

## Implementación de redes neuronales artificiales (RNA) para clasificar niveles de pm2.5 en un sistema de alarma ambiental.

### Implementation of artificial neural networks (ANN) to classify pm2.5 levels in an environmental alarm system.

Mauricio Luna Calva <sup>a</sup>, Adolfo Meléndez Ramírez <sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> Maestría en Ingeniería en Sistemas Computacionales, Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec / TecNM, 55210, Ecatepec de Morelos, Estado de México, México.

<sup>b</sup> División de Ingeniería en Sistemas Computacionales, Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec / TecNM, 55210, Ecatepec de Morelos, Estado de México, México.

#### Resumen

En respuesta a la creciente conciencia ambiental en la sociedad mexicana y las prácticas emergentes en este ámbito, se propone realizar una investigación sobre el impacto del material particulado PM2.5 en la salud y el medio ambiente. A partir de estos hallazgos, se desarrolla un prototipo de alarma ambiental utilizando tecnología Arduino. El objetivo principal de este proyecto es utilizar un sensor Sharp, modelo GP2Y1010AU0F, junto con otros materiales de bajo costo y fácil acceso. Se emplea la metodología Design Thinking, que se adapta perfectamente al desarrollo de prototipos con un enfoque centrado en el usuario. En cuanto a los resultados, estos son satisfactorios, ya que al finalizar el prototipo se logra la clasificación de tres niveles de PM2.5 en bajo, regular y alto y la Red Neuronal Artificial alcanza una precisión del 99.90%. Esto permite que tanto los usuarios interesados como las autoridades responsables de monitorear los niveles de contaminación del aire puedan tomar medidas proactivas para salvaguardar la salud pública.

*Palabras clave:* Arduino, PM2.5, Prototipo, Redes Neuronales Artificiales, Sensor

#### Abstract

In response to the growing environmental awareness in Mexican society and emerging practices in this area, it is proposed to conduct research on the impact of PM2.5 particulate matter on health and the environment. Based on these findings, an environmental alarm prototype is developed using Arduino technology. The main objective of this project is to use a Sharp sensor, model GP2Y1010AU0F, along with other low-cost and easily accessible materials. The Design Thinking methodology is used, which is perfectly adapted to the development of prototypes with a user-centered approach. As for the results, they are satisfactory, since at the end of the prototype the classification of three levels of PM2.5 is achieved as low, regular and high and the Artificial Neural Network reaches an accuracy of 99.90%. This allows both interested users and authorities responsible for monitoring air pollution levels to take proactive measures to safeguard public health.

*Keywords:* Arduino, PM2.5, Prototype, Artificial Neural Network, Sensor

#### 1. Introducción

Las enfermedades respiratorias siguen siendo un problema difícil de resolver para la sociedad mexicana, en el año 2023 las enfermedades pulmonares obstructivas crónicas (EPOC) a veces denominadas «enfisemas» o «bronquitis crónica» representan la novena causa de defunción en México (INEGI,

2024) además (OMS, 2023) registra que es la tercera causa de muerte en el mundo. La OMS documenta que los síntomas de la EPOC son reducción de aire, mucosidad que puede dañar los pulmones, tos, sibilancias y fatiga.

Existen diversas causas para esta enfermedad y en los registros se encuentran: tabaquismo, exposición a polvos, humos, sustancias químicas, contaminación de aire en

\*Autor para la correspondencia: 202310789@tese.edu.mx

**Correo electrónico:** 202310789@tese.edu.mx (Mauricio Luna-Calva), adolfo\_melendez@tese.edu.mx (Adolfo Meléndez-Ramírez).

**Historial del manuscrito:** recibido el 04/07/2024, última versión-revisada recibida el 10/07/2024, aceptado el 11/07/2024, publicado el 19/07/2024.



interiores, quema de madera, estiércol y quema de carbón vegetal para cocina o calefacción.

Un dato desalentador es que la EPOC no se cura, pero puede mejorar si no se fuma ni se está expuesto a partículas de aire contaminadas, además de tratamiento médico y rehabilitación pulmonar (OMS, 2023).

Es tal la preocupación de diversas naciones por erradicar esta enfermedad que la EPOC se encuentra dentro del Plan de Acción Mundial de la OMS para la Prevención y Control de las enfermedades no transmisibles (ENT) y la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas.

Países en vías de desarrollo como México necesitan soluciones a este tipo de problemas, se necesitan soluciones rápidas y asequibles para la mayoría de la gente.

Se define a un prototipo como un primer modelo de un producto o servicio con la intención de realizar pruebas o bien lanzar al mercado como algo novedoso o una versión mejorada de lo que ya existe (Universidad Europea Creative Campus, 2022).

El objetivo de un prototipo es verificar el diseño y observar si cumple con todas las características específicas que el usuario necesita. Por lo tanto, se propone realizar un prototipo de alarma para la detección de PM<sub>2.5</sub> en ambientes cerrados, al tratarse de un prototipado rápido realizado con materiales de fácil acceso es una propuesta interesante con alto valor tecnológico y con un amplio campo de estudio.

### 1.2. Antecedentes

El ingeniero Botello Mendoza et al. de la Universidad Libre Seccional Cúcuta desarrolla un estudio sobre la viabilidad de implementar una estación de monitoreo de la calidad del aire utilizando tecnología Arduino.

En este trabajo de tesis se opta por utilizar un sensor para Arduino modelo GP2Y1010AU0F para detectar partículas PM 2.5 y el sensor M17 para el monitoreo de monóxido de carbono (CO). Para la transmisión de los datos a la computadora se implementa el módulo WIFI ESP8266-01, para PM 2.5 se utiliza una plataforma basada en la nube llamada ThingSpeak y PowerBI para los datos de CO.

Finalmente, Botello concluye que el prototipo es viable para una implementación real en una estación puesto que los materiales son accesibles y fáciles de implementar, además que los sensores utilizados cuentan con un margen de error bastante bajo (Botello Mendoza & Arenas Castro, 2023).

Por otro lado, la Pontificia Universidad Católica del Ecuador en su sede Esmeraldas, desarrolla un ecosistema de internet de las cosas orientado a la adquisición automática de datos ambientales y de calidad del aire. En este trabajo también se busca desarrollar un prototipo de bajo costo basado en sensores y tecnología Arduino, los sensores utilizados para este proyecto es el sensor de PM 2.5 modelo GP2Y1010AU0F y un sensor de temperatura y humedad DHT11, además de un sensor barométrico modelo BMP180 y la plataforma web Ubidots para IoT.

