración en los silos por medio de la lectura de las variables a medir para un destape en un tiempo adecuado evitando una segunda fermentación producida después del primer destape (Ohmomo et al., 2002). Esto es de suma importancia ya que permite aprovechar de la mejor manera los nutrientes del ensilado. Además de que debido a los materiales con los cuales se plantea su fabricación podrá ser asequible económicamente hablando, ya que como se analizó en los

antecedentes, actualmente hay equipos que pueden detectar la composición de un ensilado por medio de un sistema NIR. Sin embargo, este tipo de dispositivos tienen costos muy elevados para un productor pequeño de ganado. El objetivo de hacerlo económicamente asequible es que la agricultura de precisión sea cada vez más accesible en el campo y de esta manera reducir los costos de producción o aumentar la productividad (Erickson & Fausti, 2021). Una ventaja a destacar es que al presentado en este trabajo no hay un dispositivo similar en el mercado que mida en tiempo real las variables antes mencionadas dentro de un ensilaje. Por este motivo, se abre una nueva puerta a estudios de investigación dentro del área de los ensilados enfocado en la correlación de estas variables para el desarrollo de nueva tecnología o métodos que puedan aplicarse en la agroindustria, una necesidad que México viene arrastrando desde hace años (Negrete, 2017).

Lo esencial es plantear un esquema del funcionamiento del dispositivo y sus partes, para ello se destaca en la Figura 1.1 un desglose general de las partes con las cuales se desarrolló el dispositivo.

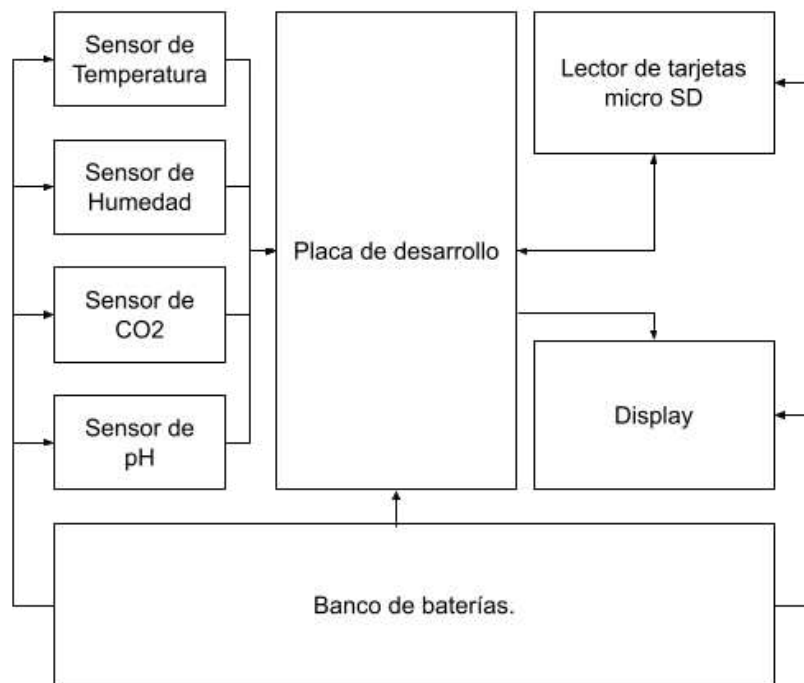


Figura 1.1: Esquema del dispositivo de medición de variables físicas.

Los sensores tomarán mediciones dentro del silo, que serán enviadas a la placa de desarrollo, la cual procesará e interactuará con un lector de tarjetas micro SD, escribiendo los valores en un archivo de texto y al mismo tiempo, se mostrará en un display los valores medidos. Todo esto siendo energizado por un banco de baterías. En cuanto a los sensores seleccionados, las 4 variables presentadas son las que tienen una interacción continua dentro del ensilaje de maíz, en este caso, el CO₂ ha sido muy poco estudiado y por ende se incluye este sensor de medición de dióxido de carbono para comprender el comportamiento de esta variable (en este estudio se analiza la posibilidad de utilizar dos tipos de sensores de CO₂). Con respecto al sensor de pH se opta por dos posibles opciones, un sensor de pH económico y análogo el cual transforma sus señales análogas a digitales por medio de un convertidor análogo-digital y otro sensor de tipo industrial que se comunica vía puerto serie; el objetivo es plantear cual representa ser una mejor opción costo/beneficio.

Al no existir en el mercado un dispositivo similar que tenga estas funciones, se plantea su desarrollo por medio de placas de desarrollo para prototipos ya que son relativamente sencillas de programar y plantean una opción económica para desarrollar un proyecto. Se establecen 3 criterios para la selección de la placa de desarrollo:

- Comunicación I2C y UART para la interacción entre diferentes elementos electrónicos.
- Mínimo 24 pines de comunicación son necesarios, sin embargo, si hay pines extra, puede ser muy útil si se desea expandir las funciones del dispositivo.
- Una programación fácil y sencilla. Posibilidad de ser escalable a un sistema IoT.

1.3. Objetivos.

1.3.1. Objetivo general.

Desarrollar un dispositivo de medición de variables físicas para el ensilaje de maíz.

1.3.2. Objetivos específicos.

- Determinar la placa de desarrollo y los sensores que mejor se adaptan a las necesidades del dispositivo.
- Realizar prototipo del dispositivo.
- Realizar prueba de campo.

1.4. Delimitación.

El desarrollo de este dispositivo propone una nueva forma de obtener variables que puedan tener una correlación con el estado de la maduración del ensilado. Por tanto, el proyecto se limita a la fabricación y prueba del dispositivo por tanto excluye la experimentación rigurosa de diferentes muestras de ensilaje con el fin de desarrollar de la manera óptima esta nueva herramienta de medición y captura de datos.

Capítulo 2

Marco Teórico.

2.1. Ensilaje.

El ensilaje es un método de conservación de alimentos que utiliza un silo, el cual es una estructura que se encarga de mantener aislado el forraje con dos finalidades principales: propiciar una fermentación anaeróbica y mantener el forraje apto para el consumo bobino (Avila & Carvalho, 2020).

Entre los ensilados mas comunes se encuentran los de gramíneas como el *kikuyo* (Boschini-Figueroa & Pineda-Cordero, 2016), el *ryegrass* perenne y el alpiste forrajero (Villalobos et al., 2016); pastos de corte como lo son el sorgo (Morales-Querol et al., 2019), la avena (Condori-Quispe et al., 2019), la cebada (Rojas G. et al., 1997) el maíz y el trigo (Rojas G. & Manríquez B., 2001); leguminosas como la alfalfa (Velázquez-Guerrero et al., 2021) y arbustos como la *leucaena* (Evangelista et al., 2005) o el sauco (Carvajal Salcedo & Cuesta Peralta, 2016). Dependiendo las necesidades de los rumiantes y la región geográfica los productores deciden cual es el forraje a ensilar, o también pueden optar por la combinación de diferentes forrajes (National Academies of Sciences, 2016).

2.1.1. Elaboración del ensilaje de maíz.

Aunque el proceso para ensilar diferentes tipos de forrajes es muy similar en todas sus variedades, son 4 procesos necesarios para la correcta elaboración de un silo de maíz las

cuales son: Cosecha, picado, compactado y el tapado (Morales & Echavarría, 2004).

Cosecha.

La etapa de cosecha como lo indica el INIFAP en su manual se realiza cuando el grano en el maíz presenta una textura lechosa-masosa (Morales & Echavarría, 2004) también la literatura indica que un buen estado del maíz forrajero al momento de ser cosechado es cuando presenta una línea de leche en grano de dos tercios (2/3) (Bal et al., 1997). El momento de corte es el principal medio que determina una buena fermentación del forraje y con ello una buena calidad nutritiva (Castañeda et al., 2006). Estos dos métodos son subjetivos a la percepción, un tercer método eficaz para determinar el momento óptimo de corte es aplicando la determinación de materia seca en el forraje (Zaragoza-Esparza et al., 2019) donde se recomienda un porcentaje de entre el 30 % al 35 % (Goffart, 2011).

Picado.

El tamaño de partícula del forraje es importante para la fermentación y alimentación de los animales rumiantes. En caso de que la partícula picada sea muy pequeña, el animal se verá afectado en el proceso de rumia por un cambio en su pH (Hutjens, 2003). Mientras que, en caso contrario, si se presenta el material picado de un tamaño muy grande provocará defectos en el proceso de compactado del forraje en el silo como una mala compactación que dará lugar a espacios con oxígeno, un elemento indeseado y que afecta a la fermentación del ensilaje (Fernandez, 1999). Por lo tanto, aunque el INIFAP recomienda un tamaño de partícula entre 2 a 5 centímetros (Figura 2.1) , se destaca en la literatura que lo ideal es tener un tamaño menor a 2 centímetros (ARVALIS, 2013).



Figura 2.1: Forraje picado. (*Proain, 2020*).

Compactado.

El objetivo del compactado está muy relacionado con el tapado: evitar la interacción entre el ensilado y el oxígeno. El compactado se realiza por capas aproximadamente de 20 cm y después se apisona con el objetivo de compactar y extraer todo el oxígeno posible que hay entre las partículas del forraje picado (Morales & Echavarría, 2004). Dependiendo del tipo y el tamaño del silo, el apisonado se puede realizar con un tractor (Figura 2.2) en caso de ser un silo grande o con una herramienta apisonadora en caso de ser un silo en bolsa (Nicholson et al., 1991).



Figura 2.2: Compactado con tractor. (*DEKALB, 2020*).

Tapado.

El tapado previene que el oxígeno entre dentro del silo, donde se encuentra el forraje listo para empezar su etapa de fermentación. El tapado se realiza cubriendo el silo con una capa de plástico de polietileno la cual no permite la entrada de agua ni aire. Posteriormente se procede a fijar el plástico al material ensilado utilizando tierra por encima o cualquier cantidad de objetos pesados que eviten el movimiento del plástico protector (Morales & Echavarría, 2004).

Una vez que estos cuatro procedimientos han concluido comienza una etapa de fermentación dentro del silo.

2.1.2. Etapas de fermentación del ensilaje.

El ensilaje debe pasar por 4 etapas que afectan su maduración dentro del silo, estas 4 fases ocurren en un entorno aislado justo cuando se tapa el silo y termina cuando el silo es destapado para alimentar con el ensilaje a los rumiantes. Las características de las etapas se resumen a continuación.

Etapa Aeróbica.

En esta etapa, el oxígeno atrapado dentro del silo es consumido por levaduras y enterobacterias, esta macrobiótica en el ensilaje provoca un aumento en el pH dentro del ensilaje (Guan et al., 2020). Las mediciones en silos han dado valores de hasta 50°C en etapa aeróbica (Forward, 2019).

Etapa de fermentación.

Esta etapa es crucial debido a que el ensilaje comienza a elevar su calidad nutricional. Aquí las bacterias ácido lácticas empiezan a trabajar fomentando un ambiente ácido el cual baja el pH a valores menores de 4.2. Esto beneficia al ensilado ya que genera diferentes componentes como el ácido láctico, proteínas, ácidos grasos, azúcares entre otros (Woolford & Pahlow, 1998). Un dato importante a destacar es que, en este punto, aumenta la concentración de CO₂ por la actividad microbiana (Li et al., 2017).

Etapa de estabilidad.

En esta etapa, hay pocos cambios, al igual que en la etapa de fermentación, el pH sigue bajando hasta entrar en un punto estable y del mismo modo, las bacterias ácido lácticas continúan su reproducción (Ashbell et al., 2002). El ensilado permanecerá aislado hasta que obtenga una óptima cantidad de nutrientes, el tiempo estimado de maduración varía considerablemente dependiendo el estudio. Si bien hay autores que recomiendan un destape del silo entre 69 a 110 días como límite (Robinson & Okatsu, 2019) hay quienes destacan un destape al día número 30 para el mejor aprovechamiento de los nutrientes (Morgan, 2016). Una herramienta muy útil en este punto son los dispositivos NIR, ya que se puede extraer una muestra del silo para determinar la calidad nutritiva del ensilado (Vista, 2019) sin embargo, al realizar la apertura del silo, entra en la cuarta etapa de la fermentación del ensilaje.

2.1.3. Etapa de deterioro aeróbico.

Una vez abierto el silo ocurren varios cambios, como una oxidación de azúcares solubles la pérdida o degradación de ácido láctico, un aumento en la pared celular del ensilado. Cuando existe una exposición aeróbica, algunos microorganismos se vuelven metabólicos activos, empiezan a producir calor y consumir los nutrientes del ensilado; hongos y bacterias antigénicas consumen azúcares residuales y los productos de la fermentación llegando a elevar la temperatura hasta 45°C (Velho et al., 2006). De este punto en adelante empieza un deterioro irreversible en el ensilaje.

2.1.4. Aditivos.

El objetivo de los aditivos es mejorar el rendimiento del forraje ensilado propiciando un mejor desarrollo y mantenimiento de las bacterias ácido lácticas, se centran en cinco categorías: Estimulantes de fermentación, inhibidores de la fermentación, inhibidores por deterioro aeróbico, nutrientes y absorbentes. Estos aditivos pueden ser de origen natural o industrial (Yitbarek & Tamir, 2014).

2.2. Agricultura de precisión.

La agricultura de precisión se concentra en la toma de decisiones tomando como base información recopilada del campo, dando como resultado acciones que afectan directamente a las operaciones de un cultivo (Martí, 2019). Esta práctica nace a mediados de los 80's como una nueva forma de atender el campo según sus necesidades, sin embargo, las nuevas tecnologías han impulsado la escalabilidad de la agricultura de precisión (Robin & Viacheslav, 2010).

Un tema interesante es la investigación el empleo del IoT en el campo ya que se ha hecho una tendencia el implementar diferentes dispositivos para mejorar el rendimiento en la agricultura. Esta tendencia a la automatización en los campos se centra en aplicaciones informáticas de monitoreo de campo, servicios de fumigaciones y la implementación de sensores de diferentes tipos (ejemplo, humedad y temperatura). Todo esto siendo monitorizado desde la comodidad de una computadora y dando la facilidad de detectar deficiencias en campo para tomar acción a corregirlas (Ayaz et al., 2019).

Empresas como AB VISTA son ejemplos de cómo ha ido evolucionando la agricultura de precisión hasta en los ensilajes. *John Deere*® es otro ejemplo de cómo se suma a la agricultura de precisión, usando si sistema *HarvestLab*® Este sistema tiene la capacidad de medir el contenido nutricional de un ensilado y dependiendo de sus valores, reajustar tanto la cantidad de materia cosechada, como el tamaño de picado para mejorar el rendimiento de los posteriores forrajes ensilados y ser una buena fuente de nutrientes de alta calidad para los animales (John, 2022).

2.3. Dispositivos electrónicos.

Los dispositivos son las interfaces las cuales concentran los sensores y algoritmos necesarios para la captura y análisis de datos. Los dispositivos se conforman principalmente en 2 sectores:

- Sensores: Ya sea medidores de temperatura, humedad, CO₂, incidencia solar, pH, presión, entre otros.
- Sistemas embebidos: Los más comunes como lo son Arduino, BeagleBone® , Raspberry® , ESP32® , STM32® , PLC® .

Los sensores se encargan de la recolección de valores de las magnitudes físicas mientras que los sistemas embebidos manipulan estos valores para ser entregados en forma clara y concisa para la toma de decisiones (Soto et al., 2019). La elección del dispositivo dependerá de las necesidades que requiera el proyecto a ser desarrollado.

2.3.1. Sensores.

Temperatura y Humedad.

El sensor en cuestión es el **SHT10®** (véase Apéndice A), un sensor capacitivo de alta precisión que entrega directamente una lectura digital, posee un rango de lectura de -40°C hasta los 123.8°C (Sensirion, 2011). Este tipo de sensores puede venir en diferentes tipos de encapsulados, el más común a encontrar es el sensor encapsulado en acero inoxidable. Es un sensor que es muy utilizado en invernaderos (Mamani et al., 2017) o en cultivos de campo (César et al., 2020). Se destaca también en algunas publicaciones que este sensor tiene un tiempo de estabilización de entre 15 a 40 minutos (Araque et al., 2017).

pH.

El sensor de **pH genérico PH-S RS485** (Figura 2.3) tiene un rango de 0-14 en escala de pH, es un sensor encapsulado IP65 que se comunica por el protocolo MODBUS-RTU PH-S RS485 y en un rango de temperatura operativa de -40°C hasta 83°C (véase Apéndice B). Este sensor por protocolo PH-S RS485 es comúnmente usando combinado con sensores de Nitrógeno, potasio y fósforo en el suelo (Raju & Veeramani, 2020) en proyectos de IoT. Debido a su comunicación es sencillo de programar, sin embargo es necesario la utilización de un circuito integrado MAX485 (Sung et al., 2020).



Figura 2.3: Sensor pH PH-S RS485. (Alibaba, 2022).

Por otro lado, el **Sensor 3 en 1** (Figura 2.4) se muestra como una opción sencilla y económica. Puede detectar humedad, incidencia solar y pH. Sin embargo, tiene la desventaja de que es un sensor análogo sin puertos de comunicación y para lograr una comunicación con este elemento es necesario transformar la señal que emite el sensor con la aplicación de un ADC (conversor análogo - digital). Las señales análogas son señales continuas (caso contrario a las señales digitales las cuales no son continuas). Una vez que la señal es convertida, esta tendrá un valor en cada instante que sea leído por medio del sistema embebido (Tan, 2008). En este sensor, va a ser necesario llevar a cabo una calibración debido a que de fábrica no viene diseñado para su aplicación en un sistema digital, de aquí surge la necesidad de utilizar buffers comerciales de pH para establecer una curva característica con respecto a la lectura en milivoltios que otorga el sensor en cada buffer de pH.



Figura 2.4: Sensor pH 3 en 1.

Dióxido de carbono (CO_2).

MG811 y **MH-Z16** son dos sensores comerciales de CO_2 que presentan rangos diversos de medición por partículas de millón (PPM). El sensor MG811 su principio de funcionamiento es por medio de una celda electrolítica siendo calibrado por medio de una curva de sensibilidad, tiene un rango de medición entre 350 a 10000 ppm y opera en un rango de temperaturas entre los -20°C hasta 50°C (véase Apéndice D). Es importante destacar el rango de temperaturas de trabajo ya que este sensor reacciona y puede variar con temperaturas que no se encuentren dentro del rango de trabajo. Estudios demuestran su viabilidad en análisis en cámaras aisladas de CO_2 (Saptiani et al., 2019) y como un sistema económico para medición de CO_2 dentro de lugares cerrados (Shen, 2014).

En cambio, el sensor industrial MH-Z16 (Figura 2.5) funciona por medio de un sensor de infrarrojo no dispersivo (NDIR) que detecta las partículas de CO_2 en el ambiente (Winsen, 2022b). Con un amplio rango de lectura desde 0ppm hasta 50000ppm y una temperatura de trabajo entre los -10°C hasta 50°C (véase Apéndice C) es una buena opción para emplearse en campo, ya que hay experimentos que puede incluso extrapolarse a un sistema IoT (Ibaseta et al., 2018)

Figura 2.5: Sensor de CO₂ MH-Z16.

