



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE DURANGO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



**“Detección mediante redes neuronales de
macronutrientes del sustrato de invernadero”**

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestría en Ingeniería

Presenta:

Ing. Armando Raúl Maturino Barraza

Director de tesis:

M.C. José Antonio Martínez Rivera

Codirector:

Dr. Rubén Guerrero Rivera

Durango, Dgo. México, Marzo, 2024.



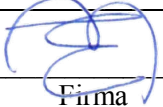

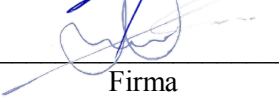


**Detección mediante redes neuronales de
macronutrientes del sustrato de invernadero**


Presenta:

Ing. Armando Raúl Maturino Barraza


COMITÉ TUTORIAL

<u>M.C. José Antonio Martínez Rivera</u> Director	 Firma
<u>Dr. Rubén Guerrero Rivera</u> Codirector	 Firma
<u>Dr. Josué Ortiz Medina</u> Asesor	 Firma

Dra. Norma Alicia García Vidaña


Coordinadora del programa de la maestría
en ingeniería.

Dr. Francisco Javier Godínez García


Jefe de la División de Estudios de Posgrado e
Investigación

Durango, Dgo. México

Marzo de 2024



Victoria de Durango, Dgo., a **13/Mayo/2024**.

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
DEPI/C/144/24.

ASUNTO: Autorización de Impresión de Tesis de Maestría.

C. ARMANDO RAÚL MATURINO BARRAZA
No. DE CONTROL G22040324
P R E S E N T E .

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:

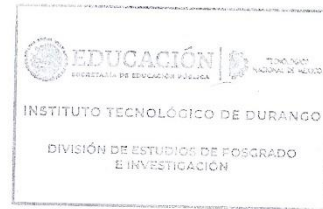
"Detección mediante redes neuronales de macronutrientes del sustrato de invernadero"

Sin otro particular de momento, quedo de Usted.

ATENTAMENTE.

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


C. FRANCISCO JAVIER GODÍNEZ GARCÍA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN



FJGGammc



Av. Felipe Pescador #1210 Ofc. Col. Nueva Virreyna C.P.34020 Durango, Durango.
Tel. (618) 8290909 e-mail: tecnm.mx | itdurango.edu.mx



Victoria de Durango, Dgo., a **13/Mayo/2024**.

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
DEPI/C/143/24.

ASUNTO: Autorización de Tema de Tesis de Maestría.

C. ARMANDO RAÚL MATURINO BARRAZA
No. DE CONTROL G22040324
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:

“Detección mediante redes neuronales de macronutrientes del sustrato de invernadero”

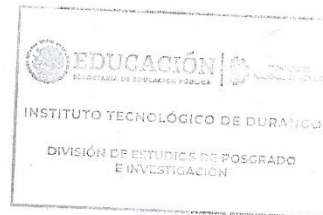
CONTENIDO:

	RESUMEN
CAPÍTULO I	INTRODUCCIÓN
CAPÍTULO II	MARCO TEÓRICO
CAPÍTULO III	MATERIALES Y MÉTODOS
CAPÍTULO IV	RESULTADOS Y DISCUSIÓN
CAPÍTULO V	CONCLUSIONES
CAPÍTULO VI	REFERENCIAS
	ANEXOS

ATENTAMENTE.

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


C. FRANCISCO JAVIER GODÍNEZ GARCÍA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN



FJGG/ammc



Av. Felipe Pescador 31210 Cde. Col. Nueva Vindora C.P. 34020 Durango, Durango.
Tel. (463) 9200300 e-mail: tecnm.mx | itdurango.edu.mx



Agradecimientos

Agradezco al CONAHCYT por el apoyo financiero brindado para cursar los estudios de posgrado.

Agradezco a mi familia por la paciencia y cariño que me brindaron durante esta etapa del estudio de posgrado.

Mis más sinceras gracias a los maestros del programa por sus conocimientos y apoyo otorgados durante este periodo.

Un especial agradecimiento a los miembros de mi comité, con su ayuda y conocimientos fue posible realizar este proyecto.

Gracias al maestro Antonio por su paciencia y conocimientos para terminar el proyecto y el estudio de posgrado.

Para la realización de las pruebas y experimentos relacionadas con el análisis de suelos se contó con el apoyo de la Maestra María Dolores Josefina Rodríguez Rosales, la Doctora Ixchel Abby Ortiz Sánchez y el Doctor Víctor Jesús Martínez Gómez a los cuales se agradece su apoyo.

Agradezco a mis compañeros de maestría por sus consejos, en especial al ing. Pedro Verdín y al ing. Ernesto Barboza.

Agradezco a mi amigo Iván por sus consejos.

Gracias Daniela por el consejo.

Resumen

En esta tesis se detalla el diseño e implementación de una red neuronal en un sistema embebido de gama media para la clasificación de nutrientes de suelo agrícola, se rediseñó un espectrofotómetro para la determinación de la respuesta espectral de muestras de suelo agrícola. La caracterización del sensor se realizó mediante la herramienta *webplotdigitizer* de acuerdo con la información obtenida de la hoja de datos del fabricante, determinando la gráfica que relaciona la longitud de onda con la salida normalizada del sensor. Se construyó un *dataset* con la información de la respuesta espectral ingresándola en la plataforma *Edge Impulse®* con la cual se realizó el entrenamiento de una red neuronal con 600 épocas y una tasa de aprendizaje del 0.001 obteniendo un porcentaje de precisión de 83.3%, y una función de pérdida de 0.38 validando la identificación y clasificación de los diferentes tipos de suelo analizados.

Palabras clave: aprendizaje automático, espectrografía, muestras de suelo, red neuronal, sistemas embebidos.

Abstract

This thesis details the design and implementation of a neural network in a mid-range embedded system for the classification of agricultural soil nutrients. A spectrophotometer was redesigned for the determination of the spectral response of agricultural soil samples. The characterization of the sensor was performed using the webplotdigitizer tool according to the information obtained from the manufacturer's datasheet, determining the relationship between the spectral wavelength and the normalized output of the sensor. A dataset was built with the information of the spectral response and entered to the Edge Impulse® platform for the training of a neural network with 600 epochs and a learning rate of 0.001, obtaining an accuracy percentage of 83.3%, and a loss function of 0.38, validating the identification and classification of the different types of soil analyzed.

Keywords: embedded systems, machine learning, neural network, soil sampling, spectrography.

Tabla de contenido

Agradecimientos	V
Resumen.....	VII
Abstract.....	VIII
Índice de Tablas	1
Capítulo 1 Introducción	2
1.1 Planteamiento del problema.....	4
1.2 Objetivos	4
1.2.1 Objetivo general.....	4
1.2.2 Objetivos específicos.....	4
1.3 Hipótesis	5
1.4 Justificación	5
1.5 Delimitación del problema.....	6
1.6 Estado del arte.....	7
1.6.1 Antecedentes	7
Capítulo 2 Marco teórico	9
2.1 Espectrofotómetro.....	9
2.2 Espectroscopia ultravioleta-visible.....	10
2.3 Absorbancia y transmitancia en materiales.....	10
2.4 Ley de Beer-Lambert	11
2.5 Espectro electromagnético	14

Capítulo 3 Materiales y métodos.....	16
3.1 Construcción del espectrofotómetro.....	16
3.2 Selección de muestras.....	19
3.3 Preparación de muestras	20
3.4 Experimento angular del sensor	21
3.5 Caracterización del medidor	24
3.6 Diseño del sistema de aprendizaje.....	28
3.7 Programación de sistema embebido	38
Capítulo 4 Resultados y discusión	41
Capítulo 5 Conclusiones	55
Capítulo 6 Referencias	56
Apéndice A	58
Nomenclatura.....	58
Apéndice B.....	60

Índice de Figuras

Figura 1 Absortividad molar	11
Figura 2 Espectrofotómetros de barrido convencionales	12
Figura 3 Espectrofotómetro de red de diodos.	13
Figura 4 Espectro electromagnético	14
Figura 5 Prototipo de espectrofotómetro.....	18
Figura 6 Esquema para la recolección de submuestras	19
Figura 7 Gráfica Ángulo vs Valor de salida UVA	23
Figura 8 Gráfica Ángulo vs Valor normalizado (%).....	23
Figura 9 Gráfica longitud de onda vs salida normalizada	26
Figura 10 Representación por tramos de la curva función de transferencia.....	27
Figura 11 Báscula.....	28
Figura 12 Agitador magnético.....	29
Figura 13 Proceso de filtrado	30
Figura 14 Espectrofotómetro.....	30
Figura 15 Proyecto nuevo en Edge Impulse.....	31
Figura 16 Wizard asistente para la adquisición de datos.....	32
Figura 17 Etiquetado de muestras	32
Figura 18 Entrenamiento y prueba	32
Figura 19 Bloque de procesamiento.....	34
Figura 20 Bloque de aprendizaje.....	35
Figura 21 Creación del impulso	36
Figura 22 Capas de la red neuronal.....	36
Figura 23 Matriz de confusión	37
Figura 24 Deployment.....	38

Figura 25 Código de la red neuronal	39
Figura 26 Código de la red neuronal	40
Figura 27 Resultado 0 = Agua Destilada	41
Figura 28 Resultado 1 = Tipo de suelo 1	42
Figura 29 Resultado 2 = Tipo de suelo 2	43
Figura 30 Resultado deseado 3 obtenido 4.....	44
Figura 31 Resultado 4 = Tipo de suelo 4	45
Figura 32 Resultado 5 = Tipo de suelo 5	46
Figura 33 Resultado deseado 6 obtenido 8.....	47
Figura 34 Resultado deseado 7 obtenido 3.....	48
Figura 35 Resultado 8 = Tipo de suelo 8	49
Figura 36 Resultado 9 = Tipo de suelo 9	50
Figura 37 Resultado 10 = Tipo de suelo 10	51
Figura 38 Resultado 11 = Luz directa al sensor	52

Índice de Tablas

Tabla 1 Espectro electromagnético (Rangos aproximados)	14
Tabla 2 Resultado experimento ángulo sensor	22
Tabla 3 Función de transferencia digitalizada.....	25
Tabla 4 Resultados de clasificación de la red neuronal con 10 muestras de suelo.....	53
Tabla 5 Resultados de análisis de suelos.....	54

Capítulo 1 Introducción

El estado de Durango tiene una superficie territorial de $123,364 \text{ Km}^2$, lo que hace que sea el cuarto estado por tamaño en el país (INEGI, 2020). Es un estado que cuenta con una población de 1,832,650 personas (INEGI, 2020), esto hace que ocupe el lugar 25 por el número de habitantes. Una de las actividades primarias del estado de Durango es la agroindustrial (Hernández Chavarria, 2022).

La producción agrícola de Durango está conformada por maíz forrajero, avena forrajera, maíz grano, frijol, alfalfa verde, tomate, cebada, pimiento morrón, nogal, espárrago, chile y cebolla (Castillo, 2020).

En el desarrollo de un cultivo los nutrientes del suelo se pierden ya que los absorbe el cultivo recién cosechado, varios de estos nutrientes no se regeneran por si solos por lo que es importante usar fertilizantes los cuales sirven para recuperar los nutrientes perdidos (IFA, 2002). Según (Sierra, 2021) la cantidad de fertilizante a aplicar debe estar basada en el requerimiento de nutrientes del cultivo (RNC) y en el análisis de suelo.

Según (De La Cruz Moreno, 2019) la identificación de los macronutrientes que la planta requiere en importantes cantidades para su desarrollo normal son nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), azufre (S), calcio (Ca), magnesio (Mg) y sodio (Na). Existen nutrientes que se suministran en cantidades menores y estos no dejan de ser importantes para las plantas. En (Ibujés, 2020) detalla que los micronutrientes presentes en el suelo son hierro (Fe), manganeso (Mn), zinc (Zn), cobre (Cu), molibdeno (Mo), cloro (Cl) y boro (B).

Para lograr una mayor satisfacción de los requerimientos de las plantas, se requiere tener un óptimo abastecimiento de nutrientes y agua. En esta perspectiva (Gaona, 2020) expone que se debe tomar en la estimación las dosis y la frecuencia de aplicación, estas deben estar balanceadas para impedir pérdidas por lixiviación evitando la contaminación del suelo y/o de los mantos acuíferos.

El avance en las tecnologías electrónica, óptica y de la inteligencia artificial, permiten sensor los micro y macronutrientes que conforman el suelo del invernadero, optimizando la producción y la calidad en los cultivos.

La luz blanca descompuesta en sus diferentes intensidades de luz al pasar por una sustancia produce un espectro interrumpido por diferentes líneas oscuras, denominadas líneas de absorción (Fonseca, 2020).

1.1 Planteamiento del problema

Debido al crecimiento poblacional de la actualidad, se requiere mejorar la producción de cultivos para alimentar a la población. En el sector de cultivos protegidos bajo invernadero, es indispensable conocer la cantidad de nutrientes que conforman el suelo, por lo cual suministrar los nutrientes necesarios mediante la aplicación de fertilizantes, con la finalidad de obtener una mejora en la calidad y cantidad de la producción. Mediante la aplicación de las tecnologías electrónica y óptica se aborda la identificación de los micro y macronutrientes que están presentes en el suelo del invernadero.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Clasificar la presencia de macronutrientes de muestras del suelo de un invernadero mediante el análisis espectral a través de una red neuronal.

1.2.2 Objetivos específicos

- Rediseñar e implementar un espectrógrafo en impresora 3D, esto permitirá obtener la respuesta espectral de la muestra a analizar en región UVA.
- Recolectar, preparar y analizar las muestras del suelo, el análisis de la muestra del suelo permite obtener la longitud de onda vs la respuesta de absorbancia.
- Caracterizar el sensor VEML6075, con la finalidad de encontrar la función de transferencia del sensor para incorporarla en el programa del microcontrolador.

- Diseñar una red neuronal para la detección de los macronutrientes, para encontrar el tipo de suelo al que pertenece la muestra analizada
- Implementar en un sistema embebido la red neuronal.
- Clasificar la cantidad de nutrientes mediante la red neuronal.
- Exhibir los datos para la toma de decisiones.

1.3 Hipótesis

Mediante la aplicación de la tecnología electrónica, óptica e inteligencia artificial, es posible determinar los elementos químicos que componen el sustrato de un cultivo protegido dentro de un invernadero, recopilando la información necesaria para una óptima toma de decisiones del uso de los fertilizantes.

1.4 Justificación

Debido al crecimiento poblacional mundial y más en específico del país México y más en concreto del estado de Durango, donde la población aumento del 2010 (SEDESOL, 2010) al 2020 en 200,000 personas, y se tiene que obtener alimento para dicha población se requiere una mayor y mejor producción del sector agropecuario.

La presente investigación se enfoca en el sector agrícola, donde se tendrá un instrumento de mejora en la producción de cultivos de hortalizas dentro de un invernadero, detectando los nutrientes que tiene el suelo, esto con el fin de que se determine qué macro y micronutrientes son necesarios añadir en forma de fertilizante para mejorar el crecimiento de las plantas.

La mayor problemática que se aborda en la presente investigación es la aplicación adecuada de fertilizantes, ya que al no tener conocimiento con exactitud en tiempo real de los nutrientes que son necesarios en el suelo, se puede suministrar de forma errónea la cantidad requerida, por lo cual impedirá que el cultivo se desarrolle en las mejores condiciones; conociendo los nutrientes que faltan en el suelo se proporcionara la cantidad óptima para la mejora en la cantidad y calidad del cultivo.

1.5 Delimitación del problema

La presente investigación está limitada a la región UV del espectro electromagnético debido a que los nutrientes a analizar están ubicados en esta región. Dichos nutrientes son Magnesio (Mg), Fosforo (P) y Nitrógeno (N).

El presente trabajo de investigación también tiene la limitación de suelos analizados ya que el costo de analizar cada uno en el laboratorio es elevado y solo se analizaron 10 suelos distintos.

El diseño del prototipo del espectrógrafo será de material PLA debido a que el costo es menor, se pierde resistencia, pero no es tan importante esta ventaja en el trabajo realizado.

1.6 Estado del arte

1.6.1 Antecedentes

En (Gómara, 2016), se muestra la combinación de la tecnología optoelectrónica con el aprendizaje automático a través de una red neuronal para medir y caracterizar la absorbancia de muestras de productos bioquímicos en función de las longitudes de onda. El desarrollo del sistema embebido está basado en el microcontrolador PIC 16F877A, obteniendo un tiempo de ejecución del código del algoritmo de clasificación de pocos segundos.

En (Saha, 2022), se explora la posibilidad de implantar los algoritmos de aprendizaje automático en los dispositivos de baja capacidad computacional como los microcontroladores. El desafío radica en que la implementación convencional de machine learning requiere una gran capacidad computacional, lo que dificulta su uso directo en microcontroladores con recursos limitados. Se resaltan los requisitos específicos para habilitar el aprendizaje automático en dispositivos tipo microcontrolador.

En (Benigno, 2022) se destaca la creciente importancia de la implementación de algoritmos de aprendizaje automático en microcontroladores, dado que estos dispositivos deben ser altamente eficientes en cuanto al consumo de energía, los desarrolladores requieren aprender a implementar modelos de aprendizaje automático en sistemas basados en microcontroladores. Se presenta una introducción de cómo los desarrolladores de sistemas embebidos pueden aprovechar el *machine learning* en microcontroladores, utilizando ejemplos concretos y herramientas específicas de STMicroelectronics para facilitar el proceso.