El principal objetivo de este proyecto es que cualquier usuario pueda acceder a los datos de contaminación del aire ambiental sin necesidad de solicitar los datos al Ministerio del

Medio Ambiente, quienes son los responsables de monitorear la calidad del aire en Ecuador.

Los resultados obtenidos en esta investigación demuestran que los sensores de bajo costo desempeñan un papel fundamental en la recopilación de datos ambientales, ofreciendo una solución escalable y que el acceso a la plataforma IoT es de fácil manejo y cuenta con legibilidad de la información (Ángulo Montenegro, 2023).

Para el área industrial también existen propuestas interesantes puesto que la Universidad Politécnica Salesiana propone el diseño de un sistema ANDON en la línea de producción de ladrillos refractarios en la empresa Samothermal.

La parte que se relaciona con la construcción del presente prototipo es en el módulo del sistema automatizado de extracción de polvos para los trabajadores. Vásquez y Zhindón, autores del trabajo, mencionan que dentro del área de corte y formado de ladrillos se producen polvos y desperdicios en cada una de las estaciones de trabajo que a lo largo del tiempo son perjudiciales para la salud.

El sensor GP2Y1010AU0F solo es un elemento más a todo el modelo que se implementa pero se concluye que el sistema construido presenta un ahorro de 6.8 minutos cada 72 ladrillos, que representa a su vez en una ganancia de 1776% del total de trabajo. Y por otro lado, se reduce significativamente la rotación de personal debido a enfermedades respiratorias gracias al sistema de extracción de polvo a pesar de utilizar materiales de bajo costo (Astudillo Vásquez & Maldonado Zhindón, 2022).

### 1.3. Partículas suspendidas PM<sub>2.5</sub>

El elemento que causa EPOC no es el aire de mala calidad por sí solo, dependiendo el tipo de contaminante que se encuentre en el ambiente este viene acompañado de PM<sub>2.5</sub>. Se define al material particulado o PM (Particular Matter) 2.5 como partículas muy pequeñas en el aire que tienen un diámetro de 2.5 micrómetros (aproximadamente 1 diezmilésimo de pulgada) o menos de diámetro (ver Figura 1) (California Office for Environmental Health Hazard Assessment (OEHHA), 2024). De todas las medidas de contaminación atmosférica, la contaminación por PM<sub>2.5</sub> supone la mayor amenaza para la salud debido a su tamaño que solo pueden verse con un microscopio electrónico.

Además, este tipo de partículas pueden permanecer en el aire durante largos periodo de tiempo a diferencia de otros contaminantes (IQAir Staff Writers, 2024).

El problema con este tipo de partículas es que no solamente afecta a la salud sino que a largo plazo modifica y altera el medio ambiente, también, las PM 2.5 provocan lluvia ácida, afectación de la visibilidad, cambio climático y eutrofización, es decir aquel ecosistema o ambiente con una abundancia anormalmente alta de nutrientes (procedente de actividades humanas) (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), 2021).

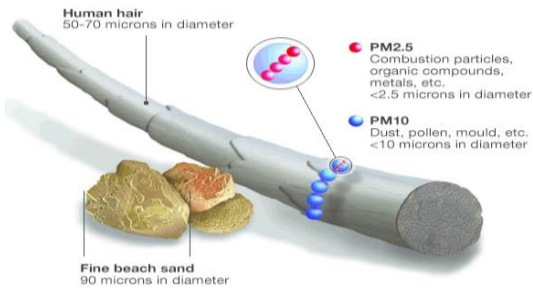


Figura 1: Tamaño PM2.5

#### 1.4. Fuentes generadoras de PM2.5

Pueden existir diversas fuentes naturales o artificiales, siendo estas las que generalmente producen una mayor cantidad de PM2.5 (ver Figura 2) (California Office for Environmental Health Hazard Assessment (OEHHA), 2024).

##### Fuentes artificiales:

- Combustión de motores
- Combustión de centrales eléctricas
- Procesos industriales
- Estufas, chimeneas y combustión doméstica de leña
- Humo de fuegos artificiales
- Humo de tabaco
- Humo de papel

##### Fuentes naturales:

- Polvo
- Hollín
- Suciedad
- Sal arrastrada por el viento
- Algunas esporas de plantas
- Polen
- Incendios forestales



Figura 2: Algunas fuentes artificiales de PM2.5

#### 1.5. Microgramos/Metro cúbico ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

La metodología empleada en este proyecto para cuantificar la concentración de partículas PM2.5 en el entorno atmosférico y evaluar la densidad de polvo se expresa en microgramos por metro cúbico ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Esta unidad pertenece al Sistema Internacional y se utiliza para expresar la concentración de una sustancia en el aire.

Por ejemplo, si se dice que la concentración de partículas PM2.5 en el aire es de  $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , esto significa que hay 35 microgramos de partículas con un diámetro de 2.5 micrómetros o menos en cada metro cúbico de aire.

Es importante destacar que, si bien la presencia de PM2.5 es inherente al ambiente, existen umbrales de concentración que no representan un riesgo para la salud humana. No obstante, un incremento significativo en dichos niveles se considera potencialmente peligroso y requiere atención y gestión adecuadas.

La Organización Panamericana de la Salud (OPS) documenta que existen efectos de la contaminación del aire sobre la salud a corto y largo plazo, siendo la exposición a largo plazo y de larga duración la más significativa para la salud pública.

Por lo tanto (Organización Panamericana de la Salud (OPS), 2024) publica una tabla (ver Tabla 1) en su sitio web en donde se muestran los niveles de riesgo para PM10 y PM2.5. Cabe mencionar, que los niveles 2 y 3 se considera uno solo pero en cualquiera de los dos se debe tomar precaución.

Tabla 1: Niveles de riesgo

NIVEL	PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	PM2.5 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	RIESGO
1	70	35	15% Mayor riesgo de mortalidad a largo plazo.
2	50	25	6% Menor riesgo de mortalidad a largo plazo en relación con el Nivel 1.
3	30	15	6% Menor riesgo de mortalidad a largo plazo en relación con el Nivel 2.
4	20	10	Nivel más bajo en presentar aumento al riesgo a la salud en respuesta a la exposición a largo plazo a PM2.5.

## 2. Materiales y Método

### 2.1. Arduino UNO

Como se ha mencionado anteriormente, al tratarse de un prototipo se utilizaron materiales de fácil acceso para su desarrollo, por lo tanto, se opta por utilizar tecnología de Arduino.

Arduino es una empresa italiana fundada en el año 2005 en el Instituto de Diseño Interactivo de Ivrea, Italia. Este proyecto nace bajo la necesidad de contar con diversos dispositivos para utilizar en aulas y que fueran principalmente de bajo costo.

