



**Detección de factores de riesgo en un cultivo de papa a partir de mapas espaciales  
de calor de las variables pH y humedad sensadas a lo largo del terreno.**

**Cristian Mauricio Diaz Quiroga**

**Fabian David Rodríguez Gil**

20441718804

20441717388

**Universidad Antonio Nariño**

Programa Ingeniería Electrónica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Tunja, Colombia

2021



**Detección de factores de riesgo en un cultivo de papa a partir de mapas espaciales  
de calor de las variables pH y humedad sensadas a lo largo del terreno.**

**Cristian Mauricio Diaz Quiroga**

**Fabian David Rodríguez Gil**

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

**Ingeniero Electrónico**

Director (a):

PhD. Jenny Carolina Castiblanco

Línea de Investigación:

Agricultura de precisión

**Universidad Antonio Nariño**

Programa Ingeniería Electrónica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Tunja, Colombia

2021



## NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado

\_\_\_\_\_.

Cumple con los requisitos para optar

Al título de \_\_\_\_\_.

\_\_\_\_\_  
Firma del Tutor

\_\_\_\_\_  
Firma Jurado

\_\_\_\_\_  
Firma Jurado

Ciudad, Día Mes Año.

# Contenido

	Pág.
Preliminares.....	XIII
Resumen.....	7
Abstract.....	8
Introducción .....	9
Planteamiento del problema .....	10
Justificación.....	11
Estado del arte.....	12
Objetivos .....	14
<b>1. Marco Teórico.....</b>	<b>15</b>
<b>1.1 Generalidades del cultivo de papa.....</b>	<b>15</b>
<i>1.1.1 Descripción botánica, morfológica y condiciones agroecológicas.....</i>	<i>15</i>
<i>1.1.2 Suelo y preparación de la tierra.....</i>	<i>16</i>
<i>1.1.3 Siembra y Ciclo del cultivo.....</i>	<i>17</i>
<b>1.2 Factores abióticos y afectaciones de un cultivo de papa .....</b>	<b>18</b>
<i>1.2.1 Humedad en el cultivo de papa .....</i>	<i>19</i>
<i>1.2.2 PH en el cultivo de papa.....</i>	<i>22</i>
<b>1.3 Herramientas para la supervisión de los factores pH y humedad en un cultivo de papa.....</b>	<b>25</b>
<i>1.3.1 Sistema de adquisición de las variables pH y humedad.....</i>	<i>25</i>
<i>1.3.2 Métodos de calibración para sensores .....</i>	<i>29</i>
<i>1.3.3 Herramientas para el análisis e interpretación de datos .....</i>	<i>29</i>
<b>2. Diseño metodológico .....</b>	<b>34</b>
<b>2.1 Selección de instrumentos .....</b>	<b>34</b>
<i>2.1.1 Requerimientos de los instrumentos .....</i>	<i>35</i>

2.1.2	<i>Selección de la instrumentación electrónica</i> .....	38
2.1.3	<i>Selección final mediante matrices de decisión</i> .....	39
2.2	Construcción del prototipo .....	43
2.2.1	<i>Descripción prototipo</i> .....	44
2.2.2	<i>Caracterización sensor Humedad</i> .....	45
2.2.3	<i>Caracterización sensor pH</i> .....	48
2.2.4	<i>Diseño circuito impreso</i> .....	51
2.3	Recolección de muestras pH y humedad .....	54
2.3.1	<i>Ubicación del cultivo</i> .....	54
2.3.2	<i>Toma de muestras humedad y pH</i> .....	54
2.3.3	<i>Visualización muestras en XCTU</i> .....	56
2.3.4	<i>Recopilación datos en Matlab</i> .....	57
2.4	Visualización espacial .....	58
2.4.1	<i>Visualización aérea del cultivo</i> .....	59
2.4.2	<i>Interpolación de los datos</i> .....	60
2.5	Análisis visualización espacial .....	61
<b>3.</b>	<b>Resultados y discusión</b> .....	<b>63</b>
3.1	Selección final instrumentos.....	63
3.2	Toma de muestras .....	64
3.3	Procesamiento de los datos en Matlab.....	65
3.3.1	<i>Lectura y conversión archivo de datos “.log”</i> .....	65
3.3.2	<i>Posición de los puntos medidos</i> .....	68
3.3.3	<i>Mapas de calor</i> .....	70
<b>4.</b>	<b>Conclusiones</b> .....	<b>74</b>
<b>5.</b>	<b>Referencias</b> .....	<b>76</b>
<b>ANEXO I: FICHA TECNICA DEL CULTIVO</b> .....		<b>81</b>
<b>ANEXO II: TABLAS DE INSTRUMENTOS APTOS PARA EL PROTOTIPO</b> .....		<b>86</b>
<b>ANEXO III: MANUAL DE USUARIO</b> .....		<b>95</b>
<b>ANEXO IV: PSEUDOCÓDIGO MATLAB</b> .....		<b>101</b>

## Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1-1:</b> Descripción botánica de la papa. Fuente: (Camara de Comercio de Bogota, 2015) .....	16
<b>Figura 1-2:</b> Arado de la tierra. Fuente: (John Deere, 2021) .....	17
<b>Figura 1-3:</b> Ciclo de un cultivo de papa. Fuente: (Camara de Comercio de Bogota, 2015)	18
<b>Figura 1-4:</b> Condiciones de humedad para suelos de diferentes texturas. Fuente: (Tecnigrícola, 2013) .....	20
<b>Figura 1-5:</b> Sarna común por exceso de agua. Fuente: (Yara, 2018) .....	20
<b>Figura 1-6:</b> Lenticelas formadas por exceso de agua. Fuente: (Yara, 2018) .....	21
<b>Figura 1-7:</b> Grietas en el tubérculo causadas por el exceso de agua. Fuente: (Yara, 2018)	21
<b>Figura 1-8:</b> Síntoma del corazón vacío. Fuente: (Muñoz, Sandaña , & Orena , 2016) .....	22
<b>Figura 1-9:</b> Síntoma del tubérculo secundario. Fuente: (Muñoz, Sandaña , & Orena , 2016) .....	22
<b>Figura 1-10:</b> Sensor de pH. Fuente: Autores .....	26
<b>Figura 1-11:</b> Sensor de Humedad. Fuente: Autores .....	27
<b>Figura 1-12:</b> Microcontrolador. Fuente: Autores .....	28
<b>Figura 1-13:</b> XBee. Fuente: Autores.....	28
<b>Figura 1-14:</b> Curve fitting App. Fuente: (The MathWorks, Curve Fitting, 2021) .....	31
<b>Figura 1-15:</b> Mapa de calor. Fuente: (The MathWorks, Interpolacion, 2021) .....	33
<b>Figura 2-1:</b> Metodología de la investigación. Fuente: Autores .....	34
<b>Figura 2-2:</b> Diagrama de conexiones. Fuente: Autores .....	45
<b>Figura 2-3:</b> Calibracion sensor humedad. Fuente: Autores .....	48

<b>Figura 2-4:</b> Calibracion sensor pH. Fuente: Autores .....	50
<b>Figura 2-5:</b> Buffers de solucion estándar pH. Fuente: Autores .....	50
<b>Figura 2-6:</b> Esquema del prototipo. Fuente: Autores .....	51
<b>Figura 2-7:</b> Placa del circuito impreso. Fuente: Autores .....	52
<b>Figura 2-8:</b> Montaje del prototipo. Fuente: Autores.....	53
<b>Figura 2-9:</b> Prototipo terminado. Fuente: Autores.....	53
<b>Figura 2-10:</b> Cultivo de papa. Fuente: Autores .....	54
<b>Figura 2-11:</b> Toma de las variables de pH y Humedad. Fuente: Autores .....	55
<b>Figura 2-12:</b> Sonda con punta de lanza. Fuente: Autores.....	56
<b>Figura 2-13:</b> Datos en XCTU. Fuente: Autores.....	57
<b>Figura 2-14:</b> Archivo ‘.log’. Fuente: Autores.....	58
<b>Figura 2-15:</b> Referencia dron. Fuente: Autores .....	59
<b>Figura 2-16:</b> Imagen dron. Fuente: Autores .....	60
<b>Figura 2-17:</b> Suelos según el pH. Fuente (Martinez, 2012).....	61
<b>Figura 3-1:</b> Error en la conversión. Fuente: Autores .....	66
<b>Figura 3-2:</b> Matrices Humedad y pH por separado. Fuente: Autores.....	67
<b>Figura 3-3:</b> Humedad y pH. Fuente: Autores .....	67
<b>Figura 3-4:</b> Puntos sensados en el cultivo. Fuente: Autores.....	68
<b>Figura 3-5:</b> Pixeles en X y Y de cada punto. Fuente: Autores .....	69
<b>Figura 3-6:</b> Posición de los puntos sensados. Fuente: Autores .....	71
<b>Figura 3-7:</b> Visualización espacial Humedad. Fuente: Autores .....	71
<b>Figura 3-8:</b> Vista superior Humedad. Fuente: Autores.....	72
<b>Figura 3-9:</b> Visualización espacial pH. Fuente: Autores.....	73



## Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1-1:</b> pH del suelo y grado de acidez. Fuente: (Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, 2001) .....	24
<b>Tabla 1-2:</b> Métodos de interpolación. Fuente: (The MathWorks, Interpolacion , 2021)...	32
<b>Tabla 2-1:</b> Requerimiento sensores. Fuente: Autores .....	35
<b>Tabla 2-2:</b> Requerimiento fuente de alimentación. Fuente: Autores .....	36
<b>Tabla 2-3:</b> Requerimiento procesamiento de la información. Fuente: Autores .....	36
<b>Tabla 2-4:</b> Requerimiento sistema de comunicación. Fuente Autores .....	37
<b>Tabla 2-5:</b> Requerimiento visualización. Fuente Autores.....	38
<b>Tabla 2-6:</b> Puntuación sensor pH. Fuente: Autores .....	39
<b>Tabla 2-7:</b> Puntuación sensor humedad. Fuente: Autores .....	40
<b>Tabla 2-8:</b> Puntuación microcontrolador. Fuente: Autores .....	41
<b>Tabla 2-9:</b> Puntuación XBee. Fuente: Autores .....	42
<b>Tabla 2-10:</b> Puntuación batería. Fuente: Autores .....	43
<b>Tabla 2-11:</b> Datos del sensor de humedad. Fuente: Autores. ....	46
<b>Tabla 2-12:</b> Datos del sensor de pH. Fuente: Autores .....	49
<b>Tabla 3-1:</b> Instrumentos aptos. Fuente: Autores.....	63
<b>Tabla 6-1:</b> Tipos de sensores. Fuente: Autores.....	86
<b>Tabla 6-2:</b> Tipos de baterías. Fuente: Autores.....	88
<b>Tabla 6-3:</b> Tipos de microcontroladores. Fuente: Autores .....	89
<b>Tabla 6-4:</b> Tipos de Arduino. Fuente: Autores .....	90
<b>Tabla 6-5:</b> Tipos de bluetooth. Fuente: Autores .....	91

<b>Tabla 6-6:</b> Tipos de XBee. Fuente: Autores .....	92
<b>Tabla 6-7:</b> Tipos de cable serial. Fuente: Autores .....	93
<b>Tabla 6-8:</b> Portátiles. Fuente: Autores .....	94

## **Preliminares**

*(Dedicatoria)*

*Este gran paso de mi vida se lo quiero dedicar en especial a mi madre que siempre estuvo ahí, dándome su amor y apoyo incondicional para seguir adelante y nunca desfallecer, también se lo quiero dedicar a mi familia por estar presente en este paso importante para mi vida profesional, quiero también agradecer a Dios por llenarme de sabiduría y guiarme en los momentos más difíciles de este camino.*

*Fabian David Rodríguez Gil*

*(Dedicatoria)*

*A mi abuela*

*A mi madre*

*Las dos mujeres que me han brindado su más sincero e incondicional apoyo, asimismo le dedico este logro a toda mi familia y a cada una de las personas que aportaron su granito de arena durante todo este proceso, para hoy poder decir con gran satisfacción lo logre.*

*Cristian Mauricio Diaz Quiroga*



## **Agradecimientos**

Agradecemos infinitamente a todas las personas que nos han brindaron siempre su apoyo en este proceso, a quienes nos acompañaron y que hicieron parte de nuestra formación profesional. A los docentes de la Universidad Antonio Nariño, en especial a la ingeniera Angela Viviana Peña Puerto por su compromiso, apoyo y dedicación; al ingeniero Jorge Orlando Bareño y demás docentes de la sede Tunja quienes nos compartieron sus conocimientos y experiencias.

Por ultimo y no menos importante queremos agradecer al ingeniero Mario Duarte y la ingeniera Jenny Carolina Castiblanco por su paciencia, dedicación y constancia, por la orientación durante el desarrollo de este trabajo de grado.



## **Resumen**

En este proyecto de investigación, se propone realizar una visualización espacial (mapa de calor) del terreno, en el cual se indiquen las variables de pH y humedad que están presentes en el suelo durante el proceso de un cultivo de papa, y así observar cómo influyen en el crecimiento de la planta. Para ello se planteó realizar un prototipo que tendrá integrados dos sensores diferentes con los que se van a tomar el valor de las variables a medir, estas mismas variables se pueden observar a través de una hoja de especificaciones que será entregada al dueño del cultivo.

En la hoja de especificaciones se observará el mapa espacial de calor con los datos obtenidos a lo largo del terreno, esto con el propósito de indicarle al agricultor cuales son las zonas más críticas y cómo afectan estas variables en su cultivo, de manera que a futuro se puedan reducir los riesgos y amenazas que afectan los cambios de pH y de humedad en la tierra. Se espera que este proyecto pueda beneficiar al gremio agrícola que tiene este tipo de cultivo, en donde ellos mismos puedan observar y tener en cuenta que partes del terreno están afectadas.

**PALABRAS CLAVE:** Instrumentación, cultivo papa, pH, humedad, mapeo de variables.

### **Abstract**

In this research project, it is proposed to carry out a spatial visualization (heat map) of the terrain, in which the pH and moisture variables that are present in the soil during the process of a potato crop are indicated, and thus observe how they influence the growth of the plant. For this, it was proposed to make a prototype that will have two different sensors integrated with which the value of the variables to be measured will be taken, these same variables can be observed through a specification sheet that will be delivered to the owner of the crop.

In the specification sheet, the spatial heat map will be observed with the data obtained throughout the field, this with the purpose of indicating to the farmer which are the most critical areas and how these variables affect his crop, so that in the future risks and threats that affect changes in pH and moisture in the soil can be reduced. It is hoped that this project can benefit the agricultural union that has this type of crop, where they themselves can observe and take into account which parts of the land are affected.

Keywords: Instrumentation, potato farming, pH, moisture, variables mapping.

## Introducción

Colombia goza de diversos privilegios por su ubicación geográfica, clima, fauna, flora, cuencas hidrográficas y demás recursos naturales. Estas ventajas hacen de la agricultura colombiana uno de los sectores más importantes para la economía y desarrollo del país, pues es la principal fuente de ingresos del área rural, hace un aporte significativo al avance económico, la mitigación de la pobreza, entre otras. No obstante, los agricultores se enfrentan a problemas de diferente índole como la violencia, variación en los precios del mercado, enfermedades y principalmente al cambio climático y el daño ambiental que está sufriendo el planeta conllevado a drásticos cambios de temperatura que se presentan en el país, además de la poca rotación de cultivos en las áreas de siembra por el surgimiento de plagas y enfermedades (Sandoval, 2016).

Aportando a la agricultura de precisión este proyecto propone una visualización espacial de todo el terreno de un cultivo de papa con el fin de ayudar al agricultor a diferenciar los puntos donde el cultivo es vulnerable a enfermedades de acuerdo a los rangos que presenten las variables de pH y humedad medidas. Para ello se realiza un estudio del campo con el prototipo tomando diferentes muestras a lo largo del cultivo, y con los valores que se obtuvieron se realiza un mapa de calor, entregándole al agricultor una ficha técnica de su cultivo como se presenta en el Anexo I, exponiendo los resultados y aportando a recomendaciones y advertencias de las enfermedades que se pueden desarrollar cuando el cultivo no presenta los niveles tanto de pH como de humedad adecuados, todo esto se realiza respecto al análisis de los resultados arrojados en la visualización espacial.