En (Giménez, 2022) se abordan los avances recientes en el campo del aprendizaje automático que permiten la inferencia con modelos en microcontroladores económicos y de tamaño

reducido. Se propone un enfoque innovador al entrenar directamente los modelos de aprendizaje automático en microcontroladores y ampliar el proceso de entrenamiento mediante el aprendizaje federado. Los resultados indican que cuando se entrena localmente con menos datos, aumentar la frecuencia de las rondas de aprendizaje federado reduce la pérdida de entrenamiento de manera más rápida, pero esto conlleva un mayor uso de ancho de banda y un tiempo de entrenamiento prolongado. En función de la aplicación específica, se destaca la importancia de encontrar un equilibrio entre los requisitos y el uso de recursos del sistema.

En (Svoboda, 2022) se enfocan en la implementación de modelos de redes neuronales profundas (DNN) en microcontroladores, que son atractivos debido a su bajo costo, consumo moderado y disponibilidad generalizada en el mercado. Así mismo, se profundiza en los requisitos y desafíos asociados con la inferencia rápida de DNN en microcontroladores, se discuten varios aspectos, como la influencia de la jerarquía de memoria en la arquitectura del modelo, los costos subestimados de técnicas de compresión y cuantificación, y las cuestiones críticas que surgen al desplegar modelos en microcontroladores en comparación con dispositivos móviles.

Capítulo 2 Marco teórico

En esta sección se presentarán algunos conceptos básicos de espectrografía, así como la absorbancia y transmitancia de los materiales, ley de Beer-Lambert, el espectro electromagnético.

2.1 Espectrofotómetro

El espectrofotómetro es un instrumento que permite proyectar un haz de luz a través de una muestra y medir la absorbancia (la cantidad de luz absorbida por la muestra) o la transmitancia (la cantidad de luz que pasa a través de la muestra, es decir, el recíproco matemático de la absorbancia). La cantidad de luz absorbida o transmitida a una determinada longitud de onda es proporcional a la concentración del material. Si el material no absorbe luz por sí mismo, se puede mezclar con otros reactivos para obtener, mediante una reacción química específica, una solución que si absorba luz. Los espectrofotómetros actuales pueden medir sobre prácticamente cualquier material (líquidos, plásticos, papel, metal, telas, etc.), de allí su versatilidad y uso en diferentes disciplinas. Las principales aplicaciones de los espectrómetros son determinación de la cantidad en una solución de un compuesto en específico (p.e., concentración de hierro en la sangre, de cobre en un tejido, etc.), identificación de unidades estructurales específicas, (ya que estas tienen distintos tipos de absorbancia), detección de niveles de contaminación en aire y agua, determinación de impurezas en alimentos y reactivos, determinación de constantes de disociación de indicadores ácido base, y estandarización de colores de diversos materiales.

2.2 Espectroscopia ultravioleta-visible

La espectroscopia ultravioleta-visible es un subconjunto de la espectroscopia de absorción en la que se utilizan diferentes longitudes de onda de radiación electromagnética en el rango ultravioleta (UV) y visible (VIS) para iluminar una muestra. Los rayos UV o de luz visible son parcialmente absorbidos por la muestra, dependiendo de la sustancia. Un detector adecuado registra en función de la longitud de onda la luz transmitida, que constituye la luz restante. La salida posterior del detector es el espectro UV-VIS distintivo de la muestra, también conocido como "espectro de absorción".

2.3 Absorbancia y transmitancia en materiales

Debido a que la longitud de onda de la luz absorbida corresponde a una excitación electrónica en el objeto, es común que un objeto absorba luz cuando este incide sobre la misma. El resto de la luz se transmite, otras palabras, la luz suministrada atraviesa la muestra a analizar.

Al dividir el espectro de intensidad de la luz transmitida a través de una muestra (I_0) por el espectro de intensidad de la luz transmitida a través del objetivo (I), un espectrofotómetro puede calcular la razón de la luz transmitida respecto a la luz incidente, bajo condiciones geométricas específicas "transmitancia"

La absorbancia (A), también conocida como "densidad óptica" (DO), es la cantidad de luz absorbida por el objeto y puede expresarse de la siguiente manera:

$$A = -\log(T)$$

Transmitancia (T):

$$T = \frac{I}{I_0}$$

2.4 Ley de Beer-Lambert

El principio de la ley de Beer-Lambert establece que la cantidad de luz absorbida por una solución es directamente proporcional tanto a la concentración de la solución como a la medida en que la luz se transmite a través de ella. De manera concisa, una mayor concentración equivale a una mayor absorción de luz.

La ley de Beer-Lambert estimula que:

$$A = \epsilon * d * c$$

Donde:

$\epsilon =$ *absortividad molar*

$d =$ *Paso de luz*

$c =$ *Concentración*

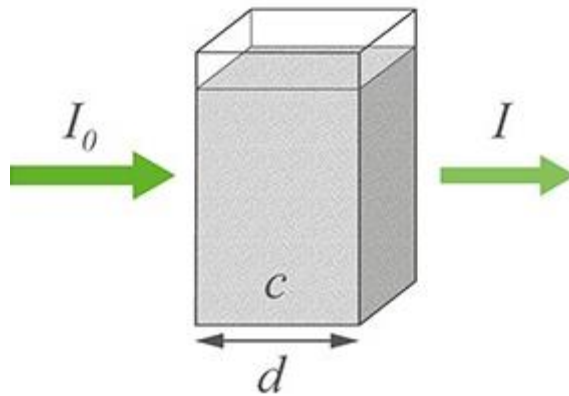


Figura 1 Absortividad molar
Fuente: (Toledo, 2023)

La absorbancia molar es una constante física única de una muestra relacionada con su capacidad para absorber luz de una longitud de onda específica.

La unidad de ϵ se expresa como $L * mol^{-1} * cm^{-1}$

Un espectrofotómetro UV-VIS es un instrumento que mide la absorbancia en la región UV-VIS utilizando la ley de Beer-Lambert. Mide la intensidad de la luz que pasa a través de la solución de muestra en la cubeta y la compara con la intensidad de la luz antes de que pase a través de la muestra.

La diferencia entre los espectrógrafos de barrido y de red de diodos es que los de barrido convencionales se basan en el principio de mediciones continuas de transmitancia en cada longitud de onda determinada. utilizando una rejilla de difracción para dividir la luz en diferentes longitudes de onda. La celda con la muestra se coloca entre la rejilla de difracción y el detector. Tal como se muestra en la figura 2.

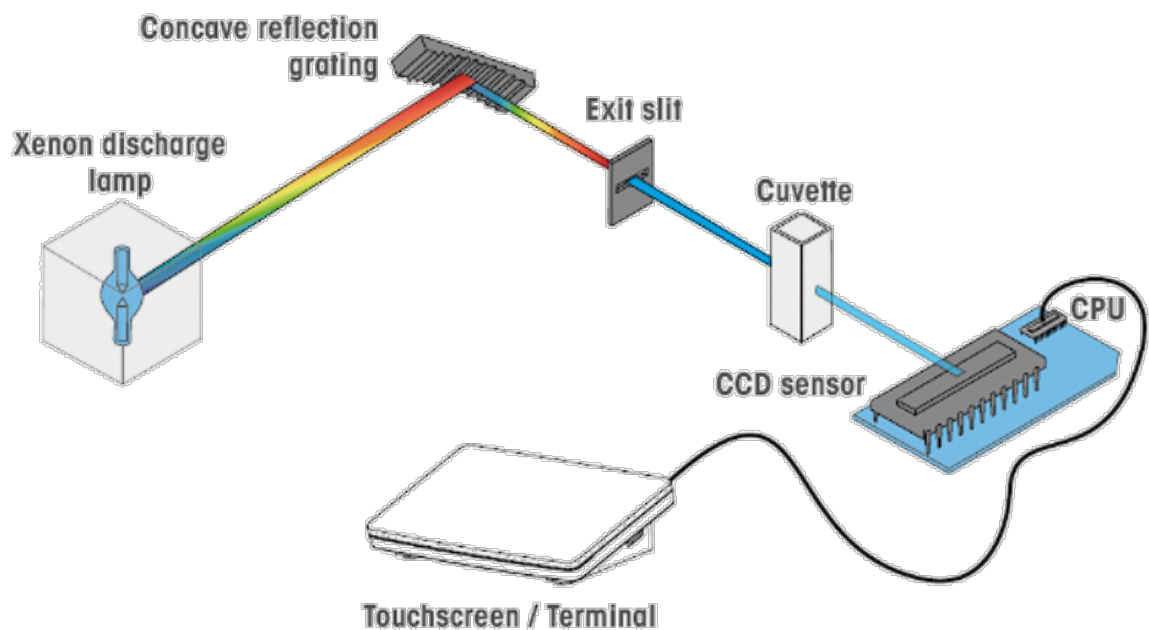


Figura 2 Espectrofotómetros de barrido convencionales
Fuente: (Toledo, 2023)

Por otro lado, un espectrofotómetro de red de diodos, La muestra se irradia junta, es decir. se ilumina simultáneamente con todos los componentes espectrales de la luz de modo que absorbe

simultáneamente luz de diferentes longitudes de onda. La rejilla reflectante dispersa entonces la luz transmitida. Este instrumento ayuda a obtener espectros UV-VIS más rápido que los espectrofotómetros de barrido tradicionales, como se muestra en la figura 3.

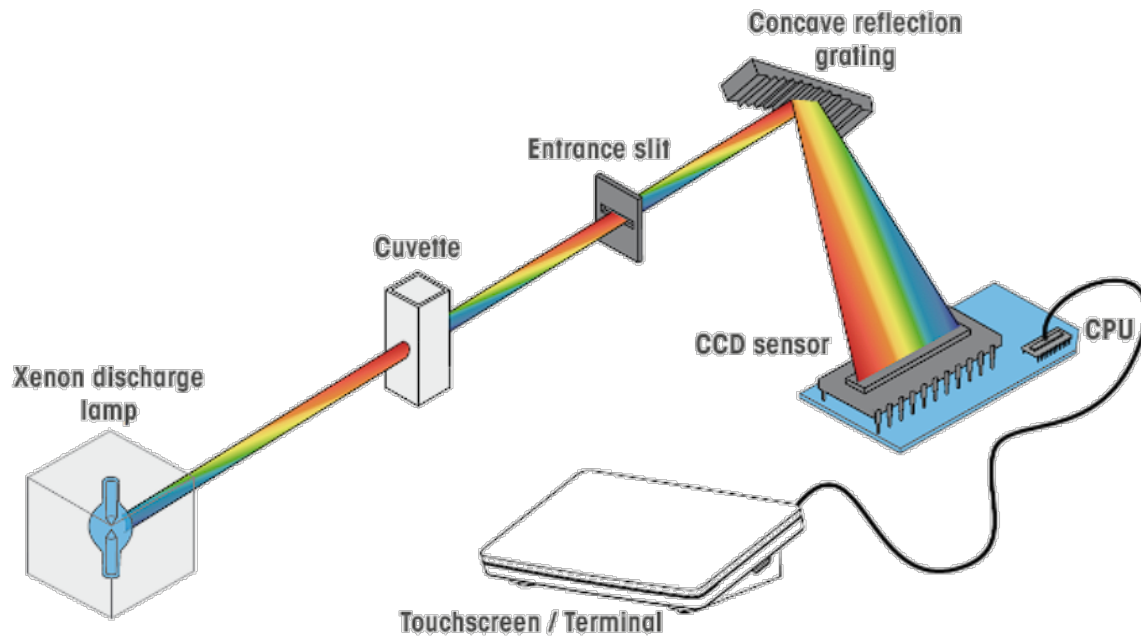


Figura 3 Espectrofotómetro de red de diodos.

Fuente: (Toledo, 2023)

En conclusión, la principal diferencia entre estos dos tipos de espectrofotómetros es que el espectrofotómetro de red de diodos no tiene piezas móviles en comparación de un espectrofotómetro de barrido.

2.5 Espectro electromagnético

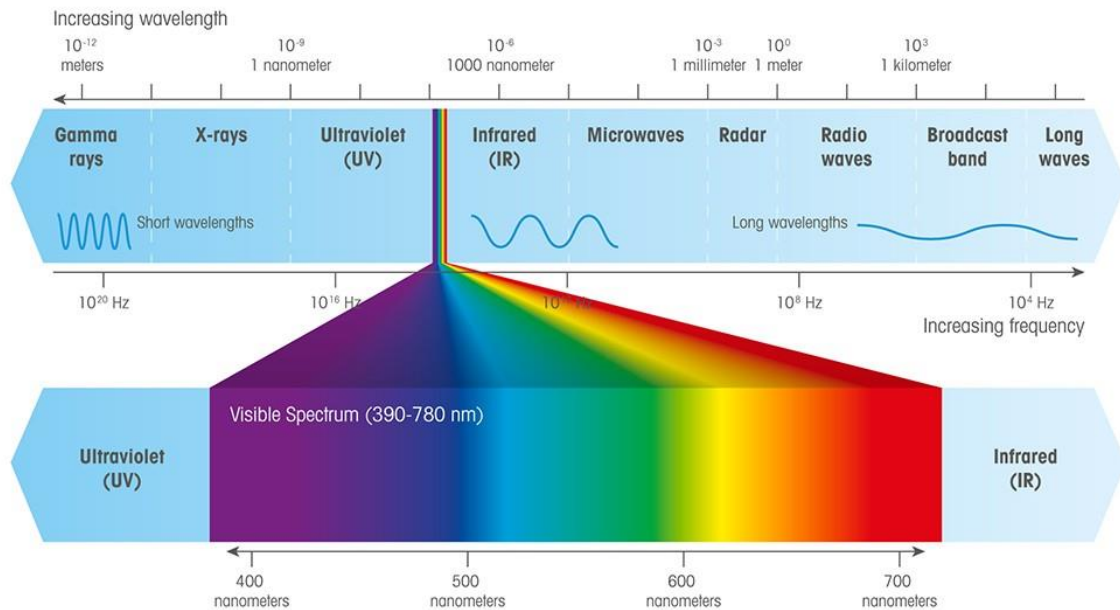


Figura 4 Espectro electromagnético
Fuente: (Toledo, 2023)

En la Tabla 1 se indican los rangos aproximados de frecuencias (Hz ó ciclos/seg) y longitudes de onda (metros) y energías promedio (eV) de las diferentes regiones del espectro electromagnético.

Región	Frecuencia(Hz ó ciclos/s)	Longitud de onda (m)	Energía del fotón(eV,_{promedio})
Rayos gamma	$10^{22} - 10^{19}$	$10^{-11} - 10^{-14}$	10^{10}
Rayos-X	$10^{17} - 10^{20}$	$10^{-8} - 10^{-11}$	10^5
Ultravioleta	$10^{15} - 10^{17}$	$10^{-6} - 10^{-8}$	10^3
Visible	$10^{14} - 10^{15}$	$4 \times 10^{-6} - 7 \times 10^{-6}$	1
Infrarrojo	$10^{11} - 10^{14}$	$10^{-3} - 10^{-5}$	10^{-3}
Microondas	$10^9 - 10^{11}$	$10^{-1} - 10^{-3}$	10^{-5}
Ondas de radio	$10^3 - 10^9$	$10^5 - 10^{-1}$	10^{-10}
Corriente alterna	$10^2 - 10^3$	$10^7 - 10^5$	10^{-15}

Tabla 1 Espectro electromagnético (Rangos aproximados)
Fuente: (Ruíz Echeverri, 2018)

Los niveles naturales de radiación ultravioleta (UV; 280–400 nm), los rayos UVB (280–315 nm) y UVA (315–400 nm).

Los colores añaden interés a nuestro mundo. Los fotorreceptores de la retina capturan la luz reflejada cuando miramos un objeto. Las personas perciben los colores de manera diferente debido a variaciones en la sensibilidad de los fotorreceptores.

Se requiere un valor numérico específico para la aceptación universal de la precisión de un color específico. Los equipos de medición, como espectrofotómetros y colorímetros, proporcionan resultados de color numéricos para mediciones de color precisas y repetibles.

Un espectrofotómetro cuantifica los datos de color recopilando y filtrando las longitudes de onda que pasan a través de la muestra.

La Comisión Internacional de Iluminación (CIE), define mediante tres parámetros: tono, croma y luminosidad las características de un color.

- **El tono:** es el color dominante de un objeto. La combinación de los colores primarios y secundarios conforma el tono. (“Espectroscopia ultravioleta-visible: conceptos básicos”)
- **El croma** o también conocido como “saturación”: describe lo intenso o apagado que es un color.
- **La luminosidad:** es la intensidad luminosa del color (si es oscuro o claro).

Capítulo 3 Materiales y métodos

Este estudio se enfoca en el diseño e implementación de un sistema embebido de bajo costo para la clasificación de muestras de suelo agrícola. Este dispositivo debe ser pequeño, portátil y económico, además de tener un bajo consumo de energía. Para llevar a cabo este proyecto, se mencionan cuatro etapas clave: construcción del espectrofotómetro, caracterización y calibración del medidor, diseño del sistema de aprendizaje y programación del sistema embebido.

3.1 Construcción del espectrofotómetro

La espectroscopia UV-Vis es una técnica analítica que se utiliza para estudiar la interacción de la radiación electromagnética en el rango de la luz ultravioleta (UV) y la luz visible (Vis) con la materia, permite realizar análisis cuantitativos y cualitativos de muestras de compuestos orgánicos e inorgánicos.

En la espectroscopia UV-Vis, la muestra interactúa con la radiación electromagnética en el rango ultravioleta y visible, y como resultado, absorbe ciertas longitudes de onda de luz. El detector registra la intensidad de la luz transmitida a través de la muestra en función de la longitud de onda. Este registro de intensidad se representa como un espectro de absorción, que muestra los puntos en los que la muestra ha absorbido la luz de manera más efectiva, lo que a menudo se manifiesta como picos en el espectro.