Los miembros fundadores de Arduino son Massimo Banzi, David Cuartielles, David Mellis, Tom Igoe y Gianluca Martino (Arduino.cl, 2024). Una de las características de Arduino es que es una plataforma de creación de electrónica de código abierto, la cual se basa en hardware y software libre, flexible y fácil de utilizar para los usuarios.

En específico para este proyecto se utilizó el modelo de placa Arduino UNO (ver Figura 3). Esta placa cuenta con un microcontrolador ATmega328P-PU en donde se pueden

grabar instrucciones, las cuáles se escriben con el lenguaje de programación en el entorno Arduino IDE.

Por otro lado, existe la posibilidad de conectar una amplia variedad de periféricos para enviar datos al microcontrolador, como pueden ser cámaras, teclados o sensores.

También cuenta con una interfaz de salida que se encarga de llevar la información procesada a otros periféricos como pantallas o altavoces (Arduino.cl, 2024).

El modelo Arduino UNO cuenta con algunos componentes clave que le permiten funcionar como una plataforma de desarrollo:

- **Cristal oscilador:** El Arduino UNO incluye un cristal oscilador de 16 MHz que proporciona el reloj necesario para sincronizar las operaciones del microcontrolador.
- **Puertos de entrada/salida (E/S):** Tiene una variedad de pines de entrada/salida que pueden utilizarse para conectar sensores, actuadores y otros dispositivos electrónicos. Estos incluyen pines digitales y pines analógicos.
- **Puerto USB:** Tiene un puerto USB que se utiliza para la comunicación con un ordenador y para cargar el código en el microcontrolador.
- **Regulador de voltaje:** Incluye un regulador de voltaje que permite alimentar la placa con una amplia gama de tensiones de entrada (generalmente de 7 a 12 voltios) y proporciona un voltaje de salida de 5 voltios para alimentar el microcontrolador y otros componentes.
- **Conector de alimentación:** Tiene un conector de alimentación que puede ser utilizado para alimentar la placa con una fuente de alimentación externa en lugar de a través del puerto USB.
- **Botón de “reset”:** El Arduino UNO incluye un botón de “reset” que puede utilizarse para reiniciar el microcontrolador y comenzar la ejecución del programa desde el principio.



Figura 3: Vista a detalle de un Arduino modelo UNO

## 2.2. Sensor Sharp GP2Y1010AU0F

Al trabajar con tecnología Arduino para la detección de PM2.5 se eligió un sensor óptico con las características necesarias para detectar este tipo de partículas de manera

precisa. El sensor elegido pertenece a la marca Sharp, modelo GP2Y1010AU0F (ver Figura 4).

Esta es una opción popular para proyectos de monitorización de calidad del aire y otras aplicaciones donde la detección de partículas de polvo es importante.

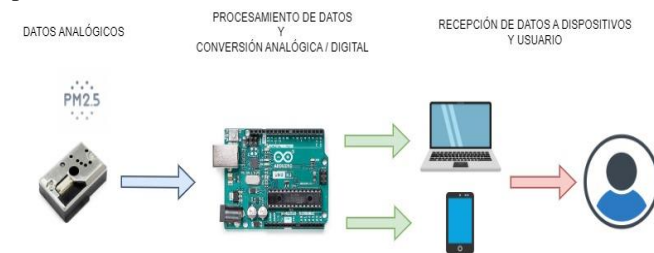
Este sensor funciona utilizando un diodo infrarrojo y un fototransistor para detectar la luz dispersada por las partículas de polvo, cuando las partículas de polvo pasan entre el diodo emisor y el fototransistor, la luz infrarroja se dispersa, lo que produce una señal eléctrica proporcional a la concentración de partículas (Sharp, 2006).



Figura 4: Vista a detalle del sensor modelo GP2Y1010AU0F

## 2.3. Diseño del prototipo

En este apartado se describe que función tienen los componentes más importantes del prototipo que se desarrolla con el fin de entender cómo se va a abordar el problema planteado. El diseño se dividió en 3 fases:



1. **Datos analógicos:** Los datos analógicos se refieren al mundo real, como puede ser luz, sonido, temperatura, presión, aire etc. Para el caso específico de este proyecto, los datos analógicos son PM2.5 las cuáles son captadas por el sensor óptico.

2. **Arduino UNO:** Una vez que el sensor obtiene los datos del mundo analógico estos son procesados y convertidos a datos digitales por la placa Arduino previamente programada y con todas las conexiones necesarias. Por otro lado, la placa Arduino cuenta con una alarma de tres estados:

- **LED verde:** Presencia nula de PM2.5, el ambiente se encuentra limpio.
- **LED amarillo:** Incremento en PM2.5, el usuario debe tomar precaución.
- **LED rojo:** Presencia total de PM2.5 en el ambiente, se deben tomar las medidas necesarias.



- **Buzzer:** Esta alarma se activa y emite un sonido cada segundo únicamente cuando el LED rojo se enciende para indicar presencia de PM2.5 y alertar a los usuarios.
3. **Módulo Bluetooth HC-05:** Envía los datos procesados y convertidos a un dispositivo móvil previamente configurado.
4. **Usuario:** El usuario cuenta con la posibilidad de obtener los datos en una computadora o en su dispositivo móvil.

#### 2.4. Cálculo en la densidad del polvo

Para realizar el cálculo de la densidad de polvo en el ambiente, fue necesario desarrollar diversas ecuaciones matemáticas específicas.

**Ecuación 1:** Medición de Voltaje.

$$VoMeasured = analogRead(measuredPin) \quad (1)$$

- **analogRead(measurePin):** Es una función en Arduino que lee el valor de un pin analógico (measurePin) y devuelve un valor entre 0 y 1023.
- **VoMeasured:** Es la variable donde se almacena el valor leído. Este valor representa una lectura de voltaje en una escala de 0 a 1023, donde 0 corresponde a 0V y 1023 corresponde al voltaje de referencia del Arduino, generalmente 5V.

**Ecuación 2:** Cálculo del Voltaje.

$$calcVoltage = \frac{5 \times VoMeasured}{1024} \quad (2)$$

- **calcVoltage:** Es el voltaje calculado a partir del valor analógico medido. La fórmula convierte el valor leído (VoMeasured) a un voltaje real.
- **5:** Representa el voltaje de referencia del Arduino.
- **1024:** Es el valor máximo que puede ser leído por analogRead. La ecuación completa convierte el valor analógico en un voltaje real en el rango de 0 a 5V.