2.3.2. Sistemas embebidos.

A un sistema embebido se le caracteriza por ser un sistema electrónico que realiza funciones programadas por medio de un algoritmo (Aguirre & Giraldo, 2014). Comúnmente también se les conoce como tarjetas de desarrollo ya que son tarjetas de circuitos con hardware adecuado para facilitar la experimentación con la misma (Utmel, 2022). El listado a continuación, es una serie de tarjetas de desarrollo que pueden programarse con el framework de Arduino, lo que facilita la programación y la experimentación (Vargas et al., 2015).

Arduino®.

Se promociona como una plataforma de desarrollo de interacción con la tecnología dirigido a un público que abarca desde aficionados, estudiantes y hasta profesionales de la industria. Al ser una tarjeta de desarrollo amigable para programar, representa ser una herramienta viable de trabajo en prototipos para cualquier persona que tenga la disposición de aprender (Arduino, 2022).

Arduino Nano® (Figura 2.6) es una placa compacta con las mismas capacidades de un Arduino Uno® (Arduino (2019)), aunque debido a su tamaño es fácil de utilizar en proyectos de prototipos que dispongan de poco espacio, la Tabla 2.1 muestra las especificaciones del ArduinoNano®.

Tabla 2.1. Especificaciones ArduinoNano®.

Processor	Atmega328P
Architecture	AVR 8-bit RISC
Operating Frequency	16MHz
Operating Voltage	3.3V DC
UART Port	1
SPI Port	1
I2C Port	1
Digital I/O Pins	14
Analog pins	8

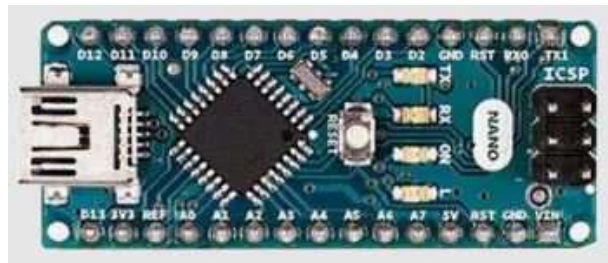


Figura 2.6: ArduinoNano®. (Arduino, 2019).

Una gran ventaja del sistema Arduino® es que al abarcar una gran comunidad del mercado, hay muchos investigadores que han desarrollado sus proyectos en esta plataforma, por lo tanto, es muy sencillo encontrar referencias en las cuales apoyarse para iniciar un proyecto relacionado al estudio de variables físicas (Bhadani & Vashisht, 2019).

STM32®.

STM32® es una amplia gama de microcontroladores de la empresa ST®, la cualidad principal de estos chips es que tienen una arquitectura de 32 bits basada en un procesador ARM Cortex M. Una gran ventaja que ofrece esta arquitectura es la capacidad de tener un rendimiento muy elevado con un funcionamiento de bajo voltaje. Estos microcontroladores tienen el objetivo de servir en proyectos industriales (ST, 2020). Una de sus tarjetas de desarrollo mas populares es la tarjeta STM32F103C8® "Blue Pill"(Figura 2.7).

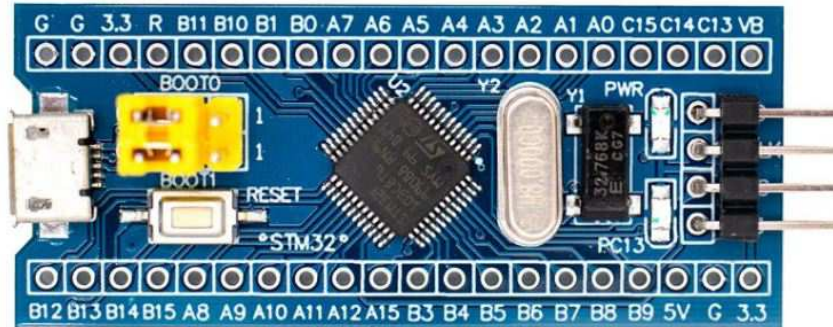


Figura 2.7: STM32 Blue Pill. (*Uelectronics, 2020*).

Las especificaciones de esta tarjeta de desarrollo se pueden ver en la Tabla 2.2 las cuales muestran una capacidad mayor comparando al Arduino Nano®.

Tabla 2.2. Especificaciones STM32F103C8 Blue Pill.

Processor	STM32F103C8T6
Architecture	ARM Cortex-M3 32-bit RISC
Operating Frequency	72MHz
Operating Voltage	5V DC
UART Port	3
SPI Port	2
I2C Port	2
Digital I/O Pins	37
Analog pins	10

Al igual que Arduino®, STM32® tiene entre sus características una alta compatibilidad con dispositivos comerciales y puede utilizarse en sistemas de realización de prototipos relacionados a la medición de variables físicas (Mahadev Prasad & Pushpalatha S, 2020).

ESP32®.

Espressif™, la empresa desarrolladora del ESP32 Wroom® (Figura 2.8) describe a su sistema como una herramienta de bajo consumo para el desarrollo de proyectos de internet de las cosas. Dentro de sus características destacables se encuentran la posibilidad de tener integrada nativa la una antena Wifi y Bluetooth, integración robusta de circuitos, una alta capacidad de configuración y un rango amplio de aplicaciones en proyectos (Espressif, 2022).

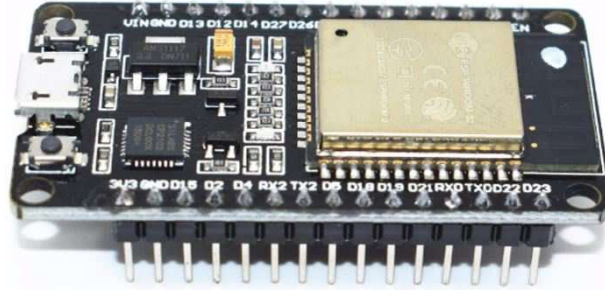


Figura 2.8: ESP32 Wroom. (TDE, 2022).

Las especificaciones del ESP32 se pueden observar en la Tabla 2.3

Tabla 2.3. Especificaciones ESP32 WROOM.

Module interfaces	SD card, UART, SPI, SDIO, I2C, LED PWM, Motor PWM, I2S, IR, pulse counter, GPIO, capacitiva touch sensor, ADC, DAC, Two-Wire Automotive Interface (TWAI}, compatible with IS011898-1 (CAN Specification 2.0)
On-chip sensor	Hallsensor
Integrated crystal	40 MHz crystal
Integrated SPIflash	4 MB
Operating voltage/Power supply	3.0 V 3.6 V
Operating current!	Average: 80 mA
Mínimum current! delivered by power supply	500 mA
Recommended operating ambient temperatura range	-40 °C +85 °C
Package size	18 mm x 25.5 mm x 3.10 mm
Moisture.sensitivity level (MSL)	Level3

Dentro de las aplicaciones de esta placa de desarrollo, se encuentran múltiples proyectos orientados a la comunicación Wifi y Bluetooth (Ali et al., 2019) y también se encuentran proyectos con un enfoque a la medición de variables físicas (Aji Purnomo et al., 2021).

Capítulo 3

Metodología.

3.1. Materiales.

Descrito el proceso de ensilaje y sus etapas en el marco teórico, se resume que entre las diferentes variables que intervienen en la maduración de un silo, se destacan el incremento en el dióxido de carbono mientras se mantiene el proceso anaerobio, la disminución de PH, el aumento de la temperatura y de la humedad. Para recopilar estas variables se requiere el empleo de un *data logger* programado para recopilar las variables durante días, sin la intervención humana. De aquí parte la identidad del prototipo donde se establece la función principal y su utilización en la recolección de datos, la Tabla 3.1 muestra la lista de materiales para la construcción del dispositivo.

Tabla 3.1. Tabla de Materiales.

Tarjetas de desarrollo	Arduino Uno®
	STM32F103C8®
	ESP32 WROOM®
Sensores	SHT10®
	pH PH-S RS485
	3 en 1 PH
	MG811
	MH-Z16
Otros	Powerbank 10000mAh
	Lector SD
	Pantalla LCD
	Memoria SD
	Cable calibre 22
	Buffer PH 9.18, 7, 6.86 y 4.01
	Conector MAX485
	RTC DS3231

3.2. Desarrollo del proyecto.

La metodología con la cual se desarrolló el proyecto consta de cuatro partes o fases:

- **El desarrollo de los prototipos del dispositivo:** Comprende el armado de todos los módulos electrónicos, la programación de las tarjetas de desarrollo, el cableado de sensores y el diseño y construcción de carcasa.
- **Prueba en campo:** Se desarrolla primero utilizando el dispositivo en diferentes ambientes "hostiles"(interacción con altas cantidades de humedad, temperatura y polvo). Y después se usa en un micro silo para evaluar el desempeño realizando lecturas día a día.
- **Retroalimentación:** Después de las pruebas de campo, se determinan los puntos buenos y malos del dispositivo. Se analizan mejores a implementar y se aplican al dispositivo para repetir una prueba de campo; el objetivo es lograr un producto final estable.
- **Implementación en campo:** Se usa el dispositivo con las mejoras implementadas

en el material ensilado desde el "día 0", se procede a recopilar los datos del ensilado y pasados 30 días de operación, se analizan los datos obtenidos.

Para realizar el dispositivo se integró lo mostrado en el diagrama de bloques de la Figura 3.1 en la cual se observa la estructura general del dispositivo y cómo interactúan sus elementos, siendo aplicado este diagrama a las 3 tarjetas de desarrollo seleccionadas para llevar a cabo el proyecto.

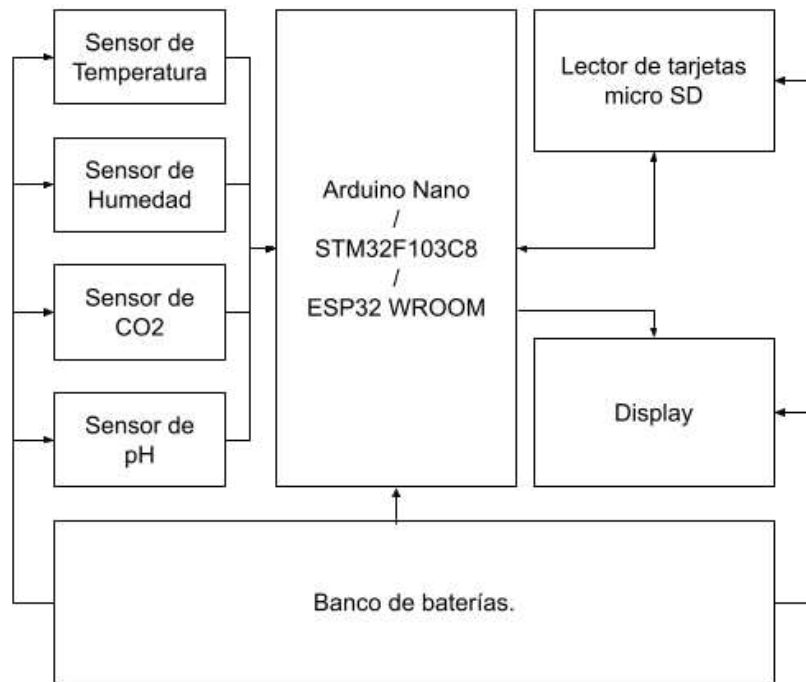


Figura 3.1: Diagrama del dispositivo de medición.

El funcionamiento parte de la tarjeta de control, que se encarga de recibir los datos de los cuatro sensores y tiene una comunicación tanto de lectura y escritura con el módulo SD, lo que permite al programa poder realizar una calibración y recopilación de datos. Todos los elementos son alimentados por un banco de baterías de 10000 mAh que le da un tiempo de trabajo al dispositivo de 4 semanas ininterrumpidas.

3.2.1. Programación de elementos electrónicos.

La programación tuvo como base el material que existe en línea, sin embargo, cada código fue modificado para funcionar en la tarjeta de desarrollo a emplear.

SHT10®.

El SHT10® (Figura 3.2) es un sensor dedicado a la detección de humedad relativa y temperatura. La programación del mismo se hizo por medio de la librería *SHT1x Temperature / Humidity Sensor Library for Arduino* de GitHub (Book, 2022). La programación se tomó como base el código por defecto en la librería antes mencionada.



Figura 3.2: Sensor SHT10®.

pH 3 en 1.

El objetivo es transformar la señal análoga de este sensor a una señal digital, una señal utilizada en los circuitos electrónicos que puede ser interpretada y manipulada según la necesidad. La principal cualidad de una señal digital es que es continua; el valor que tiene esta señal con respecto al tiempo le corresponde un valor alto o uno bajo por cada paso que realice (Tan, 2008). El desarrollo de la programación de este dispositivo se realiza en 4 pasos, la transformación de la señal análoga, el filtrado de la señal análoga convertida a digital, la calibración con buffers de PH, y la programación de los pasos anteriores.

Esta transformación requiere la aplicación de un ADC (Convertidor Analogo-Digital) que tienen las tarjetas de desarrollo, en el caso de Arduino Nano® tiene una tensión de

entre 0 - 1024 por su resolución de 10bits (Jecrespom, 2022), mientras que en el caso de STM32® y ESP32® tienen una tensión de entre 0 - 4096 por su resolución de 12bits (Carrasco & Molera, 2020). La Ecuación 3.1 muestra el valor de la tensión que adquiere con respecto a la entrada en el ADC

$$Voltaje = \left(\frac{ValorADC}{ResolucionADC} \right) * (Vref) \quad (3.1)$$

Donde:

Voltaje= Valor digital del voltaje.

ValorADC= El valor de entrada al ADC.

Resolución ADC= Resolución del ADC (4096: Para STM32 y ESP32, 1024: para Arduino Nano®).

Vref= Voltaje de referencia (3.3v: para STM32 y ESP32, 5v: para Arduino Nano).

El filtro EMA (Exponential Moving Average) o media móvil experimental es el seleccionado para realizar una estabilidad en la señal que se vaya a obtener, gracias a este filtro se tiene una señal fidedigna ya que le da mayor importancia a los datos recientes del sensor que son capturados (Kumar et al., 2020). La Ecuación 3.2 muestra el filtro EMA.

$$A_n = (\alpha * M) + [(1 - \alpha) * A_{(n-1)}] \quad (3.2)$$

Donde:

A_n = La señal filtrada.

A_{n-1} = El valor filtrado anterior.

M= El valor captado por el sensor.

α = Factor de 0 a 1.

La calibración del sensor se realiza de la siguiente manera:

- Se desmonta el sensor y se puentea en el multímetro los polos positivo y negativo del sensor respectivamente
- Se somete el sensor a 4 buffers de pH (9.18, 7, 6.86 y 4.0).
- Se anotan las lecturas de los milivoltios generados en el sensor en cada buffer de pH y se comparó el buffer de pH con la escala del sensor (Figura 3.3)
- Se repite este procedimiento varias veces para obtener un patrón de repetibilidad.



Figura 3.3: Lectura de milivoltios de buffers de pH.

De esta calibración se obtiene la curva característica de la Figura 3.4 la cual nos refleja su ecuación y también un $R = 0.97$.

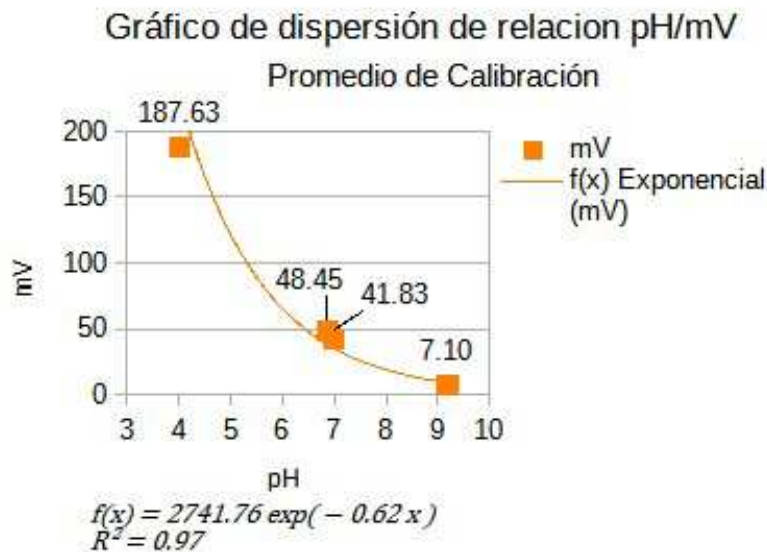


Figura 3.4: Curva promedio de calibración.

Una vez que se obtiene la curva característica promedio se procede a la programación del sensor.

PH-S RS485.

El sensor de pH PH-S RS485 presenta una calibración de fabrica la cual se valida siguiendo un protocolo de comunicación tipo serie, sin embargo, es necesario utilizar un conversor TTL - MAX485 para establecer una comunicación entre el sensor y la tarjeta de desarrollo a usar (How To Electronics, 2021).

MH Z16.

En cuanto al sensor de CO₂ MH Z16 comparte la misma característica de comunicación de tipo serie que el sensor de pH PH-S RS485 dando paso a una calibración y validación por medio de comandos de pregunta-respuesta desde la tarjeta de desarrollo hasta el sensor (Studio, 2021). Este sensor no requiere el conversor TTL - MAX485 que usa el sensor de pH antes mencionado.

MG811.

Este sensor funciona por medio de una correlación entre voltaje generado y cantidad de CO₂ en el ambiente (véase Figura 2 del Anexo D), el voltaje va a disminuir conforme la concentración de CO₂ aumente, por tanto es necesaria la programación de este comportamiento (Sandbox, 2014).

Pantalla OLED.

Las pantallas OLED (Figura 3.5) han estado tomando relevancia en prototipos y productos finales debido a que ofrecen una gran calidad de imagen, alto brillo, amplio ángulo de visión, rápido tiempo de respuesta, son delgadas, ligeras, bajo consumo de energía y bajo coste de producción (Koden, 2016). En este proyecto se utilizó la pantalla OLED SSD1306 128*64 siendo programada por medio de las librerías y el ejemplo base de GitHub (Zabala, 2022).

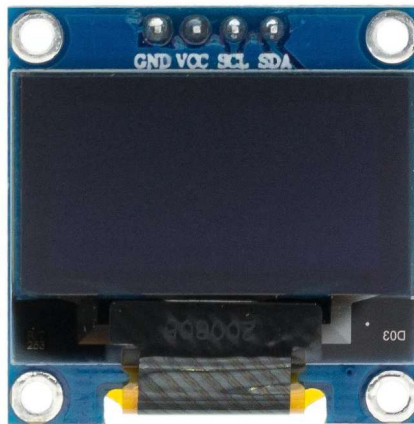


Figura 3.5: Pantalla OLED 128*64. (AITEXM, 2022).

Lector SD.

El dispositivo utilizado para interactuar con la memoria es de la línea Adafruit®. El objetivo es poder almacenar los datos que recolectan los sensores en una memoria micro SD de manera automática, haciendo la función principal de un data logger. El código de programación viene por defecto en el framework de Arduino®.