### **Planteamiento del problema**

El Centro Internacional de la papa (CIP) afirma que la agricultura es vulnerable al cambio climático siendo una de las principales causas de los gases de efecto invernadero. Si bien se espera que la demanda de alimentos aumente en un 60% para 2050, se tiene como indicio que cada 1 ° C de calentamiento provoque una reducción en la productividad de los cultivos estimada del 5%, además aproximadamente 14 mil millones de personas consumen la papa como alimento básico en el mundo (center, 2020). De otra forma unos de los principales problemas para los agricultores es que ellos no saben con exactitud qué zonas de su cultivo son las que están más afectadas por la humedad y el pH, puesto que para la producción de la papa el suelo debe tener un pH de entre 5.2 a 6.4 (fao.org, 2008) ya que fuera de este rango el cultivo puede presentar distintos trastornos en su desarrollo, y el exceso de humedad genera sarna común, desarrollo de lenticelas y también puede causar grietas en el tubérculo.

Por lo mencionado anteriormente se plantea realizar una visualización espacial (mapa de calor) de variables ambientales, centrándose específicamente en el pH y la humedad presentes en el terreno de un cultivo de papa, con el fin de recopilar información sobre como estas variables afectan en el desarrollo del cultivo para que así los agricultores logren identificar con mayor certeza que es lo que realmente está afectando sus cultivos. Es de vital importancia seleccionar los sensores tanto de pH y humedad más aptos e identificar la instrumentación requerida para el funcionamiento del sistema y el diseño.

### **Justificación**

Al ser el cultivo de papa uno de los cultivos más importantes en Colombia, es necesario dar solución a las diferentes problemáticas que más aquejan a los agricultores. Por ello surge la necesidad de identificar inicialmente qué factores abióticos afectan dicho cultivo. En la mayoría de los casos el pH del suelo donde se cultivan las papas no es óptimo, además el rendimiento del cultivo es alto cuando la humedad del suelo se mantiene en un 70% de su capacidad disponible (Medina, 2012).

Con la implementación del prototipo se tomarán muestras de las variables pH y humedad presentes en el cultivo, con el fin de detectar los factores de riesgo. Estos factores están asociados al rango de dichas variables que afectan el cultivo permitiendo el desarrollo de enfermedades, dicho de otra forma, un cultivo puede presentar diferentes tipos de anomalías y la solución para el agricultor es aplicar agroquímicos con el fin de evitar pérdidas en la plantación. Por otro lado, si se obtienen los valores reales de dichas variables y teniendo en cuenta los parámetros en los que se desarrolla la enfermedad

es de gran ayuda para el agricultor identificar cuál de los dos factores abióticos es propicio afectando el cultivo, por consiguiente, lograra determinar las acciones para prevenir o mitigar el progreso de la enfermedad, además de tener una visión total del cultivo ya que los datos estarán mapeados a lo largo del terreno con el propósito de identificar los puntos más críticos del cultivo.

### **Estado del arte**

En Colombia los cultivos de papa no poseen sistemas de monitoreo de variables climáticas y pH en la tierra, por lo que el manejo del cultivo se realiza de manera empírica por parte de los productores. Sin embargo, con el avance de la tecnología, se han realizado nuevas propuestas, como la que se muestra en una conferencia realizada en julio de 2019 en Yogyakarta, Indonesia; en donde hablaron de la creación de un sistema para monitorear la Humedad y el pH en tiempo real utilizando comunicación de manera inalámbrica con ondas de radio basadas en el internet de las cosas (IoT), el proyecto se realiza con el objetivo de hacer un seguimiento en la calidad de la tierra, tomando muestras y observando los valores a través de una interfaz de usuario. Este prototipo se realiza a modo escala utilizando vasijas con tierra (Kamelia, Setya Nugraha, Ridlo Effendi, & Priatna, 2019).

De igual manera, Martha Ceballos realizó un esquema de riego para un cultivo de pimiento habanero definido por un algoritmo que automatiza la cantidad de agua suministrada, mediante un sistema inalámbrico ZigBee que permite el monitoreo a través de una PC, el cual considera la humedad relativa y temperatura ambiente, en este proyecto los autores lo gestionan para que el algoritmo tome en cuenta condiciones como el microclima de una casa sombra y hacen el seguimiento al consumo de agua y cuánto tiempo la tierra conserva esa humedad para que pueda ser comparado con los sistemas de riego tradicionales y así observar cuanto varía la diferencia de consumo de cada uno de los sistemas de riego. Estos datos que se arrojan son procesados mediante el protocolo ZigBee el cual se utiliza para la transmisión de información (Ceballos, Palma Gamboa, & Gorricho, 2015). Así mismo, en la universidad de San Carlos en Cebú, Filipinas reposa en base de datos un estudio

realizado con título “A Wireless Sensor Network using XBee for precision agriculture of sweet potatoes (*Ipomoea batatas*)”, donde monitorearon dos plantas de batatas, una dejándola en ambiente natural y la otra en ambiente controlado, monitoreando la temperatura, la humedad del suelo y la humedad relativa. Utilizaron una red de sensores inalámbricos conectados a un módulo XBee y utilizando el protocolo Zigbee recopilaron los datos. La información se envió a una computadora y con ayuda de Matlab los datos fueron procesados creando una interfaz gráfica en donde el usuario podía observar la temperatura y la humedad de las batatas plantadas en el ambiente natural y en el ambiente controlado. Este proyecto se realizó a escala donde se podía controlar la humedad y temperatura de la planta comparándola con una planta dejada al aire libre y así observar el desarrollo de ambas plantas, obteniendo como resultado que la planta controlada tiene un mejor desarrollo (Lázaro Pascual, R. Sánchez, E. Naces, & A. Nuñez, 2015).

Por otra parte, en la Universidad Ateneo de Manila en Metro Manila, Filipinas el Departamento de ingeniería electrónica realizó un estudio agricultura de precisión en donde su objetivo principal era implementar un sistema de red de sensores de Humedad, temperatura, conductividad eléctrica y pH para monitorear factores que puedan poner en riesgo a un cultivo. Este estudio se realizó con la idea de proporcionar una ayuda a los agricultores locales para detectar a tiempo factores que podían dañar el cultivo o simplemente hacer un seguimiento en el proceso de crecimiento del cultivo. Este prototipo fue implementado en un cultivo de maíz (O. Flores, M. Butaslac, M. Gonzales, G. Dumlao, & J. Reyes, 2016).

## Objetivos

Como objetivo general se plantea:

Detectar factores de riesgo en un cultivo de papa a partir de mapas de calor de las variables pH y humedad sensadas a lo largo del terreno.

Objetivos específicos:

- Seleccionar los dispositivos electrónicos para la medición de variables pH y Humedad en suelo.
- Elaborar prototipo con la instrumentación electrónica requerida para la obtención de los datos de pH y humedad del suelo.
- Implementar un sistema de información para la recolección de muestras espaciales de las variables pH y humedad a lo largo del cultivo de papa.
- Elaborar una visualización espacial (mapa de calor) de la variación de los valores de pH y Humedad a lo largo del cultivo de papa.

## 1. Marco Teórico

En esta sección se presenta el marco conceptual en el que se basa el proyecto para su ejecución, dentro de este se tiene lo relacionado con los factores abióticos y afectaciones de un cultivo de papa durante su desarrollo, el ciclo de crecimiento de la papa, la preparación del suelo y el cuidado que se debe tener con el cultivo. Por otra parte, también se presenta la teoría relacionada con la implementación de tecnologías para la supervisión de estado del cultivo en estudio.