**Ecuación 3:** Cálculo de la Densidad de Polvo.

$$dustDensity = 0.17 \times calcVoltage - 0.1 \quad (3)$$

- **DustDensity:** Es la densidad de polvo calculada.
- **0.17:** Es un factor de calibración que convierte el voltaje (calcVoltage) en una densidad de polvo.
- **-0.1:** Es un ajuste para la calibración, es necesario para corregir cualquier desviación sistemática en la medición. La ecuación lineal relaciona el voltaje calculado (calcVoltage) con la densidad de polvo medida, basado en características específicas del sensor y la calibración.

**Condicionales:**

→ Densidad de polvo menor o igual a  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ :

$$\text{If } dustDensity \leq 0.1$$

→ Densidad de polvo entre 11 y  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ :

$$\text{If } dustDensity \leq 0.25$$

→ Densidad de polvo mayor a  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ :

$$\text{If } dustDensity > 0.25$$

#### 2.5. Implementación

**A)** Una vez definida la visión y los objetivos generales del prototipo, se procedió a realizar una simulación detallada empleando el software Fritzing. Este paso es fundamental para validar el diseño conceptual y asegurar que todos los componentes interactúan correctamente antes de la construcción física del prototipo (ver Figura 5).

La simulación en Fritzing permite identificar y corregir posibles errores de diseño en una etapa temprana del desarrollo, optimizando así el proceso y garantizando una mayor precisión en el resultado final.

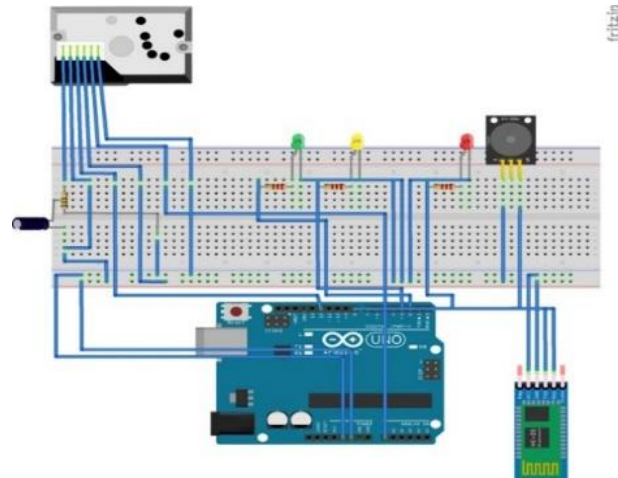


Figura 5: Diagrama de conexión

**B)** Finalmente, se optó por diseñar una base compacta que proteja parte de los componentes y una estructura tipo chimenea para ubicar el sensor en la parte superior. Esto permite que el humo que contiene PM2.5 ascienda directamente hacia el sensor simulando un entorno cerrado y alienado con los objetivos del prototipo.

Tanto la base como la chimenea están fabricadas de vidrio color negro, para generar una presentación más seria y profesional. A continuación, se muestra una serie de imágenes del prototipo terminado (ver Figura 6 y 7).

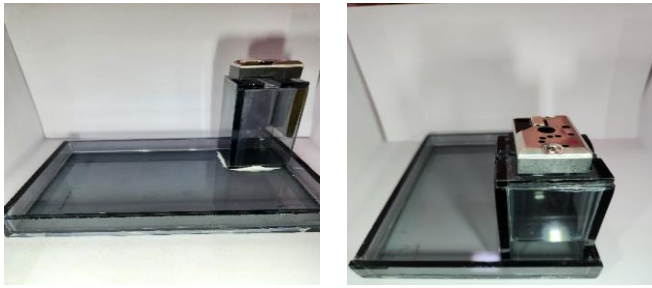


Figura 6: Vista de la estructura sin componentes

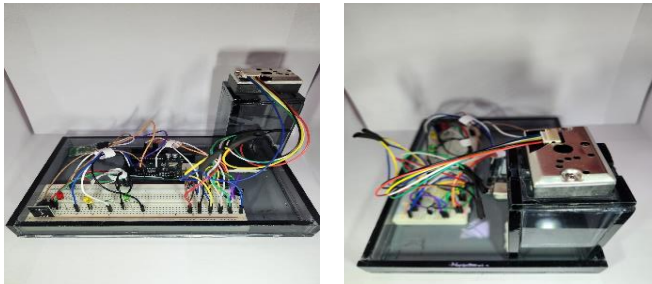
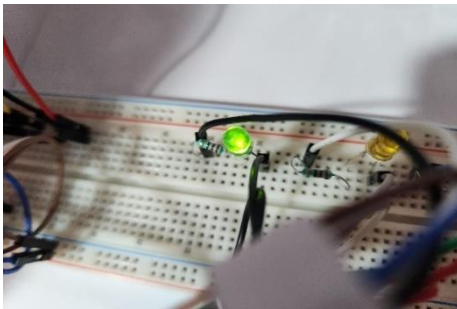


Figura 7: Vista a detalle del prototipo

### 3. Resultados

#### Nivel BAJO ( $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ o menos)

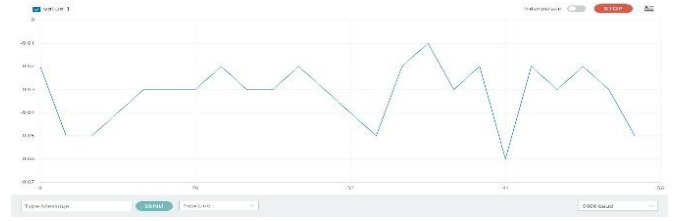
1. Al conectar la placa Arduino UNO a la computadora, se enciende un LED color verde indicando que la densidad de polvo se encuentra en un nivel bajo y no representa un riesgo para la salud.



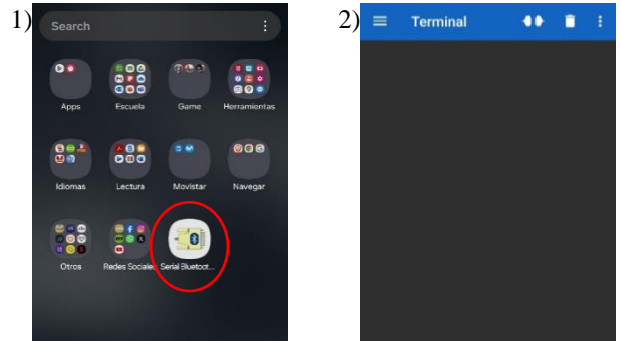
2. Se puede observar la lectura de los datos en el Serial Monitor del Arduino IDE, en este caso se registra una densidad de polvo menor a  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y un nivel bajo.