RTC 3231.

El RTC3231 es un reloj de alta precisión el cual tiene las cualidades de ser un módulo económico, fácil de programar, formato de 24h o 12 horas am/pm y proporciona información en segundos, minutos, horas, días, meses, años por lo que permite un control continuo en el tiempo de los diferentes valores a medir y almacenar. La librería que controla este elemento se encuentra en GitHub (Ayars et al., 2021) junto con el código base de programación.

3.2.2. Diseño de carcasa.

Las dimensiones de la carcasa del dispositivo se encuentran en la Figura 3.6 las cuales cumplen un requisito óptimo para el acomodo de los elementos electrónicos. La carcasa tiene el espacio suficiente para almacenar los diferentes componentes electrónicos, además ya están diseñadas las cavidades donde se instala la pantalla OLED, donde se conectan los sensores, el botón de encendido, separadores entre la tarjeta de desarrollo y el banco de baterías, espacio para ver el nivel de batería, la entrada de corriente al sistema electrónico y la salida de corriente del banco de baterías. En la Figura 3.7 se desglosa las partes de las que consta la carcasa.

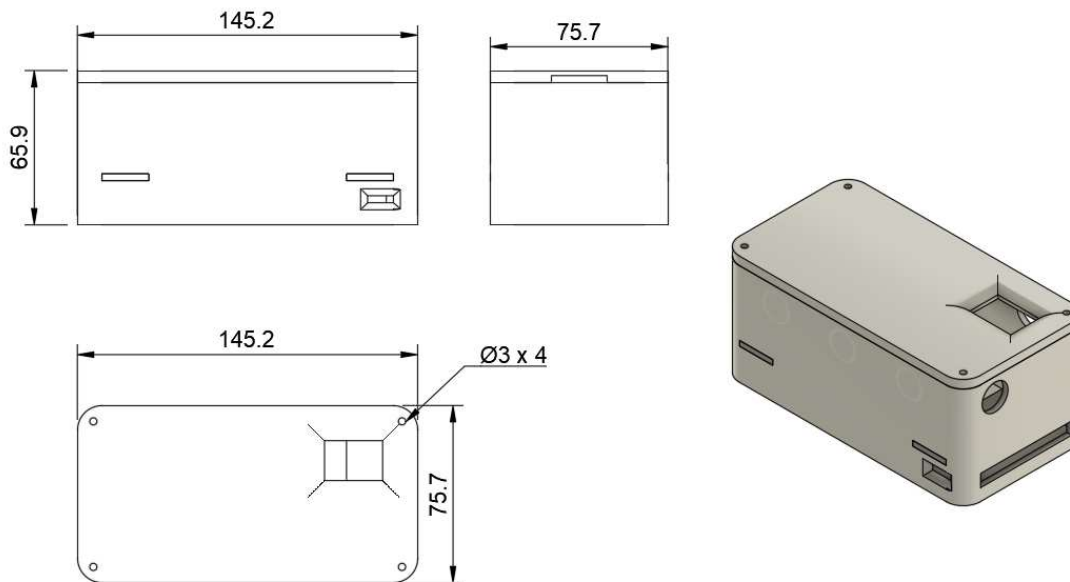
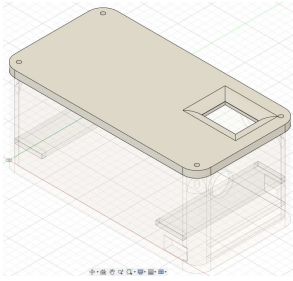
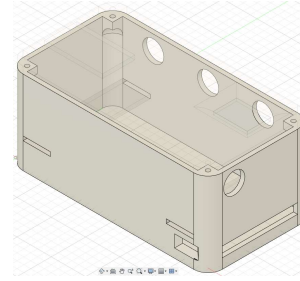


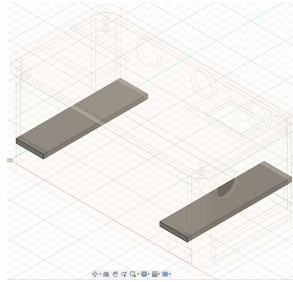
Figura 3.6: Dimensiones del dispositivo.



(a) Tapa de la carcasa.



(b) Estructura de la carcasa.



(c) Separadores de la carcasa.

Figura 3.7: Partes de la carcasa del dispositivo.

3.3. Prueba de campo.

Las pruebas de campo se realizaron en la siguiente secuencia:

1. Prueba en Arduino Nano[®] y después se procede a una retroalimentación.
2. Prueba en STM32[®] y después se procede a una retroalimentación.
3. Prueba en ESP32[®] y después se procede a una retroalimentación.

Una vez realizado el test en cada tarjeta de desarrollo, se obtiene un prototipo final con el cual realizar un experimento desde día 0 del ensilaje de maíz.

Las pruebas se efectuaron en un lapso de 30 días dentro de un silo abierto en bolsa como se observa en la Figura 3.8 en donde los sensores interactúan con la temperatura, humedad, pH y CO₂ de un silo de maíz.



Figura 3.8: Silo de maíz.

En caso de error o fallo, se corta el experimento y entra en etapa de retroalimentación para mejorar el sistema.

3.3.1. Prueba 1: Arduino Nano®.

Primera iteración del proyecto se detectan los siguientes fallos:

- Ligero retraso en la comunicación serial con el sensor de pH y la comunicación con el sensor de CO₂ MH Z16.
- Inestabilidad con el sensor MG 811.
- Mala interpretación de los datos del sensor 3 en 1.

Retroalimentación.

Desglosando los errores, el retraso en la comunicación con el sensor PH-S RS485 y el sensor MH Z16 no presenta un riesgo en el funcionamiento del Arduino en el proyecto

ya que las mediciones no se requieren que sean en un intervalo de tiempo muy corto. En cambio, el sensor MG 811 presenta una inestabilidad considerable. Hay referencias en donde indican que el sensor puede usarse a 5V (Shen, 2014) sin embargo las especificaciones (véase Anexo D) indican un voltaje de operación de 6V. La alimentación por defecto del banco de baterías son 5V por lo tanto se requeriría hacer modificaciones tanto en el suministro de energía y en la carcasa para obtener un aumento de 1V en el dispositivo, sumando a esto que el sensor MG 811 tiende a calentarse a 5V (que se sabe que tanto pueda afectar este aumento de temperatura en un ensilaje de maíz), se descarta la opción de aumentar 1V y se continua su operación a 5V.

Por último, no hubo respuesta del sensor 3 en 1. Aunque entregaba los milivoltios de acuerdo al pH, la cantidad era tan pequeña que la resolución del ADC del Arduino Nano no era lo suficientemente grande para interpretar los valores. Arduino® no podía trabajar este sensor, una solución a esto es diseñar un amplificador de voltaje en cascada (Celis, 2018) pero con la desventaja que quitaría versatilidad al dispositivo ya que se tendría que agregar una nueva fuente de voltaje mayor al banco de baterías, por tanto, aumenta el tamaño del dispositivo, lo hace más completo y para el usuario tendría que tener en cuenta la recarga de dos fuentes de voltaje. Analizados los errores se opta por continuar el estudio con el STM32® debido a su capacidad de sensar valores muy pequeños de voltaje.

3.3.2. Prueba 2: STM32®.

Para la prueba del STM32® se utilizó un Bootloader (HID Bootloader), una función del STM32® que permite ser programado por medio del framework de Arduino® (GitHub, 2022).

Segunda iteración del proyecto el cual dura 29 días en operación que se reflejan en la Tabla 3.2. Se detectan los siguientes fallos:

- El sensor de CO₂ MG 811 presenta inestabilidad.
- El sensor de pH 3 en 1 se congela en el número 8.
- Nula conectividad con el sensor de pH PH-S RS485.

Retroalimentación.

La inestabilidad del sensor de CO₂ MG 811 sigue presente, se observa en el día #8 al día #13 como es que el sensor vuelve a su valor mínimo de rango para después del día #14 al día #17 retomar una lectura de CO₂ y de nuevo del día #18 al día #23 vuelve a su valor mínimo de rango y una vez más continua una medición muy variable. Incluso cambiando el sensor presenta este tipo de variación en cuestión de minutos de trabajo, por tanto, se descarta el uso del sensor MG 811.

En cuanto al pH 3 en 1, pudo operar con esta tarjeta de desarrollo debido a que maneja una resolución mucho mayor que Arduino®), a partir del día 23 hay un salto en el valor congelándose en 8.0, analizándolo se sabe por la curva de calibración que un valor de 0 milivoltios es igual a 8.0 en escala de pH, esto indica un fallo en la conexión del sensor, no está enviando un voltaje. Revisando el sensor se detecta que las puntas del mismo están oxidadas y presentan un gran desgaste. *El sensor es útil en periodos cortos de análisis.*

Por último, el fallo con el sensor de pH PH-S RS485 se dio por problemas de compatibilidad entre el sensor y HID Bootloader ya que no puede establecer una comunicación entre la tarjeta STM32® Blue Pill y el sensor. Al quedarse la tarjeta de desarrollo sin opción para medir pH debido a esta falta de comunicación y el fallo por oxidación en periodos largos del sensor de pH 3 en 1, **se descarta el uso del STM32® blue pill.**

Cabe destacar algo importante en la Tabla 3.2, el silo en que se probó es un silo abierto y por lo tanto las variables físicas demuestran un comportamiento propio de un silo destapado según la literatura analizada en el proceso del ensilaje (temperatura elevada, pérdida de humedad, aumento de pH y un CO₂ inestable por la interacción con el ambiente).

Tabla 3.2. Resultados 30 días de trabajo con STM32®.

Día	Temperatura (°C)	Humedad Relativa	pH	CO ₂ (ppm)
1	50.0	80.0	4.6	975.0
2	50.0	80.0	4.7	986.0
3	49.0	80.0	4.7	800.0
4	51.0	80.0	4.7	998.0
5	50.0	80.0	4.7	759.0
6	46.0	80.0	4.8	526.0
7	45.0	80.0	4.7	623.0
8	48.0	80.0	4.7	400.0
9	47.0	80.0	4.7	400.0
10	46.0	80.0	4.7	400.0
11	39.0	80.0	4.9	400.0
12	42.0	80.0	5.1	400.0
13	40.0	80.0	5.1	400.0
14	36.0	80.0	5.1	695.0
15	35.0	80.0	5.1	655.0
16	36.0	80.0	5.1	788.0
17	36.0	80.0	5.1	912.0
18	36.0	80.0	5.1	400.0
19	36.0	80.0	5.1	400.0
20	32.0	80.0	5.1	400.0
21	35.0	80.0	5.1	400.0
22	30.0	75.0	5.1	400.0
23	31.0	75.0	8.0	400.0
24	30.0	60.0	8.0	566.0
25	31.0	60.0	8.0	899.0
26	28.0	45.0	8.0	556.0
27	29.0	45.0	8.0	785.0
28	30.0	45.0	8.0	456.0
29	28.0	45.0	8.0	400.0
30	30.0	30.0	8.0	697.0

3.3.3. Prueba 3: ESP32®.

En este punto ya se han descartado los sensores MG 811 y pH 3 en 1. Por tanto, la prueba a continuación contempla el uso del MH Z16 y PH-S RS485. La Tabla 3.3 muestra los datos que recopiló el dispositivo.

Retroalimentación.

Analizando la tabla, se observa en las variables que hay una estabilidad en el silo, al estar expuesto al aire se notan características no deseables como lo es un pH elevado, indicando una mala fermentación.

En cuanto al ESP32® funcionó correctamente una vez configurado ya que fue necesario instalar las librerías de la pantalla y del RTC a una versión que soportara ESP32®. La comunicación con los diferentes sensores fue rápida y no presenté fallos en la operación de trabajo. Entre Arduino Nano® y ESP32® logran la función de recopilar las magnitudes físicas, por las posibilidades que ofrece ESP32® como lo es mayor cantidad de pines de conexión, mejor velocidad de trabajo, Wifi y Bluetooth integrado se selecciona ESP32® como la tarjeta a controlar el dispositivo de medición.

Tabla 3.3. Resultados 30 días de trabajo con ESP32.

Dias	Temperatura (°C)	Humedad Relativa	pH	CO ₂ (ppm)
1	25.00	31.00	6.80	1200.00
2	26.00	31.00	6.82	1100.00
3	26.00	31.00	6.82	1154.00
4	24.00	31.00	6.82	989.00
5	23.23	31.00	6.83	1022.00
6	23.30	31.00	6.84	998.00
7	23.39	31.00	6.84	1000.00
8	23.55	31.00	6.85	1025.00
9	23.64	31.00	6.86	988.00
10	23.73	31.00	6.82	997.00
11	23.80	30.00	6.83	982.00
12	23.87	30.00	6.84	1001.00
13	23.92	30.00	6.82	961.00
14	23.97	30.00	6.82	974.00
15	24.01	30.00	6.84	988.00
16	23.95	30.00	6.85	980.00
17	24.05	30.00	6.86	992.00
18	24.07	30.00	6.87	978.00
19	24.07	30.00	6.87	989.00
20	24.08	30.00	6.82	969.00
21	24.14	30.00	6.82	978.00
22	24.12	30.00	6.82	989.00
23	24.16	30.00	6.83	998.00
24	24.25	30.00	6.84	976.00
25	23.87	29.00	6.84	988.00
26	23.92	29.00	6.85	986.00
27	23.97	29.00	6.86	993.00
28	24.01	30.00	6.87	990.00
29	23.95	30.00	6.87	984.00
30	24.05	30.00	6.88	988.00

3.4. Prueba en micro silo.

El micro silo fabricado es en bolsa, este tipo de silo facilita la experimentación por su practicidad. Las características del maíz forrajero a ensilar son las siguientes:

- Fresco recién cortado.
- Picado a 1 centímetro (Figura 3.9a).
- Línea de leche a 2/3 en grano (Figura 3.9b).



(a) Maíz forrajero picado.



(b) Maíz forrajero picado.

Figura 3.9: Maíz forrajero.

La preparación del silo se hizo siguiendo los siguientes pasos:

1. Relleno en capas 10cm de forraje (Figura 3.10a).
2. Compactación del picado de maíz en cada capa.
3. Posicionamiento de sensores al centro del micro silo (Figura 3.10b).
4. Relleno y compactación de espacio del micro silo (Figura 3.10c).

5. Extracción de aire por medio de aspiradora.

6. Encendido de Dispositivo.



(a) Llenado de micro-silo en bolsa.



(b) Posicionamiento de sensores.



(c) Compactado final de micro-silo.

Figura 3.10: Ensilaje de maíz en bolsa.

Se propiciaron las condiciones óptimas para la correcta fermentación del silo, se ubicó

el silo en un lugar seco fuera del alcance de luz solar Figura 3.11 para que continúe la recolección de datos Figura 3.12 sin que el medio ambiente que rodea al silo afecte las mediciones por parte del dispositivo.



Figura 3.11: Silos de Maíz en Día 0 de Ensilado.

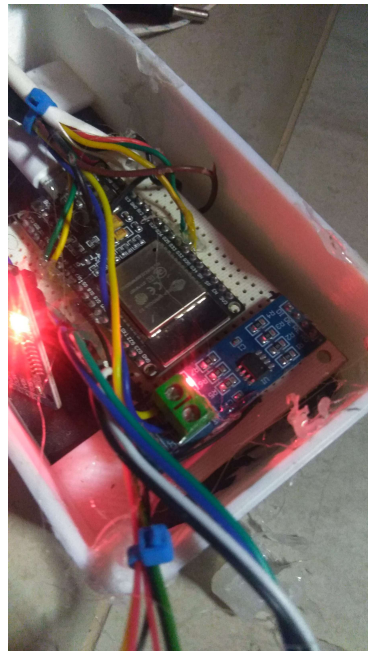


Figura 3.12: Dispositivo en funcionamiento.

Capítulo 4

Resultados.

El proyecto estuvo en operación 716 horas continuas (30 Días). En esa cantidad de horas se extrajeron las siguientes gráficas del comportamiento de la temperatura (Figura 4.1), humedad (Figura 4.2), pH (Figura 4.3) y CO₂ (Figura 4.4) (también véase el Anexo E para ver todos los datos recolectados).

4.1. Medición de Temperatura.

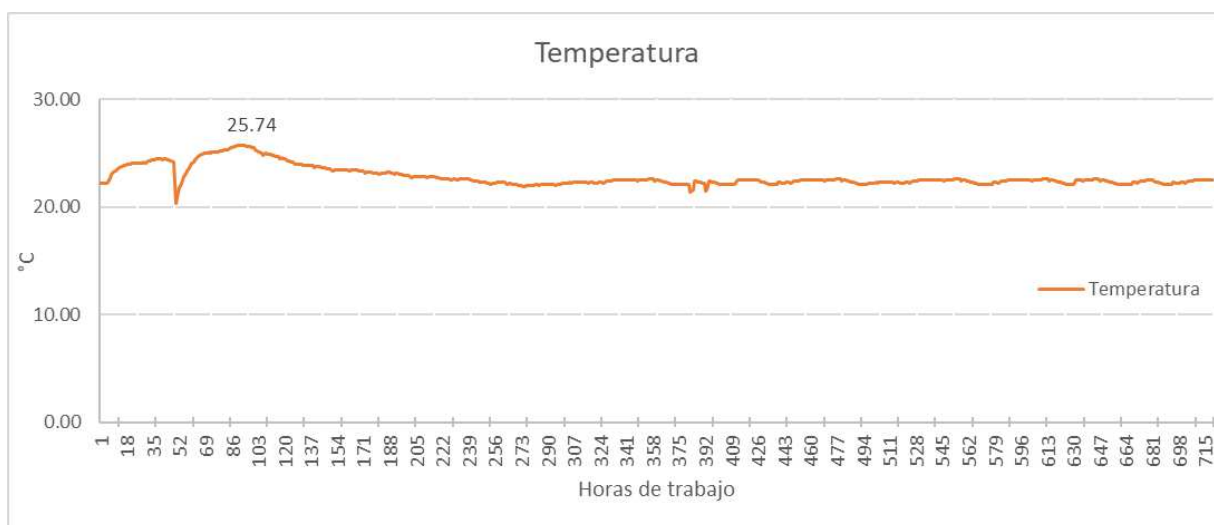


Figura 4.1: Comportamiento de la Temperatura.