### 1.1 Generalidades del cultivo de papa

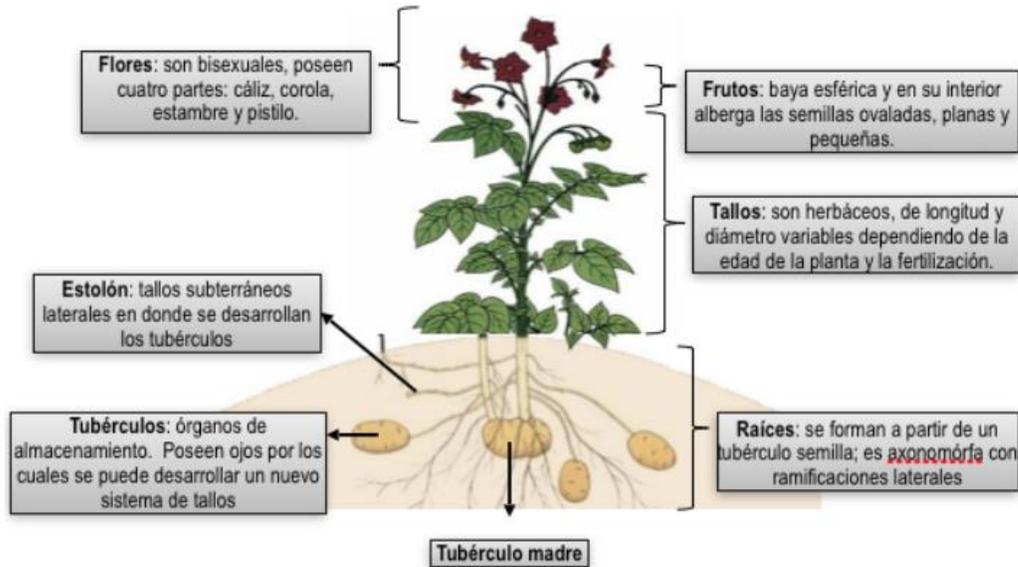
#### *1.1.1 Descripción botánica, morfológica y condiciones agroecológicas*

El ciclo total de la papa para llegar a su punto de madurez y poder cosecharla es de 120 días o 17 semanas aproximadamente. En Colombia la mayoría de los cultivos de este tubérculo son cosechados entre los 2.000 y 3.500 metros sobre el nivel del mar, ya que a esta altura se beneficia de la temperatura ambiente puesto que las temperaturas óptimas para el buen crecimiento del cultivo varían entre los 10 °C a 25 °C.

Estas plantas son de tipo herbáceo (tienen el aspecto o la característica de la hierba), esto se puede observar en la figura 1-1, donde la planta se conforma por dos partes (Camara de Comercio de Bogota, 2015):

- Parte subterránea: En esta sección se encuentra la raíz, los estolones o tallos internos, los tubérculos, y el tubérculo madre o semilla.
- Parte aérea: En esa sección se encuentran los tallos principales, las hojas y las flores de la planta, esta parte muere al terminar el ciclo de producción.

**Figura 1-1:** Descripción botánica de la papa. Fuente: (Camara de Comercio de Bogota, 2015)



### 1.1.2 Suelo y preparación de la tierra

Estos tubérculos pueden crecer en cualquier tipo de suelo ya sean alcalinos o salinos, aunque el mejor suelo para la papa son los que no ofrecen tanta resistencia al crecimiento de esta planta, es decir, suelos que sean arcillosos con una gran cantidad de materia orgánica y que tengan un buen drenaje.

Para este cultivo se requiere una gran preparación del suelo, se le da bote a la tierra, así como se presenta en la figura 1-2, esto con el fin de eliminar raíces de malezas que estén presentes o raíces de cultivos anteriores; en algunos casos es necesario arar la tierra dos o tres veces, rastrillar en varias ocasiones y aplicar rodillo, esto se hace con el fin de que el suelo quede suave, bien drenado y con buena ventilación (fao.org, 2008).

**Figura 1-2:** Arado de la tierra. Fuente: (John Deere, 2021)



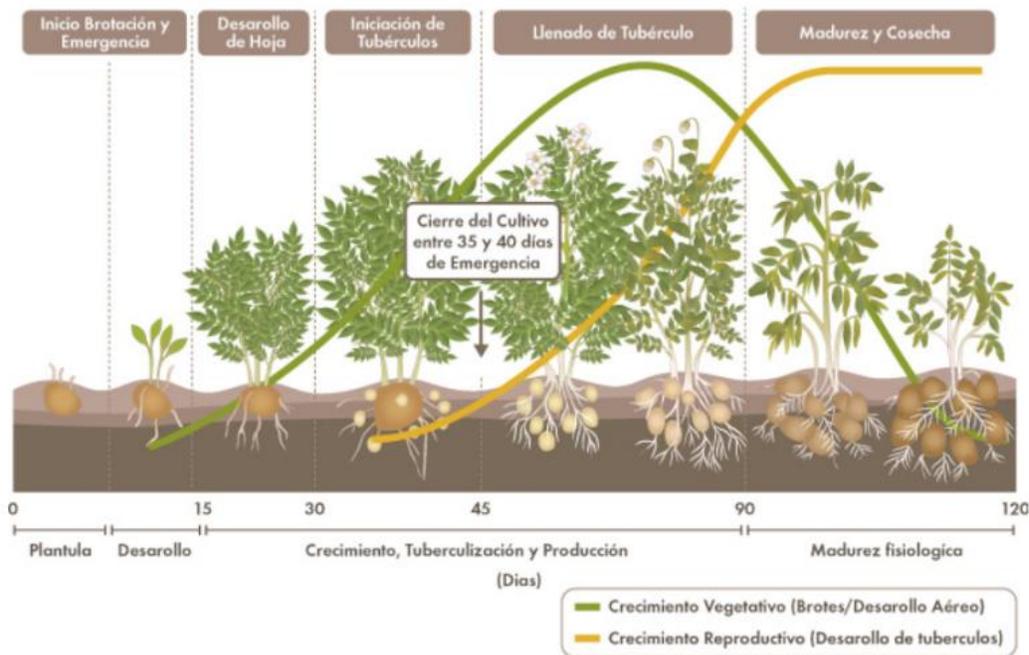
### *1.1.3 Siembra y Ciclo del cultivo*

Para la siembra del cultivo se hace con “papas semilla” los cuales son pequeños tubérculos que se introducen a una profundidad máxima de 10 cm en la tierra, estas semillas deben estar en un buen estado y no tener ninguna enfermedad ya que de ellas depende el buen desarrollo del cultivo.

La cantidad de los tubérculos depende de la manera en que se siembra y de la cantidad de espacio que se deje al momento de introducir la semilla, el espacio que debe haber entre las hileras debe permitir que haya un aporcado en el cultivo. En la figura 1-3 se observa el ciclo de un cultivo de papa, este cultivo en suelos planos sembrados en zonas áridas de secano, es decir, que solo proveen agua de la lluvia, pueden producir estos tubérculos en más cantidad gracias a que tienen una mejor retención de humedad, en los lugares en donde se siembra

por regadío para obtener una buena cantidad de estos tubérculos la papa se debe sembrar en camellones (fao.org, 2008).

**Figura 1-3:** Ciclo de un cultivo de papa. Fuente: (Camara de Comercio de Bogota, 2015)



## 1.2 Factores abióticos y afectaciones de un cultivo de papa

Como en todos los cultivos, la papa puede presentar anomalías y enfermedades que afectan el desarrollo de la planta durante su crecimiento, esto producido por causas tanto de factores abióticos como bióticos. La papa puede ser afectada por distintas plagas de insectos, además de llegar a desarrollar enfermedades en alguna de las etapas de crecimiento como lo pueden ser hongos, bacterias o algún tipo de virus. Estas enfermedades pueden causar daño al tubérculo y al follaje de la planta, como también, generar pérdidas económicas para el agricultor y en la calidad del cultivo.

También se puede agregar los cambios climáticos en donde influyen la temperatura, la Humedad del suelo y el pH que pueden causar desordenes fisiológicos, estos desordenes en algunas ocasiones son confundidos por enfermedades dadas por las bacterias o hongos.

*En este estudio nos vamos a enfocar solamente en los problemas que pueden producir el cambio de pH y Humedad que pueda tener el cultivo, esto con el fin de detectar un riesgo a temprana edad en el desarrollo del cultivo y advertir de las posibles afectaciones que estas pueden llegar a generar (Muñoz, Sandaña , & Orena , 2016).*

### *1.2.1 Humedad en el cultivo de papa*

La humedad se mide por la cantidad de agua que hay en el suelo, por lo tanto, es importante el manejo y seguimiento para las actividades agrícolas. Resaltando que los niveles de humedad del suelo determinan el momento de riego y estiman el aspecto que este debe tener; estos niveles se deben controlar debido a que una cantidad de agua apropiada es óptima para el buen rendimiento de los cultivos y el exceso de humedad puede reducir el crecimiento de este. tomando como ejemplo una lluvia abundante o si el agricultor se excede en la cantidad de agua durante el riego; el agua llega a ocupar todos los poros del suelo y ahí decimos que el suelo está saturado, a continuación, el agua tiende a moverse por gravedad hacia el subsuelo, hasta llegar a un punto en que el drenaje es tan pequeño que el contenido de agua del suelo se estabiliza.