3. Por otro lado, existe la posibilidad de visualizar la lectura de los datos en el Serial Plotter. En esta imagen se puede observar que la gráfica se encuentra por debajo de 0 puesto que el ambiente está limpio y no existe ningún peligro.



4. Para acceder a la lectura de los datos en un dispositivo móvil por medio de la conexión Bluetooth, basta con acceder a la aplicación Serial Bluetooth Terminal como se muestra en la siguiente serie de imágenes.



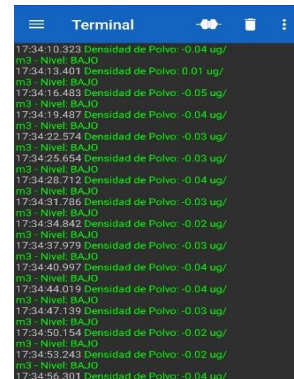
5. Cuando se ingresa a la aplicación previamente descargada, se debe seleccionar el módulo Bluetooth para Arduino modelo HC-05 y la conexión se realiza automáticamente como se muestra en las imágenes.

```

-> Densidad de Polvo: -0.00 ug/m3 - Nivel: BAJO
-> -0.00
-> Densidad de Polvo: -0.02 ug/m3 - Nivel: BAJO
-> -0.02
-> Densidad de Polvo: -0.02 ug/m3 - Nivel: BAJO
-> -0.02
-> Densidad de Polvo: 0.00 ug/m3 - Nivel: BAJO
-> 0.00
-> Densidad de Polvo: -0.01 ug/m3 - Nivel: BAJO
-> -0.01
-> Densidad de Polvo: 0.01 ug/m3 - Nivel: BAJO
-> 0.01
-> Densidad de Polvo: -0.01 ug/m3 - Nivel: BAJO
-> -0.01
-> Densidad de Polvo: 0.00 ug/m3 - Nivel: BAJO
-> 0.00
-> Densidad de Polvo: -0.00 ug/m3 - Nivel: BAJO
-> -0.00

```

6. Cuando el dispositivo móvil genera la conexión de manera correcta, los mismos datos que se muestran en la computadora se empiezan a enviar al dispositivo como se muestra en la imagen. Como en este punto no se ha generado la combustión de algún material que desprenda PM2.5 el nivel bajo se continúa mostrando.



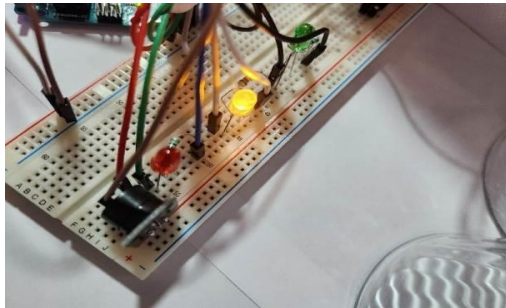
**Nivel REGULAR** (11 a 25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

1. Como se menciona anteriormente, las pruebas para la detección de PM2.5 y medición de la densidad del polvo en microgramos/metro cúbico ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) se realiza con la quema de cerillos de madera y papel servilleta como se muestra en la siguiente serie de imágenes.



2. En cuanto se acerca el humo que desprenden estos materiales al ser quemados, el sensor detecta las partículas y el LED amarillo se enciende indicando un aumento en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

En este nivel, el usuario debe tomar precaución para evitar daños a la salud.



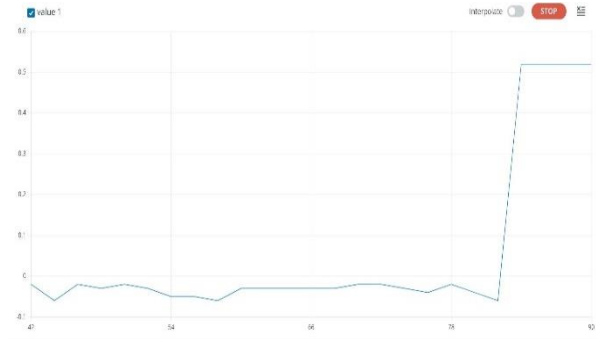
3. Aumento de los niveles vistos desde el Serial Monitor de Arduino IDE.

Al ser demasiada la cantidad de humo que detecta el sensor, rápidamente pasa de un estado regular a un estado alto.

```

Monitor x
r to send message to 'Arduin New Line 9600 baud
-> 0.33
-> Densidad de Polvo: 0.15 ug/m3 - Nivel: REGULAR
-> 0.15
-> Densidad de Polvo: 0.53 ug/m3 - Nivel: ALTO
-> 0.53
-> Densidad de Polvo: 0.53 ug/m3 - Nivel: ALTO
-> 0.53
    
```

4. Aumento de los niveles vistos desde el Serial Plotter. Se puede observar de manera clara el cambio de forma que toma la gráfica al cambiar de un estado a otro.

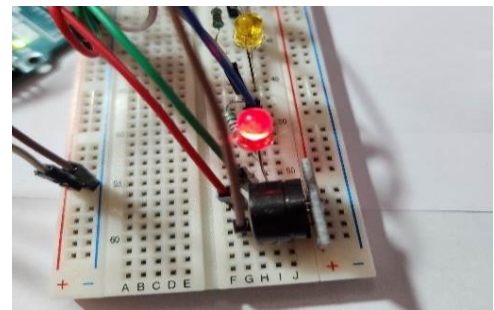


5. Los niveles en aumento también se pueden visualizar en el dispositivo móvil.



**Nivel ALTO** (25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  o más)

1. Finalmente, cuando se acerca lo suficiente el humo al sensor y los  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  comienzan a aumentar a niveles dañinos para la salud, se enciende un LED rojo y suena el Buzzer cada segundo para alertar a los usuarios que los niveles son peligrosos y se deben tomar las medidas o protocolos correspondientes.