4.2. Medición de Humedad.

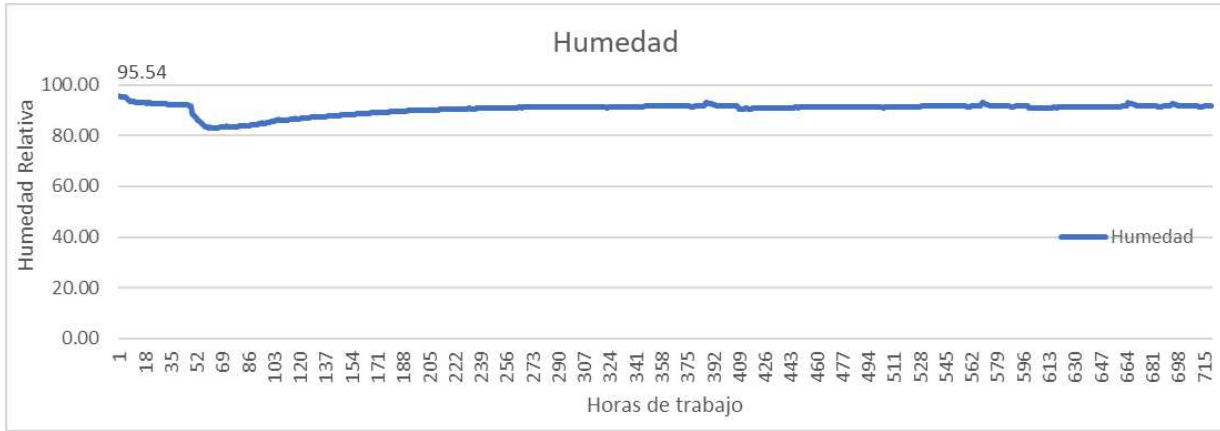


Figura 4.2: Comportamiento de la Humedad.

4.3. Medición de pH.

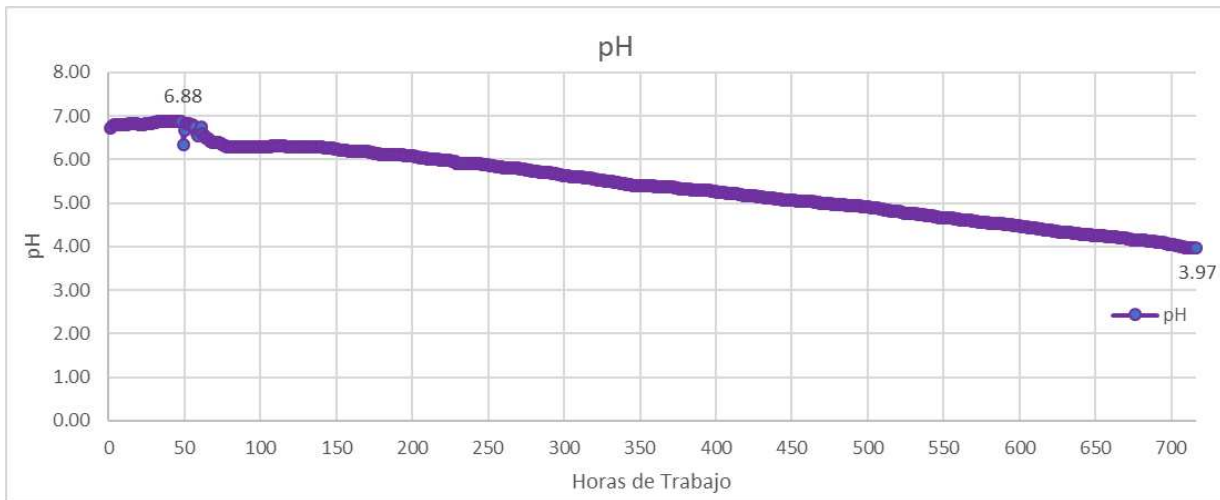


Figura 4.3: Comportamiento del pH.

4.4. Medición de CO₂.

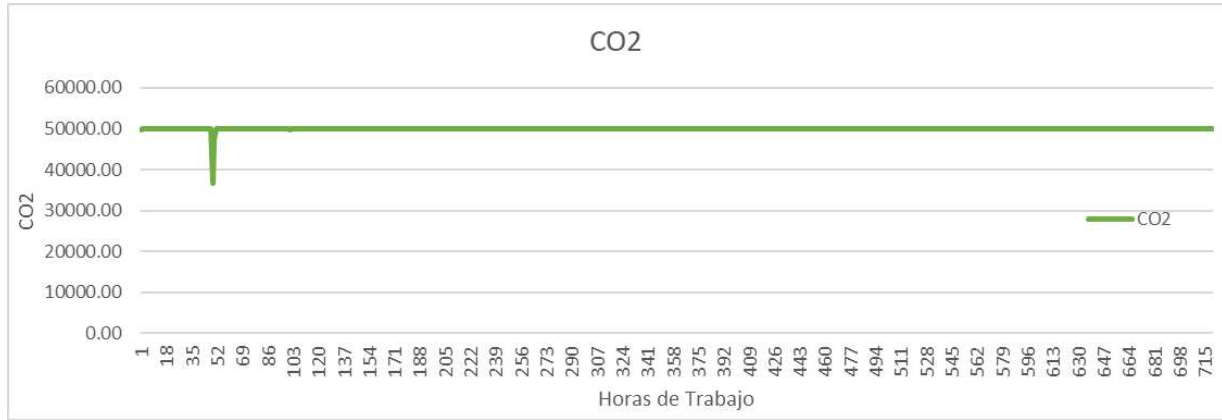


Figura 4.4: Comportamiento del CO₂.

La Tabla 4.1 muestra una matriz de correlación entre las diferentes variables de estudio. Asimismo, se apoya con la Figura 4.5 donde se muestra por mapa de calor la correlación entre las diferentes variables en cuestión.

Tabla 4.1. Matriz de correlación entre las variables.

	Tiempo	Temperatura	Humedad	pH	CO ₂
Tiempo	1	-0.64662338	0.48731247	-0.9971019	0.06853072
Temperatura	-0.64662338	1	-0.73365716	0.62024774	0.04243423
Humedad	0.48731247	-0.73365716	1	-0.4478062	0.03771572
PH	-0.9971019	0.62024774	-0.4478062	1	-0.0557326
CO ₂	0.06853072	0.04243423	0.03771572	-0.0557326	1

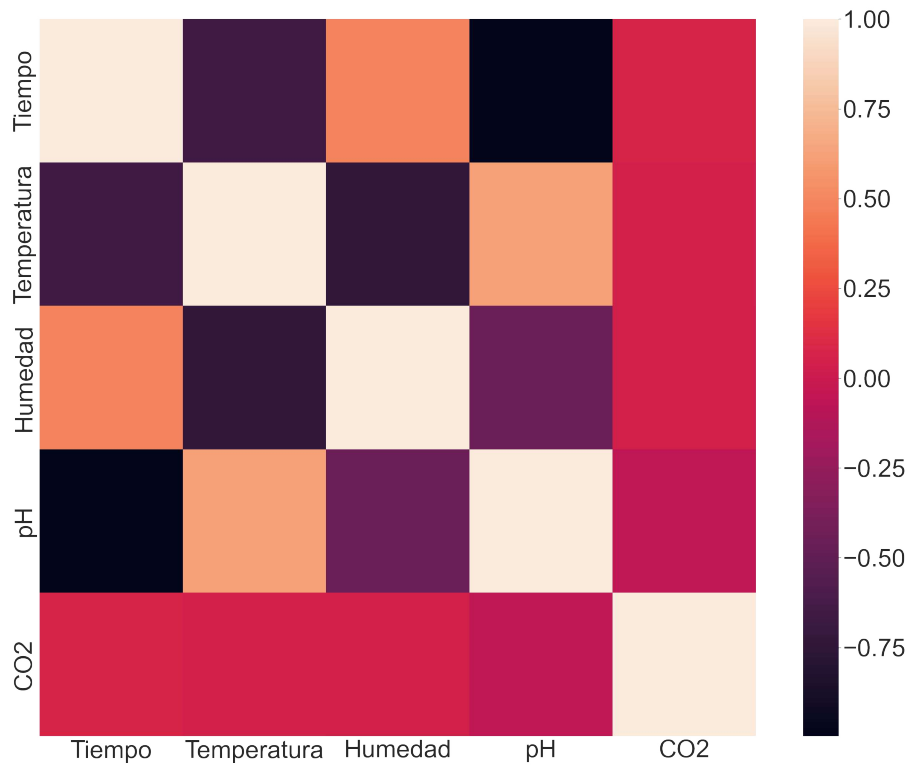


Figura 4.5: Mapa de calor: Correlación entre variables.

Se optó por el análisis entre las variables Temperatura/pH ya que son las que revelaron una mayor correlación (en orden descendente, la temperatura se correlaciona más con: 'pH', 'CO₂', 'Tiempo', 'Humedad') la cual se observa en la Figura 4.6

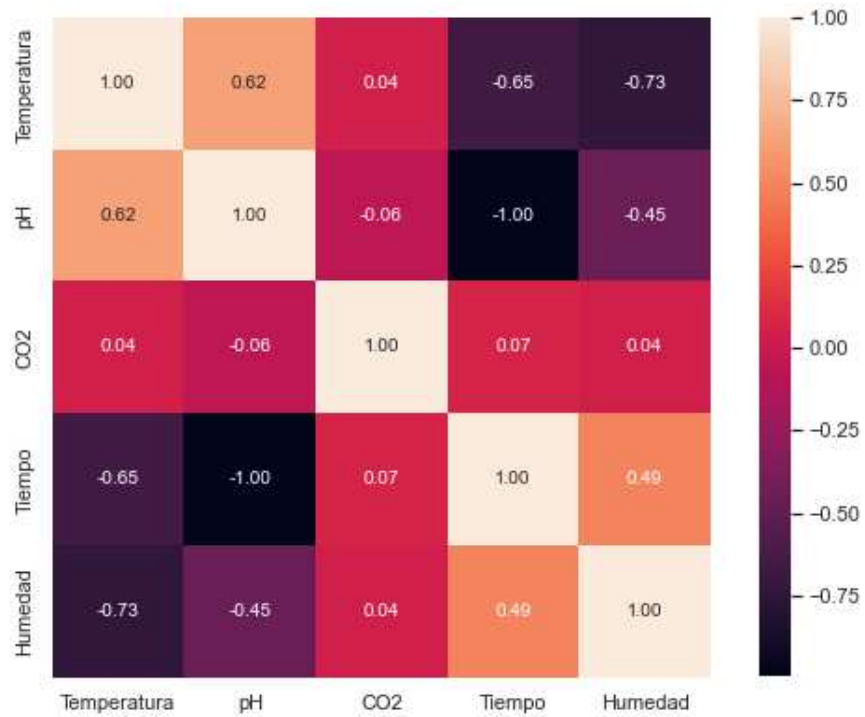


Figura 4.6: Mapa de calor organizado con respecto a la temperatura.

4.5. Dispositivo de medición.

Se tiene como resultado final el dispositivo de medición de variables físicas en la Figura 4.7. La programación y el diagrama de conexión se observa en los Apéndices F y G respectivamente.



Figura 4.7: Dispositivo de medición de variables físicas en el ensilaje de maíz.

4.6. Análisis bromatológico.

Se complementó el desarrollo del proyecto con un análisis bromatológico (Tabla 4.2) para observar la calidad del ensilado al momento del destape.

Tabla 4.2. Análisis bromatológico.

T	pH	%Hum	%Ash	%MO	%N	%PC	%MSt	%PC (BS)	Fat	%EE	%EE (BS)	FDN (BS)
T1	3.67	6.95	6.92	93.08	1.02	6.37	93.05	6.84	0.01	0.98	1.05	70.45
T2	3.71	5.65	5.57	94.43	0.90	5.61	94.35	5.95	0.02	0.98	1.04	69.07
T3	3.93	5.65	5.57	94.40	0.95	5.96	94.40	6.32	0.01	0.98	1.04	68.98

T: Tratamiento. pH: Potencial de Hidrógeno. %Hum: Porcentaje de humedad después de secar las muestras. %Ash: Porcentaje de ceniza. %MO: Porcentaje de materia orgánica. %N: Porcentaje de nitrógeno. %PC: Porcentaje de proteína cruda. %MSt: Porcentaje de materia seca total. %PC(BS) Porcentaje de proteína cruda en base seca. Fat: Grasa. %EE: Porcentaje de extracto etéreo. %EE (BS): Porcentaje de extracto etéreo base seca. FDN: Fibra detergente neutro.

4.7. Discusión

Las gráficas y correlaciones muestran que la temperatura fue casi estable durante el proceso, no hubo un aumento de temperatura considerable en los primeros días. Esto se contrapone con la teoría que describe un aumento en la temperatura (Koc et al., 2009). Tomando en cuenta más referencias, el artículo se ha destacado como es que en los silos de búnker se tiene una temperatura estable de 20°C en el centro del material compactado, mientras que en las orillas del ensilado presenta temperaturas hasta de 54°C (Borreani & Tabacco, 2010). A la hora de compactar silos grandes es normal el uso de maquinaria pesada como un tractor para apisonar las capas, algo a destacar es que las fronteras del silo tienden a ser más difíciles de compactar, por lo cual es normal que queden cavidades grandes donde se concentra el oxígeno.

El dispositivo empezó a recolectar información dentro del micro silo en ausencia de oxígeno, ya que fue extraído el aire con una aspiradora dejando una cantidad mínima de oxígeno reflejado en el pico de temperatura de 25.74°C. Lo que lleva a la conclusión de

que el oxígeno es el responsable de un aumento en la temperatura ya que activa de nuevo organismos aerobios que se encarga de elevar la temperatura; como se analizó en el proceso de fermentación del silo. Incluso Borreani et al. también describe este efecto en donde la temperatura del ensilaje incrementó después de haberse expuesto al aire (Borreani & Tabacco, 2010).

Se detectó en los datos el decrecimiento gradual de pH. Se puede someter a discusión los valores de correlación entre la temperatura y el pH ya que no son significativamente elevados, al ser una prueba controlada en donde se mantuvo una estabilidad en el experimento da como resultado una variación mínima en los valores recolectados. Sin embargo, la teoría mostrada en el marco teórico respalda una interacción entre temperatura/pH y su relación con las bacterias ácido lácticas las cuales se encargan de generar un entorno ácido bajando el pH de aproximadamente a 4.

La gráfica de la humedad presenta una gran estabilidad, esto se debe a que el micro silo no cuenta con un drenaje de líquidos, los cuales se acumulan al fondo del micro silo sin posibilidad de ser extraídos, dando como resultado un ambiente constante de humedad.

En este caso se obtuvo un pH de 3.97 (un valor cercano al obtenido en el análisis bromatológico), un entorno ácido donde la fermentación se lleva a cabo sin problemas sumado a estar con una temperatura controlada, la maduración del silo se logra con éxito.

Por último, el sensor de CO₂ se vio saturado desde un inicio del experimento ya que llegó a su límite de 50 000 ppm desde la primera hora de trabajo, esto indica cantidades mucho mayores del CO₂ dentro de un silo a este valor, por lo tanto, no pudo ser monitorizada esta variable. Aún faltan estudios con respecto a esta variable en concreto ya que es fundamental una reducción de oxígeno y aumento de CO₂ en el proceso de fermentación. A la fecha en que se realizó la prueba del micro silo el sensor MH Z16 era el sensor comercial de más amplio rango que se podía aplicar en el sistema, al día de hoy ya se pueden encontrar sensores con más rango de medición en partículas por millón (Winsen, 2022a).

En cuanto al análisis bromatológico se detectan valores que no se ajustan al estándar marcado por el NRC (NRC, 2001). Destacando el porcentaje de proteína cruda (%PC) donde una media estándar se alza en un 9%, en este estudio se obtiene un máximo de 6.37%. También se detecta un FDN al 70% el cual determina que tan fibroso es el ensilaje, entre mayor cantidad en FDN, el rumiante que consume el material ensilado sentirá saciedad de forma más rápida que con un FDN bajo; esto puede representar un problema ya que no se estaría nutriendo adecuadamente. La posible causa de esta variación con el estándar puede ser la fertilización de la tierra donde creció el maíz o las propiedades de la tierra (Mancipe-Muñoz et al., 2022), posibles errores en el equipo o manejo del laboratorio al realizar el análisis y la humedad excesiva que estuvo presente en todo el proceso de experimentación.

Capítulo 5

Resolución.

5.1. Recomendaciones

Dentro de la última prueba de mediciones, se destacaron varios puntos que pueden implementarse como mejora, de entre ellos el reemplazo de sensor de CO₂ MH Z16 por el sensor MD62 para continuar pruebas de CO₂ con rangos más altos de concentración. También es posible realizar un cambio en la carcasa del sensor SHT10 a una carcasa plástica que se desempeña mejor en ambientes de humedad constante. Además debido a las capacidades del ESP32 es posible escalar el dispositivo con funciones IoT (Molina-Maturano et al., 2021).

Es necesario profundizar más la experimentación tomando en cuenta el control de los factores antes mencionados y también contemplar varios análisis bromatológicos a lo largo del tiempo mientras el dispositivo recolecta datos. Por las condiciones que se presentaron en el desarrollo del proyecto no fue posible analizar la maduración del ensilado de manera constante en laboratorio (es necesario contar con más dispositivos y por ende más tratamientos para analizar cada día, semana o mes dependiendo el diseño del experimento) que reflejen ampliamente de la maduración del ensilaje tomando como base a las variables físicas propuestas a estudio.

5.2. Conclusiones

El dispositivo se desarrolló de manera adecuada de acuerdo a esta última configuración de elementos electrónicos:

- ESP32 como tarjeta de desarrollo.
- SHT10 como sensor de temperatura y humedad.
- PH-S RS485 como sensor de pH.
- MH-Z16 como sensor de CO₂.

Al momento del desarrollo del dispositivo, propone una nueva posibilidad para la experimentación y generación de información en el área agrícola. Las variables físicas tomadas en cuenta para el estudio a 30 días de maduración, excepción del dióxido de carbono, se comportaron de acuerdo a la literatura, por tanto, *el dispositivo es fiable de utilizar para determinar la progresión y maduración del silo.*

La generación de este dispositivo abre las puertas a una nueva forma de análisis aplicándose en diferentes experimentos relacionados a la fermentación del maíz y su calidad (ej. variación de las variables y la calidad nutricional utilizando aditivos en el ensilaje o comparar las variables físicas el maíz cultivado en diferentes tipos de suelo). Queda a consideración del experimentador el aplicar un sensor de CO₂ de mayor rango o incluso de oxígeno para analizar esta variable y su comportamiento.

Appendix.

A. Sensor SHT10.

Sensor Performance

Relative Humidity

Parameter	Condition	min	typ	max	Units
Resolution ¹		0.4	0.05	0.05	%RH
		8	12	12	bit
Accuracy ² SHT10	typical		±4.5		%RH
	maximal	see Figure 2			
Accuracy ² SHT11	typical		±3.0		%RH
	maximal	see Figure 2			
Accuracy ² SHT15	typical		±2.0		%RH
	maximal	see Figure 2			
Repeatability			±0.1		%RH
Replacement		fully interchangeable			
Hysteresis			±1		%RH
Nonlinearity	raw data		±3		%RH
	linearized		<<1		%RH
Response time ³	τ (63%)		8		s
Operating Range		0		100	%RH
Long term drift ⁴	normal		< 0.5		%RH/yr

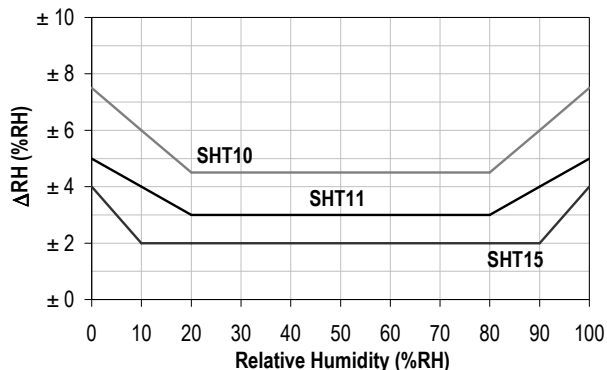


Figure 2: Maximal RH-accuracy at 25°C per sensor type.