Para medir la absorbancia de una sustancia en la región de la luz ultravioleta-visible (UV-VIS), se utiliza un espectrofotómetro UV-VIS, su funcionamiento se basa en la Ley de Beer-Lambert, que relaciona la absorbancia de una sustancia en una solución con la concentración de la sustancia y la longitud de onda de la muestra.

Existen dos tipos de espectrofotómetros, los de barrido convencionales que se basan en la técnica de medir la transmitancia en cada longitud de onda definida de manera consecutiva. Esto se logra utilizando una red de difracción o un prisma para separar la luz en sus componentes de diferentes longitudes de onda y el espectrofotómetro de red de diodos, el cual utiliza una técnica que permite iluminar la muestra con todos los componentes espectrales de la luz simultáneamente en lugar de realizar mediciones secuenciales, como en un espectrofotómetro de barrido tradicional. Esto se logra mediante el uso de una red de difracción en reflexión.

El diseño del espectrofotómetro se realizó con un prototipo propuesto por (B-winters, 2018) rediseñándolo para adecuarlo a la fuente de luz y al sensor UVA y UVB. El rediseño se realizó en SolidWorks, el cual es un programa que permite hacer modelados mecánicos de las piezas que se necesiten desarrollar. Para realizar la impresión en 3D se utilizó el programa CURA, que le indica a la impresora 3D el código que requiere para lograr la impresión.

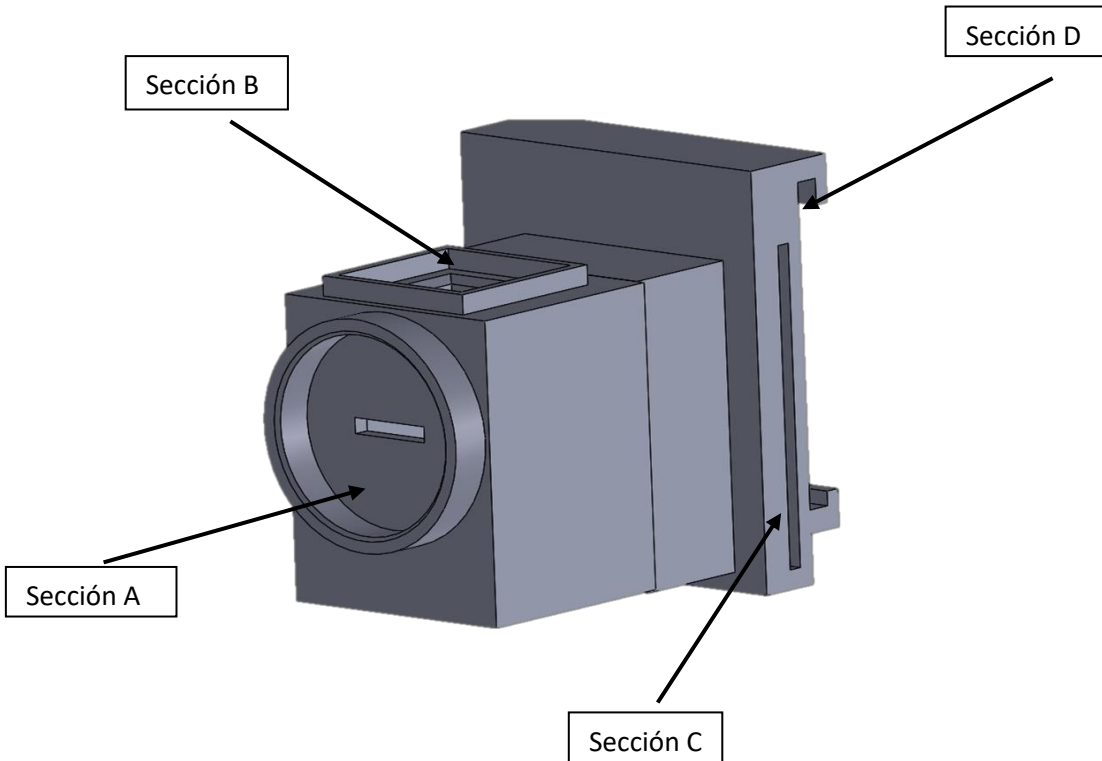


Figura 5 Prototipo de espectrofotómetro

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se describe detalladamente cada una de las secciones que lo conforman; en la sección A se inserta la fuente de luz ultravioleta con un espectro de longitud de onda 395 nm, en la sección B se introduce la celda de vidrio con la muestra de suelo analizado la cual es aislada de la luz externa mediante una tapa que se inserta en la parte superior de la celda de vidrio, en la sección C se adapta una rejilla de difracción de $1000 \text{ mm}/\text{línea}$ teniendo un rango de operación de 300 a 700 nanómetros dividiendo el haz de luz, proporcionando la respuesta del suelo analizado, en la sección D se ubica el sensor VEML6075 que permite detectar las diferentes amplitudes de la respuesta filtrada por la celda y la rejilla de difracción.

3.2 Selección de muestras

Los elementos nutricionales a los que se les aplico el análisis del suelo fueron nitrógeno y fósforo, estos elementos forman parte de los macroelementos primarios ya que son los que necesita la planta en cantidades elevadas y el suelo no los tiene en las cantidades requeridas para cubrir esas necesidades de nutrición, otro elemento analizado es el magnesio que forma parte de los macroelementos secundarios la diferencia con los primarios es que estos están más presentes en el suelo.

Los suelos son heterogéneos, es decir, sus propiedades varían ya sea en menor proporción como el valor del pH o en mayor proporción como los contenidos de nutrientes. En la figura 6 se indica cómo se realiza la correcta toma de muestras para obtener un muestreo representativo del suelo de la superficie analizada (López Galán & Miñano Fernández, 1988).

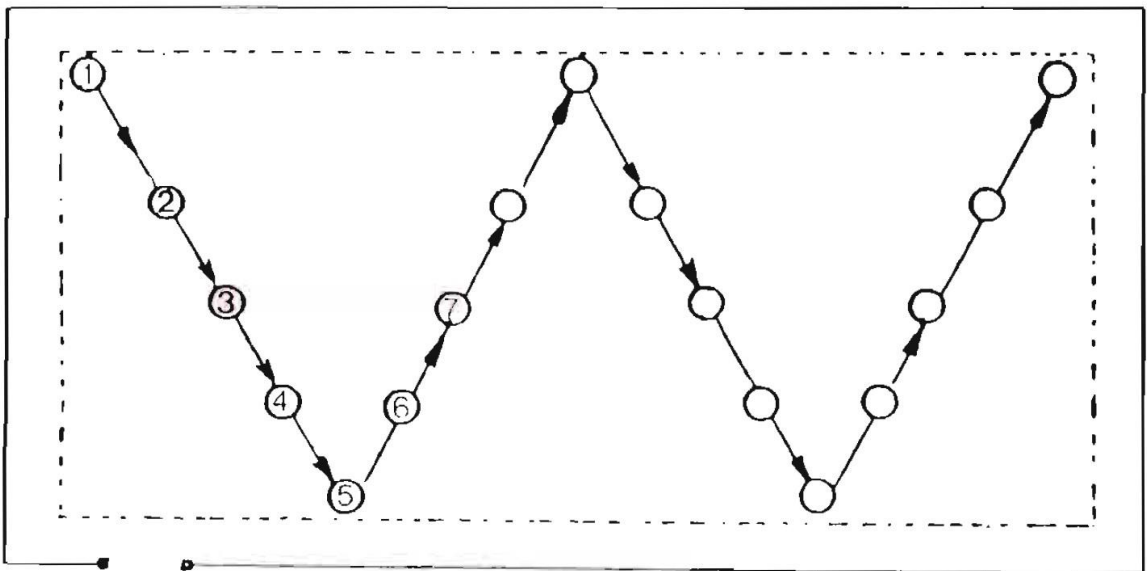


Figura 6 Esquema para la recolección de submuestras

Fuente: (López Galán & Miñano Fernández, 1988)

El número de submuestras depende del tamaño de la parcela o invernadero que se muestrea y este varía de 15 a 40 submuestras.

Las muestras obtenidas se guardaron en un recipiente plástico con una ficha de identificación que tenga los siguientes datos número de invernadero, profundidad de muestreo, fecha, entre otros datos.

Las muestras se tomaron de una profundidad aproximada de 30 centímetros, se tomó con una barrena la cual permitió la realización de la excavación del suelo y así mismo guardar ese suelo para su análisis.

Para hacer el análisis de suelo que involucra al nitrógeno, se realizan mínimo dos tomas de muestra, una antes del sembrado y otra a la mitad del desarrollo completo del cultivo, para así en ambas poder agregar el nitrógeno que necesite.

3.3 Preparación de muestras

Antes de realizar el análisis, las muestras se secan y se tamizan con un cedazo de 2 mm de agujero de malla.

Las muestras que se ingresaron al espectrógrafo requirieron ser mezclas homogéneas por lo cual no debieron contener partículas de mayor tamaño al de una solución, debido a que estas resultan en absorbancias altas que no corresponden a la absorción por excitación de la muestra, sino por

obstrucción del paso de luz, si la muestra contiene este tipo de partículas pasa por un tratamiento de filtración (Castellanos Cuéllar, 2018).

Para estudiar las muestras se realizó el siguiente método:

- 1.- Antes de agregar la solución a la celda de vidrio, se limpió perfectamente.
- 2.- En la primera celda se añadió un solvente, el cual es agua destilada con el cual se lavó la celda de vidrio y posteriormente se llenó la celda con el blanco evitando burbujas al interior de la solución.
- 3.- La celda de vidrio se tapa y se limpia con un papel fino para evitar rayones.
- 4.- La colocación de la fuente de luz es directa a la parte clara de la celda de vidrio lo que permite el correcto paso del haz por la celda con la solución a analizar. Se cierra el espectrógrafo para obtener el valor del espectro de absorción de la muestra.
- 5.- Se repitió el proceso cambiando el blanco por cada una de las muestras.

3.4 Experimento angular del sensor

Se realizó un experimento en una cámara isométrica de aislamiento lumínico en donde se instaló el Arduino mega y el sensor VEML6075 junto con un transportador para saber el ángulo de incidencia de la lámpara de UV.

Se realizaron 19 mediciones por cada ángulo con el que se trabajó, estos aumentaban de 10 en 10 grados empezando en 0 hasta llegar a 180. Se sacó un promedio de cada una de las mediciones.

Se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 2

Ángulo	UVA Promedio	Ángulo	%
0	34.300	0	3.267
10	46.436	10	4.422
20	101.840	20	9.699
30	169.420	30	16.140
40	319.700	40	30.450
50	463.940	50	44.180
60	537.860	60	51.220
70	589.940	70	56.180
80	844.060	80	80.390
90	1050	90	100
100	934.324	100	88.980
110	566.102	110	53.910
120	477.160	120	45.440
130	399.022	130	38
140	302.222	140	28.780
150	282.200	150	26.880
160	213.872	160	20.370
170	82.022	170	7.812
180	11	180	1.048

Tabla 2 Resultado experimento ángulo sensor
Fuente: Elaboración propia

A partir de los datos, se obtuvo una gráfica en donde se puede ver la tendencia del valor UVA con respecto al ángulo, donde se logra observar que el ángulo donde existe mayor incidencia de UVA es el ángulo de 90 grados, es decir de manera perpendicular al sensor.

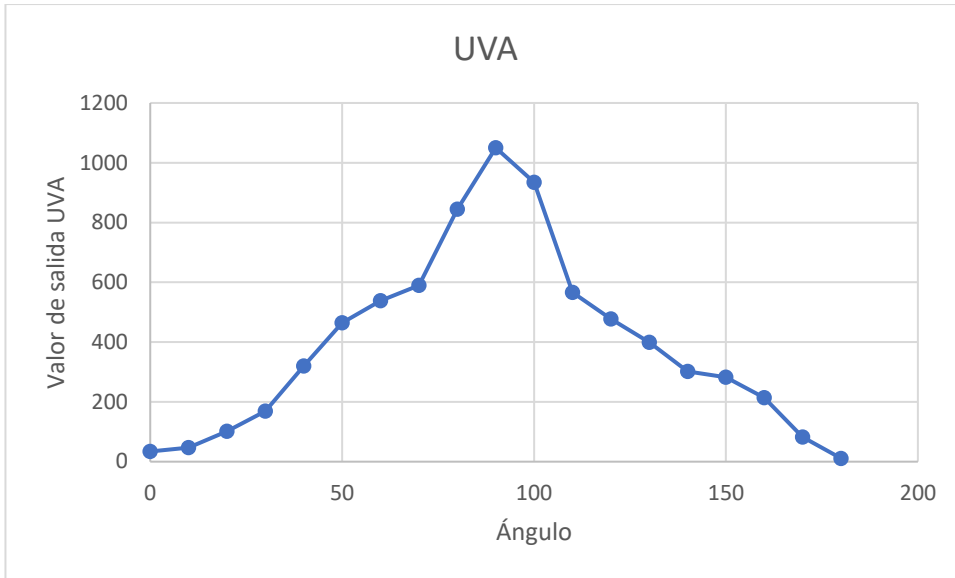


Figura 7 Gráfica Ángulo vs Valor de salida UVA
Fuente: Elaboración propia

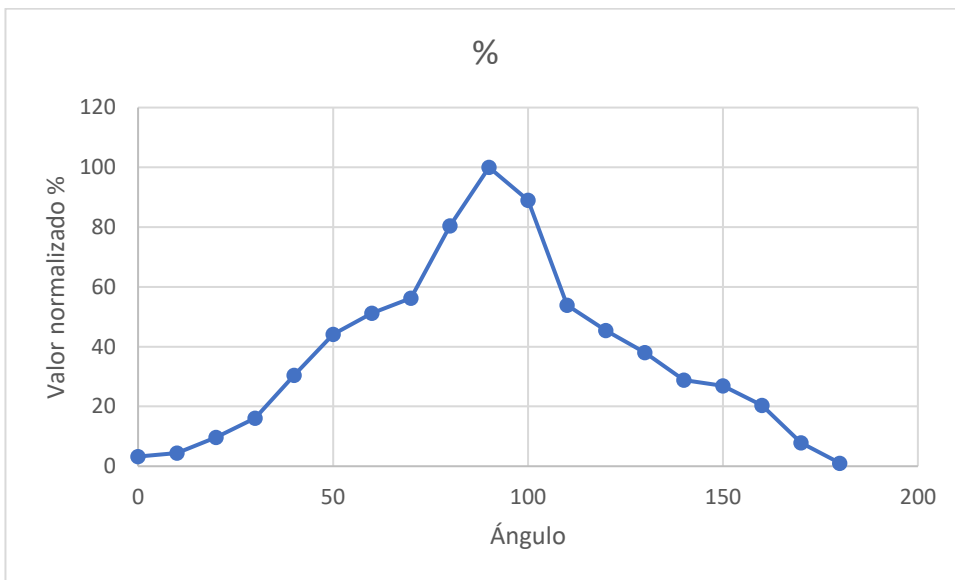


Figura 8 Gráfica Ángulo vs Valor normalizado (%)
Fuente: Elaboración propia

La curva que se obtiene nos indica que entre más cercano el ángulo entre la lampara UV y el sensor a la perpendicular el valor de UVA es más alto, con esto obtenemos una gráfica que se puede

considerar simétrica ya que los valores a la derecha del punto más alto se pueden considerar iguales a los valores de la parte izquierda.

3.5 Caracterización del medidor

La medición de la radiación UV se basa en el efecto fotoeléctrico interno en fotodiodos con uniones P-N sensibles a la luz, estas uniones funcionan en polarización inversa y evitan el flujo de corriente a menos que la radiación genere pares electrón-hueco al incidir en los fotones. La radiación UV provoca una corriente eléctrica proporcional a la radiación incidente. La elección del material para el fotodiodo determina su sensibilidad a ciertos rangos de longitud de onda. Para el UV, se usa comúnmente silicio, que es sensible entre 190 y 1100 nm. La sensibilidad puede variar dentro de este rango y depende de la respuesta espectral específica de cada sensor.

El sensor VEML6075 está diseñado para detectar la radiación ultravioleta (UV) en las gamas UVA y UVB. Este sensor integra fotodiodos, amplificadores y circuitos analógicos y digitales en un solo chip utilizando un proceso CMOS. Cuando se expone el sensor UV, a la radiación UV este puede medir la intensidad de los rayos UVA y UVB para proporcionar una medida de la intensidad de la señal.

La caracterización del sensor VEML6075 permite evaluar el rendimiento del sensor en diversas aplicaciones y comprender su sensibilidad a diferentes rangos de longitud de onda UV, para lo anterior se determinó la función de transferencia del sensor la cual representa la relación entre la amplitud normalizada de la salida del sensor y la longitud de onda en nanómetros (nm). La

digitalización de la gráfica de la función de transferencia con pasos de 0.5 entre puntos proporciono una serie de 190 puntos, tabla 3.

Longitud de onda	Respuesta normalizada
330	13.151
330.5	13.558
331	13.722
331.5	13.927
332	14.321
332.5	14.741
333	15.080
333.5	15.517
334	16.208
334.5	16.919
335	17.342
335.5	17.580
336	19.929
336.5	18.523
337	19.365
337.5	20.400
338	21.507
338.5	22.580
339	23.541
339.5	24.357
340	25.109

Tabla 3 Función de transferencia digitalizada

Fuente: Elaboración propia

A partir de los datos de la tabla 3, se obtiene la gráfica aproximada de la curva original, figura 9.