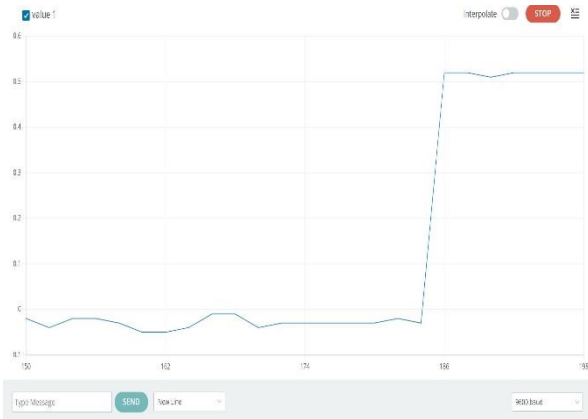
2. En este punto, la densidad de polvo supera los 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y se marca como un nivel alto en el Serial Monitor.

```

Monitor x
r to send message to 'Arduino Uno' on 'COM6')
-> 0.52
-> Densidad de Polvo: 0.52 ug/m3 - Nivel: ALTO
-> 0.52
-> Densidad de Polvo: 0.52 ug/m3 - Nivel: ALTO
-> 0.52
-> Densidad de Polvo: 0.52 ug/m3 - Nivel: ALTO
-> 0.52
-> Densidad de Polvo: 0.50 ug/m3 - Nivel: ALTO
-> 0.50
-> Densidad de Polvo: 0.52 ug/m3 - Nivel: ALTO
-> 0.52
-> Densidad de Polvo: 0.52 ug/m3 - Nivel: ALTO
-> 0.52
-> Densidad de Polvo: 0.52 ug/m3 - Nivel: ALTO
-> 0.52
-> Densidad de Polvo: 0.52 ug/m3 - Nivel: ALTO
-> 0.52
    
```



3. La gráfica sigue cambiando de forma y se observa de manera clara el aumento de  $\mu g/m^3$ , pasando por cada uno de los estados, bajo, regular y alto.



4. De la misma manera, los datos que se muestran en la computadora se muestran en el dispositivo móvil.



5. Finalmente, a medida que el humo se aleja y el ambiente se comienza a limpiar, los niveles comienzan a bajar poco a poco, como lo muestra la gráfica generada por el Serial Plotter



### 3.1 Desarrollo de una Red Neuronal Artificial (ANN)

Una vez finalizado el prototipo y verificado su correcto funcionamiento en la medición de la densidad de PM2.5, clasificando estos valores en tres categorías (BAJO, REGULAR y ALTO), se procede a desarrollar una Red

Neuronal Artificial (ANN) utilizando el lenguaje de programación Python.

Esta red neuronal se diseña con el propósito de clasificar cualquier valor aleatorio ingresado por el usuario, determinando a cuál de los tres estados mencionados pertenece dicho valor.

La implementación de la red neuronal no solo incrementa la precisión en la clasificación, sino que también mejora la capacidad del sistema para manejar datos no vistos previamente, robusteciendo así la herramienta de análisis y predicción de la calidad del aire.

### 3.2 Arquitectura propuesta

Se propone una arquitectura de Red Neuronal Artificial (ANN) diseñada específicamente para satisfacer los requerimientos del proyecto (ver Figura 8).

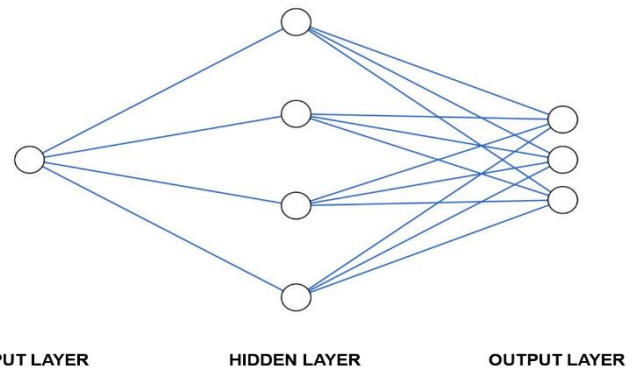


Figura 8: Red Neuronal Artificial propuesta

### 3.3 Capas

1. **Capa de Entrada (Input Layer):** La Red Neuronal Artificial cuenta con una única entrada, denominada 'DENSIDAD'. Esta entrada está especificada en el código de programación mediante el parámetro `input_dim=1`, lo que indica que el modelo recibe el único valor numérico correspondiente a la densidad de PM2.5.

2. **Capa Oculta (Hidden Layer):** La capa oculta de la red consta de cuatro neuronas completamente conectadas, definidas en el código con `Dense(4)`. Cada neurona en esta capa utiliza la función de activación ReLU (Rectified Linear Unit), que se especifica con `activation='relu'`.

La función ReLU es elegida por su eficiencia en el entrenamiento de redes neuronales, ya que ayuda a mitigar el problema del desvanecimiento del gradiente y permite un aprendizaje más rápido y efectivo.

3. **Capa de Salida (Output Layer):** La capa de salida de la red consta de tres neuronas, cada una correspondiente a uno de los tres estados de clasificación: BAJO, REGULAR y ALTO. Esta configuración se define en el código con `Dense(3, activation='softmax')`. La función de activación Softmax se utiliza para convertir las salidas en probabilidades, permitiendo así la clasificación de la entrada en una de las tres categorías. Esta función asegura que la suma de las probabilidades de todas las clases sea igual a uno, facilitando



una interpretación clara y precisa de los resultados de clasificación.

### 3.4 Funciones de activación

→ **Función de Activación ReLU (Rectified Linear Unit):**

$$ReLU(x) = \max(0, x) \tag{4}$$

La función ReLU es una de las funciones de activación más utilizadas en redes neuronales debido a su simplicidad y eficacia. Esto significa que la salida de la función ReLU es igual al valor de entrada  $x$  si  $x$  es mayor que 0; de lo contrario, la salida es 0. En términos formales:

$$ReLU(x) = \begin{cases} x, & \text{si } x > 0 \\ 0, & \text{si } x \leq 0 \end{cases}$$

→ **Función de Activación Softmax:**

$$Softmax(z_i) = \frac{e^{z_i}}{\sum_{j=1}^n e^{z_j}} \tag{5}$$

La función Softmax se utiliza principalmente en la capa de salida de una red neuronal para problemas de clasificación multiclase. La fórmula matemática de la función Softmax para una entrada vectorial es  $\mathbf{z} = [z_1, z_2, \dots, z_n]$ . Para cada elemento  $z_i$  del vector de entrada  $\mathbf{z}$ , Softmax convierte estos valores en probabilidades. La función asegura que la suma de todas las probabilidades es igual a 1.

Donde:

- $e$ : Es la base del logaritmo natural.
- $z_i$ : Es el  $i$ -ésimo valor del vector de entrada.
- $n$ : Es el número de clases.

La función Softmax es útil para modelos de clasificación multiclase porque proporciona una manera de interpretar las salidas de la red neuronal como probabilidades, facilitando la determinación de la clase más probable para una entrada dada.

### 3.5 Análisis de la Red Neuronal Artificial

Se realiza el análisis de los resultados tras la obtención de los datos del sensor el cual estuvo en operación por 25 minutos, el procesamiento y limpieza de los datos, así como la programación de la Red Neuronal Artificial.

1. **Base de datos:** La base de datos contiene un total de 1765 registros obtenidos por el sensor.