Temperature

Parameter	Condition	min	typ	max	Units
Resolution ¹		0.04	0.01	0.01	°C
		12	14	14	bit
Accuracy ² SHT10	typical		±0.5		°C
	maximal	see Figure 3			
Accuracy ² SHT11	typical		±0.4		°C
	maximal	see Figure 3			
Accuracy ² SHT15	typical		±0.3		°C
	maximal	see Figure 3			
Repeatability			±0.1		°C
Replacement		fully interchangeable			
Operating Range		-40		123.8	°C
		-40		254.9	°F
Response Time ⁶	τ (63%)	5		30	s
Long term drift			< 0.04		°C/yr

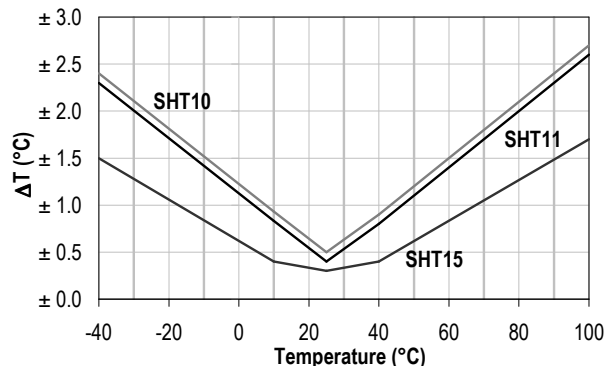


Figure 3: Maximal T-accuracy per sensor type.

Electrical and General Items

Parameter	Condition	min	typ	max	Units
Source Voltage		2.4	3.3	5.5	V
Power Consumption ⁵	sleep		2	5	μW
	measuring		3		mW
	average		150		μW
Communication	digital 2-wire interface, see Communication				
Storage	10 – 50°C (0 – 125°C peak), 20 – 60%RH				

Packaging Information

Sensor Type	Packaging	Quantity	Order Number
SHT10	Tape & Reel	2000	1-100218-04
	Tape & Reel	100	1-100051-04
SHT11	Tape & Reel	400	1-100098-04
	Tape & Reel	2000	1-100524-04
SHT15	Tape & Reel	100	1-100085-04
	Tape & Reel	400	1-100093-04

¹ The default measurement resolution of is 14bit for temperature and 12bit for humidity. It can be reduced to 12/8bit by command to status register.

² Accuracies are tested at Outgoing Quality Control at 25°C (77°F) and 3.3V. Values exclude hysteresis and non-linearity.

³ Time for reaching 63% of a step function, valid at 25°C and 1 m/s airflow.

⁴ Value may be higher in environments with high contents of volatile organic compounds. See Section 1.3 of Users Guide.

⁵ Values for VDD=5.5V at 25°C, average value at one 12bit measurement per second.

⁶ Response time depends on heat capacity of and thermal resistance to sensor substrate.

B. Sensor pH PH-S RS485.

2 Specifications

pH	
Range	0 to 14 pH
Accuracy	± 0.1 pH
Resolution	0.01 pH
General Parameters	
Product Model	S-pH-01
Interface	RS-485
Protocol	MODBUS-RTU RS485
Power Supply	3.6 ~ 30V DC
Current Consumption	Max 6mA @24V DC
IP Rating	IP65
Cable Length	5 meters
Operating Temperature	-40 ~ 85°C
Installation	All buried or probe into all of the measured medium
Device Weight	400g

C. Sensor CO₂ MH-Z16.

MH-Z16 Intelligent Infrared Gas Module

1. Profile:

MH-Z16 NDIR Infrared gas module is a common type, small size sensor, using non-dispersive infrared (NDIR) principle to detect the existence of CO₂ in the air, with good selectivity, non-oxygen dependent and long life. Built-in temperature compensation; and it has digital output and PWM wave output. This common type infrared gas sensor is developed by the tight integration of mature infrared absorbing gas detection technology, precision optical circuit design and superior circuit design.

2. Main features:

- High sensitivity, High resolution, Low power consumption
- Output method: UART, PWM wave &etc
- Quick response, Good stability
- Temperature compensation,
- Excellent linear output
- Long lifespan
- Anti-water vapor interference
- No poisoning



3. Application:

- HVAC equipment • air quality monitoring equipment • fresh air system • air purification equipment
- intelligent home • education system • animal husbandry production • safety protection monitoring

4. Main technical parameters

Model No.	MH-Z16
Detection Gas	CO ₂ gas
Working voltage	4.5 V ~ 5.5V DC
Average current	<85mA
Interface level	3.3 V
Measuring range	0~5%vol range selectable (refer to table2.)
Output signal	UART
	PWM
	Analog output DAC (0.4~2V)
Preheat time	3 mins
Response Time	T ₉₀ < 30s
Working temperature	-10°C ~ 50°C
Working humidity	0~95%RH (no condensation)
Size	97*20*17mm (L*W*H)
Weight	21 g
Lifespan	>5 years

D. Sensor CO₂ MG811.

Specifications y

Symbol	Parameter Name	Technical	Remarks
V_H	Heating Voltage	$6.0 \pm 0.1 \text{ V}$	AC or DC
R_H	Heating Resistor	$30.0 \pm 5\% \leq$	Room Temperature
I_H	Heating Current	@200mA	
P_H	Heating Power	@1200mW	
Tao	Operating Temperature	-20@ 50	
Tas	Storage Temperature	-20@ 70	
? E?M F	Output	30@ 50mV	350@ 10000ppmCO2

Sensitivity y

Figure 2 Shows gas sensor sensitivity curve. y

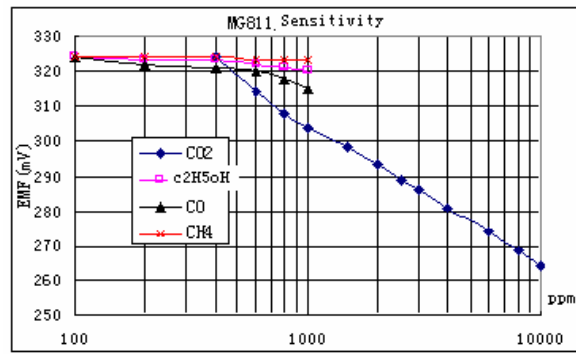
Conditions:

Tem y 28F ~

RHy 65%~

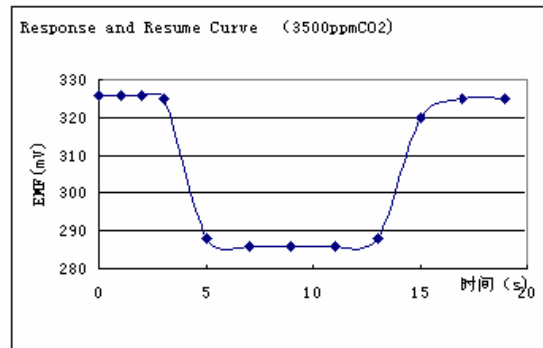
Oxygen y 21%

EMF: sensor EMF under different gas and concentration .

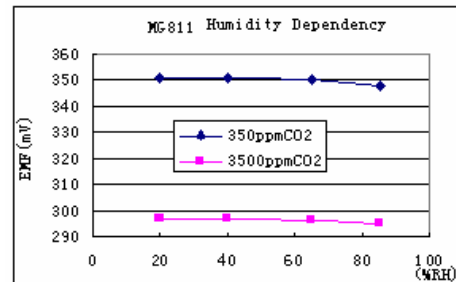
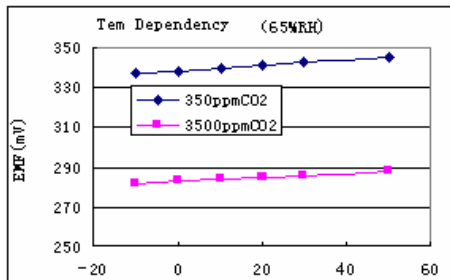


Response and Resume Characteristic

Figure 3 shows Solid electrolyte sensor response and resume characteristics.



Temperature and Humidity Dependency y



E. Datos recolectados.

Horas de trabajo	Temperatura	Humedad	PH	CO2
1	22.22	95.54	6.72	49638.00
2	22.21	95.41	6.74	50000.00
3	22.20	95.30	6.79	50000.00
4	22.21	95.21	6.80	50000.00
5	22.24	95.13	6.80	50000.00
6	22.32	95.05	6.80	50000.00
7	22.73	94.40	6.80	50000.00
8	23.09	93.66	6.80	50000.00
9	23.23	93.40	6.80	50000.00
10	23.30	93.32	6.80	50000.00
11	23.39	93.31	6.80	50000.00
12	23.55	93.09	6.80	50000.00
13	23.64	93.03	6.82	50000.00
14	23.73	92.99	6.82	50000.00
15	23.80	92.96	6.83	50000.00
16	23.87	92.93	6.84	50000.00
17	23.92	92.91	6.82	50000.00
18	23.97	92.88	6.82	50000.00
19	24.01	92.86	6.82	50000.00
20	23.95	93.03	6.81	50000.00
21	24.05	92.86	6.81	50000.00
22	24.07	92.80	6.81	50000.00
23	24.07	92.76	6.81	50000.00
24	24.08	92.73	6.82	50000.00
25	24.08	92.69	6.82	50000.00
26	24.09	92.66	6.82	50000.00
27	24.10	92.63	6.83	50000.00
28	24.12	92.59	6.84	50000.00
29	24.14	92.55	6.84	50000.00
30	24.12	92.61	6.85	50000.00
31	24.17	92.63	6.86	50000.00
32	24.25	92.46	6.87	50000.00
33	24.30	92.41	6.87	50000.00
34	24.35	92.37	6.88	50000.00
35	24.38	92.33	6.88	50000.00
36	24.42	92.30	6.88	50000.00
37	24.45	92.27	6.88	50000.00
38	24.47	92.24	6.88	50000.00
39	24.49	92.22	6.88	50000.00
40	24.49	92.19	6.88	50000.00
41	24.40	92.35	6.88	50000.00
42	24.46	92.19	6.88	50000.00
43	24.44	92.12	6.88	50000.00
44	24.42	92.08	6.87	50000.00
45	24.37	92.05	6.87	50000.00
46	24.32	92.03	6.87	50000.00
47	24.26	91.98	6.87	50000.00
48	24.19	91.96	6.87	50000.00
49	22.22	88.60	6.35	36791.59

INSTITUTO TECNOLÓGICO DEL VALLE DEL GUADIANA



DISPOSITIVO DE MEDICIÓN DE VARIABLES FÍSICAS EN

EL ENSILAJE DE MAÍZ

DAVID ORLANDO ROMERO SOTO

50	20.37	88.05	6.67	47359.84
51	21.40	87.35	6.83	50000.00
52	21.84	86.81	6.83	50000.00
53	22.21	86.26	6.82	50000.00
54	22.53	85.68	6.81	50000.00
55	22.84	85.09	6.80	50000.00
56	23.11	84.51	6.79	50000.00
57	23.38	84.00	6.75	50000.00
58	23.64	83.58	6.59	50000.00
59	23.89	83.26	6.55	50000.00
60	24.10	83.06	6.64	50000.00
61	24.17	83.26	6.75	50000.00
62	24.43	83.02	6.59	50000.00
63	24.57	83.04	6.55	50000.00
64	24.69	83.07	6.50	50000.00
65	24.79	83.12	6.50	50000.00
66	24.88	83.18	6.46	50000.00
67	24.94	83.23	6.42	50000.00
68	24.99	83.28	6.40	50000.00
69	25.03	83.32	6.40	50000.00
70	25.06	83.37	6.40	50000.00
71	25.09	83.41	6.40	50000.00
72	25.00	83.67	6.40	50000.00
73	25.09	83.55	6.39	50000.00
74	25.12	83.52	6.35	50000.00
75	25.14	83.55	6.34	50000.00
76	25.15	83.57	6.31	50000.00
77	25.17	83.60	6.30	50000.00
78	25.19	83.63	6.30	50000.00
79	25.22	83.64	6.30	50000.00
80	25.25	83.67	6.30	50000.00
81	25.30	83.75	6.30	50000.00
82	25.36	83.78	6.30	50000.00
83	25.32	83.96	6.30	50000.00
84	25.43	83.95	6.30	50000.00
85	25.52	83.90	6.30	50000.00
86	25.57	83.95	6.30	50000.00
87	25.62	84.02	6.30	50000.00
88	25.66	84.11	6.30	50000.00
89	25.70	84.20	6.30	50000.00
90	25.72	84.30	6.30	50000.00
91	25.73	84.40	6.30	50000.00
92	25.74	84.50	6.30	50000.00
93	25.74	84.59	6.30	50000.00
94	25.71	84.71	6.30	50000.00
95	25.61	84.97	6.30	50000.00
96	25.67	84.87	6.30	50000.00
97	25.65	84.94	6.30	50000.00
98	25.61	85.02	6.30	50000.00
99	25.56	85.10	6.30	50000.00

INSTITUTO TECNOLÓGICO DEL VALLE DEL GUADIANA



DISPOSITIVO DE MEDICIÓN DE VARIABLES FÍSICAS EN
EL ENSILAJE DE MAÍZ

DAVID ORLANDO ROMERO SOTO

100	25.49	85.20	6.30	50000.00
101	25.30	85.53	6.30	49685.17
102	25.21	85.71	6.30	50000.00
103	25.14	85.82	6.30	50000.00
104	25.08	85.90	6.30	50000.00
105	25.02	85.97	6.30	50000.00
106	24.83	86.30	6.30	50000.00
107	24.99	85.98	6.31	50000.00
108	24.97	86.00	6.31	50000.00
109	24.94	86.04	6.31	50000.00
110	24.90	86.09	6.31	50000.00
111	24.86	86.16	6.31	50000.00
112	24.82	86.22	6.31	50000.00
113	24.79	86.29	6.31	50000.00
114	24.74	86.35	6.31	50000.00
115	24.70	86.42	6.31	50000.00
116	24.66	86.48	6.31	50000.00
117	24.48	86.79	6.30	50000.00
118	24.55	86.63	6.30	50000.00
119	24.51	86.65	6.30	50000.00
120	24.46	86.70	6.30	50000.00
121	24.40	86.75	6.30	50000.00
122	24.34	86.81	6.30	50000.00
123	24.28	86.86	6.30	50000.00
124	24.22	86.92	6.30	50000.00
125	24.17	86.97	6.30	50000.00
126	24.08	87.08	6.30	50000.00
127	23.93	87.34	6.30	50000.00
128	24.01	87.17	6.30	50000.00
129	23.99	87.19	6.30	50000.00
130	23.97	87.23	6.30	50000.00
131	23.94	87.28	6.30	50000.00
132	23.92	87.32	6.30	50000.00
133	23.91	87.37	6.30	50000.00
134	23.90	87.42	6.29	50000.00
135	23.88	87.47	6.29	50000.00
136	23.86	87.52	6.29	50000.00
137	23.85	87.58	6.29	50000.00
138	23.83	87.64	6.29	50000.00
139	23.67	87.97	6.29	50000.00
140	23.79	87.77	6.29	50000.00
141	23.78	87.80	6.29	50000.00
142	23.76	87.85	6.28	50000.00
143	23.73	87.89	6.28	50000.00
144	23.70	87.94	6.27	50000.00
145	23.67	87.99	6.27	50000.00
146	23.63	88.04	6.26	50000.00
147	23.59	88.09	6.26	50000.00
148	23.56	88.14	6.26	50000.00
149	23.53	88.19	6.25	50000.00

INSTITUTO TECNOLÓGICO DEL VALLE DEL GUADIANA



DISPOSITIVO DE MEDICIÓN DE VARIABLES FÍSICAS EN
EL ENSILAJE DE MAÍZ

DAVID ORLANDO ROMERO SOTO

150	23.43	88.35	6.24	50000.00
151	23.38	88.47	6.23	50000.00
152	23.44	88.35	6.22	50000.00
153	23.44	88.37	6.22	50000.00
154	23.43	88.40	6.21	50000.00
155	23.42	88.43	6.21	50000.00
156	23.42	88.47	6.20	50000.00
157	23.42	88.50	6.20	50000.00
158	23.42	88.54	6.20	50000.00
159	23.43	88.58	6.20	50000.00
160	23.44	88.62	6.20	50000.00
161	23.44	88.67	6.20	50000.00
162	23.32	88.90	6.20	50000.00
163	23.41	88.81	6.20	50000.00
164	23.44	88.82	6.20	50000.00
165	23.44	88.85	6.20	50000.00
166	23.43	88.89	6.20	50000.00
167	23.42	88.93	6.19	50000.00
168	23.40	88.97	6.19	50000.00
169	23.38	89.02	6.18	50000.00
170	23.36	89.06	6.18	50000.00
171	23.32	89.10	6.18	50000.00
172	23.17	89.35	6.17	50000.00
173	23.26	89.21	6.16	50000.00
174	23.24	89.22	6.15	50000.00
175	23.22	89.25	6.15	50000.00
176	23.21	89.28	6.13	50000.00
177	23.19	89.30	6.14	50000.00
178	23.18	89.34	6.13	50000.00
179	23.18	89.36	6.12	50000.00
180	23.17	89.39	6.11	50000.00
181	23.07	89.59	6.11	50000.00
182	23.16	89.51	6.10	50000.00
183	23.17	89.50	6.10	50000.00
184	23.18	89.52	6.10	50000.00
185	23.20	89.55	6.10	50000.00
186	23.20	89.58	6.10	50000.00
187	23.20	89.62	6.10	50000.00
188	23.20	89.65	6.10	50000.00
189	23.19	89.69	6.10	50000.00
190	23.18	89.72	6.10	50000.00
191	23.00	90.02	6.10	50000.00
192	23.12	89.83	6.10	50000.00
193	23.11	89.84	6.10	50000.00
194	23.08	89.86	6.10	50000.00
195	23.04	89.88	6.10	50000.00
196	23.01	89.91	6.09	50000.00
197	22.97	89.93	6.09	50000.00
198	22.94	89.96	6.09	50000.00
199	22.92	89.98	6.09	50000.00