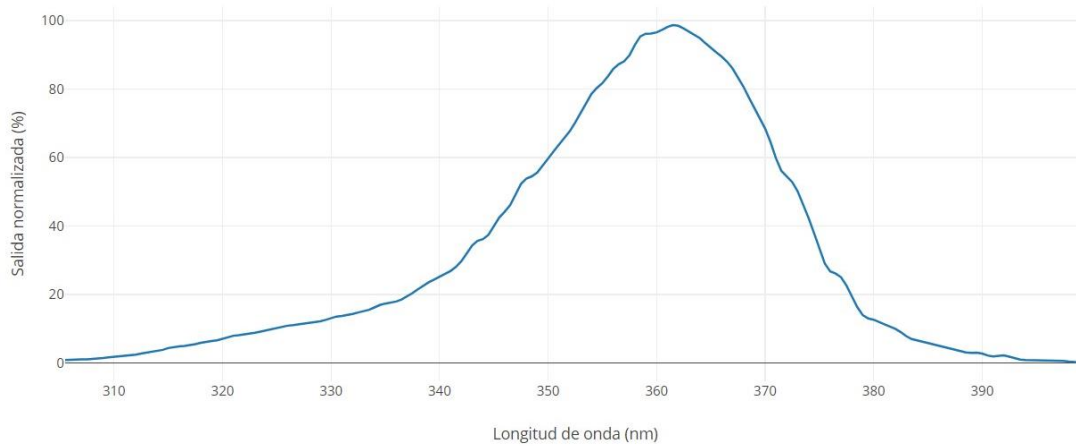


Figura 9 Gráfica longitud de onda vs salida normalizada

Fuente: Elaboración propia

Mediante una estimación lineal polinómica se obtuvieron los coeficientes de aproximación de las ocho ecuaciones que representan a la curva de la figura 10, vea ecuación 1.

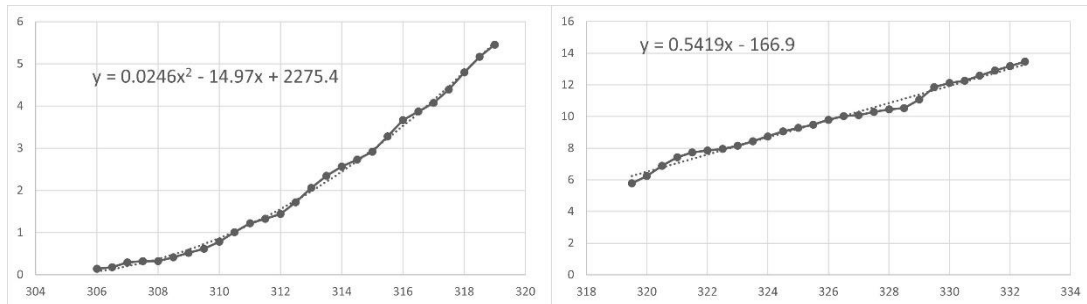


Fig. 10.a Intervalo 1

Fig. 10.b Intervalo 2

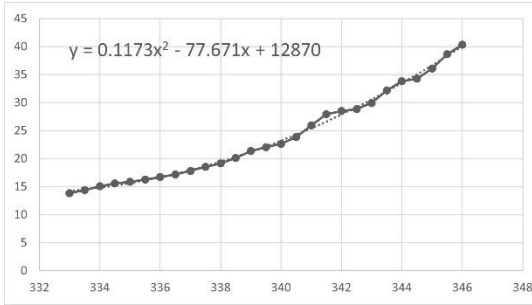


Fig. 10.c Intervalo 3

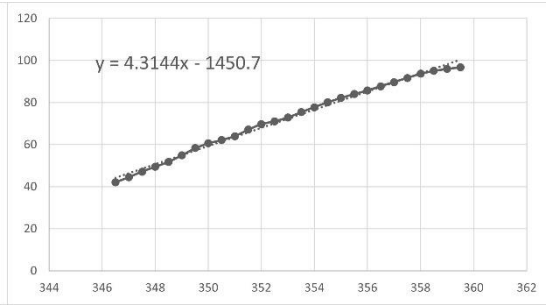


Fig. 10.d Intervalo 4

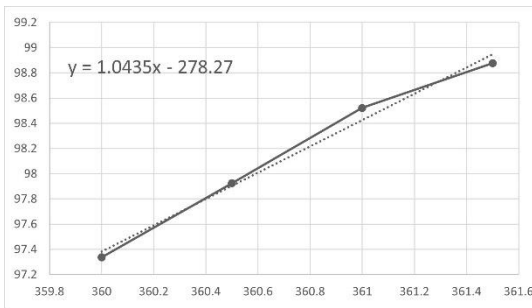


Fig. 10.e Intervalo 5

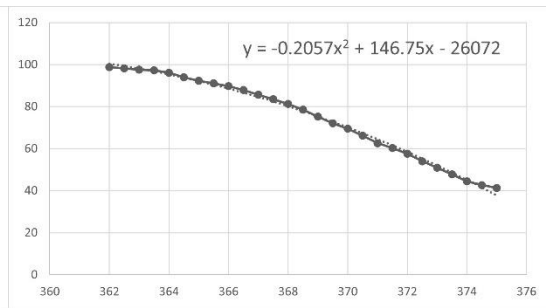


Fig. 10.f Intervalo 6

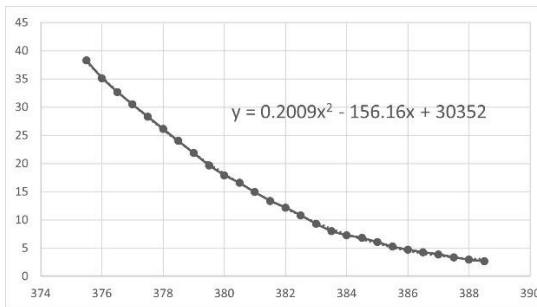


Fig. 10.g Intervalo 7

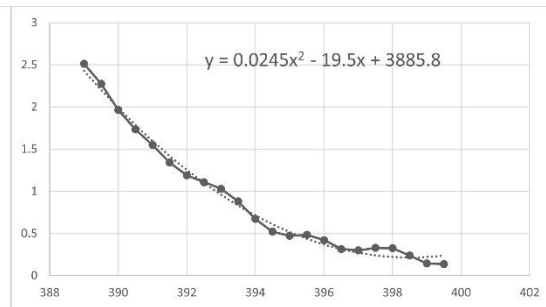


Fig. 10.h Intervalo 8

Figura 10 Representación por tramos de la curva función de transferencia

Fuente: Elaboración propia

$$y = f(x) = \begin{cases} 0.0246x^2 - 14.97x + 2275.4, & 306 < x \leq 319 \\ 0.5419x - 166.9, & 319 < x \leq 333 \\ 0.1173x^2 - 77.671x + 12870, & 333 < x \leq 347 \\ 4.3144x - 1450.7, & 347 < x \leq 360 \\ 1.0435x - 278.27, & 360 < x \leq 362 \\ -0.02057x^2 + 146.75x - 26072, & 362 < x \leq 375 \\ 0.2009x^2 - 156.16x + 30352, & 375 < x \leq 389 \\ 0.0245x^2 - 19.5x + 3885.8, & 389 < x \leq 400 \end{cases}$$

Ecuación 1 Respuesta del sensor VEML6075

3.6 Diseño del sistema de aprendizaje

La toma de muestras de suelo agrícola se efectuó, dividiendo el área de cultivo en cinco segmentos eliminando los lados externos del área de cultivo. Mediante una barrena metálica se tomaron las muestras a una profundidad de 30 cm., estas muestras se deshidrataron y posteriormente se pulverizaron, tomando 1 gr de la muestra de suelo siendo diluida en 100 ml de agua destilada, Figura 11.



Figura 11 Báscula
Fuente: Elaboración propia

La disolución resultante se mezcló mediante un agitador magnético durante 30 min, Figura 12, obteniendo una solución con los minerales suspendidos contenidos en la muestra de suelo, filtrándose mediante una unidad por gravedad al vacío, Figura 13. El procesamiento de las muestras de suelo se desarrolló en un espectrofotómetro Genesys 8000, el cual proporcionó la respuesta espectral de cada una de las muestras de suelo, Figura 14.



Figura 12 Agitador magnético
Fuente: Elaboración propia



Figura 13 Proceso de filtrado
Fuente: Elaboración propia

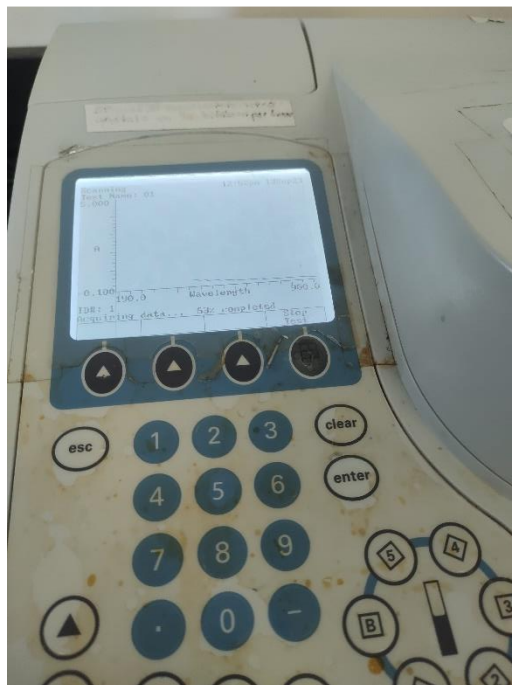


Figura 14 Espectrofotómetro
Fuente: Elaboración propia

La respuesta espectral del espectrofotómetro permite construir la base de datos que alimentan una red neuronal implementada en *Edge Impulse*, Figura 15, el dataset se construye con la información proporcionada por el espectrofotómetro, la cual consiste en la respuesta espectral normalizada, la longitud de onda y el valor al cuadrado de los datos anteriores, Figura 16. El análisis que realizara la red neuronal es de tipo supervisado, por lo que se requiere una etiqueta de cada clase, Figura 17.

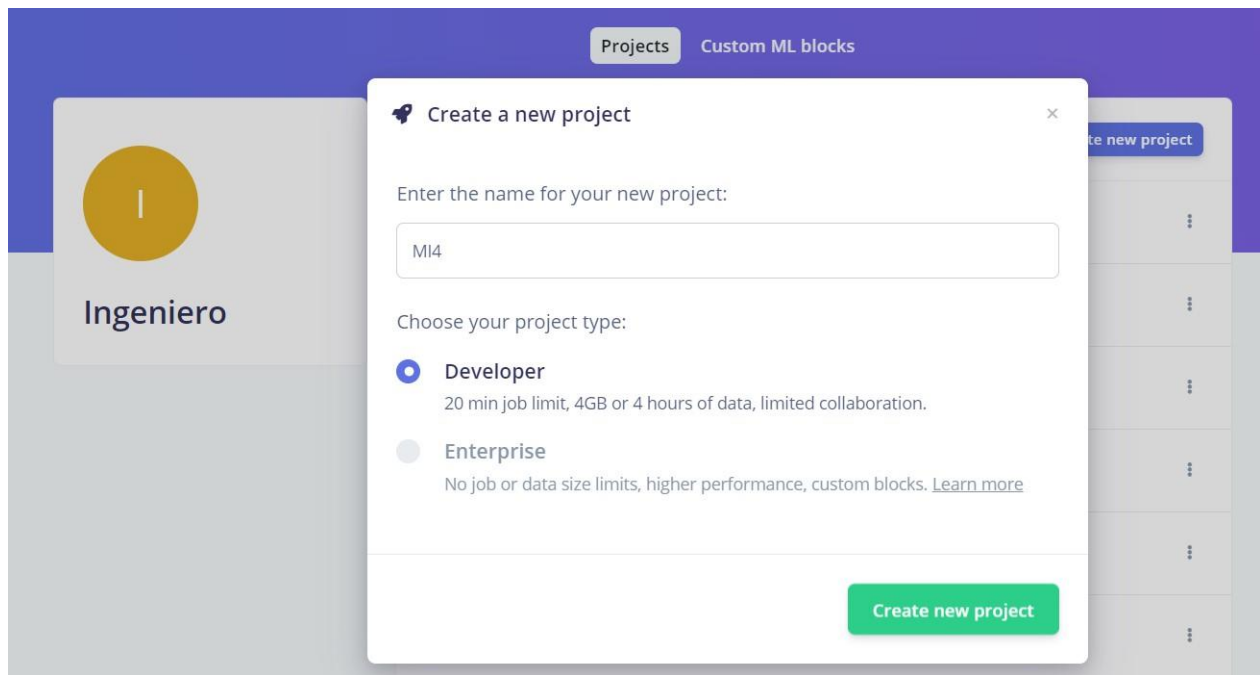


Figura 15 Proyecto nuevo en Edge Impulse
Fuente: Elaboración propia mediante la plataforma Edge Impulse

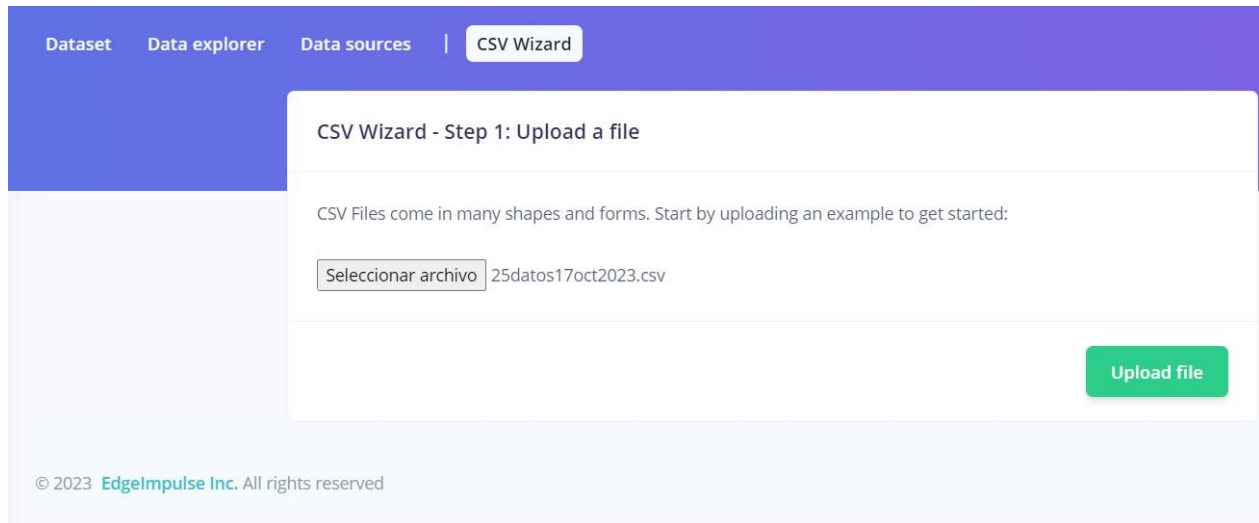


Figura 16 Wizard asistente para la adquisición de datos
Fuente: Elaboración propia mediante la plataforma Edge Impulse

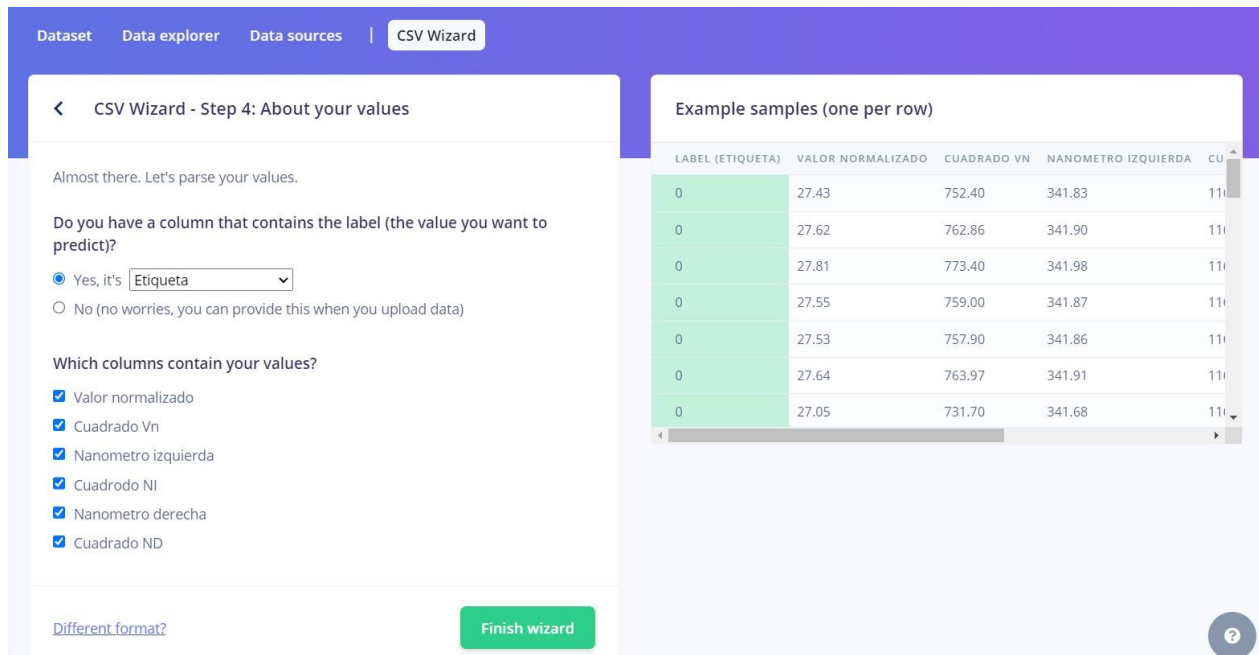


Figura 17 Etiquetado de muestras
Fuente: Elaboración propia mediante la plataforma Edge Impulse

Upload data ×

You can upload existing data to your project in the Data Acquisition Format (CBOR, JSON, CSV), or as WAV, JPG, PNG, AVI or MP4 files. We also support uploading image datasets with labels in various formats. When you include labels during upload, we attempt to convert your dataset into a format recognized by Studio. [here](#).