2. **Entrenamiento:** Para el entrenamiento de la red neuronal se utiliza el 80% de los datos, lo que equivale a 1412 registros.

3. **Validación:** Los datos utilizados para la validación comprenden el 20% restante, es decir, un total de 353 registros.

4. **Datos de prueba (externos):** Por último, se realizaron 20 pruebas, introduciendo niveles de densidad de polvo de manera aleatoria para verificar la precisión. La red neuronal acertó en las 20 pruebas realizadas.

5. **Precisión:** Al concluir el entrenamiento del modelo, se calcula la precisión (Accuracy) dividiendo el número de predicciones correctas entre el número total de predicciones teniendo como resultado un 99.90%.

6. **Curva de Entrenamiento y Validación** (ver Figura 9): Ambas líneas (Entrenamiento y Validación) muestran un incremento progresivo y eventualmente convergen, alcanzando una precisión superior al 95% después de 50 épocas.

Este resultado indica que la Red Neuronal desarrollada es confiable para la clasificación de los niveles de PM2.5 en el entorno.

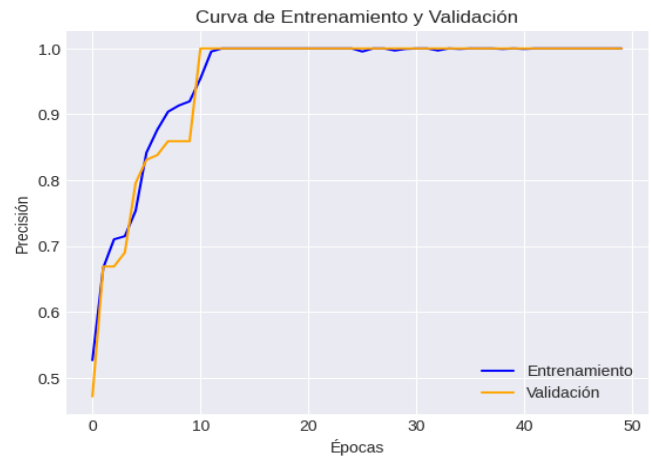


Figura 9: Curva con datos de Entrenamiento y Validación

7. **Pérdida de Entrenamiento y Validación** (ver Figura 10): En esta gráfica se observa que la pérdida inicialmente es superior a 0.8 en ambas instancias (Entrenamiento y Validación). Sin embargo, a medida que progresan las épocas, la pérdida disminuye gradualmente hasta aproximarse a 0.

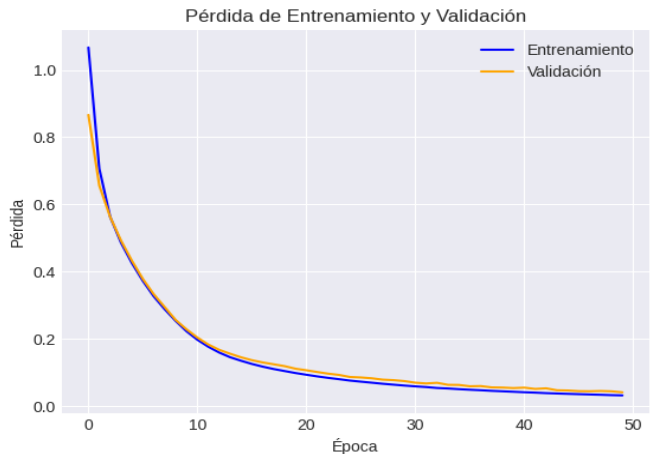


Figura 10: Gráfica de pérdida en Entrenamiento y Validación

4. **Matriz de Confusión** (ver Figura 11): Como parte del análisis de resultados, se presenta una matriz de confusión que muestra los siguientes números: 88 clasificaciones correctas para el nivel ALTO como ALTO, 104 para REGULAR como REGULAR y 161 para BAJO como BAJO.

Los demás cuadros muestran valores de 0, indicando un desempeño sobresaliente de la Red Neuronal en la clasificación.

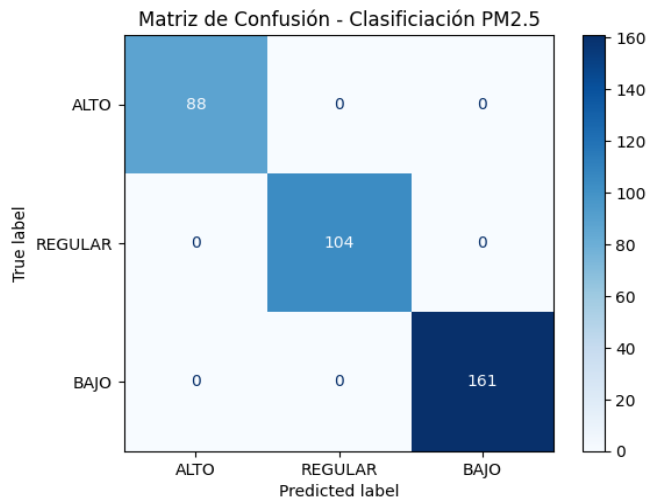


Figura 11: Matriz de Confusión obtenida en los datos de Validación

#### 4. Discusión

Como parte de la discusión de este artículo, se concluye que los resultados obtenidos son consistentes con los hallazgos reportados por diversos autores en la literatura revisada. Es importante destacar que, al igual que en los estudios previos, se han empleado materiales de fácil acceso, lo que ha permitido obtener resultados superiores a las expectativas iniciales. A pesar de tratarse de un prototipo, los resultados demostraron ser altamente confiables, con un porcentaje de precisión superior al 95%.

Además, este prototipo ofrece a los usuarios la capacidad de acceder a información precisa y en tiempo real sobre el medio ambiente, contribuyendo a un estilo de vida más saludable y conciencia del entorno que lo rodea. Por otro lado, se presenta una solución valiosa para las autoridades, facilitando la mejora en el monitoreo ambiental y en la implementación de prácticas que benefician a la sociedad.

Estos aspectos están alineados con los objetivos clave propuestos por los autores en el estado del arte, subrayando la relevancia y el impacto social de este trabajo.

#### 5. Conclusiones

El desarrollo de prototipos rápidos para la detección de PM2.5 representa un avance importante en la lucha contra la contaminación atmosférica, un problema global que afecta la salud pública y el medio ambiente. Estos prototipos no solo permiten una respuesta más rápida ante niveles elevados de partículas finas, sino que también facilitan la toma de

decisiones informadas para proteger la salud de las comunidades afectadas.