INSTITUTO TECNOLÓGICO DEL VALLE DEL GUADIANA



DISPOSITIVO DE MEDICIÓN DE VARIABLES FÍSICAS EN EL ENSILAJE DE MAÍZ

DAVID ORLANDO ROMERO SOTO

200	22.90	90.00	6.08	50000.00
201	22.88	90.02	6.07	50000.00
202	22.77	90.19	6.07	50000.00
203	22.83	90.11	6.06	50000.00
204	22.85	90.09	6.05	50000.00
205	22.86	90.10	6.04	50000.00
206	22.86	90.10	6.03	50000.00
207	22.87	90.12	6.03	50000.00
208	22.88	90.14	6.03	50000.00
209	22.87	90.16	6.02	50000.00
210	22.88	90.19	6.02	50000.00
211	22.88	90.21	6.01	50000.00
212	22.77	90.42	6.00	50000.00
213	22.86	90.30	6.00	50000.00
214	22.86	90.31	6.00	50000.00
215	22.85	90.32	6.00	50000.00
216	22.82	90.34	6.00	50000.00
217	22.79	90.36	6.00	50000.00
218	22.77	90.38	5.99	50000.00
219	22.74	90.40	5.99	50000.00
220	22.71	90.43	5.99	50000.00
221	22.60	90.56	5.99	50000.00
222	22.61	90.56	5.99	50000.00
223	22.62	90.51	5.98	50000.00
224	22.60	90.51	5.97	50000.00
225	22.59	90.52	5.97	50000.00
226	22.58	90.53	5.96	50000.00
227	22.57	90.53	5.96	50000.00
228	22.57	90.54	5.95	50000.00
229	22.58	90.56	5.92	50000.00
230	22.59	90.57	5.91	50000.00
231	22.52	90.68	5.91	50000.00
232	22.55	90.71	5.91	50000.00
233	22.60	90.64	5.91	50000.00
234	22.61	90.64	5.90	50000.00
235	22.61	90.65	5.91	50000.00
236	22.61	90.68	5.90	50000.00
237	22.61	90.70	5.90	50000.00
238	22.60	90.71	5.90	50000.00
239	22.59	90.74	5.90	50000.00
240	22.57	90.75	5.90	50000.00
241	22.54	90.78	5.90	50000.00
242	22.41	90.95	5.90	50000.00
243	22.44	90.88	5.90	50000.00
244	22.42	90.86	5.90	50000.00
245	22.39	90.86	5.90	50000.00
246	22.36	90.86	5.89	50000.00
247	22.33	90.87	5.89	50000.00
248	22.30	90.88	5.88	50000.00
249	22.28	90.89	5.88	50000.00

INSTITUTO TECNOLÓGICO DEL VALLE DEL GUADIANA



DISPOSITIVO DE MEDICIÓN DE VARIABLES FÍSICAS EN
EL ENSILAJE DE MAÍZ

DAVID ORLANDO ROMERO SOTO

250	22.27	90.89	5.87	50000.00
251	22.26	90.89	5.87	50000.00
252	22.26	90.90	5.86	50000.00
253	22.14	91.09	5.86	50000.00
254	22.24	90.96	5.85	50000.00
255	22.25	90.94	5.84	50000.00
256	22.26	90.94	5.84	50000.00
257	22.28	90.95	5.83	50000.00
258	22.28	90.96	5.83	50000.00
259	22.28	90.98	5.82	50000.00
260	22.28	90.99	5.82	50000.00
261	22.28	91.00	5.81	50000.00
262	22.27	91.02	5.80	50000.00
263	22.26	91.04	5.80	50000.00
264	22.13	91.23	5.80	50000.00
265	22.21	91.12	5.80	50000.00
266	22.18	91.11	5.80	50000.00
267	22.16	91.11	5.80	50000.00
268	22.13	91.12	5.80	50000.00
269	22.10	91.12	5.80	50000.00
270	22.07	91.14	5.79	50000.00
271	22.04	91.15	5.79	50000.00
272	22.02	91.15	5.78	50000.00
273	22.01	91.15	5.78	50000.00
274	21.96	91.19	5.77	50000.00
275	21.90	91.31	5.76	50000.00
276	21.97	91.19	5.76	50000.00
277	21.99	91.18	5.76	50000.00
278	22.01	91.17	5.75	50000.00
279	22.03	91.16	5.74	50000.00
280	22.04	91.14	5.73	50000.00
281	22.06	91.15	5.73	50000.00
282	22.08	91.15	5.72	50000.00
283	22.09	91.15	5.72	50000.00
284	22.04	91.19	5.71	50000.00
285	22.07	91.31	5.71	50000.00
286	22.13	91.19	5.70	50000.00
287	22.15	91.18	5.70	50000.00
288	22.16	91.17	5.70	50000.00
289	22.16	91.16	5.70	50000.00
290	22.16	91.16	5.69	50000.00
291	22.15	91.17	5.69	50000.00
292	22.15	91.17	5.69	50000.00
293	22.15	91.19	5.69	50000.00
294	22.15	91.31	5.68	50000.00
295	22.03	91.33	5.67	50000.00
296	22.13	91.15	5.65	50000.00
297	22.14	91.15	5.65	50000.00
298	22.16	91.15	5.65	50000.00
299	22.17	91.19	5.64	50000.00

INSTITUTO TECNOLÓGICO DEL VALLE DEL GUADIANA



DISPOSITIVO DE MEDICIÓN DE VARIABLES FÍSICAS EN
EL ENSILAJE DE MAÍZ

DAVID ORLANDO ROMERO SOTO

300	22.19	91.31	5.63	50000.00
301	22.21	91.19	5.62	50000.00
302	22.23	91.18	5.62	50000.00
303	22.25	91.17	5.62	50000.00
304	22.27	91.16	5.61	50000.00
305	22.19	91.16	5.61	50000.00
306	22.29	91.17	5.61	50000.00
307	22.32	91.17	5.60	50000.00
308	22.33	91.19	5.60	50000.00
309	22.34	91.31	5.60	50000.00
310	22.34	91.33	5.60	50000.00
311	22.35	91.26	5.59	50000.00
312	22.35	91.26	5.59	50000.00
313	22.35	91.27	5.59	50000.00
314	22.34	91.28	5.59	50000.00
315	22.33	91.29	5.58	50000.00
316	22.21	91.29	5.58	50000.00
317	22.28	91.30	5.57	50000.00
318	22.27	91.32	5.57	50000.00
319	22.27	91.33	5.56	50000.00
320	22.26	91.52	5.55	50000.00
321	22.26	91.38	5.54	50000.00
322	22.26	91.11	5.53	50000.00
323	22.27	91.11	5.53	50000.00
324	22.29	91.12	5.52	50000.00
325	22.31	91.12	5.52	50000.00
326	22.24	91.14	5.51	50000.00
327	22.33	91.15	5.51	50000.00
328	22.37	91.15	5.50	50000.00
329	22.40	91.15	5.50	50000.00
330	22.43	91.19	5.50	50000.00
331	22.46	91.31	5.49	50000.00
332	22.48	91.19	5.49	50000.00
333	22.51	91.18	5.48	50000.00
334	22.53	91.17	5.48	50000.00
335	22.53	91.16	5.47	50000.00
336	22.55	91.14	5.47	50000.00
337	22.52	91.15	5.46	50000.00
338	22.48	91.15	5.45	50000.00
339	22.54	91.15	5.45	50000.00
340	22.54	91.19	5.44	50000.00
341	22.53	91.31	5.43	50000.00
342	22.52	91.19	5.43	50000.00
343	22.51	91.18	5.43	50000.00
344	22.50	91.17	5.43	50000.00
345	22.50	91.16	5.41	50000.00
346	22.49	91.16	5.40	50000.00
347	22.50	91.59	5.40	50000.00
348	22.40	91.73	5.40	50000.00
349	22.49	91.62	5.40	50000.00

INSTITUTO TECNOLÓGICO DEL VALLE DEL GUADIANA



DISPOSITIVO DE MEDICIÓN DE VARIABLES FÍSICAS EN
EL ENSILAJE DE MAÍZ

DAVID ORLANDO ROMERO SOTO

350	22.51	91.59	5.40	50000.00
351	22.53	91.58	5.40	50000.00
352	22.54	91.56	5.40	50000.00
353	22.56	91.56	5.40	50000.00
354	22.57	91.56	5.40	50000.00
355	22.58	91.56	5.40	50000.00
356	22.58	91.57	5.39	50000.00
357	22.59	91.57	5.39	50000.00
358	22.58	91.58	5.39	50000.00
359	22.46	91.75	5.39	50000.00
360	22.53	91.64	5.38	50000.00
361	22.51	91.63	5.38	50000.00
362	22.48	91.63	5.38	50000.00
363	22.45	91.63	5.37	50000.00
364	22.40	91.62	5.37	50000.00
365	22.36	91.62	5.38	50000.00
366	22.31	91.62	5.37	50000.00
367	22.27	91.62	5.37	50000.00
368	22.24	91.62	5.37	50000.00
369	22.21	91.61	5.37	50000.00
370	22.07	91.77	5.37	50000.00
371	22.14	91.62	5.37	50000.00
372	22.13	91.60	5.36	50000.00
373	22.13	91.58	5.36	50000.00
374	22.14	91.57	5.35	50000.00
375	22.15	91.56	5.34	50000.00
376	22.14	91.55	5.33	50000.00
377	22.14	91.54	5.33	50000.00
378	22.15	91.53	5.33	50000.00
379	22.16	91.53	5.32	50000.00
380	22.06	91.68	5.32	50000.00
381	22.15	91.57	5.32	50000.00
382	21.36	91.56	5.31	50000.00
383	21.52	91.56	5.31	50000.00
384	21.61	91.56	5.31	50000.00
385	22.45	91.56	5.31	50000.00
386	22.40	91.55	5.30	50000.00
387	22.36	93.12	5.30	50000.00
388	22.31	93.14	5.30	50000.00
389	22.27	92.85	5.29	50000.00
390	22.24	92.67	5.29	50000.00
391	22.21	92.51	5.29	50000.00
392	21.52	92.28	5.29	50000.00
393	21.61	92.16	5.28	50000.00
394	22.45	91.73	5.28	50000.00
395	22.40	91.62	5.28	50000.00
396	22.36	91.59	5.28	50000.00
397	22.31	91.58	5.27	50000.00
398	22.27	91.56	5.26	50000.00
399	22.24	91.56	5.26	50000.00

INSTITUTO TECNOLÓGICO DEL VALLE DEL GUADIANA



DISPOSITIVO DE MEDICIÓN DE VARIABLES FÍSICAS EN
EL ENSILAJE DE MAÍZ

DAVID ORLANDO ROMERO SOTO

400	22.21	91.56	5.26	50000.00
401	22.07	91.56	5.25	50000.00
402	22.14	91.57	5.25	50000.00
403	22.13	91.57	5.24	50000.00
404	22.13	91.58	5.24	50000.00
405	22.14	91.75	5.24	50000.00
406	22.15	91.64	5.24	50000.00
407	22.14	91.63	5.23	50000.00
408	22.14	91.63	5.22	50000.00
409	22.15	90.53	5.22	50000.00
410	22.16	90.54	5.22	50000.00
411	22.06	90.56	5.22	50000.00
412	22.46	90.57	5.21	50000.00
413	22.48	90.68	5.21	50000.00
414	22.51	90.71	5.21	50000.00
415	22.53	90.64	5.20	50000.00
416	22.53	90.64	5.20	50000.00
417	22.55	90.65	5.19	50000.00
418	22.52	90.68	5.18	50000.00
419	22.48	90.70	5.18	50000.00
420	22.54	90.71	5.18	50000.00
421	22.54	90.74	5.17	50000.00
422	22.53	90.75	5.17	50000.00
423	22.52	90.78	5.16	50000.00
424	22.51	90.95	5.16	50000.00
425	22.50	90.88	5.16	50000.00
426	22.50	90.86	5.16	50000.00
427	22.40	90.86	5.15	50000.00
428	22.36	90.86	5.15	50000.00
429	22.31	90.87	5.14	50000.00
430	22.27	90.88	5.14	50000.00
431	22.24	90.89	5.14	50000.00
432	22.21	90.89	5.13	50000.00
433	22.07	90.89	5.12	50000.00
434	22.14	90.90	5.11	50000.00
435	22.13	91.09	5.11	50000.00
436	22.13	90.96	5.11	50000.00
437	22.14	90.94	5.11	50000.00
438	22.15	90.94	5.11	50000.00
439	22.27	90.95	5.10	50000.00
440	22.27	90.96	5.10	50000.00
441	22.26	90.98	5.10	50000.00
442	22.26	90.99	5.09	50000.00
443	22.26	91.00	5.09	50000.00
444	22.27	91.02	5.08	50000.00
445	22.29	91.04	5.08	50000.00
446	22.31	91.23	5.08	50000.00
447	22.24	91.12	5.07	50000.00
448	22.33	91.11	5.07	50000.00
449	22.37	91.11	5.07	50000.00

INSTITUTO TECNOLÓGICO DEL VALLE DEL GUADIANA



DISPOSITIVO DE MEDICIÓN DE VARIABLES FÍSICAS EN EL ENSILAJE DE MAÍZ

DAVID ORLANDO ROMERO SOTO

450	22.40	91.12	5.07	50000.00
451	22.43	91.12	5.06	50000.00
452	22.46	91.14	5.06	50000.00
453	22.48	91.15	5.05	50000.00
454	22.51	91.15	5.05	50000.00
455	22.53	91.15	5.05	50000.00
456	22.53	91.19	5.04	50000.00
457	22.55	91.31	5.05	50000.00
458	22.52	91.19	5.05	50000.00
459	22.48	91.18	5.04	50000.00
460	22.54	91.17	5.03	50000.00
461	22.54	91.16	5.04	50000.00
462	22.53	91.14	5.03	50000.00
463	22.52	91.15	5.03	50000.00
464	22.51	91.15	5.03	50000.00
465	22.50	91.15	5.02	50000.00
466	22.50	91.19	5.02	50000.00
467	22.49	91.31	5.01	50000.00
468	22.50	91.19	5.01	50000.00
469	22.40	91.18	5.00	50000.00
470	22.49	91.17	5.00	50000.00
471	22.51	91.16	5.00	50000.00
472	22.53	91.16	5.00	50000.00
473	22.54	91.17	4.99	50000.00
474	22.56	91.17	4.98	50000.00
475	22.57	91.19	4.99	50000.00
476	22.58	91.31	4.98	50000.00
477	22.58	91.33	4.97	50000.00
478	22.59	91.15	4.97	50000.00
479	22.58	91.15	4.97	50000.00
480	22.46	91.15	4.96	50000.00
481	22.53	91.19	4.97	50000.00
482	22.51	91.31	4.96	50000.00
483	22.48	91.19	4.96	50000.00
484	22.45	91.18	4.96	50000.00
485	22.40	91.17	4.96	50000.00
486	22.36	91.16	4.95	50000.00
487	22.31	91.16	4.95	50000.00
488	22.27	91.17	4.95	50000.00
489	22.24	91.17	4.94	50000.00
490	22.21	91.19	4.94	50000.00
491	22.07	91.31	4.94	50000.00
492	22.14	91.33	4.94	50000.00
493	22.13	91.26	4.94	50000.00
494	22.13	91.26	4.93	50000.00
495	22.14	91.27	4.93	50000.00
496	22.16	91.28	4.92	50000.00
497	22.17	91.29	4.92	50000.00
498	22.19	91.29	4.91	50000.00
499	22.21	91.30	4.91	50000.00

INSTITUTO TECNOLÓGICO DEL VALLE DEL GUADIANA



DISPOSITIVO DE MEDICIÓN DE VARIABLES FÍSICAS EN
EL ENSILAJE DE MAÍZ

DAVID ORLANDO ROMERO SOTO

500	22.23	91.32	4.91	50000.00
501	22.25	91.33	4.91	50000.00
502	22.27	91.52	4.90	50000.00
503	22.19	91.38	4.90	50000.00
504	22.29	91.11	4.90	50000.00
505	22.32	91.11	4.89	50000.00
506	22.33	91.12	4.88	50000.00
507	22.34	91.12	4.88	50000.00
508	22.34	91.14	4.87	50000.00
509	22.35	91.15	4.86	50000.00
510	22.35	91.15	4.86	50000.00
511	22.35	91.15	4.85	50000.00
512	22.34	91.19	4.85	50000.00
513	22.33	91.31	4.84	50000.00
514	22.21	91.19	4.83	50000.00
515	22.28	91.18	4.82	50000.00
516	22.27	91.17	4.82	50000.00
517	22.27	91.16	4.82	50000.00
518	22.26	91.14	4.81	50000.00
519	22.26	91.15	4.80	50000.00
520	22.26	91.15	4.80	50000.00
521	22.27	91.15	4.80	50000.00
522	22.29	91.19	4.79	50000.00
523	22.31	91.31	4.78	50000.00
524	22.24	91.19	4.77	50000.00
525	22.33	91.18	4.77	50000.00
526	22.37	91.17	4.77	50000.00
527	22.40	91.16	4.77	50000.00
528	22.43	91.16	4.77	50000.00
529	22.46	91.59	4.76	50000.00
530	22.48	91.73	4.76	50000.00
531	22.51	91.62	4.75	50000.00
532	22.53	91.59	4.75	50000.00
533	22.53	91.58	4.74	50000.00
534	22.55	91.56	4.74	50000.00
535	22.52	91.56	4.73	50000.00
536	22.48	91.56	4.73	50000.00
537	22.54	91.56	4.73	50000.00
538	22.54	91.57	4.72	50000.00
539	22.53	91.57	4.72	50000.00
540	22.52	91.58	4.71	50000.00
541	22.51	91.75	4.71	50000.00
542	22.50	91.64	4.71	50000.00
543	22.50	91.63	4.70	50000.00
544	22.49	91.63	4.69	50000.00
545	22.50	91.63	4.69	50000.00
546	22.40	91.62	4.68	50000.00
547	22.49	91.62	4.67	50000.00
548	22.51	91.62	4.67	50000.00
549	22.53	91.62	4.67	50000.00

INSTITUTO TECNOLÓGICO DEL VALLE DEL GUADIANA



DISPOSITIVO DE MEDICIÓN DE VARIABLES FÍSICAS EN EL ENSILAJE DE MAÍZ

DAVID ORLANDO ROMERO SOTO

550	22.54	91.62	4.66	50000.00
551	22.56	91.61	4.66	50000.00
552	22.57	91.77	4.65	50000.00
553	22.58	91.62	4.65	50000.00
554	22.58	91.60	4.66	50000.00
555	22.59	91.58	4.66	50000.00
556	22.58	91.57	4.65	50000.00
557	22.46	91.56	4.64	50000.00
558	22.53	91.55	4.64	50000.00
559	22.51	91.54	4.63	50000.00
560	22.48	91.53	4.63	50000.00
561	22.45	91.53	4.62	50000.00
562	22.40	91.68	4.62	50000.00
563	22.36	91.57	4.62	50000.00
564	22.31	91.56	4.61	50000.00
565	22.27	91.56	4.61	50000.00
566	22.24	91.56	4.60	50000.00
567	22.21	91.56	4.60	50000.00
568	22.07	91.55	4.60	50000.00
569	22.14	93.12	4.59	50000.00
570	22.13	93.14	4.58	50000.00
571	22.13	92.51	4.58	50000.00
572	22.14	92.28	4.58	50000.00
573	22.15	92.16	4.57	50000.00
574	22.14	91.73	4.57	50000.00
575	22.14	91.62	4.56	50000.00
576	22.15	91.59	4.56	50000.00
577	22.16	91.58	4.56	50000.00
578	22.27	91.56	4.55	50000.00
579	22.29	91.56	4.55	50000.00
580	22.31	91.56	4.54	50000.00
581	22.24	91.56	4.54	50000.00
582	22.33	91.57	4.54	50000.00
583	22.37	91.57	4.54	50000.00
584	22.40	91.58	4.53	50000.00
585	22.43	91.75	4.53	50000.00
586	22.46	91.64	4.53	50000.00
587	22.48	91.55	4.52	50000.00
588	22.51	91.54	4.52	50000.00
589	22.53	91.53	4.52	50000.00
590	22.53	91.53	4.51	50000.00
591	22.55	91.68	4.51	50000.00
592	22.52	91.57	4.51	50000.00
593	22.48	91.56	4.50	50000.00
594	22.54	91.56	4.50	50000.00
595	22.54	91.56	4.50	50000.00
596	22.53	91.56	4.49	50000.00
597	22.52	91.56	4.49	50000.00
598	22.51	91.56	4.48	50000.00
599	22.50	91.56	4.47	50000.00