Cuando se alcanza este punto se dice que el suelo está a la **Capacidad de Campo**; buena parte del agua retenida puede ser utilizada por las plantas, pero a medida que el agua disminuye se llega a un punto en que la planta no puede absorberla, en este estado se dice

que el suelo está en el **punto de marchitez**; la diferencia entre la capacidad del suelo y el punto de marchitez representa la fracción de agua útil disponible para el cultivo, cuanto más fina es la textura mayor son los porcentajes de agua en el suelo, tanto a la capacidad del campo como en el punto de marchitez. Una buena estructura del suelo también aumenta la fracción de agua útil. En la Figura 1-4 se puede observar que el agua disponible que tiene la planta depende del tipo de suelo, en donde se puede ver la relación entre la capacidad de campo al agua disponible de la planta y el punto de marchitamiento. (Tecniagricola, 2013)

**Figura 1-4:** Condiciones de humedad para suelos de diferentes texturas. Fuente: (Tecniagricola, 2013)



El exceso de humedad en el cultivo de papa puede ser crítico para el crecimiento de la planta ya que a causa de este exceso los tubérculos pueden verse afectados por varias enfermedades directas como la sarna común que se puede observar en la figura 1-5. (Yara, 2018)

**Figura 1-5:** Sarna común por exceso de agua. Fuente: (Yara, 2018)



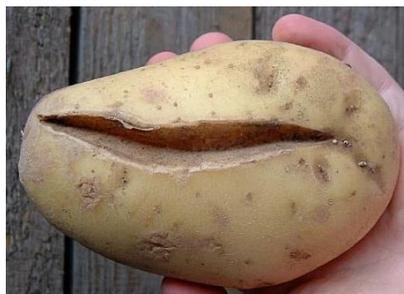
En la figura 1-6 se observa el desarrollo de lenticelas que se originan por el exceso de agua. (Yara, 2018)

**Figura 1-6:** Lenticelas formadas por exceso de agua. Fuente: (Yara, 2018)



También se presentan grietas en el tubérculo como lo muestra la figura 1-7, por esto se debe tener un buen manejo en la cantidad de agua que se aplica en el cultivo. (Yara, 2018)

**Figura 1-7:** Grietas en el tubérculo causadas por el exceso de agua. Fuente: (Yara, 2018)



Otras enfermedades en las que puede influir la humedad de la tierra son el corazón vacío que se presenta en el centro del tubérculo, primero como una mancha o parche; con el crecimiento del tamaño como se puede observar en la figura 1-8 toman una apariencia de rajadura en forma de estrella o de lente, el color de estas cavidades es de café claro o pajizo. (Muñoz, Sandaña , & Orena , 2016)

**Figura 1-8:** Síntoma del corazón vacío. Fuente: (Muñoz, Sandaña , & Orena , 2016)



Hay diferentes tipos de crecimiento secundario de los tubérculos como son los tubérculos nudosos que se deforman creciendo en las partes laterales de la papa, los tubérculos secundarios por gemación que crecen sobre una extensión del tubérculo original y los tubérculos formados que producen brotes antes de que la cosecha este lista, todo esto se da puesto que si la humedad no es constante y uniforme durante el desarrollo del tubérculo pueden presentar estos síntomas, como lo presentado en la figura 1-9. Cabe decir que para que se desarrollen estas enfermedades también debe influir el factor genético de la semilla. (Muñoz, Sandaña , & Orena , 2016)

**Figura 1-9:** Síntoma del tubérculo secundario. Fuente: (Muñoz, Sandaña , & Orena , 2016)



### *1.2.2 PH en el cultivo de papa*

Es importante tener en cuenta la acidez de la tierra ya que es una de las principales limitantes de la producción agrícola y este factor no es tomado en cuenta ni es manejado correctamente.

La acidez del suelo tiene varias fuentes en donde encuentra la materia orgánica, la remoción de nutrientes por la planta, los fertilizantes o a la presencia de aluminio en el suelo.

- **Materia Orgánica:** La materia orgánica en el suelo varía de sitio a sitio, por lo tanto, la acidez del suelo es variable, esta contiene grupos de carboxílicos y fenólicos activos que se disocian cuando hay liberación de iones  $H^+$  a la solución del suelo.
- **Remoción de Nutrientes por la Planta:** La acidez del suelo se puede incrementar como producto de la absorción de nutrientes (iones positivos llamados cationes), al absorber estos nutrientes la planta libera iones de  $H^+$  para mantener el equilibrio, ya estos contribuyen a la reducción del pH del suelo.
- **Fertilizantes:** Estos incrementan la acidez del suelo ya que contienen amonio ( $NH_4^+$ ), el fertilizante al hacer contacto con el suelo produce una reacción en donde incrementa el pH inmediatamente ya que estos procesos liberan iones de  $H^+$ .
- **Presencia de Aluminio:** Hay estudios que demuestran que la presencia de aluminio en el suelo es uno de los factores en el desarrollo de la acidez, estos iones de aluminio son desplazados de los minerales arcillosos, la reacción provoca la liberación de  $H^+$  y baja el pH; mientras haya más presencia de aluminio el suelo va a incrementar más la acidez, por lo tanto, se puede decir que este metal es muy tóxico para los cultivos.

En la tabla 1-1 se observa la escala del pH que cubre un rango de 0 a 14, donde el valor de 7.0 es neutro, es decir que el número de iones  $H^+$  y  $OH^-$  en la solución es igual, mientras que valores menores que 7.0 son ácidos y valores mayores que 7.0 son bases (Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, 2001).

**Tabla 1-1:** pH del suelo y grado de acidez. Fuente: (Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, 2001)

<b>pH del suelo</b>		<b>Acidez / Basicidad comparadas con pH de 7.0</b>
	<b>Basicidad</b>	
9,0		100
8,0		10
7,0	<b>Neutro</b>	
	<b>Acidez</b>	
6,0		10
5,0		100
4,0		1000

Las papas se cultivan en diferentes tipos de suelos, ya sean arenosos o arcillosos en donde su pH sea de entre 5.2 a 6.4 y de baja salinidad, ya en caso de que el terreno no tenga este suelo lo ideal será ajustar el nivel de pH como sea posible (Yara, 2018).

Los agricultores al momento de realizar la siembra de un cultivo no tienen en cuenta el pH del suelo en donde van a realizar el proceso; por lo general la mayoría de los suelos son ácidos y hay que ajustar la tierra para que el cultivo no tenga deficiencias ni haya problemas durante el desarrollo del tubérculo. En caso de que el pH este por debajo de 5.2 puede afectar y hacerle daño al cultivo ya que puede tener toxicidad en algunos de los micronutrientes que consumirá la planta. Para solucionar este problema del pH bajo y elevarlo al nivel que requiera el cultivo una de las opciones es mediante la adición de cal, esta es una de las técnicas más utilizadas por los agricultores, aunque no es muy eficiente ya que la cal solamente se aplica en la parte superior del suelo y solamente penetra algunos centímetros de este. Para realizar este proceso de la aplicación de la cal es importante resaltar que se debe hacer antes de plantar el cultivo ya que debe ser aplicada individualmente para cada planta.

A diferencia de la cal hay otro método más efectivo y simple de usar que puede ser aplicado por riego o por goteo, el carbonato de potasio eleva rápidamente el pH del suelo especialmente en la zona de las raíces, la ventaja de utilizar carbonato de potasio es que además de elevar el pH puede servir como fertilizante durante el desarrollo del cultivo (Smart fertilizer , 2020).

### **1.3 Herramientas para la supervisión de los factores pH y humedad en un cultivo de papa**

#### *1.3.1 Sistema de adquisición de las variables pH y humedad*

- **Sensor pH**

Un medidor de pH es un dispositivo eléctrico utilizado para medir la actividad de iones de hidrógeno (acidez o alcalinidad) en solución. Básicamente, un medidor de pH consiste en un voltímetro conectado a un electrodo sensible al pH y un electrodo de referencia “invariable”. El electrodo sensible al pH suele ser de vidrio y la referencia suele ser un electrodo de plata -cloruro de plata, aunque a veces se utiliza un electrodo de mercurio -cloruro mercurioso “calomelanos” (Britannica, 2021). En la figura 1-10 se puede observar el electrodo de plata -cloruro de plata protegido por una capsula en la punta del sensor.