Upload mode

Select individual files [?](#)

Select a folder [?](#)

Select files

Elegir archivos | 25datos17oct2023.csv

Upload into category

Automatically split between training and testing [?](#)

Training

Testing

Label

CSV files will be labeled using the 'Etiqueta' column, as configured in the CSV wizard. [Update configuration](#)

[< Back](#) Upload data

Figura 18 Entrenamiento y prueba
Fuente: Elaboración propia mediante la plataforma Edge Impulse

La plataforma Edge Impulse automáticamente divide el dataset ingresado en entrenamiento y prueba, validando el modelo entrenado, Figura 18. En el bloque de procesamiento se selecciona el tipo de preprocesamiento con el que trabaja la red neuronal, Figura 19.

DESCRIPTION	AUTHOR	RECOMMENDED
Flatten Flatten an axis into a single value, useful for slow-moving averages like temperature data, in combination with other blocks.	Edge Impulse	Add
Spectral Analysis Great for analyzing repetitive motion, such as data from accelerometers. Extracts the frequency and power characteristics of a signal over time.	Edge Impulse	Add
Spectrogram Extracts a spectrogram from audio or sensor data, great for non-voice audio or data with continuous frequencies.	Edge Impulse	Add
IMU (Syntiant) Syntiant only. Great for analyzing repetitive motion, such as data from accelerometers. Extracts the frequency and power characteristics of a signal over time.	Syntiant	Add
Raw Data Use data without pre-processing. Useful if you want to use deep learning to learn features.	Edge Impulse	Add


Some processing blocks have been hidden based on the data in your project. [Show all blocks anyway](#)

Figura 19 Bloque de procesamiento
Fuente: Elaboración propia mediante la plataforma Edge Impulse

En el bloque de aprendizaje se selecciona la función de clasificación que realiza la red neuronal una vez ya entrenada, Figura 20. Una vez que la plataforma Edge Impulse se configura, se crea el impulso que permite generar la red neuronal, Figura 21, en la configuración de la red neuronal se crean las características de las capas ocultas, así mismo, se determina el número de épocas y la tasa de aprendizaje, Figura 22.

Add a learning block ×

Did you know? You can [bring your own model](#) in PyTorch, Keras or scikit-learn.

DESCRIPTION	AUTHOR	RECOMMENDED
Regression Learns patterns from data, and can apply these to new data. Great for predicting numeric continuous values.	Edge Impulse 	<button>Add</button>
Classification Learns patterns from data, and can apply these to new data. Great for categorizing movement or recognizing audio.	Edge Impulse	<button>Add</button>
Anomaly Detection (K-means) Find outliers in new data. Good for recognizing unknown states, and to complement classifiers. Works best with low dimensionality features like the output of the spectral features block.	Edge Impulse	<button>Add</button>
Classification - BrainChip Akida™ Learns patterns from data, and can apply these to new data. Great for categorizing movement or recognizing audio. ONLY FOR: BrainChip AKD1000 MINI PCIe board	BrainChip	<button>Add</button>

Some learning blocks have been hidden based on the data in your project. [Show all blocks anyway](#)

Figura 20 Bloque de aprendizaje
Fuente: Elaboración propia mediante la plataforma Edge Impulse

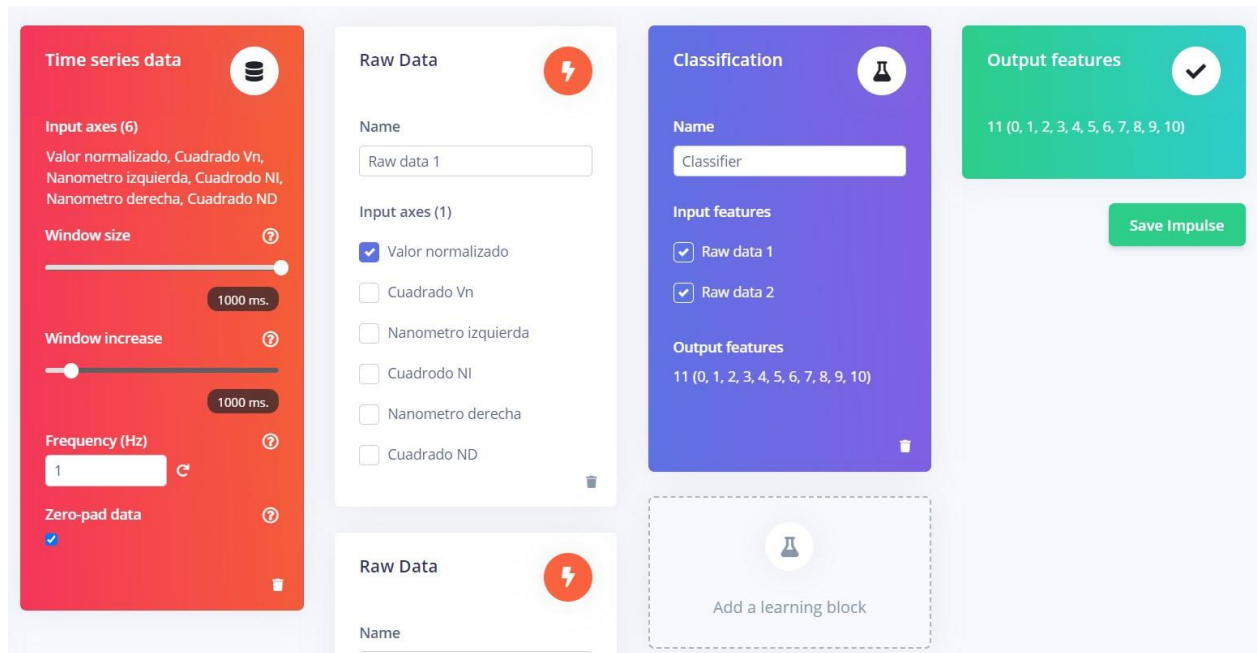


Figura 21 Creación del impulso
Fuente: Elaboración propia mediante la plataforma Edge Impulse

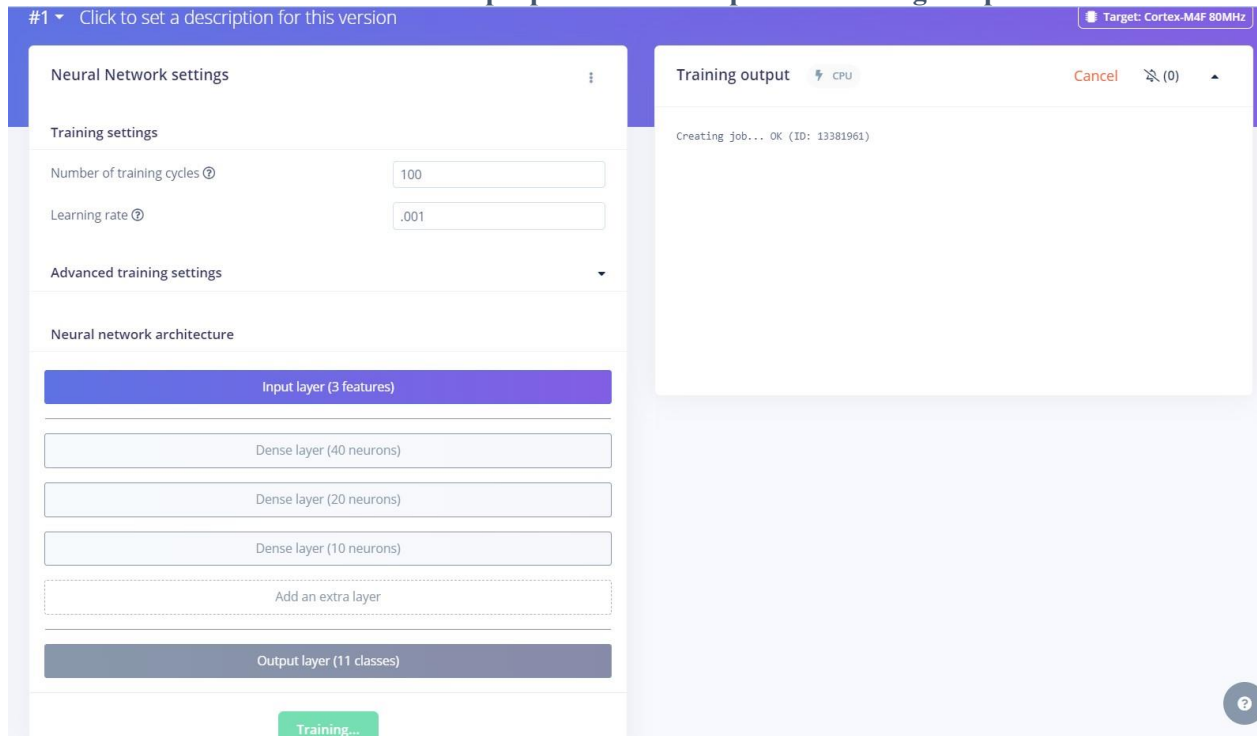


Figura 22 Capas de la red neuronal
Fuente: Elaboración propia mediante la plataforma Edge Impulse

La matriz de confusión de la red neuronal entrenada, indica la probabilidad de clasificación del valor real contra el valor pronosticado, el modelo de red neuronal seleccionado proporciona una precisión de 83.3% y una función de pérdida del 0.38, Figura 23.

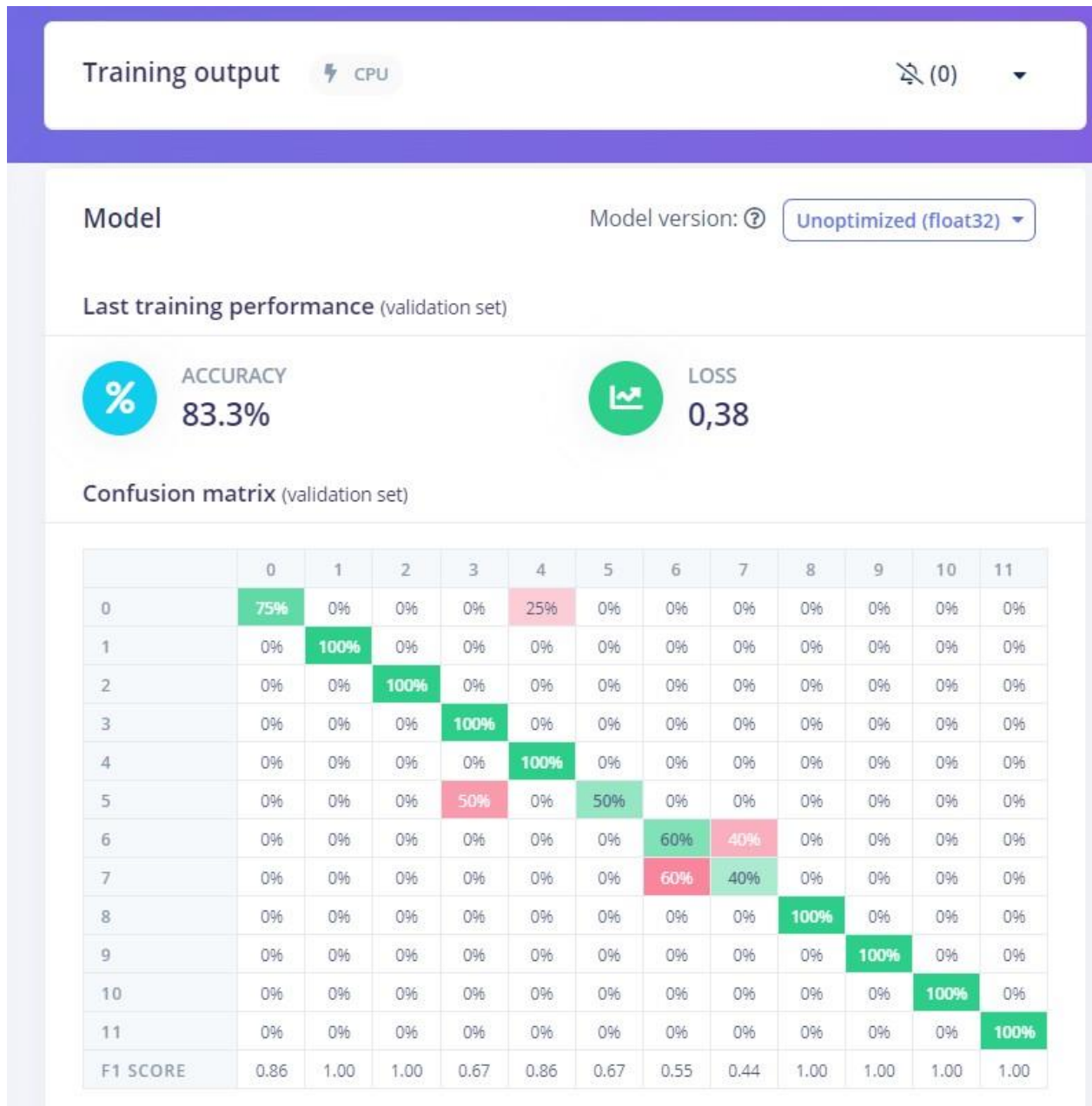


Figura 23 Matriz de confusión
Fuente: Elaboración propia mediante la plataforma Edge Impulse

3.7 Programación de sistema embebido

La plataforma Edge Impulse permite generar el modelo de la red neuronal entrenada, el programa en lenguaje C que representa a la red neuronal se transfiere mediante el IDE de Arduino (*deployment*) al microcontrolador ESP32, seleccionando el tipo de librería en la que se programara el código ejecutado por el sistema embebido seleccionado, Figura 24.

Configure your deployment

You can deploy your impulse to any device. This makes the model run without an internet connection, minimizes latency, and runs with minimal power consumption. [Read more.](#)

🔍 **Arduino library** ✕

SELECTED DEPLOYMENT

Arduino library
An Arduino library with examples that runs on most Arm-based Arduino development boards.

MODEL OPTIMIZATIONS
Model optimizations can increase on-device performance but may reduce accuracy.

Enable EON™ Compiler *Same accuracy, up to 50% less memory. [Learn more](#)*

Quantized (int8)

	RAW DATA1	RAW DATA2	CLASSIFIER	TOTAL
LATENCY	-	-	1 ms.	1 ms.
RAM	0,0K	0,0K	3,4K	3,4K
FLASH	-	-	35,6K	-
ACCURACY				-

Unoptimized (float32)

	RAW DATA1	RAW DATA2	CLASSIFIER	TOTAL
LATENCY	-	-	6 ms.	6 ms.
RAM	0,0K	0,0K	3,5K	3,5K
FLASH	-	-	38,6K	-
ACCURACY				-

To compare model accuracy, run model testing for all available optimizations.

Estimate for Espressif ESP-EYE (ESP32 240MHz) - [Change target](#)

Figura 24 Deployment
Fuente: Elaboración propia mediante la plataforma Edge Impulse

En la Figura 25 y Figura 26, se muestra parte del código en C con el que se programa el microcontrolador ESP32 LilyGo TTGOV1.4

```
ei_printf("Predictions ");
ei_printf("(DSP: %d ms., Classification: %d ms., Anomaly: %d ms.)",
  result.timing.dsp, result.timing.classification, result.timing.anomaly);
ei_printf(": \n");
float VMax=0.0;
String LMax;
for (size_t ix = 0; ix < EI_CLASSIFIER_LABEL_COUNT; ix++) {
  ei_printf("  %s: %.5f\n", result.classification[ix].label, result.classification[ix].value);
  if (result.classification[ix].value>VMax)
  {
    VMax=result.classification[ix].value;
    LMax=result.classification[ix].label;
  }
}

#if EI_CLASSIFIER_HAS_ANOMALY == 1
  ei_printf("  anomaly score: %.3f\n", result.anomaly);
#endif
ei_printf(" %s: %.5f\n", LMax, VMax);

  lcd.setCursor(0, 1);

  lcd.print("Soil:");
  lcd.print(LMax);
  delay(100);
  lcd.print(" Acc:");
  lcd.print(int(VMax*100));
  lcd.print("%");
  delay(4000);
}

#if !defined(EI_CLASSIFIER_SENSOR) || EI_CLASSIFIER_SENSOR != EI_CLASSIFIER_SENSOR_ACCELEROMETER
#endif

void VSetup() {
  Serial.println("VEML6075 Full Test");
  while (!uv.begin()) {
    Serial.println("Failed to communicate with VEML6075 sensor, check wiring?");
    delay(2000);
  }
  Serial.println("Found VEML6075 sensor");
}
```

Figura 25 Código de la red neuronal
Fuente: Elaboración propia

```

void Vloop() {
  normi = (uv.readUVA()/(1050)*100);
  normd = (uv.readUVA()/(1050)*100);
  if(normi > 0 && normi<6){
    xi =(14.9702703+sqrt(sq(14.9702703)-(4*0.02462244*(2275.4338-normi))))/(2*0.02462244);
  }
  if(normi > 6 && normi<14){
    xi = (normi + 166.896448)/0.54190366;
  }
  if(normi > 14 && normi<44){
    xi =(77.670864+sqrt(sq(77.670864)-(4*0.11731074*(12870.1747-normi))))/(2*0.11731074);
  }
  if(normi > 44 && normi<96){
    xi = (normi + 1450.6922)/4.3143968;
  }
  if(normi > 96 && normi<100){
    xi = (normi + 278.265341)/1.04346906;
  }
  if(normd > 38 && normd<100){
    xd =(-146.746707-sqrt(sq(146.746707)-(4*-0.20565272*-(26072.3133-normd))))/(2*-0.20565272);
  }
  if(normd > 3 && normd<38){
    xd =(156.162686-sqrt(sq(-156.162686)-(4*0.20088947*(30351.5897-normd))))/(2*0.20088947);
  }
  if(normd > 0 && normd<3){
    xd =(19.5004114-sqrt(sq(-19.5004114)-(4*0.024446625*(3885.83382-normd))))/(2*0.024446625);
  }
  Serial.print("Raw UVA reading: "); Serial.println(uv.readUVA());
  Serial.print("Valor normalizado izquierdo: "); Serial.println(normi);
  Serial.print("Valor normalizado derecho: "); Serial.println(normd);
  Serial.print("Valor x izquierdo: "); Serial.println(xi);
  Serial.print("Valor x derecho: "); Serial.println(xd);
  delay(1000);
}