La implementación de Inteligencia Artificial, específicamente Redes Neuronales Artificiales (ANN), para robustecer estos prototipos es fundamental. Las redes neuronales pueden procesar grandes volúmenes de datos de manera eficiente y precisa, mejorando la capacidad de los dispositivos para clasificar y predecir la concentración de PM2.5 con alta exactitud. Esto no solo optimiza la monitorización en tiempo real, sino que también permite una intervención más efectiva y oportuna por parte de las autoridades y los ciudadanos.

El impacto de estos avances tecnológicos se extiende más allá de la simple detección. Proporcionan datos fundamentales para la formulación de políticas públicas orientadas a reducir las emisiones y proteger la calidad del aire en áreas urbanas y rurales. Además, empoderan a las comunidades con información accesible y transparente sobre los niveles de contaminación, fomentando una mayor conciencia ambiental y promoviendo comportamientos más sostenibles.

En términos de salud pública, la capacidad de anticipar y gestionar la exposición a PM2.5 puede significar la diferencia entre la vida y la muerte, especialmente para grupos vulnerables como niños pequeños, ancianos y personas con enfermedades respiratorias crónicas. La combinación de prototipos rápidos y IA no solo mejora la vigilancia continua de la calidad del aire, sino que también fortalece la capacidad de las comunidades para proteger su bienestar a largo plazo.

En conclusión, invertir en el desarrollo y perfeccionamiento de prototipos rápidos para la detección de PM2.5, fortalecidos con Inteligencia Artificial como Redes Neuronales Artificiales, es esencial para mitigar los efectos adversos de la contaminación atmosférica en la sociedad. Estas tecnologías no solo son herramientas poderosas para la monitorización ambiental, sino que también representan un compromiso con la salud pública, la sostenibilidad ambiental y el desarrollo de comunidades más resilientes frente a los desafíos ambientales del siglo XXI.

##### 5.1 Trabajos futuros

Se espera que este prototipo de alarma ambiental para PM2.5 sirva de apoyo para futuros trabajos e investigaciones tecnológicas. En este sentido, se proponen las siguientes mejoras e implementaciones adicionales para potenciar su utilidad:

- **Incorporación de un módulo WiFi para Arduino:** Esto permitiría el acceso remoto a los datos en cualquier lugar, facilitando el monitoreo y la gestión de la calidad del aire en tiempo real.
- **Extractor o ventilación:** Se puede agregar un extractor o un sistema de ventilación al sistema con el objetivo de limpiar el ambiente que contenga PM2.5 y así evitar daños a la salud.
- **Integración de sensores ambientales adicionales:** Añadir otros tipos de sensores ambientales ayudaría a crear una red o sistema

integral para el monitoreo y cuidado de la salud y el medio ambiente.

- **Desarrollo de una aplicación para dispositivos Android y iOS:** Diseñar una aplicación específica permitiría a los usuarios acceder a los datos y gestionar el sistema, incluyendo la activación y desactivación de la alarma desde sus dispositivos móviles además de poder ver las gráficas en el aumento de PM2.5
- **Optimización del consumo energético:** Realizar ajustes en el diseño y funcionamiento del prototipo para minimizar el consumo de energía.

Esto incluiría el uso de componentes de bajo consumo y la implementación de modos de ahorro de energía, lo que aumentaría la autonomía del dispositivo y su viabilidad en entornos con recursos limitados.

Estas mejoras adicionales contribuirán a la robustez, eficiencia y usabilidad del sistema, facilitando su integración en proyectos más amplios y su adopción en distintos contextos de aplicación.

## 6. Agradecimientos

## 7. Referencias

- Ángulo Montenegro, K. L. (2023). *Ecosistema de internet de las cosas orientado a la adquisición automática de datos ambientales y de calidad del aire*. Esmeraldas: Pontificia Universidad Católica del Ecuador sede Esmeraldas.
- Arduino.cl. (6 de Mayo de 2024). *¿Qué es Arduino?* Obtenido de *¿Qué es Arduino?*: <https://arduino.cl/que-es-arduino/>
- Astudillo Vásquez, J. A., & Maldonado Zhindón, C. R. (2022). *Diseño de un sistema ANDON en la línea de producción de ladrillos refractarios en la empresa Samothermal*. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana.
- Botello Mendoza, N., & Arenas Castro, J. C. (2023). *Estudio de la viabilidad de implementación de una estación de monitoreo de la calidad del aire utilizando la tecnología Arduino*. Cúcuta: Universidad Libre Seccional Cúcuta.
- California Office for Environmental Health Hazard Assessment (OEHHA). (2 de Mayo de 2024).

- PM2.5. Obtenido de <https://oehha.ca.gov/calenviroscreen/indicador/pm25>
- INEGI. (2024). *Estadística de Defunciones Registradas (EDR)*. Ciudad de México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (21 de Enero de 2021). *Partículas suspendidas PM10 y PM2.5 dañan la salud y medio ambiente*. Obtenido de *Partículas suspendidas PM10 y PM2.5 dañan la salud y medio ambiente*: <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/particulas-suspendidas-pm10-y-pm2-5-danan-salud-y-medio-ambiente>
- IQAir Staff Writers. (6 de Mayo de 2024). *PM2.5*. Obtenido de *PM2.5*: <https://www.iqair.com/mx/newsroom/pm2-5>
- OMS. (16 de Marzo de 2023). *Enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC)*. Obtenido de *Enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC)*: [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/chronic-obstructive-pulmonary-disease-\(copd\)#:~:text=La%20enfermedad%20pulmonar%20obstructiva%20cr%C3%B3nica%20\(EPOC\)%20es%20una%20enfermedad%20pulmonar,da%C3%B1ar%20u%20obstruir%20los%20pulmones.](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/chronic-obstructive-pulmonary-disease-(copd)#:~:text=La%20enfermedad%20pulmonar%20obstructiva%20cr%C3%B3nica%20(EPOC)%20es%20una%20enfermedad%20pulmonar,da%C3%B1ar%20u%20obstruir%20los%20pulmones.)
- Organización Panamericana de la Salud (OPS). (16 de Mayo de 2024). *Calidad del Aire Ambiente*. Obtenido de *Calidad del Aire Ambiente*: <https://www.paho.org/es/temas/calidad-aire/calidad-aire-ambiente>
- Sharp. (2006). *GP2Y1010AU0F*. Tokio: Sharp.
- Universidad Europea Creative Campus. (20 de Abril de 2022). *¿Qué es un prototipo y para qué sirve?* Obtenido de *¿Qué es un prototipo y para qué sirve?*: <https://creativecampus.universidadeuropea.com/blog/que-es-prototipo/>