INSTITUTO TECNOLÓGICO DEL VALLE DEL GUADIANA



DISPOSITIVO DE MEDICIÓN DE VARIABLES FÍSICAS EN EL ENSILAJE DE MAÍZ

DAVID ORLANDO ROMERO SOTO

600	22.50	90.88	4.47	50000.00
601	22.49	90.89	4.46	50000.00
602	22.50	90.89	4.46	50000.00
603	22.40	90.89	4.45	50000.00
604	22.49	90.90	4.46	50000.00
605	22.51	91.09	4.45	50000.00
606	22.53	90.96	4.44	50000.00
607	22.54	90.94	4.44	50000.00
608	22.56	90.94	4.43	50000.00
609	22.57	90.95	4.42	50000.00
610	22.58	90.96	4.42	50000.00
611	22.58	90.98	4.42	50000.00
612	22.59	90.99	4.41	50000.00
613	22.58	91.00	4.41	50000.00
614	22.46	91.02	4.40	50000.00
615	22.53	91.04	4.40	50000.00
616	22.51	91.23	4.39	50000.00
617	22.48	91.12	4.38	50000.00
618	22.45	91.11	4.37	50000.00
619	22.40	91.11	4.37	50000.00
620	22.36	91.12	4.37	50000.00
621	22.31	91.12	4.37	50000.00
622	22.27	91.14	4.36	50000.00
623	22.24	91.15	4.35	50000.00
624	22.21	91.15	4.35	50000.00
625	22.07	91.15	4.35	50000.00
626	22.14	91.19	4.34	50000.00
627	22.13	91.31	4.34	50000.00
628	22.13	91.19	4.34	50000.00
629	22.14	91.18	4.34	50000.00
630	22.15	91.17	4.33	50000.00
631	22.51	91.16	4.33	50000.00
632	22.50	91.14	4.33	50000.00
633	22.50	91.15	4.32	50000.00
634	22.49	91.15	4.32	50000.00
635	22.50	91.15	4.31	50000.00
636	22.40	91.19	4.30	50000.00
637	22.49	91.31	4.30	50000.00
638	22.51	91.19	4.30	50000.00
639	22.53	91.18	4.30	50000.00
640	22.54	91.17	4.29	50000.00
641	22.56	91.16	4.29	50000.00
642	22.57	91.16	4.28	50000.00
643	22.58	91.17	4.28	50000.00
644	22.58	91.17	4.28	50000.00
645	22.59	91.19	4.27	50000.00
646	22.58	91.31	4.27	50000.00
647	22.46	91.33	4.27	50000.00
648	22.53	91.15	4.26	50000.00
649	22.51	91.15	4.26	50000.00

INSTITUTO TECNOLÓGICO DEL VALLE DEL GUADIANA



DISPOSITIVO DE MEDICIÓN DE VARIABLES FÍSICAS EN
EL ENSILAJE DE MAÍZ

DAVID ORLANDO ROMERO SOTO

650	22.48	91.15	4.26	50000.00
651	22.45	91.19	4.25	50000.00
652	22.40	91.31	4.25	50000.00
653	22.36	91.19	4.25	50000.00
654	22.31	91.18	4.25	50000.00
655	22.27	91.17	4.24	50000.00
656	22.24	91.16	4.24	50000.00
657	22.21	91.16	4.23	50000.00
658	22.07	91.17	4.23	50000.00
659	22.14	91.17	4.23	50000.00
660	22.13	91.19	4.23	50000.00
661	22.13	91.58	4.23	50000.00
662	22.14	91.56	4.22	50000.00
663	22.15	91.56	4.22	50000.00
664	22.14	91.56	4.22	50000.00
665	22.14	93.14	4.21	50000.00
666	22.15	92.85	4.21	50000.00
667	22.16	92.67	4.21	50000.00
668	22.27	92.51	4.20	50000.00
669	22.29	92.28	4.19	50000.00
670	22.31	92.16	4.19	50000.00
671	22.24	91.73	4.18	50000.00
672	22.33	91.62	4.17	50000.00
673	22.37	91.59	4.17	50000.00
674	22.40	91.58	4.16	50000.00
675	22.43	91.56	4.16	50000.00
676	22.46	91.56	4.16	50000.00
677	22.48	91.56	4.15	50000.00
678	22.51	91.56	4.15	50000.00
679	22.53	91.57	4.15	50000.00
680	22.53	91.57	4.14	50000.00
681	22.55	91.58	4.14	50000.00
682	22.40	91.75	4.14	50000.00
683	22.36	91.64	4.14	50000.00
684	22.31	91.55	4.13	50000.00
685	22.27	91.54	4.13	50000.00
686	22.24	91.53	4.13	50000.00
687	22.21	91.53	4.12	50000.00
688	22.07	91.68	4.12	50000.00
689	22.14	91.57	4.12	50000.00
690	22.13	91.56	4.11	50000.00
691	22.13	91.56	4.10	50000.00
692	22.14	91.56	4.10	50000.00
693	22.15	91.56	4.09	50000.00
694	22.27	92.67	4.09	50000.00
695	22.27	92.51	4.09	50000.00
696	22.26	92.28	4.07	50000.00
697	22.26	92.16	4.07	50000.00
698	22.26	91.73	4.06	50000.00
699	22.27	91.62	4.06	50000.00

INSTITUTO TECNOLÓGICO DEL VALLE DEL GUADIANA



DISPOSITIVO DE MEDICIÓN DE VARIABLES FÍSICAS EN
EL ENSILAJE DE MAÍZ

DAVID ORLANDO ROMERO SOTO

700	22.29	91.59	4.06	50000.00
701	22.31	91.58	4.05	50000.00
702	22.24	91.56	4.04	50000.00
703	22.33	91.56	4.03	50000.00
704	22.37	91.56	4.03	50000.00
705	22.40	91.56	4.02	50000.00
706	22.43	91.57	4.01	50000.00
707	22.46	91.57	4.00	50000.00
708	22.48	91.58	3.99	50000.00
709	22.51	91.75	3.98	50000.00
710	22.53	91.64	3.98	50000.00
711	22.53	91.55	3.98	50000.00
712	22.55	91.54	3.97	50000.00
713	22.52	91.53	3.97	50000.00
714	22.48	91.53	3.97	50000.00
715	22.54	91.68	3.97	50000.00
716	22.54	91.57	3.97	50000.00
717	22.53	91.56	3.96	50000.00
718	22.52	91.56	3.96	50000.00
719	22.51	91.56	3.96	50000.00
720	22.50	91.56	3.96	50000.00

INSTITUTO TECNOLÓGICO DEL VALLE DEL GUADIANA



DISPOSITIVO DE MEDICIÓN DE VARIABLES FÍSICAS EN
EL ENSILAJE DE MAÍZ.

DAVID ORLANDO ROMERO SOTO

F. Programación de Dispositivo.

```
// OLED Libraries
#include <ACROBOTIC_SSD1306.h>

// Libraries for CO\textsubscript{2} Sensor & PH
#include <SoftwareSerial.h>
#include <Wire.h>

// Libraries for SD card
#include "FS.h"
#include "SD.h"
#include <SPI.h>

// Libraries for RTC
#include "RTClib.h"

// Libraries for SHT10
#include <SHT1x-ESP.h>

// Config for RTC
RTC_DS3231 rtc;

//Define SHT10 Pins
#define dataPin 0 //green wire
#define clockPin 4 //Yellow wire

//Start the sht10
SHT1x sht1x(dataPin, clockPin);
```



```

// Pins for PH RS485
#define RE 25 // Pin use "DE" MAX485
#define DE 25 // Pin use "RE" MAX485

//Config for PH Sensor
const byte ph[] = {0x01, 0x03, 0x00, 0x00, 0x00, 0x01, 0x84, 0x0A};
byte values [11];
SoftwareSerial mod(16, 17);

//Config for CO\textsubscript{2} Sensor
SoftwareSerial s_serial(33, 32); // TX, RX
#define sensor s_serial

const unsigned char cmd_get_sensor[] =
{
    0xff, 0x01, 0x86, 0x00, 0x00,
    0x00, 0x00, 0x00, 0x79
};

unsigned char dataRevice[9];
int CO\textsubscript{2}PPM;

// Define CS pin for the SD card module
#define SD_CS 5

// Save reading number on RTC memory
RTC_DATA_ATTR int readingID = 0;

String dataMessage;

```

```
String dataMessage2;

// Temperature Sensor variables
float temperature;

// Humidity sensor variables
float humidity;

// PH sensor variables
float soil_ph;

// Define NTP Client to get time
//WiFiUDP ntpUDP;
//NTPClient timeClient(ntpUDP);

// Variables to save date and time
String formattedDate;
String dayStamp;
String timeStamp;

void setup()
{
  Serial.begin(115200);
  Wire.begin();
  oled.init();
  delay(2000);
  sensor.begin(9600);//Start CO\textsubscript{2} serial sensor
  mod.begin(4800);//Start PH serial sensor
  pinMode(RE, OUTPUT);
```

```
pinMode(DE, OUTPUT);

////////RTC CONFIG

    rtc.begin();
rtc.adjust(DateTime(__DATE__, __TIME__));
if (! rtc.begin()) {
Serial.println("Couldn't find RTC");
while (1);
}
if (rtc.lostPower()) {
    // Fijar a fecha y hora de compilacion
    rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));

    // Fijar a fecha y hora específica. En el ejemplo,
    // 21 de Enero de 2016 a las 03:00:00
    // rtc.adjust(DateTime(2016, 1, 21, 3, 0, 0));
}

////////RTC CONFIG*

//////// Initialize SD card
SD.begin(SD_CS);
if(!SD.begin(SD_CS)) {
    Serial.println("Card Mount Failed");
    return;
}

uint8_t cardType = SD.cardType();
```

```

if(cardType == CARD_NONE) {
    Serial.println("No SD card attached");
    return;
}
Serial.println("Initializing SD card...");
if (!SD.begin(SD_CS)) {
    Serial.println("ERROR - SD card initialization failed!");
    return;    // init failed
}

// If the data.csv file doesn't exist
// Create a file on the SD card and write the data labels
File file = SD.open("/data.csv");
if(!file) {
    Serial.println("File doesn't exist");
    Serial.println("Creating file...");
    writeFile(SD, "/data.csv", "Reading ID, Date, Hour,
    Temperature, Humidity, PH, CO2 \r\n");
}
else {
    Serial.println("File already exists");
}
file.close();

////////// Initialize SD card
}

void loop()
{

```

```
getReadingsT();

getReadingsH();

getReadingsPH();

if(getReadingsCO\textsubscript{2}())
{
    Serial.print("  CO\textsubscript{2}: ");
    Serial.print(CO\textsubscript{2}PPM);
    Serial.println("");
}

DateTime now = rtc.now();

logSDCard(now);

oled.setFont(font5x7);
oled.setTextXY(3,0);
oled.putString("Temp: ");
oled.putNumber(temperature);
oled.putString("C  ");
oled.putString("Hum: ");
oled.putNumber(humidity);

oled.setTextXY(4,0);
oled.putString("PH: ");
oled.putNumber(soil_ph);
oled.putString("  ");
oled.putString("CO\textsubscript{2}: ");
oled.putNumber(CO\textsubscript{2}PPM);
```

```
oled.putString("PPM");
//delay(54000);

}

//Function to get temperature
void getReadingsT(){
    float temp_c;
    temp_c = sht1x.readTemperatureC ();
    temperature = temp_c; // Temperature in Celsius
    Serial.println("");
    Serial.println("");
    Serial.println("--- SENSORS READ ---");
    Serial.print("Temperature: ");
    Serial.println(temperature);
}

//Function to get temperature*

// Function to get humidity
void getReadingsH(){
    float hum;
    hum = sht1x.readHumidity();
    humidity = hum; //
    Serial.print("Humidity: ");
    Serial.println(humidity);
}

//Function to get humidity*
```

```
//Function to get PH
void getReadingsPH(){
    byte val;

    digitalWrite(DE, HIGH);
    digitalWrite(RE, HIGH);
    delay(10);

    if (mod.write(ph, sizeof(ph)) == 8)
    {
        digitalWrite(DE, LOW);
        digitalWrite(RE, LOW);
        for (byte i = 0; i < 11; i++)
        {
            values [i] = mod.read();
            Serial.print(values[i],HEX);
        }

        Serial.println();
    }
    soil_ph = float(values[4])/10;
    Serial.print("Valor Ph: ");
    Serial.println(soil_ph, 1);

    delay(3000);
}
// Function to get PH*
```

```
//Function to get CO\textsubscript{2}
bool getReadingsCO\textsubscript{2}(void){
  byte data[9];
  int i = 0;

  //transmit command data
  for(i=0; i<sizeof(cmd_get_sensor); i++)
  {
    sensor.write(cmd_get_sensor[i]);
  }
  Serial.flush();

  //begin reveiceing data
  if(sensor.available())
  {
    while(sensor.available())
    {
      for(int i=0;i<9; i++)
      {
        data[i] = sensor.read();
      }
    }
  }

  for(int j=0; j<9; j++)
  {
    Serial.print(data[j],HEX);
  }
}
```



```
        Serial.print(" ");
    }
    Serial.println("");

    // First calculate then validate the check sum as there is no point in
    proceeding if the packet is corrupted. (code inspired by datasheet
    algorithm)
    byte checksum = 0 ;
    for(int j=1; j<8; j++)
    {
        checksum += data[j];
    }
    checksum=0xff-checksum;
    checksum+=1;

    if (checksum != data[8])
    {
        Serial.println("Error checksum");
        return false;
    }

    // Then check the start byte to make sure response is what we
    were expecting
    if ( data[0] != 0xFF )
    {
        Serial.println("Error start byte");
        return false;
    }

    // Then check the command byte to make sure response is what we
```

```

were expecting
if ( data[1] != 0x86 )
{
    Serial.println("Error command");
    return false;
}

CO\textsubscript{2}PPM = (int)data[2] * 256 + (int)data[3];

return true;
}
// --Function to get CO\textsubscript{2}*

//Write the sensor readings on the SD card
void logSDCard(DateTime date) {
    // Increment readingID on every new reading
    readingID++;
    dataMessage2= String(date.year(),DEC) + "/" + String(date.month(),DEC)
+ "/" + String(date.day(),DEC)+"," + String(date.hour(),DEC) + ":"
+String(date.minute(),DEC) + ":" +String(date.second(),DEC);
    dataMessage = String(readingID) + ","
+ String(date.year(),DEC) + "/" + String(date.month(),DEC) + "/"
+ String(date.day(),DEC)+"," + String(date.hour(),DEC) + ":"
+String(date.minute(),DEC) + ":" +String(date.second(),DEC) + "," +
        String(temperature) + "," +
        String(humidity) + "," +
        String(soil_ph) + "," +

```

```

        String(CO\textsubscript{2}PPM) + "\r\n";
Serial.print("Save data: ");
Serial.println(dataMessage);
appendFile(SD, "/data.csv", dataMessage.c_str());

oled.clearDisplay();
oled.setFont(font5x7);
oled.setTextXY(0,0);
oled.putString("Num:");
oled.putNumber(readingID);
oled.setTextXY(1,0);
oled.putString(dataMessage2);

}

//Write the sensor readings on the SD card*

//Write to the SD card
void writeFile(fs::FS &fs, const char * path, const char * message) {
    Serial.printf("Writing file: %s\n", path);

    File file = fs.open(path, FILE_WRITE);
    if(!file) {
        Serial.println("Failed to open file for writing");
        return;
    }
    if(file.print(message)) {

```

```
    Serial.println("File written");
} else {
    Serial.println("Write failed");
}
file.close();
}
//Write to the SD card

// Append data to the SD card (DON'T MODIFY THIS FUNCTION)
void appendFile(fs::FS &fs, const char * path, const char * message) {
    Serial.printf("Appending to file: %s\n", path);

    File file = fs.open(path, FILE_APPEND);
    if(!file) {
        Serial.println("Failed to open file for appending");
oled.setFont(font5x7);
oled.setTextXY(0,3);
oled.putString("CHECK SD CARD");
        return;
    }
    if(file.print(message)) {
        Serial.println("Message appended");
    } else {
        Serial.println("Append failed");
    }
    file.close();
}
```

G. Diagrama de conexión.

Bibliografía

Aguirre, A. G. & Giraldo, P. J. R. (2014). Sistema embebido de bajo costo para visión artificial. *Scientia et Technica*, 19(2):163–173. Number: 2.

AITEXM (2022). Pantalla OLED.

Aji Purnomo, F., Maulana Yoeseph, N., Alim Tri Bawono, S., & Hartono, R. (2021). Development of air temperature and soil moisture monitoring systems with LoRA technology. *Journal of Physics: Conference Series*, 1825(1):012029.

Ali, A. H., Chisab, R. F., & Mnati, M. J. (2019). A smart monitoring and controlling for agricultural pumps using LoRa IOT technology. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 13(1):286.

Alibaba (2022). Sensor De Ph De Suelo Para Huerto, Medidor De Ph De Suelo Rs485 De Alta Calidad - Buy Soil Ph Meter, Soil Ph Sensor, Soil Sensor Product on Alibaba.com.

Araque, D. S. G., Sarmiento, M. C. V., & Gómez, J. P. C. (2017). Caracterización de Temperatura y Humedad de Suelos Agrícolas. *Letras ConCiencia Tecnológica*, pages 24–31.

Arduino (2019). Arduino Nano | Arduino.cl - Compra tu Arduino en Línea.

Arduino (2022). About Arduino.

Arriagada-Benítez, M. & Arriagada-Benítez, M. (2020). Ciencia de Datos: hacia la automatización de las decisiones. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 28(4):556–557. Publisher: Universidad de Tarapacá.