```

Figura 26 Código de la red neuronal
Fuente: Elaboración propia

Capítulo 4 Resultados y discusión

En la figura 27 se muestra el resultado de ingresar en una celda de vidrio al espectrofotómetro agua destilada. La predicción con el valor más grande es el 0 que indica que es agua destilada.

```
Starting inferencing in 2 seconds...
Sampling...
Predictions (DSP: 0 ms., Classification: 1 ms., Anomaly: 0 ms.):
  0: 0.52992
  1: 0.00000
  2: 0.00000
  3: 0.02521
  4: 0.15988
  5: 0.00097
  6: 0.00000
  7: 0.00000
  8: 0.00000
  9: 0.00000
 10: 0.28243
 11: 0.00158
 0: 0.52992
Raw UVA reading: 341.48
Valor normalizado izquierdo: 32.52
Valor normalizado derecho: 32.52
Valor x izquierdo: 343.68
Valor x derecho: 376.57
```

Figura 27 Resultado 0 = Agua Destilada
Fuente: Elaboración propia

En la figura 28 se muestra el resultado de ingresar en una celda de vidrio al espectrofotómetro la muestra número 1. La predicción con el valor más grande es el 1 que indica que es el tipo de suelo 1.

```
Starting inferencing in 2 seconds...
Sampling...
Predictions (DSP: 0 ms., Classification: 1 ms., Anomaly: 0 ms.):
  0: 0.00000
  1: 0.99791
  2: 0.00000
  3: 0.00000
  4: 0.00000
  5: 0.00000
  6: 0.00000
  7: 0.00000
  8: 0.00000
  9: 0.00209
 10: 0.00000
 11: 0.00000
 1: 0.99791
Raw UVA reading: 178.90
Valor normalizado izquierdo: 17.04
Valor normalizado derecho: 17.04
Valor x izquierdo: 336.30
Valor x derecho: 380.34
```

Figura 28 Resultado 1 = Tipo de suelo 1
Fuente: Elaboración propia

En la figura 29 se muestra el resultado de ingresar en una celda de vidrio al espectrofotómetro la muestra número 2. La predicción con el valor más grande es el 2 que indica que es el tipo de suelo 2.

```
Starting inferencing in 2 seconds...
Sampling...
Predictions (DSP: 0 ms., Classification: 1 ms., Anomaly: 0 ms.):
  0: 0.00000
  1: 0.00000
  2: 0.77890
  3: 0.13903
  4: 0.00001
  5: 0.07975
  6: 0.00224
  7: 0.00006
  8: 0.00000
  9: 0.00000
 10: 0.00000
 11: 0.00000
 2: 0.77890
Raw UVA reading: 288.36
Valor normalizado izquierdo: 27.46
Valor normalizado derecho: 27.46
Valor x izquierdo: 341.84
Valor x derecho: 377.66
```

Figura 29 Resultado 2 = Tipo de suelo 2
Fuente: Elaboración propia

En la figura 30 se muestra el resultado de ingresar en una celda de vidrio al espectrofotómetro la muestra número 3. La predicción con el valor más grande es el 4 que indica que es el tipo de suelo 4, mostrando un error ya que es el tipo de suelo 3.

```
Starting inferencing in 2 seconds...
Sampling...
Predictions (DSP: 0 ms., Classification: 1 ms., Anomaly: 0 ms.):
  0: 0.19813
  1: 0.00000
  2: 0.00000
  3: 0.04165
  4: 0.73778
  5: 0.01641
  6: 0.00000
  7: 0.00000
  8: 0.00000
  9: 0.00000
 10: 0.00603
 11: 0.00000
 4: 0.73778
Raw UVA reading: 324.48
Valor normalizado izquierdo: 30.90
Valor normalizado derecho: 30.90
Valor x izquierdo: 343.12
Valor x derecho: 376.91

Starting inferencing in 2 seconds...
```

Figura 30 Resultado deseado 3 obtenido 4
Fuente: Elaboración propia

En la figura 31 se muestra el resultado de ingresar en una celda de vidrio al espectrofotómetro la muestra número 4. La predicción con el valor más grande es el 4 que indica que es el tipo de suelo 4.

```
Starting inferencing in 2 seconds...
Sampling...
Predictions (DSP: 0 ms., Classification: 1 ms., Anomaly: 0 ms.):
  0: 0.19813
  1: 0.00000
  2: 0.00000
  3: 0.04165
  4: 0.73778
  5: 0.01641
  6: 0.00000
  7: 0.00000
  8: 0.00000
  9: 0.00000
 10: 0.00603
 11: 0.00000
  4: 0.73778
Raw UVA reading: 324.48
Valor normalizado izquierdo: 30.90
Valor normalizado derecho: 30.90
Valor x izquierdo: 343.12
Valor x derecho: 376.91

Starting inferencing in 2 seconds...
```

Figura 31 Resultado 4 = Tipo de suelo 4
Fuente: Elaboración propia

En la figura 32 se muestra el resultado de ingresar en una celda de vidrio al espectrofotómetro la muestra número 5. La predicción con el valor más grande es el 5 que indica que es el tipo de suelo 5.

```
Starting inferencing in 2 seconds...
Sampling...
Predictions (DSP: 0 ms., Classification: 1 ms., Anomaly: 0 ms.):
  0: 0.01574
  1: 0.00000
  2: 0.00002
  3: 0.31797
  4: 0.05143
  5: 0.61476
  6: 0.00000
  7: 0.00000
  8: 0.00000
  9: 0.00000
 10: 0.00009
 11: 0.00000
 5: 0.61476
Raw UVA reading: 309.92
Valor normalizado izquierdo: 29.52
Valor normalizado derecho: 29.52
Valor x izquierdo: 342.62
Valor x derecho: 377.21
```

Figura 32 Resultado 5 = Tipo de suelo 5
Fuente: Elaboración propia

En la figura 33 se muestra el resultado de ingresar en una celda de vidrio al espectrofotómetro la muestra número 6. La predicción con el valor más grande es el 8 que indica que es el tipo de suelo 8, mostrando un error ya que es el suelo tipo 6.

```
Starting inferencing in 2 seconds...
Sampling...
Predictions (DSP: 0 ms., Classification: 1 ms., Anomaly: 0 ms.):
  0: 0.00000
  1: 0.00000
  2: 0.00001
  3: 0.00000
  4: 0.00000
  5: 0.00000
  6: 0.00376
  7: 0.02955
  8: 0.96051
  9: 0.00618
 10: 0.00000
 11: 0.00000
  8: 0.96051
Raw UVA reading: 263.58
Valor normalizado izquierdo: 25.10
Valor normalizado derecho: 25.10
Valor x izquierdo: 340.86
Valor x derecho: 378.21
```

Figura 33 Resultado deseado 6 obtenido 8
Fuente: Elaboración propia

En la figura 34 se muestra el resultado de ingresar en una celda de vidrio al espectrofotómetro la muestra número 7. La predicción con el valor más grande es el 3 que indica que es el tipo de suelo 3, mostrando un error ya que es el suelo tipo 7.

```
Starting inferencing in 2 seconds...
Sampling...
Predictions (DSP: 0 ms., Classification: 1 ms., Anomaly: 0 ms.):
  0: 0.00005
  1: 0.00000
  2: 0.20012
  3: 0.45654
  4: 0.00015
  5: 0.34310
  6: 0.00005
  7: 0.00000
  8: 0.00000
  9: 0.00000
 10: 0.00000
 11: 0.00000
 3: 0.45654
Raw UVA reading: 294.14
Valor normalizado izquierdo: 28.01
Valor normalizado derecho: 28.01
Valor x izquierdo: 342.05
Valor x derecho: 377.54
```

Figura 34 Resultado deseado 7 obtenido 3
Fuente: Elaboración propia

En la figura 35 se muestra el resultado de ingresar en una celda de vidrio al espectrofotómetro la muestra número 8. La predicción con el valor más grande es el 8 que indica que es el tipo de suelo 8.

```
Starting inferencing in 2 seconds...
Sampling...
Predictions (DSP: 0 ms., Classification: 1 ms., Anomaly: 0 ms.):
  0: 0.00000
  1: 0.00000
  2: 0.00005
  3: 0.00000
  4: 0.00000
  5: 0.00000
  6: 0.01890
  7: 0.10740
  8: 0.86851
  9: 0.00514
 10: 0.00000
 11: 0.00000
 8: 0.86851
Raw UVA reading: 262.80
Valor normalizado izquierdo: 25.03
Valor normalizado derecho: 25.03
Valor x izquierdo: 340.83
Valor x derecho: 378.23
```

Figura 35 Resultado 8 = Tipo de suelo 8
Fuente: Elaboración propia

En la figura 36 se muestra el resultado de ingresar en una celda de vidrio al espectrofotómetro la muestra número 9. La predicción con el valor más grande es el 9 que indica que es el tipo de suelo 9.

```
Starting inferencing in 2 seconds...
Sampling...
Predictions (DSP: 0 ms., Classification: 1 ms., Anomaly: 0 ms.):
  0: 0.00000
  1: 0.02457
  2: 0.00000
  3: 0.00000
  4: 0.00000
  5: 0.00000
  6: 0.00000
  7: 0.00000
  8: 0.00011
  9: 0.97531
 10: 0.00000
 11: 0.00000
  9: 0.97531
Raw UVA reading: 224.46
Valor normalizado izquierdo: 21.38
Valor normalizado derecho: 21.38
Valor x izquierdo: 339.08
Valor x derecho: 379.13
```

Figura 36 Resultado 9 = Tipo de suelo 9
Fuente: Elaboración propia

En la figura 37 se muestra el resultado de ingresar en una celda de vidrio al espectrofotómetro la muestra número 10. La predicción con el valor más grande es el 10 que indica que es el tipo de suelo 10.

```
Starting inferencing in 2 seconds...
Sampling...
Predictions (DSP: 0 ms., Classification: 1 ms., Anomaly: 0 ms.):
  0: 0.08607
  1: 0.00000
  2: 0.00000
  3: 0.00103
  4: 0.00253
  5: 0.00000
  6: 0.00000
  7: 0.00000
  8: 0.00000
  9: 0.00000
 10: 0.63778
 11: 0.27258
 10: 0.63778
Raw UVA reading: 360.26
Valor normalizado izquierdo: 34.31
Valor normalizado derecho: 34.31
Valor x izquierdo: 344.27
Valor x derecho: 376.21
```

Figura 37 Resultado 10 = Tipo de suelo 10
Fuente: Elaboración propia

En la figura 38 se muestra el resultado de incidir la luz de la fuente lumínica directamente al sensor.

La predicción con el valor más grande es el 11 que indica que es la luz directamente al sensor.

```
Starting inferencing in 2 seconds...
Sampling...
Predictions (DSP: 0 ms., Classification: 1 ms., Anomaly: 0 ms.):
 0: 0.00581
 1: 0.00000
 2: 0.00000
 3: 0.00003
 4: 0.00005
 5: 0.00000
 6: 0.00000
 7: 0.00000
 8: 0.00000
 9: 0.00000
10: 0.17666
11: 0.81745
11: 0.81745
Raw UVA reading: 368.26
Valor normalizado izquierdo: 35.07
Valor normalizado derecho: 35.07
Valor x izquierdo: 344.51
Valor x derecho: 376.06
```

Figura 38 Resultado 11 = Luz directa al sensor
Fuente: Elaboración propia

En la tabla 4 se observan los resultados obtenidos al introducir los 10 diferentes tipos de muestras del suelo agrícola en el espectrofotómetro. La muestra 0 y 11 son los blancos representando agua destilada y la luz UV incidente al sensor. Los valores más altos por columna se encuentran en la diagonal de color verde (en color rojo se encuentran las celdas donde se localiza el valor más alto de esa columna) representando la probabilidad más alta para el tipo de suelo de la muestra analizada, en consecuencia, el funcionamiento en tiempo real del sistema embebido clasifica correctamente 9 muestras de suelo agrícola de un total de 12.

Muestra	Probabilidad de clasificación											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	0.52992	0	0	0.19813	0.17176	0.01574	0	0.00005	0	0	0.08607	0.00581
1	0	0.99781	0	0	0	0	0	0	0	0.02457	0	0
2	0	0	0.7789	0	0	0.00002	0.00001	0.20012	0.00005	0	0	0
3	0.02521	0	0.13903	0.04165	0.06659	0.31797	0	0.45654	0	0	0.00103	0.00003
4	0.15988	0	0.00001	0.73778	0.7197	0.05143	0	0.00015	0	0	0.00253	0.00005
5	0.00097	0	0.07975	0.01641	0.03859	0.61476	0	0.3431	0	0	0	0
6	0	0	0.00224	0	0	0	0.00376	0.00005	0.0189	0	0	0
7	0	0	0.00006	0	0	0	0.02955	0	0.1074	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0.96051	0	0.86851	0.00011	0	0
9	0	0.00209	0	0	0	0	0.00618	0	0.00514	0.97531	0	0
10	0.28243	0	0	0.00603	0.00336	0.00009	0	0	0	0	0.63778	0.17666
11	0.00158	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.27258	0.81745

Tabla 4 Resultados de clasificación de la red neuronal con 10 muestras de suelo.
Fuente: Elaboración propia

Resultados de análisis de suelos			
Muestra	Fósforo	Magnesio	Nitrógeno
	(mg/Kg)	(meq/L)	(%)
1	17.9	3	0.05
2	18.4	3	0.04
3	14.6	2.5	0.04
4	16.4	2	0.04
5	8.8	1	0.04
6	21.5	1.5	0.05
7	23.7	1.5	0.04
8	13.3	1	0.04
9	14.2	1	0.04
10	16.7	2.5	0.03

Tabla 5 Resultados de análisis de suelos

Fuente: Elaboración propia

La tabla 5 indica los micro y macronutrientes contenidos en 10 muestras de suelo agrícola. Estos resultados se obtuvieron en el laboratorio de suelos del Instituto Tecnológico del Valle del Guadiana. Relacionando los resultados que se obtiene mediante la red neuronal con los resultados de la tabla 3, sugieren, por ejemplo, que para la predicción de una muestra de suelo de la clase 2, ésta presenta características compatibles con los resultados de Fósforo, Magnesio y Nitrógeno similares a los de la tabla 5.

Capítulo 5 Conclusiones

En este proyecto de investigación se abordó el diseño, construcción y puesta a punto de un sistema embebido para la caracterización de muestras de suelo agrícola. El sistema está conformado por un espectrofotómetro que fue implementado en una impresora 3D, está constituido por una carcasa que sirve como soporte para una fuente de excitación de luz ultravioleta, un porta muestras que permite contener una celda de vidrio en la cual se introduce la muestra analizada, una rejilla de difracción de mil líneas en el rango de los 300 nm-700 nm, un sensor VEMML6075 que permite cuantificar la respuesta refractada por la muestra de suelo agrícola.

Adicionalmente, se diseñó en lenguaje C, el programa de cómputo que permitió determinar la longitud de onda y la salida normalizada captada por el sensor VEMML6075, con esta información se entrenó una máquina de aprendizaje en la plataforma *Edge Impulse* para desarrollar un algoritmo de aprendizaje con el que se realizó el *deployment* en un microcontrolador *ESP32*. Se prepararon 10 muestras diferentes de suelo agrícolas mediante un proceso de 30 minutos de agitación las cuales se dejaron reposar por 48 horas, posteriormente se realizó un filtrado por vacío. Estas muestras se insertaron mediante una celda de vidrio en el espectrofotómetro, el cual proporciona el valor de la luz refractada por la muestra, el programa contenido en el microcontrolador *ESP32* clasifica el tipo de suelo y los nutrientes presentes.

La máquina de aprendizaje clasifica correctamente el 83.3% de las diferentes muestras de suelo a las que se somete el sistema desarrollado.