**Figura 1-10:** Sensor de pH. Fuente: Autores



- Sensor humedad

El sensor de humedad del suelo es un tipo de sensor que se utiliza para medir el contenido volumétrico de agua dentro del suelo. Como la dimensión gravimétrica recta de la humedad del suelo necesita eliminarse, secarse y pesar la muestra. En la figura 1-11 muestra el sensor de humedad, estos sensores miden el contenido volumétrico de agua no directamente con la ayuda de algunas otras reglas del suelo como la constante dieléctrica, la resistencia eléctrica, la interacción con los neutrones y el reemplazo del contenido de humedad (Agarwal, 2019).

**Figura 1-11:** Sensor de Humedad. Fuente: Autores



- Microcontrolador PIC

Los microcontroladores PIC (controladores de interfaz programables), como lo presenta la figura 1-12, son circuitos electrónicos que pueden programarse para realizar una amplia gama de tareas. Se pueden programar para que sean temporizadores o para controlar una línea de producción y mucho más. Se encuentran en la mayoría de los dispositivos electrónicos, como los sistemas de alarma, los sistemas de control por computadora, los teléfonos, de hecho, en casi cualquier dispositivo electrónico. (Ryan, 2017)

**Figura 1-12:** Microcontrolador. Fuente: Autores



- XBee

Según Digi, “los módulos XBee son soluciones integradas que brindan conectividad inalámbrica de punto final a los dispositivos. Estos módulos utilizan el protocolo de red IEEE 802.15.4 para una red rápida punto a multipunto o de igual a igual. Están diseñados para aplicaciones de alto rendimiento que requieren baja latencia y tiempos de comunicación predecibles. “Básicamente, XBee es el protocolo basado en Zigbee de Digi. En términos sencillos, son módulos inalámbricos increíblemente geniales y bastante fáciles de usar (Sparkfun, 2015).

**Figura 1-13:** XBee. Fuente: Autores



### *1.3.2 Métodos de calibración para sensores*

Existen varios métodos para la calibración de un sensor, uno de ellos es el método clásico el cual es de forma rápida y efectiva que consiste en utilizar dos puntos para ajustar una recta que describe una relación entre el valor físico y el valor eléctrico, otra forma de calibrarlo es realizando una tabla de valores que define la correlación entre los valores eléctricos y físicos mediante una colección de puntos. Otros protocolos de calibración utilizan ecuaciones lineales sencillas o ecuaciones polinómicas o de interpolación aparte de realizar la tabla de valores (HBM, 2018).

La regresión lineal es una técnica que se utiliza para el modelado estadístico para describir una variable de respuesta continua como función de una o varias variables, esta puede ayudar a comprender el comportamiento de algunos sistemas o analizar datos experimentales. Lo que hace la regresión lineal es minimizar el cuadrado del error, ya que hace que todos los errores sean positivos elevándolos al cuadrado y así obtener los mínimos errores al calibrar el sensor (The MathWorks, Regresión lineal , 2021).

### *1.3.3 Herramientas para el análisis e interpretación de datos*

- Visualización espacial de los datos – mapa de calor

Los mapas de calor son una forma de presentar la información de manera gráfica y útil. Es una herramienta que permite visualizar la información basándose en una matriz de datos y una selección de colores, relacionando la concentración de datos con la intensidad de color (Ramirez, 2019).

Los mapas de calor han sido utilizados para realizar una representación termografía, estableciendo una jerarquía de dos polos; es decir, por una parte, se hace a través del empleo de colores cálidos (generalmente rojo, naranja y amarillo) para mostrar las zonas de acción de interés o de foco, frente a una gama de colores fríos (azul, verde) que dan un significado a las zonas que no reciben atención por parte del usuario. En este proyecto la distribución de colores se presenta en la sección 3.3.3.

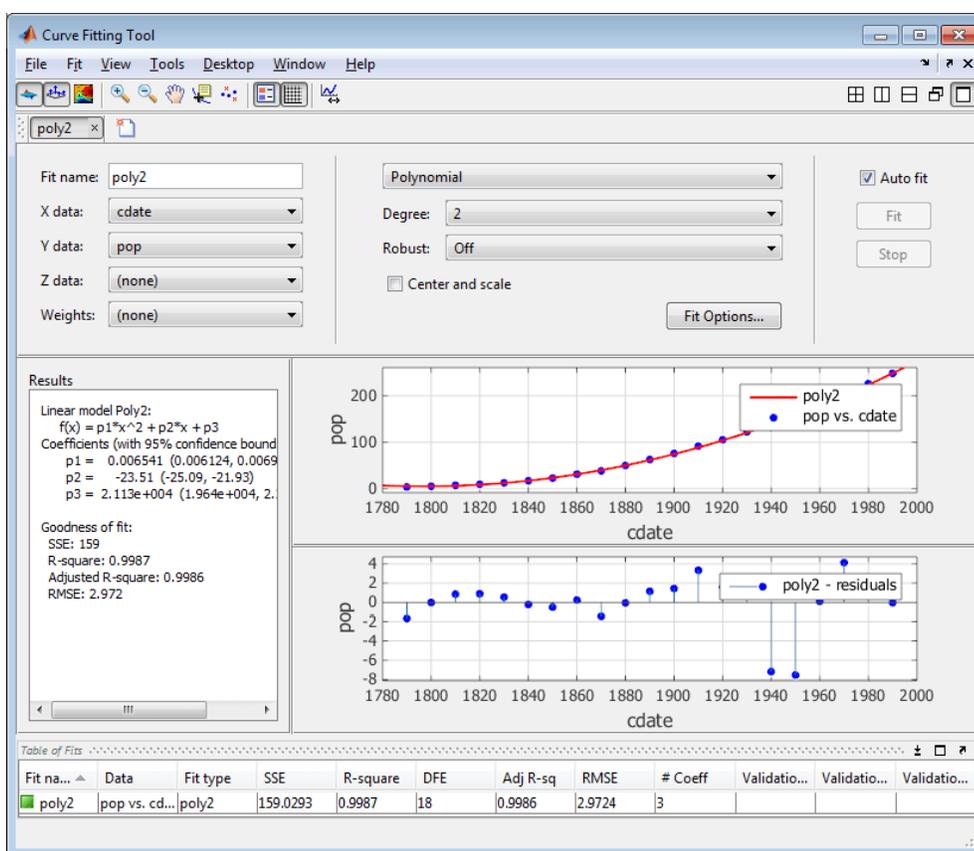
Este tipo de técnicas se basa en el concepto de eye-tracking, tecnología que refiere a un conjunto de procedimientos técnicos que permiten monitorizar el modo en que una persona mira una imagen o registro visual. Si bien en algunos casos, estas técnicas no tienen una fiabilidad del 100%, sí debería integrarse en cualquier plan analítico integral para la toma de decisiones (Mena, 2015). En este caso los mapas se realizaron mediante la técnica de la interpolación, ya que se utiliza para agregar nuevos puntos de datos dentro del rango de un conjunto de datos ya conocidos.

- Herramienta para la visualización de los mapas de calor

MATLAB es una plataforma que proporciona un potente lenguaje de programación y cálculo numérico, así como un entorno informático interactivo. Se pueden ingresar comandos de idioma uno por uno en la línea de comandos o alternativamente, escribir una serie de comandos en un archivo y luego ejecutarlos como cualquier función de Matlab. Este lenguaje es utilizado por muchas personas a nivel mundial, más que todo ingenieros, científicos y matemáticos creando algoritmos y modelos en el estudio de datos (Mathworks, 2021).

Curve fitting es una aplicación de MATLAB la cual tiene una interfaz flexible en donde se pueden ajustar curvas, superficies de datos y ver gráficas, en la figura 1-14 se puede observar la interfaz de la aplicación. En esta aplicación se puede crear, representar, comparar varios ajustes, además de utilizar regresiones lineales y no lineales, realizar interpolaciones, suavizados y ecuaciones personalizadas (The MathWorks, Curve Fitting, 2021).