- ARVALIS (2013). Ensilage de maïs : éviter la présence d'air et de terre dans le silo.
- Ashbell, G., Kipnis, T., Titterton, M., Hen, Y., Azrieli, A., & Weinberg, Z. G. (2001). Examination of a technology for silage making in plastic bags. In *Animal feed science and technology*, volume 91. Elsevier, Israel.
- Ashbell, G., Weinberg, Z. G., Hen, Y., & Filya, I. (2002). The effects of temperature on the aerobic stability of wheat and corn silages. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 28(5):261–263.
- Assis, F. G. d. V. d., Ávila, C. L. d. S., Pinto, J. C., & Schwan, R. F. (2014). New inoculants on maize silage fermentation. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 43:395–403. Publisher: Sociedade Brasileira de Zootecnia.
- Avila, C. & Carvalho, B. (2020). Silage fermentation—updates focusing on the performance of micro-organisms. *Journal of Applied Microbiology*, 128(4):966–984. _eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/jam.14450>.
- Ayars, E., Wickert, A. D., & Community, O. S. H. (2021). DS3231.
- Ayaz, M., Ammad-Uddin, M., Sharif, Z., Mansour, A., & Aggoune, E.-H. M. (2019). Internet-of-Things (IoT)-Based Smart Agriculture: Toward Making the Fields Talk. *IEEE Access*, 7:129551–129583. Conference Name: IEEE Access.
- Bal, M., Coors, J., & Shaver, R. (1997). Impact of the Maturity of Corn for Use as Silage in the Diets of Dairy Cows on Intake, Digestion, and Milk Production. *Journal of Dairy Science*, 80(10):2497–2503.
- Barreto-Villanueva, A. (2012). El progreso de la Estadística y su utilidad en la evaluación del desarrollo. (73):32.
- Bhadani, P. & Vashisht, V. (2019). Soil Moisture, Temperature and Humidity Measurement Using Arduino. In *2019 9th International Conference on Cloud Computing, Data Science Engineering (Confluence)*, pages 567–571.

- Book, P. A.-T. (2022). SHT1x Temperature / Humidity Sensor Library for Arduino. original-date: 2009-06-16T06:14:30Z.
- Borreani, G. & Tabacco, E. (2010). The relationship of silage temperature with the microbiological status of the face of corn silage bunkers. *Journal of Dairy Science*, 93(6):2620–2629.
- Boschini-Figueroa, C. & Pineda-Cordero, L. (2016). Ensilaje de kikuyo (*Pennisetum clandestinum* o *Kikuyuocloa clandestina*) fermentado con tres aditivos1. *Agronomía Mesoamericana*, 27(1):49–60.
- Burns, P. G., Borgo, M. F., Binetti, A. G., Puntillo, M. A., Bergamini, C. V., Páez, R., Mazzoni, R., Reinheimer, J. A., & Vinderola, C. G. (2018). Isolation, characterization and performance of autochthonous spray dried lactic acid bacteria in maize micro and bucket-silos. Accepted: 2019-09-30T23:18:02Z Publisher: Frontiers Media S.A.
- Cabrera, O. C. & Daza, R. M. (2016). Evaluación productividad del ensilaje de maíz (*Zea mays*) para la alimentación bovina empleando agricultura de precisión. *Revista Nova*, 2(1):66–75. Number: 1.
- Carrasco, R. & Molera, I. (2020). *CONSTRUCCIÓN Y PROGRAMACIÓN DEL CONTROL DE UN BRAZO MECÁNICO CON STM32 - PDF Descargar libre*. PhD thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España.
- Carvajal Salcedo, T. & Cuesta Peralta, A. (2016). Conservación y composición nutricional del follaje de sauco (*Sambucus nigra*). *Pastos y Forrajes*, 39(2):125–132. Publisher: EEPFIH 2007.
- Castañeda, F., Hernández, G., & Ramos, A. (2006). Etapas de corte, producción y calidad forrajera de híbridos de maíz de diferente ciclo biológico. *Revista Fitotecnia Mexicana*.
- Celis, W. (2018). *Electrónica sin barreras*. Universidad Cooperativa de Colombia.
- Chen, J., He, S., & Li, X. (2021). A Study of Big Data Application in Agriculture. *Journal of Physics: Conference Series*, 1757(1):012107.

- Condori-Quispe, R., Loza-Murguía, M. G., Achu-Nina, C., & Alberto-Alberto, H. (2019). Calidad del ensilaje de avena forrajera (*Avena sativa* L.) conservado en tres diferentes tipos de silos artesanales. *Journal of the Selva Andina Animal Science*, 6(2):57–65. Publisher: Journal of the Selva Andina Animal Science
Fundación Selva Andina Research Society
Departamento de Enseñanza e Investigación en Bioquímica & Microbiología.
- César, O.-C., Eaton-González, B. R., López Cruz, F., & Díaz-Santana Rocha, L. R. (2020). Desarrollo de un sistema inalámbrico escalable de medición de humedad del suelo en un cultivo de vid. *Revista de Ingeniería Tecnológica*, pages 20–30.
- DEKALB (2020). Manejo del ensilaje de maíz.
- Erickson, B. & Fausti, S. W. (2021). The role of precision agriculture in food security. *Agronomy Journal*, 113(6):4455–4462. _eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/agj2.20919>.
- Espressif (2022). ESP32 Wi-Fi & Bluetooth Modules I Espressif.
- Evangelista, A. R., Abreu, J. G. d., Amaral, P. N. C. d., Pereira, R. C., Salvador, F. M., Lopes, J., & Soares, L. Q. (2005). Chemical composition of sorghum silage (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) enriched with leucaena forage (*Leucaena leucocephala* (LAM.) DEWIT). *Ciência e Agrotecnologia*, 29:429–435. Publisher: Editora da UFPA.
- Fernandez, A. (1999). EL SILAJE Y LOS PROCESOS FERMENTATIVOS. page 7.
- Ferrero, F., Tabacco, E., Piano, S., Casale, M., & Borreani, G. (2021). Temperature during conservation in laboratory silos affects fermentation profile and aerobic stability of corn silage treated with *Lactobacillus buchneri*, *Lactobacillus hilgardii*, and their combination. *Journal of Dairy Science*, 104(2):1696–1713.
- Forward, L. (2019). Calentamiento del ensilado | Quality Silage.
- GitHub (2022). STM32duino.
- Goffart, A. (2011). Les territoires du maïs fourrage en France. page 8.

- Guan, H., Shuai, Y., Yan, Y., Ran, Q., Wang, X., Li, D., Cai, Y., & Zhang, X. (2020). Microbial Community and Fermentation Dynamics of Corn Silage Prepared with Heat-Resistant Lactic Acid Bacteria in a Hot Environment. *Microorganisms*, 8(5):719.
- Himesh, S. (2018). Digital revolution and Big Data: a new revolution in agriculture. *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources*, 13(021).
- How To Electronics (2021). DIY Soil Ph Meter using Soil Ph Sensor and Arduino.
- Hutjens, M. (2003). *Guia de Alimentacion: Segundo Edicion*. Hoard's Dairyman Books. Google-Books-ID: ljMc9zztMfUC.
- Ibaseta, D., Molleda, J., Díez, F., & Granda, J. C. (2018). Indoor Air Quality Monitoring Sensor for the Web of Things. *Proceedings*, 2(23):1466.
- INCyTU (2018). Agricultura de Precisión.
- Jecrespom (2022). Conversor Analógico Digital.
- John, D. (2022). HarvestLab 3000 | Tecnología de agricultura de precisión | John Deere ES.
- Khan, N. A., Yu, P., Ali, M., Cone, J. W., & Hendriks, W. H. (2015). Nutritive value of maize silage in relation to dairy cow performance and milk quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95(2):238–252. _eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/jsfa.6703>.
- King, A. (2017). Technology: The Future of Agriculture. *Nature*, 544(7651):S21–S23. Number: 7651 Publisher: Nature Publishing Group.
- Koc, F., Coskuntuna, L., Ozduven, M. L., Coskuntuna, A., & Samli, H. E. (2009). The effects of temperature on the silage microbiology and aerobic stability of corn and vetch-grain silages. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section A - Animal Science*, 59(4):239–246.

- Koden, M. (2016). *OLED Displays and Lighting*. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK.
- Kumar, A. K., Sri Lakshmi, A., & Janaki Nivas Rao, P. (2020). Moving average method based air pollution monitoring system using IoT platform. *Journal of Physics: Conference Series*, 1706:7.
- Kung, L. J., Stokes, M. R., & Lin, C. J. (2003). Silage Additives.
- Li, M., Shan, G., Zhou, H., Buescher, W., Maack, C., Jungbluth, K. H., Lipski, A., Grantz, D. A., Fan, Y., Ma, D., Wang, Z., Cheng, Q., & Sun, Y. (2017). CO₂ production, dissolution and pressure dynamics during silage production: multi-sensor-based insight into parameter interactions. *Scientific Reports*, 7(1):14721. Number: 1 Publisher: Nature Publishing Group.
- Liaghat, S. & Balasundram, S. (2010). A Review: The Role of Remote Sensing in Precision Agriculture. *American Journal of Agricultural and Biological Science*, 5.
- Mahadev Prasad & Pushpalatha S (2020). Automated Irrigation System using STM32 and Modbus RTU Protocol. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 9(5). Publisher: IJERT-International Journal of Engineering Research & Technology.
- Mamani, M., Villalobos, M., & Herrera, R. (2017). Sistema web de bajo costo para monitorear y controlar un invernadero agrícola. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 25(4):599–618.
- Mancipe-Muñoz, E. A., Castillo-Sierra, J., Vargas-Martínez, J. d. J., & Avellaneda-Avellaneda, Y. (2022). Calidad composicional del ensilaje de tres cultivares de maíz (*Zea mays*) del trópico alto colombiano. *Agronomy Mesoamerican*, pages 46412–46412.
- Martí, S. P. d. (2019). AGRICULTURA DE PRECISIÓN Y PROTECCIÓN DE CULTIVOS. *Revista de Ingeniería*, (47):10–19. Number: 47.
- Mier, M. (2009). *CARACTERIZACIÓN DEL VALOR NUTRITIVO Y ESTABILIDAD AERÓBICA DE ENSILADOS EN FORMA DE MICROSILOS PARA MAÍZ FORRAJERO*. PhD thesis, Universidad de Córdoba, Córdoba.

- Molina-Maturano, J., Verhulst, N., Tur-Cardona, J., Güereña, D. T., Gardeazábal-Monsalve, A., Govaerts, B., & Speelman, S. (2021). Understanding Smallholder Farmers' Intention to Adopt Agricultural Apps: The Role of Mastery Approach and Innovation Hubs in Mexico. *Agronomy*, 11(2):194. Number: 2 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- Morales, J. U. & Echavarría, O. O. M. (2004). ELABORACION DE ENSILAJE DE BUENA CALIDAD. page 2.
- Morales-Querol, D., Rodríguez-Hernández, R., Fundora-Fernández, L., García-Sánchez, F., Ojeda-García, F., López-Vigoa, O., Morales-Querol, D., Rodríguez-Hernández, R., Fundora-Fernández, L., García-Sánchez, F., Ojeda-García, F., & López-Vigoa, O. (2019). Calidad fermentativa de ensilados de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) y pulpa de cítrico (*Citrus* sp.). *Pastos y Forrajes*, 42(3):207–212. Publisher: EEPFIH 2007.
- Morgan, J. (2016). Growing and feeding maize silage for Better Returns.
- National Academies of Sciences, E. (2016). *Nutrient Requirements of Beef Cattle: Eighth Revised Edition*.
- Negrete, J. C. (2017). Precision Agriculture in Mexico ; Current Status and Perspectives. *International Journal of Horticulture*, 7(0). Number: 0.
- Nicholson, J. W. G., McQueen, R. E., Charmley, E., & Bush, R. S. (1991). Forage conservation in round bales or silage bags: effect on ensiling characteristics and animal performance. *Canadian Journal of Animal Science*, 71(4):1167–1180.
- NRC (2001). *Nutrient Requeriments of Dairy Cattle*. National Research Council, Estados Unidos, 7a edition.
- Ohmomo, S., Tanaka, O., Kitamoto, H. K., & Cai, Y. (2002). Silage and Microbial Performance, Old Story but New Problems. *Japan Agricultural Research Quarterly: JARQ*, 36(2):59–71.

- Pereira, S., Fernandez, B., Lorenzana, R., Barreal, M., & Flores, G. (2015). Consejos para un buen ensilado del maíz: el momento de corte. Reporter: Campo Galego.
- Press, N. A. (1988). *Read "Globalization of Technology: International Perspectives."* NAP.edu. Washington, D.C., USA.
- Proain (2020). PROCESO DE FERMENTACIÓN DEL ENSILAJE.
- Raju, K. L. & Veeramani, V. (2020). IoT Technologies in Agricultural Environment: A Survey. *Wireless Personal Communications*.
- Robin, G. & Viacheslav, A. (2010). Precision Agriculture and Food Security. 327.
- Robinson, R. & Okatsu, Y. (2019). Dairy feedbunk. *Hay & Forage Grower*.
- Rockström, J., Williams, J., Daily, G., Noble, A., Matthews, N., Gordon, L., Wetterstrand, H., DeClerck, F., Shah, M., Steduto, P., de Fraiture, C., Hatibu, N., Unver, O., Bird, J., Sibanda, L., & Smith, J. (2017). Sustainable intensification of agriculture for human prosperity and global sustainability. *Ambio*, 46(1):4–17.
- Rojas G., C., Catrileo S., A., & Romero Y., O. (1997). ENSILAJE DE CEBADA EN LA ENGORDA INVERNAL DE NOVILLOS HEREFORD. *Agro Sur*, 25(2):227–234.
- Rojas G., C. & Manríquez B., M. (2001). COMPARACIÓN DE ENSILAJE DE TRIGO Y DE MAÍZ EN LA ENGORDA INVERNAL DE NOVILLOS. *Agricultura Técnica*, 61(4):444–451. Publisher: Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA.
- Sandbox (2014). MG-811 CO2 Sensor Module | Sandbox Electronics.
- Saptiani, P., Aziz, M., Iriyanti, M., & Aminudin, A. (2019). The electrical properties characterization of MG-811 gas sensor toward the temperature alteration of soil testing chamber. *Journal of Physics: Conference Series*, 1280:022058.
- Savoie, P. & Jofriet, J. C. (2015). Silage Storage. In *Silage Science and Technology*, volume 42 of *Agronomy Monographs*.
- Sensirion (2011). SHT10 IC Datasheet pdf - Sensor IC. Equivalent, Catalog.

- Shamin, A., Frolova, O., Makarychev, V., Yashkova, N., Kornilova, L., & Akimov, A. (2019). Digital transformation of agricultural industry. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 346(1):012029.
- Shen, C. (2014). *An Investigation of a Low-cost CO2 Indoor Air Quality Monitor*. PhD thesis.
- SIAP (2020). Datos Abiertos | Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera | gob.mx.
- Soto, J. P. T., Suárez, J. d. l. S. S., Rodríguez, A. B., & Cainaba, G. O. R. (2019). Internet de las cosas aplicado a la agricultura: estado actual. *Lámpsakos*, (22):86–105.
- Souza, A. M. d., Neumann, M., Rampim, L., Almeida, E. R. d., Matchula, A. F., Cristo, F. B., & Faria, M. V. (2022). Effect of storage time on the chemical composition of whole and grainless corn plant silage harvested at different maturity stages. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 51. Publisher: Sociedade Brasileira de Zootecnia.
- ST (2020). STM32 Arm Cortex MCUs - 32-bit Microcontrollers - STMicroelectronics.
- Studio, S. (2021). Grove - CO2 Sensor - Seeed Wiki.
- Sung, G.-M., Shen, Y.-S., Yu, C.-P., & Jian, C.-S. (2020). Two-port–two-port SI between RS485 and Ethernet with an FIFO queue for efficient PC-to-PC communication. *IET Networks*, 9(3):102–109. _eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1049/iet-net.2019.0135>.
- Sánchez, V. H. & Mendoza, J. L. Z. (2019). Adopción e impacto de las tecnologías agropecuarias generadas en el Ecuador. *La Granja. Revista de Ciencias de la Vida*, 30(2):28–39.
- Tan, L. (2008). *Digital signal processing: fundamentals and applications*. Academic Press, Amsterdam ; Boston. OCLC: ocn145396569.
- TDE (2022). ESP32 DEVKIT V1 38 Pines Wifi + Bluetooth – Tienda de Electrónica MX.

- Teixeira, C. A., Lopo, M., Pascoa, R. N. M. J., & Lopes, J. A. (2013). A Review on the Applications of Portable Near-Infrared Spectrometers in the Agro-Food Industry. *Uelectronics* (2020). STM32F103C8T6 Tarjeta de Desarrollo Cortex M3.
- Utmel (2022). An Overview of Development Board - Utmel.
- Vargas, M., Castillo, G., Juan Sandoval, & Alfredo Brambila (2015). Arduino una Herramienta Accesible para el Aprendizaje de Programación. 2(4):810–815.
- Velho, J. P., Mühlbach, P. R. F., Genro, T. C. M., Sanchez, L. M. B., Nörnberg, J. L., Orqis, M. G., & Falkenberg, J. R. (2006). Alterações bromatológicas nas silagens de milho submetidas a crescentes tempos de exposição ao ar após "desensilagem". *Ciência Rural*, 36(3):916–923.
- Velázquez-Guerrero, J. J., Valadez, R. R., Chávez, E. C., Ortiz, J. C. D., Flores, J. L., Tristán, T. Q., & Fuentes, Y. M. O. (2021). Primer reporte de *Monascus ruber* en ensilaje de maíz (*Zea mays*) y alfalfa (*Medicago sativa*) en México. *Scientia Fungorum*, 52:e1385–e1385.
- Villalobos, L., Arce, J., Villalobos, L., & Arce, J. (2016). Efecto del picado sobre las características nutricionales y fermentativas de ensilajes de pastos kikuyo, ryegrass perenne y alpiste forrajero. *Agronomía Costarricense*, 40(1):65–74. Publisher: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/>.
- Vista, A. (2019). NIR 4 FARM.
- Winsen (2022a). MD62 Thermal Conductor CO2 Gas Sensor–Winsen.
- Winsen (2022b). MH-Z16 NDIR CO2 SENSOR–Winsen.
- Woolford, M. K. & Pahlow, G. (1998). The silage fermentation. In Wood, B. J. B., editor, *Microbiology of Fermented Foods*, pages 73–102. Springer US, Boston, MA.
- Yitbarek, M. B. & Tamir, B. (2014). Silage Additives: Review. *Open Journal of Applied Sciences*, 4(5):258–274.

Zabala, F. C. (2022). Ai_ardulib_ssd1306. original-date: 2016-07-14T15:59:57Z.

Zaragoza-Esparza, J., Tadeo-Robledo, M., Espinosa-Calderón, A., López-López, C., García-Espinosa, J. C., Zamudio-González, B., Turrent Fernández, A., & Rosado-Núñez, F. (2019). Rendimiento y calidad de forraje de híbridos de maíz en Valles Altos de México: Rendimiento y calidad de forraje de híbridos de maíz. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(1):101–111.