Capítulo 6 Referencias

- Beningo, J. (18 de 08 de 2022). *DigiKey*. Obtenido de <https://www.digikey.com/en/articles/how-to-run-a-hello-world-machine-learning-model-stm32>
- Castellanos Cuéllar, I. C. (2018). *Aplicaciones y generalidades de un espectrofotómetro UV-VIS UV-1800 de Shimadzu*. Bogota.
- Castillo, A. P. (17 de Febrero de 2020). *El Economista*. Obtenido de El Economista: <https://www.economista.com.mx/opinion/Inversiones-en-el-sector-agropecuario-en-Durango-I-20200217-0086.html>
- De La Cruz Moreno, V. R. (2019). TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO AGRÓNOMO. *DETERMINACIÓN DEL RITMO DE ABSORCIÓN DE MACRO Y MICRO NUTRIENTES EN EL CULTIVO DE TARA (Caesalpinia spinosa) EN LA ZONA ALTA DEL VALLE DE ICA*. UNIVERSIDAD NACIONAL “SAN LUIS GONZAGA” DE ICA FACULTAD DE AGRONOMÍA, ICA - PERU.
- Fonseca, B. S. (2020). Proyecto de grado en la modalidad de pasantía para optar el título de Licenciado en Física. *Práctica en espectroscopia estelar como apoyo a las actividades del Observatorio Astronómico de la Universidad Distrital*. UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS FACULTAD DE CIENCIAS Y EDUCACIÓN, Bogota. Obtenido de <http://hdl.handle.net/11349/24999>
- Gaona, P. (2020). Efecto de dos niveles de nitrógeno y potasio aplicados por fertirriego en las variables de crecimiento y concentración de macro y micronutrientes en plantas de aguacate. *Revista Científica Ecuatoriana*, 8.
- Giménez, N. L. (2022). On-Device Training of Machine Learning Models on Microcontrollers with Federated Learning. *electronics*, 1-15.
- Gómara, A. V. (2016). Integración de Inteligencia Artificial en un Sistema Embebido para Medidas Optoeléctricas. *upna*, 1-95.
- Hernández Chavarria, J. (2022). La productividad en los distritos agrícolas de Durango, México. *Revista de Investigación Académica sin frontera*, 1-35.
- Ibujés, Y. M. (2020). Trabajo de titulación presentado como requisito previo a la obtención del Título de Ingeniera Agrónoma. *Universidad de Quito*, 1-10.
- IFA. (2002). *Los fertilizantes y su uso*. Paris: Fertilizer.org.
- INEGI. (01 de 01 de 2020). *CuentameINEGI*. Obtenido de CuentameINEGI: <https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/dur/territorio/default.aspx?tema=me&e=10>

- INEGI. (01 de 01 de 2020). *CuentameINEGI*. Obtenido de CuentameINEGI:
<https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/dur/poblacion/default.aspx?tema=me&e=10>
- López Galán, E., & Miñano Fernández, F. (1988). *Métodos rápidos de análisis de suelo*. Madrid.
- Ruíz Echeverri, J. M. (2018). *Fundamentos para una metodología para el diagnóstico cuantitativo de la función lagrimal humana utilizando termografía infra-roja*. Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira.
- Saha, S. S. (2022). Machine Learning for Microcontroller-Class Hardware: A Review. *IEEE*, 21362 - 21390.
- SEDESOL. (01 de Diciembre de 2010). *CONEVAL*. Obtenido de www.sedesol.com
- Sierra, A. (2021). Principios y prácticas para el manejo de nutrientes en la producción de Hortalizas. *University of Florida (UF)*, 20.
- Svoboda, F. (2022). Deep Learning on Microcontrollers: A Study on Deployment Costs and Challenges. *EuroMLSys*, 54-63.
- Toledo, M. (01 de 10 de 2023). *Mettler Toledo*. Obtenido de
https://www.mt.com/mx/es/home/applications/Application_Browse_Laboratory_Analytics/uv-vis-spectroscopy/uvvis-spectroscopy-explained.html

Apéndice A

Nomenclatura

Km	Kilometro
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
IFA	Asociación Internacional de la Industria de los Fertilizantes
RNC	Requerimiento de nutrientes del cultivo
N	Nitrógeno
P	Fósforo
K	Potasio
S	Azufre
Ca	Calcio
Mg	Magnesio
Na	Sodio
Fe	Hierro
Mn	Manganeso
Zn	Zinc
Cu	Cobre
Mo	Molibdeno
Cl	Cloro
B	Boro
UV-VIS	Ultravioleta - Visible
UVA	Ultravioleta 315–400 nm
UVB	Ultravioleta 280–315 nm
SEDESOL	Secretaría de Desarrollo Social
PLA	Ácido poliláctico

DNN	Redes neuronales profundas
A	Absorbancia
DO	Densidad óptica
I_0	Espectro de intensidad de la luz transmitida a través de una muestra.
I	Espectro de intensidad de la luz transmitida a través del objetivo
T	Transmitancia
ϵ	Absortividad molar
d	Paso de luz
c	Concentración
Hz	Hertz
ev	Energía del fotón promedio
nm	Nanómetro
CIE	Comisión Internacional de Iluminación
IR	Infrarrojo
RF	Radiofrecuencias
ph	Potencial de Hidrógeno

Apéndice B

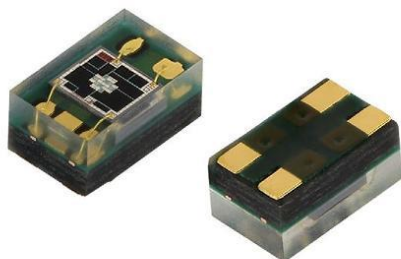


www.vishay.com

VEML6075

Vishay Semiconductors

UVA and UVB Light Sensor with I²C Interface



DESCRIPTION

The VEML6075 senses UVA and UVB light and incorporates photodiode, amplifiers, and analog / digital circuits into a single chip using a CMOS process. When the UV sensor is applied, it is able to detect UVA and UVB intensity to provide a measure of the signal strength as well as allowing for UVI measurement.

The VEML6075 provides excellent temperature compensation capability for keeping the output stable under changing temperature. VEML6075's functionality is easily operated via the simple command format of I²C (SMBus compatible) interface protocol. VEML6075's operating voltage ranges from 1.7 V to 3.6 V. VEML6075 is packaged in a lead (Pb)-free 4 pin OPLGA package which offers the best market-proven reliability.

FEATURES

- Package type: surface mount
- Dimensions (L x W x H in mm): 2.0 x 1.25 x 1.0
- Integrated modules: ultraviolet sensor (UV), and signal conditioning IC
- Converts solar UV light intensity to digital data
- Excellent UVA and UVB sensitivity
- Reliable performance of UV radiation measurement under long time solar UV exposure
- 16-bit resolution per channel
- UVA and UVB individual channel solution
- Low power consumption I²C protocol (SMBus compatible) interface
- Package: OPLGA
- Temperature compensation: -40 °C to +85 °C
- Output type: I²C bus
- Operation voltage: 1.7 V to 3.6 V
- Material categorization: for definitions of compliance please see www.vishay.com/doc?99912



APPLICATIONS

- Handheld device
- Notebook
- Consumer device
- Industrial and medical application

PRODUCT SUMMARY					
PART NUMBER	OPERATING VOLTAGE RANGE (V)	I ² C BUS VOLTAGE RANGE (V)	PEAK SENSITIVITY UVA, UVB (nm)	RANGE OF SPECTRAL BANDWIDTH λ _{0.5} (nm)	OUTPUT CODE
VEML6075	1.7 to 3.6	1.7 to 3.6	365, 330	± 10	16 bit, I ² C

Note

(1) Adjustable through I²C interface

ORDERING INFORMATION			
ORDERING CODE	PACKAGING	VOLUME (1)	REMARKS
VEML6075	Tape and reel	MOQ: 2500 pcs	2.0 mm x 1.25 mm x 1.0 mm

Note

(1) MOQ: minimum order quantity

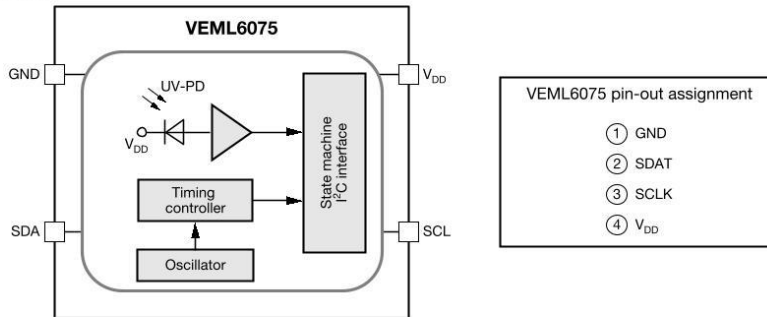


ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS ($T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, unless otherwise specified)					
PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	MIN.	MAX.	UNIT
Supply voltage		V_{DD}	0	3.6	V
Operation temperature range		T_{amb}	-40	+85	$^{\circ}\text{C}$
Storage temperature range		T_{stg}	-40	+85	$^{\circ}\text{C}$

RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS ($T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, unless otherwise specified)					
PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	MIN.	MAX.	UNIT
Supply voltage		V_{DD}	1.7	3.6	V
Operation temperature range		T_{amb}	-40	+85	$^{\circ}\text{C}$
I ² C bus operating frequency		$f_{(I2CCLK)}$	10	400	kHz

PIN DESCRIPTIONS			
PIN ASSIGNMENT	SYMBOL	TYPE	FUNCTION
1	GND	I	Ground
2	SDAT	I / O (open drain)	I ² C data bus data input / output
3	SCLK	I	I ² C digital bus clock input
4	V_{DD}	I	Power supply input

BLOCK DIAGRAM



BASIC CHARACTERISTICS ($T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, unless otherwise specified)						
PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
Supply operation voltage		V_{DD}	1.7	-	3.6	V
Supply current	$V_{DD} = 1.8\text{ V}$	I_{DD}	-	480	-	μA
I ² C signal input	Logic high	V_{IH}	1.5	-	-	V
	Logic low	V_{IL}	-	-	0.8	
I ² C signal input	Logic high	V_{IH}	1.4	-	-	V
	Logic low	V_{IL}	-	-	0.6	
Operating temperature		T_{amb}	-40	-	+85	$^{\circ}\text{C}$
Shutdown current	Light condition = dark; $V_{DD} = 1.8\text{ V}$, $T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	$I_{DD} (SD)$	-	800	-	nA
UVA responsivity	$I_T = 50\text{ ms}^{(1)}$		-	0.93	-	counts/ $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
UVB responsivity	$I_T = 50\text{ ms}^{(2)}$		-	2.1	-	counts/ $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
Visible / infrared response	W-LED / IRED (940 nm)		-	0.5	< 1	%

Notes

- ⁽¹⁾ Nichia NCSU033X (365 nm)
- ⁽²⁾ UVTOP310TO39HS (315 nm)



I ² C TIMING CHARACTERISTICS (T _{amb} = 25 °C, unless otherwise specified)						
PARAMETER	SYMBOL	STANDARD MODE		FAST MODE		UNIT
		MIN.	MAX.	MIN.	MAX.	
Clock frequency	f _(SMBCLK)	10	100	10	400	kHz
Bus free time between start and stop condition	t _(BUF)	4.7	-	1.3	-	µs
Hold time after (repeated) start condition; after this period, the first clock is generated	t _(HDSTA)	4.0	-	0.6	-	µs
Repeated start condition setup time	t _(SUSTA)	4.7	-	0.6	-	µs
Stop condition setup time	t _(SUSTO)	4.0	-	0.6	-	µs
Data hold time	t _(HDDAT)	-	3450	-	900	ns
Data setup time	t _(SUDAT)	250	-	100	-	ns
I ² C clock (SCK) low period	t _(LOW)	4.7	-	1.3	-	µs
I ² C clock (SCK) high period	t _(HIGH)	4.0	-	0.6	-	µs
Clock / data fall time	t _(F)	-	300	-	300	ns
Clock / data rise time	t _(R)	-	1000	-	300	ns

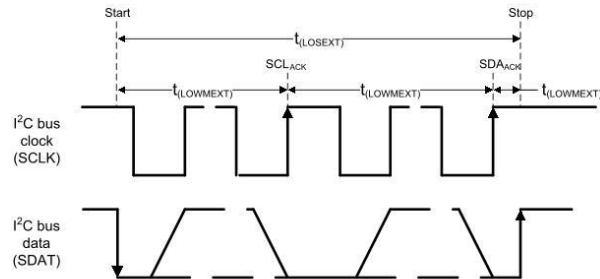
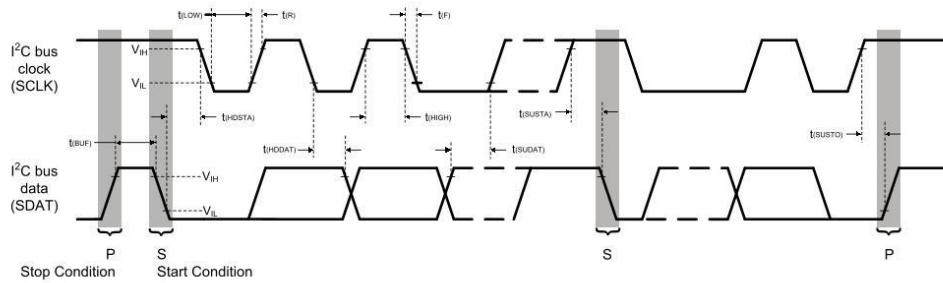


Fig. 1 - I²C Bus Timing Diagram



PARAMETER TIMING INFORMATION

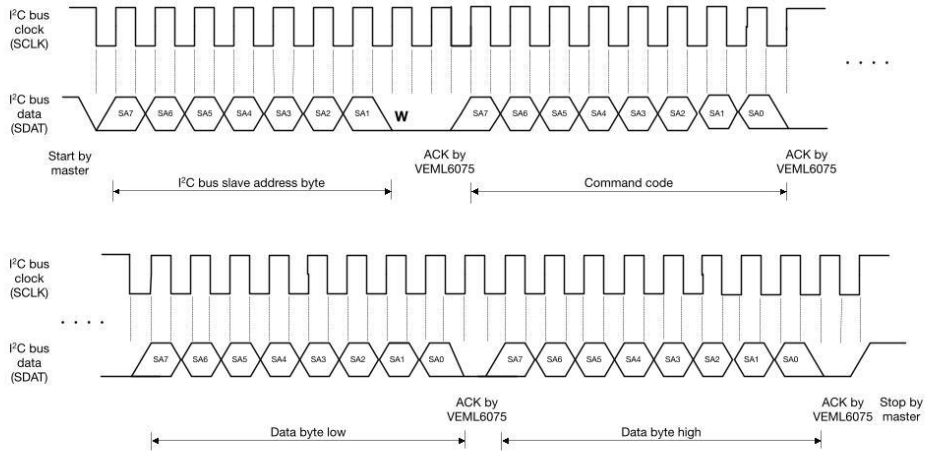


Fig. 2 - I²C Bus Timing for Sending Word Command Format

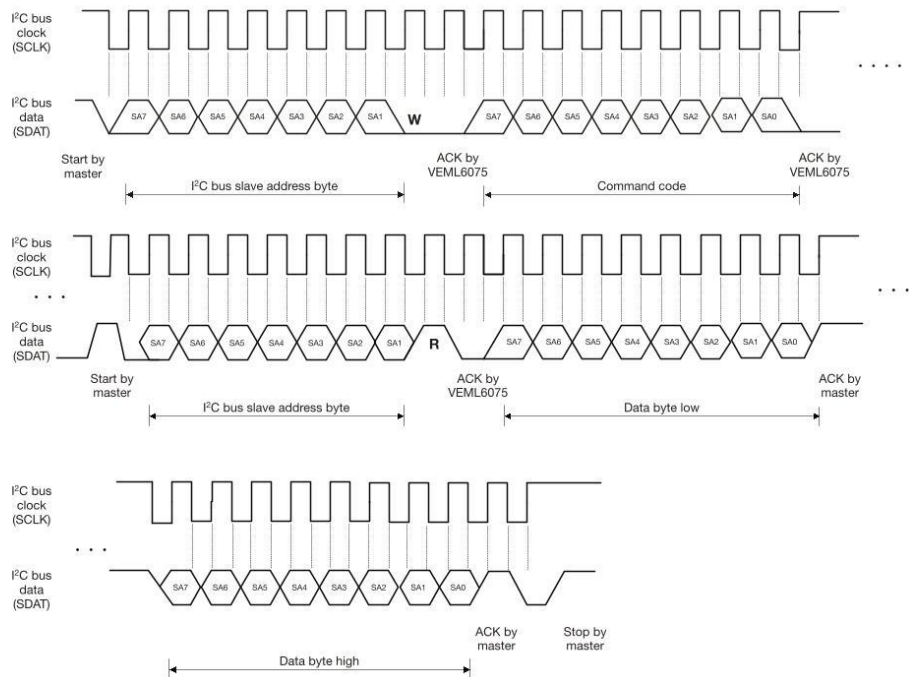


Fig. 3 - I²C Timing for Receive Word Command Format

TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS ($T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, unless otherwise specified)

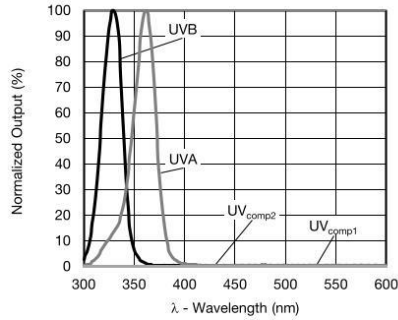


Fig. 4 - Normalized Spectral Response

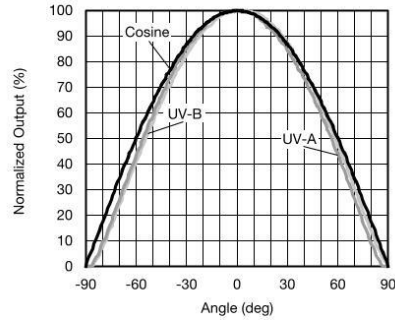


Fig. 5 - Normalized Output vs. View Angle

APPLICATION INFORMATION

Pin Connection with the Host

The configuration and data registers of the VEML6075 are accessed via the I²C interface. The hardware schematic is shown below in fig. 6.

The 0.1 μF capacitor near the V_{DD} pin is used for power supply noise rejection. The 2.2 k Ω is suitable for the pull high resistor of I²C.