**Figura 1-14:** Curve fitting App. Fuente: (The MathWorks, Curve Fitting, 2021)



En el uso programático la función `cftool(X, Y, Z)` crea un ajuste de superficie para entradas X e Y y salida Z. X, Y y Z han de ser numéricas, tener dos elementos o más y ser de tamaños compatibles. Los tamaños son compatibles si X, Y y Z tienen el mismo número de elementos

o si  $X$  e  $Y$  son vectores,  $Z$  es una matriz 2D,  $\text{length}(X) = n$  y  $\text{length}(Y) = m$  donde  $[m, n] = \text{size}(Z)$  (The MathWorks, Curve Fitting, 2021).

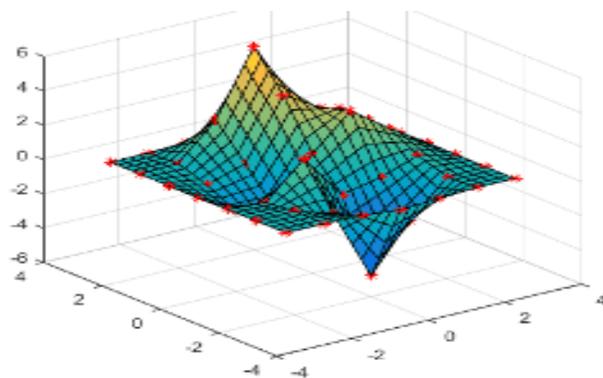
Para este proyecto se selecciona el método de interpolación, que permite evaluar valores entre puntos de datos conocidos, este se utiliza para suavizar datos observados completar y hacer predicciones. La interpolación implica construir una función  $f$  cuyo valor sea el de unos valores de datos proporcionados  $y_i$ , en unos sitios de datos proporcionados  $x_i$ , de forma que  $f(x_i) = y_i$ , para todo  $i$ . La interpolación  $f$  se construye normalmente como una función única de la forma  $f(x) = \sum_j f_j(x)a_j$  cuyos valores coinciden con los datos proporcionados, eligiendo las funciones  $f_j$  de la manera más adecuada. En la tabla 1-2 se puede observar los diferentes métodos de interpolación y la descripción de cada uno. (The MathWorks, Interpolacion , 2021)

**Tabla 1-2:** Métodos de interpolación. Fuente: (The MathWorks, Interpolacion , 2021)

Método	Descripción
Lineal	Este método ajusta un polinomio lineal distinto entre cada par de puntos de datos (en el caso de una curva) o entre conjuntos de tres puntos (en el caso de una superficie).
Vecino más cercano	Este método establece el valor de un punto interpolado como el valor del punto de datos más cercano. Por lo tanto, este método no genera ningún punto de datos nuevo.
Splines cúbicos	Este método ajusta un polinomio cúbico distinto entre cada par de puntos de datos (en el caso de una curva) o entre conjuntos de tres puntos (en el caso de una superficie).
Que conserva la forma	Este método conserva la mono tonicidad y la forma de los datos. (Solo para curvas).
Biarmónica (v. 4)	(Solo para superficies.)
Splines de thin-plate	Este método ajusta superficies suaves que también dan buen resultado para extrapolar. (Solo para superficies).

Al utilizar *Curve fitting tool* (cftool) se pueden generar mapas de calor como el que se muestra en la figura 1-15

**Figura 1-15:** Mapa de calor. Fuente: (The MathWorks, Interpolacion, 2021)



## 2. Diseño metodológico

La investigación que se realizará tendrá un enfoque de tipo descriptivo ya que se tomarán las mediciones de dos variables diferentes en el cultivo de papa. Para la realización de esta investigación se va a utilizar la metodología de investigación de (Fernandez Collado & Baptista Lucio, 2014)

**Figura 2-1:** Metodología de la investigación. Fuente: Autores



### 2.1 Selección de instrumentos

La selección de instrumentos se llevó a cabo teniendo en cuenta un amplio rango de instrumentos y/o materiales que requiere cada segmento para la construcción del prototipo, estos segmentos están divididos en: sensores, alimentación, procesamiento de la

información, sistema de comunicación y visualización; se plantea una serie de requerimientos y posteriormente los instrumentos que cumplen con ellos; una vez definidos se diseña una matriz de decisión siendo de gran ayuda para seleccionar de una forma racional ante las distintas alternativas de instrumentos que se presentan determinando las mejores opciones.

### 2.1.1 *Requerimientos de los instrumentos*

Como punto de partida se realizaron las siguientes tablas en la cuales se tienen los segmentos en los que está dividido el prototipo partiendo desde los sensores hasta la visualización; consiste en una descripción general de las opciones que se tienen para el desarrollo del prototipo.

En la tabla 2-1 se encuentran las características necesarias a tener en cuenta para la selección del sensor de pH y Humedad.

**Tabla 2-1:** Requerimiento sensores. Fuente: Autores

SENSORES			
DISPOSITIVO	INSTRUMENTOS	REQUERIMIENTOS	ARGUMENTO
Debe sensar pH y Humedad en el terreno elegido.	Sensor de pH	El sensor de pH debe medir la acidez del suelo en un rango de 0 pH a 7 pH. Debe tener un voltaje de funcionamiento de 3.3 V y 5.0 V. El sensor debe estar hecho en un material resistente. Debe tener un rango de exactitud de más o menos de 0.1.	Entre más amplio el rango de medición de pH en el sensor, mejor; ya que el rango de pH adecuado para el cultivo debe estar entre 5.2 a 6.4; y debe estar enterrado a una profundidad de 10 a 15 centímetros. La exactitud y resistencia son factores que se aprecian del sensor de acuerdo al ambiente. al sensor se le hará un sistema de acondicionamiento de señal ya que deben ser análogos para poder calibrarlos.

	Sensor de Humedad	El sensor de Humedad debe tener un rango de 0 a 100%, con una respuesta de menos de 1 minuto. Debe tener un rango de exactitud de menos del 5.0 % y trabajar a una temperatura de entre -10 °C y 50 °C. Debe tener un voltaje de funcionamiento de entre 3.3 V y 5.0 V	Al tener un sensor con un rango tan amplio como lo es de 0 a 100, es ideal para el cultivo además de que la humedad optima es del 70% al tener un rango amplio se podrán considerar que tipo de problemas pueden surgir en el cultivo si la humedad es muy alta o muy baja. al sensor se le hará un sistema de acondicionamiento de señal ya que deben ser análogos para poder calibrarlos.
--	-------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

En la tabla 2-2 se encuentran las características necesarias a tener en cuenta para la selección de la batería que alimentara el circuito.

**Tabla 2-2:** Requerimiento fuente de alimentación. Fuente: Autores

FUENTE DE ALIMENTACIÓN			
DISPOSITIVO	INSTRUMENTOS	REQUERIMIENTOS	ARGUMENTO
Debe tener la carga suficiente para la toma de datos.	Batería	Si es una Batería Interna esta debe ser recargable que pueda alimentar al dispositivo un par de horas. Esta batería debe ser pequeña ya que estará incorporada junto a la tarjeta.	Una batería que cumpla con el consumo de corriente adecuado que requiera el circuito del prototipo, que le brinde la energía necesaria durante al menos 2 horas, que sea liviana, principalmente que sea una batería recargable.
		sí es una Batería externa esta debe ser pequeña, no debe pesar más de 10 kilos puesto que se debe trasladar a varios lugares del cultivo, debe alimentar el dispositivo por varias horas sin interrupción de energía.	

En la tabla 2-3 se presentan las dos opciones de procesamiento de la información con sus respectivas características.

**Tabla 2-3:** Requerimiento procesamiento de la información. Fuente: Autores

PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN			
DISPOSITIVO	INSTRUMENTOS	REQUERIMIENTOS	ARGUMENTO

El dispositivo debe procesar la información que envían los sensores.	Microcontrolador	Debe tener varios pines de salida/entradas programables, una alimentación no mayor de 5 V, con temperaturas de trabajo de entre -10°C y 50°C. debe ser rápido al momento de procesar información y ser compatible con los sensores que se utilizaran.	Debe ser compatible con los sensores de pH y Humedad, ya que requieren del mismo voltaje, deben contar con una buena velocidad de respuesta y tener más de dos pines ADC.
	Arduino	Debe tener varios pines de salida/entradas programables, una alimentación no mayor de 5 V, con temperaturas de trabajo de entre -10°C y 50°C. debe ser rápido al momento de procesar información y ser compatible con los sensores que se utilizaran.	