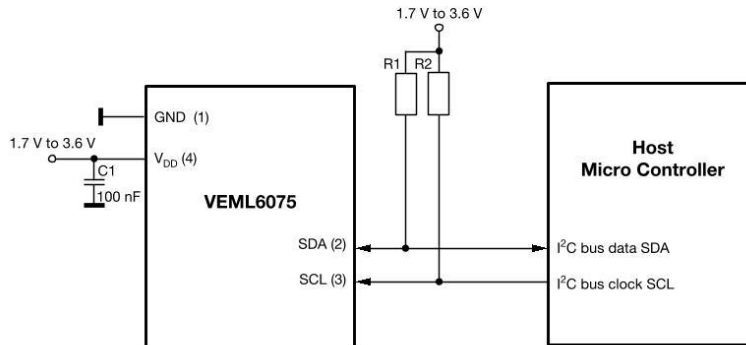


Fig. 6 - Hardware Pin Connection Diagram

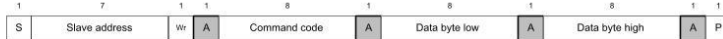


Digital Interface

The VEML6075 contains a CONF register (00h) used for operation control and parameter setup. Measurement results are stored in four separate registers, one each for UVA, UVD, UVB, UV_{comp1}, and UV_{comp2} (07h to 0Bh respectively). All registers are accessible via I²C communication. Fig. 7 shows the basic I²C communication with the VEML6075. Each of the registers in the VEML6075 are 16 bit wide, so 16 bit should be written when a write command is sent, and 16 bit should be read when a read command is sent.

The built in I²C interface is compatible with I²C modes “standard” and “fast”: 100 kHz to 400 kHz

Send Word → Write Command to VEML6075



Receive Word → Read Data from VEML6075



S = start condition
P = stop condition
A = acknowledge
Shaded area = VEML6075 acknowledge

Fig. 7 - Command Protocol Format

Note

- Please note the repeat start condition when data is read from the sensor. A stop condition should not be sent here.

Slave Address and Function Description

VEML6075 uses 0x10 slave address for 7-bit I²C addressing protocol. VEML6075 has 16-bit resolution for each channel (UVA, UVB, UV_{comp1}, and UV_{comp2}).

TABLE 1 - VEML6075 COMMAND CODE AND REGISTER DESCRIPTION					
COMMAND CODE	DATE BYTE LOW / HIGH	REGISTER NAME	R / W	DEFAULT VALUE	FUNCTION DESCRIPTION
00h	L	UV_CONF	R / W	0x00	UV integration time, function enable and disable
	H	Reserved	R / W	0x00	Reserved
01h	L	Reserved	R / W	0x00	Reserved
	H	Reserved	R / W	0x00	Reserved
02h	L	Reserved	R / W	0x00	Reserved
	H	Reserved	R / W	0x00	Reserved
03h	L	Reserved	R / W	0x00	Reserved
	H	Reserved	R / W	0x00	Reserved
04h	L	Reserved	R / W	0x00	Reserved
	H	Reserved	R / W	0x00	Reserved
05h	L	Reserved	R / W	0x00	Reserved
	H	Reserved	R / W	0x00	Reserved
06h	L	Reserved	R / W	0x00	Reserved
	H	Reserved	R / W	0x00	Reserved
07h	L	UVA_Data	R	0x00	UVA LSB output data
	H	UVA_Data	R	0x00	UVA MSB output data
08h	L	Reserved	R	0x00	Reserved
	H	Reserved	R	0x00	Reserved
09h	L	UVB_Data	R	0x00	UVB LSB output data
	H	UVB_Data	R	0x00	UVB MSB output data
0Ah	L	UVCOMP1_Data	R	0x00	UV _{comp1} LSB output data
	H	UVCOMP1_Data	R	0x00	UV _{comp1} MSB output data
0Bh	L	UVCOMP2_Data	R	0x00	UV _{comp2} LSB output data
	H	UVCOMP2_Data	R	0x00	UV _{comp2} MSB output data
0Ch	L	ID	R	0x26	Device ID LSB
	H	ID	R	0x00	Device ID MSB



Command Register Format

The VEML6075 has 16-bit registers used to set up the measurements as well as pick up the measurement results. The description of each command format is shown in the following tables.

TABLE 2 - REGISTER UV_CONF DESCRIPTION									
REGISTER NAME		COMMAND CODE: 0x00_L (0x00 DATA BYTE LOW) OR 0x00_H (0x00 DATA BYTE HIGH)							
COMMAND	BIT	7	6	5	4	3	2	1	0
REGISTER: UV_CONF		COMMAND CODE: 0x00_L (0x00 DATA BYTE LOW)							
COMMAND	BIT	Description							
Reserved	7	0							
UV_IT	6 : 4	(0 : 0 : 0) = 50 ms, (0 : 0 : 1) = 100 ms, (0 : 1 : 0) = 200 ms, (0 : 1 : 1) = 400 ms, (1 : 0 : 0) = 800 ms, (1 : 0 : 1) = reserved, (1 : 1 : 0) = reserved, (1 : 1 : 1) = reserved.							
HD	3	0 = normal dynamic setting, 1 = high dynamic setting							
UV_TRIG	2	0 = no active force mode trigger, 1 = trigger one measurement With UV_AF = 1 the VEML6075 conducts one measurement every time the host writes UV_Trig = 1. This bit returns to "0" automatically.							
UV_AF	1	0 = active force mode disable (normal mode), 1 = active force mode enable							
SD	0	0 = power on, 1 = shut down							

TABLE 3 - REGISTER 00_H DESCRIPTION		
REGISTER: reserved		COMMAND CODE: 0x00_H (0x00 DATA BYTE HIGH)
COMMAND	BIT	Description
Reserved	7 : 0	Default = (0 : 0 : 0 : 0 : 0 : 0 : 0)

TABLE 4 - REGISTER 01_L TO 06_L AND 08_L; 01_H TO 06_H AND 08_H DESCRIPTION		
REGISTER: reserved		COMMAND CODE: 0x01_L TO 0x06_L AND 0x08_L (0x01 TO 0x06 AND 0x08_L DATA BYTE LOW) COMMAND CODE: 0x01_H TO 0x06_H AND 0x08_H (0x01 TO 0x06 AND 0x08_H DATA BYTE HIGH)
REGISTER	BIT	Description
Reserved	7 : 0	Default = (0 : 0 : 0 : 0 : 0 : 0 : 0)
Reserved	7 : 0	Default = (0 : 0 : 0 : 0 : 0 : 0 : 0)

TABLE 5 - READ OUT COMMAND CODES DESCRIPTION			
REGISTER	COMMAND CODE	BIT	DESCRIPTION
UVA_DATA	0x07_L (0x07 data byte low)	7 : 0	0x00 to 0xFF, UVA LSB output data
	0x07_H (0x07 data byte high)	7 : 0	0x00 to 0xFF, UVA MSB output data
UVB_DATA	0x09_L (0x09 data byte low)	7 : 0	0x00 to 0xFF, UVB LSB output data
	0x09_H (0x09 data byte high)	7 : 0	0x00 to 0xFF, UVB MSB output data
UVCOMP1_DATA	0x0A_L (0x0A data byte low)	7 : 0	0x00 to 0xFF, UV _{comp1} LSB output data
	0x0A_H (0x0A data byte high)	7 : 0	0x00 to 0xFF, UV _{comp1} MSB output data
UVCOMP2_DATA	0x0B_L (0x0B data byte low)	7 : 0	0x00 to 0xFF, UV _{comp2} LSB output data
	0x0B_H (0x0B data byte high)	7 : 0	0x00 to 0xFF, UV _{comp2} MSB output data
ID	0x0C_L (0x0C data byte low)	7 : 0	Default = 0x26, device ID LSB byte
	0x0C_H (0x0C data byte high)	7 : 6 5 : 4 3 : 0	Company code = 00, (0 : 0), slave address = 0x20, version code (0 : 0 : 0 : 0) = VEML6075 CS, device ID MSB byte



Data Access

VEML6075 has 16-bit high resolution sensitivity for each UV channel. One byte is the LSB and the other byte is the MSB. The host needs to follow the read word protocol as shown in fig. 7. The data format shows as below.

TABLE 6 - 16-BIT DATA FORMAT																
VEML6075 16-BIT DATA FORMAT																
	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Data byte low									←							
Data byte high	←															

Note

Receive byte Read data from VEML6075

S	Slave address	Wr	A	Command code	A	S	Slave address	Rd	A	Data byte (LSB)	A	Data byte (MSB)	N	P
---	---------------	----	---	--------------	---	---	---------------	----	---	-----------------	---	-----------------	---	---

- S = start condition
- P = stop condition
- A = acknowledge
- N = no acknowledge
- Host action
- VEML6075 response

- Data byte low represents LSB and data byte high represents MSB.

Data Auto-Memorization

VEML6075 keeps the last results read. These values will remain in the registers, and can be read from these registers, until the device wakes up and a new measurement is made.

UV-Index Calculation

In order to use the result data to calculate the UV-Index, please refer to the "Designing the VEML6075 into an Application" application note (www.vishay.com/doc?84339).

PACKAGE INFORMATION in millimeters

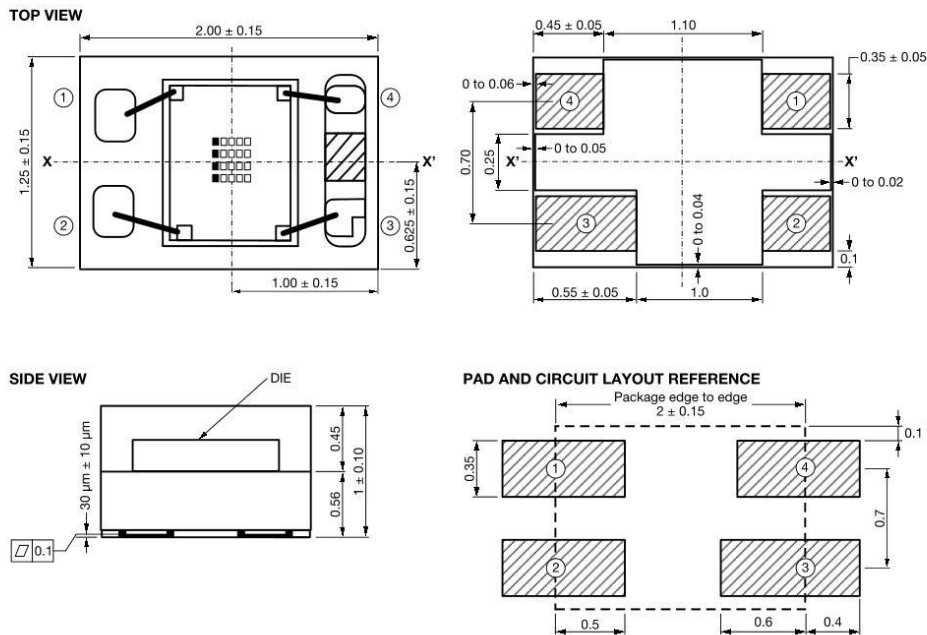


Fig. 8 - VEML6075 A3OP Package Dimensions



RECOMMENDED STORAGE AND REBAKING CONDITIONS				
PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
Storage temperature		5	50	°C
Relative humidity		-	60	%
Open time		-	168	h
Total time	From the date code on the aluminized envelope (unopened)	-	12	months
Rebaking	Tape and reel: 60 °C	-	22	h
	Tube: 60 °C	-	22	h

RECOMMENDED INFRARED REFLOW

Soldering conditions which are based on J-STD-020 C.

IR REFLOW PROFILE CONDITION			
PARAMETER	CONDITIONS	TEMPERATURE	TIME
Peak temperature		255 °C + 0 °C / - 5 °C (max.: 260 °C)	10 s
Preheat temperature range and timing		150 °C to 200 °C	60 s to 180 s
Timing within 5 °C to peak temperature		-	10 s to 30 s
Timing maintained above temperature / time		217 °C	60 s to 150 s
Timing from 25 °C to peak temperature		-	8 min (max.)
Ramp-up rate		3 °C/s (max.)	-
Ramp-down rate		6 °C/s (max.)	-

Recommend Normal Solder Reflow is 235 °C to 255 °C

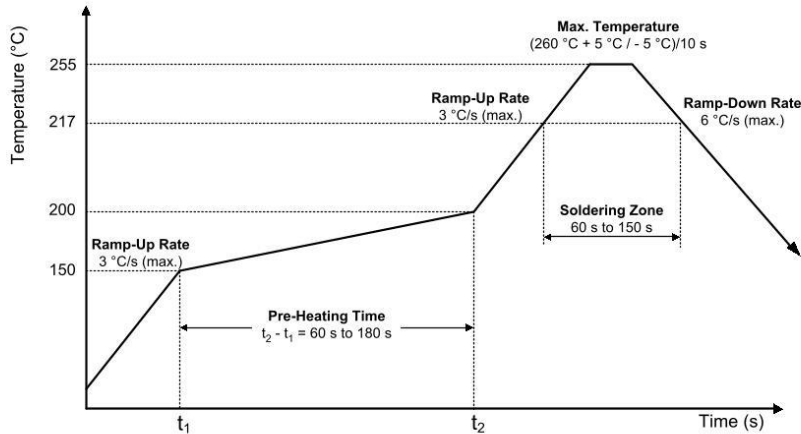


Fig. 9 - VEML6075 OPLGA Solder Reflow Profile Chart

RECOMMENDED IRON TIP SOLDERING CONDITION AND WARNING HANDLING

1. Solder the device with the following conditions:
 - 1.1. Soldering temperature: 400 °C (max.)
 - 1.2. Soldering time: 3 s (max.)
2. If the temperature of the method portion rises in addition to the residual stress between the leads, the possibility that an open or short circuit occurs due to the deformation or destruction of the resin increases.
3. The following methods: VPS and wave soldering, have not been suggested for the component assembly.
4. Cleaning method conditions:
 - 4.1. Solvent: methyl alcohol, ethyl alcohol, isopropyl alcohol
 - 4.2. Solvent temperature < 45 °C (max.)
 - 4.3. Time: 3 min (min.)



TAPE PACKAGING INFORMATION in millimeters

DIMENSION OF CARRIER TAPE

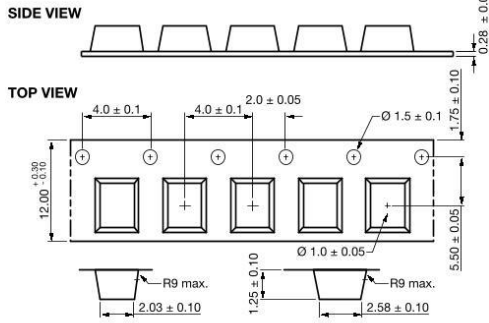


Fig. 10 - VEML6070 A3OP Package Carrier Tape

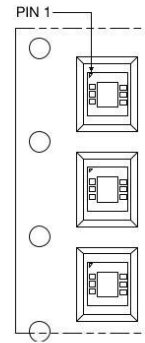


Fig. 11 - Taping Direction

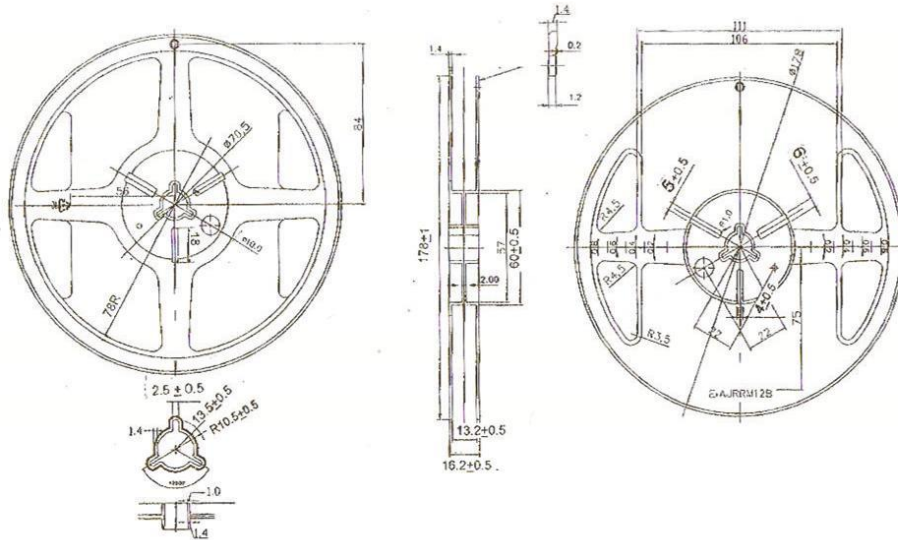


Fig. 12 - Reel Dimension



Disclaimer

ALL PRODUCT, PRODUCT SPECIFICATIONS AND DATA ARE SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE TO IMPROVE RELIABILITY, FUNCTION OR DESIGN OR OTHERWISE.

Vishay Intertechnology, Inc., its affiliates, agents, and employees, and all persons acting on its or their behalf (collectively, "Vishay"), disclaim any and all liability for any errors, inaccuracies or incompleteness contained in any datasheet or in any other disclosure relating to any product.

Vishay makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of the products for any particular purpose or the continuing production of any product. To the maximum extent permitted by applicable law, Vishay disclaims (i) any and all liability arising out of the application or use of any product, (ii) any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages, and (iii) any and all implied warranties, including warranties of fitness for particular purpose, non-infringement and merchantability.

Statements regarding the suitability of products for certain types of applications are based on Vishay's knowledge of typical requirements that are often placed on Vishay products in generic applications. Such statements are not binding statements about the suitability of products for a particular application. It is the customer's responsibility to validate that a particular product with the properties described in the product specification is suitable for use in a particular application. Parameters provided in datasheets and / or specifications may vary in different applications and performance may vary over time. All operating parameters, including typical parameters, must be validated for each customer application by the customer's technical experts. Product specifications do not expand or otherwise modify Vishay's terms and conditions of purchase, including but not limited to the warranty expressed therein.

Except as expressly indicated in writing, Vishay products are not designed for use in medical, life-saving, or life-sustaining applications or for any other application in which the failure of the Vishay product could result in personal injury or death. Customers using or selling Vishay products not expressly indicated for use in such applications do so at their own risk. Please contact authorized Vishay personnel to obtain written terms and conditions regarding products designed for such applications.

No license, express or implied, by estoppel or otherwise, to any intellectual property rights is granted by this document or by any conduct of Vishay. Product names and markings noted herein may be trademarks of their respective owners.