En la tabla 2-4 se encuentran las 3 posibles opciones del envío de los datos del prototipo al computador, con el propósito de seleccionar el sistema de comunicación más versátil y efectivo.

**Tabla 2-4:** Requerimiento sistema de comunicación. Fuente Autores

SISTEMA DE COMUNICACIÓN			
DISPOSITIVO	INSTRUMENTOS	REQUERIMIENTOS	ARGUMENTO
El dispositivo debe comunicar los sensores con un equipo ya sea un computador o celular en donde se visualizarán los datos.	Cable serial	Debe ser de fácil conexión con buena velocidad de transmisión y el cable debe ser largo para su manipulación	El sistema de comunicación debe ser de fácil conexión, tener un alcance mínimo de 20 metros con una transferencia de datos rápida, resistente al ruido y preferiblemente con bajo consumo de corriente.
	Modulo XBee	Debe tener un alcance mínimo de 50 metros con una frecuencia no menor a 2,4 GHz y tener un voltaje de operación de entre 3,3 V y 5 V. Debe tener temperaturas de operación de entre -10°C y 50°C.	

	Modulo bluetooth	Debe tener un alcance mínimo de 10 metros con una velocidad de transmisión de menos de 1Mbps y tener un voltaje de operación de entre 3,3 V y 5 V. Debe tener temperaturas de operación de entre -10°C y 50°C.	
--	------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

En la tabla 2-5 se encuentran las características que debe tener el computador en donde visualizara la información y el procesamiento de esta y en Matlab.

**Tabla 2-5:** Requerimiento visualización. Fuente Autores

VISUALIZACIÓN			
DISPOSITIVO	INSTRUMENTOS	REQUERIMIENTOS	ARGUMENTO
El dispositivo debe mostrar los datos obtenidos para luego ingresarlos a Matlab.	Computador	Debe tener un sistema operativo de 64 bits, con un buen procesador, tener conectividad Bluetooth y debe tener instalado el software de MATLAB.	Se requiere de un buen procesador, con una memoria RAM superior a 4GB para evitar complicaciones al momento de correr el software de Matlab, el equipo ya debe contar con los programas requeridos para realizar el proyecto.

### 2.1.2 Selección de la instrumentación electrónica

En esta fase del proyecto se seleccionaron hasta cuatro referencias de los instrumentos que podrían servir para la elaboración del prototipo, para cada uno de ellos, sensores y demás instrumentos, se detallan las características del fabricante, costos, proveedores en línea, de manera que se pueda realizar una selección más acertada de acuerdo con las opciones disponibles para sensores de Humedad, pH, microcontroladores, módulos de comunicación, baterías, entre otros. Esta información se encuentra recopilada en el Anexo II: Tabla de instrumentos aptos para el prototipo.

### 2.1.3 Selección final mediante matrices de decisión

De lo presentado anteriormente se puede seleccionar cualquier alternativa, pero como se presenta un escenario específico y con ciertos requerimientos, se realizan las siguientes matrices de decisión en la que se pondera cada alternativa dependiendo del factor y su relevancia, todo con el fin de tomar una decisión más acertada, considerando que la calificación más alta es 10 y la más baja es 0.

En la tabla 2-6 se califica el sensor de pH de acuerdo con su rango, precisión, costo, entre otros.

**Tabla 2-6:** Puntuación sensor pH. Fuente: Autores

Sensor pH	Características	Rango	Precisión	T. respuesta	Voltaje	Costo	Puntaje
Sensor de pH RK500-02	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rango de medición: 0-14 pH</li> <li>• Precisión: <math>\pm 0.1</math> pH</li> <li>• Resolución: 0.01 pH</li> <li>• Tiempo de respuesta: &lt;10s (en agua)</li> <li>• Voltaje de alimentación: 12-24V</li> </ul>	10	9	8	7	5	<b>7.8</b>
Sensor de pH del suelo RK500-22	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rango de medición: 0-14 pH</li> <li>• Precisión: <math>\pm 0.05</math>pH</li> <li>• Resolución: 0.01 pH</li> <li>• Tiempo de respuesta: 30</li> <li>• Voltaje de alimentación: 7-30VDC</li> </ul>	10	10	9	8	2	<b>7.8</b>

Kit medición de PH - Análogo Versión PRO	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rango de medición: 0PH ~ 10PH</li> <li>• Exactitud: <math>\pm 0.1</math>PH</li> <li>• Temperatura de operación: 5°C ~ 60°C</li> <li>• Tiempo de respuesta: <math>\leq 2</math>min (En buffer de solución estándar)</li> <li>• Voltaje de entrada: 5V</li> <li>• Exactitud: <math>&lt; \pm 0.2</math>PH (25°C)</li> </ul>	8	9	9	10	7	<b>8.6</b>
Kit medición de PH - Análogo V2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Voltaje de alimentación: 3.3~5.5V</li> <li>• Voltaje de salida: 0~3.0V</li> <li>• Exactitud de la medición: <math>\pm 0.1 @ 25</math></li> <li>• Tiempo de respuesta: <math>&lt; 2</math>min</li> <li>• Tiempo de vida: <math>&gt; 0.5</math> años</li> </ul>	9	8	7	8	7	<b>7.8</b>

En la tabla 2-7 se evalúa el sensor de humedad según su costo, voltaje de operación y material.

**Tabla 2-7:** Puntuación sensor humedad. Fuente: Autores

Sensor humedad	Características	Interfaz	Material	Voltaje operación	Costo	Puntaje
Sensor de Humedad de Suelo–Capacitivo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Voltaje de operación: 3.3 a 5.5V</li> <li>• Voltaje de salida: 0 a 3 VDC</li> <li>• Interfaz: PH2.0-3P</li> <li>• Dimensión 98x23mm</li> </ul>	9	8	10	9	<b>9</b>
Sensor de humedad de suelo con sonda	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Voltaje de funcionamiento: 3.3-12V</li> <li>• Corriente de funcionamiento: <math>&lt; 20</math>mA</li> <li>• Corriente de salida: <math>&lt; 30</math>mA</li> </ul>	5	8	10	10	<b>8.25</b>

Sensor de humedad de suelo con ESP32	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Voltaje de funcionamiento: 5V/1A</li> <li>• Con chip ESPRESSIF-ESP32 (WiFi y Bluetooth)</li> <li>• Sensor de humedad DHT12</li> <li>• Puede funcionar con batería de litio de 3.7V</li> </ul>	5	7	10	8	<b>7.5</b>
Sensor análogo de humedad del suelo a prueba de agua-Gravity	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Voltaje de funcionamiento: 3.3 a 5.5VDC</li> <li>• Voltaje de salida: 0-3VDC</li> <li>• Interfaz: 2.54 de 3 pines</li> <li>• Con cable de 1.5m</li> </ul>	10	10	10	8	<b>9.5</b>

En la tabla 2-8 se selecciona el microcontrolador conforme a su costo, memoria RAM, velocidad y canales ADC.

**Tabla 2-8:** Puntuación microcontrolador. Fuente: Autores

Microcontrolador (PIC)	Características	Memoria RAM	Velocidad	Costo	Canales ADC	Puntaje
Microcontrolador Microchip PIC18F4550-I/P	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 24KB de memoria flash para programación,</li> <li>• RAM de 2KB</li> <li>• EEPROM de 256KB</li> <li>• Velocidad: 48MHz</li> <li>• 35 puertos de entrada/salida,</li> <li>• 13 canales de ADC de 10 bits,</li> <li>• Voltaje de alimentación: 5V</li> </ul>	10	9	10	10	<b>9.75</b>
Microcontrolador Microchip PIC18F4523-I/P	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 32KB de memoria flash para programación</li> <li>• RAM de 1536 B</li> <li>• EEPROM: 256 B</li> <li>• Velocidad: 40 MHz</li> <li>• 13 canales de ADC de 12 bits</li> <li>• 4 Timers</li> <li>• Voltaje de alimentación: 4.2V ~ 5.5V</li> </ul>	7	8	8	10	<b>8.25</b>

Microcontrolador Microchip DS PIC30F4011- 30I/P	<ul style="list-style-type: none"> <li>•48KB de memoria flash para programación,</li> <li>•RAM de 2KB</li> <li>•EEPROM de 1KB</li> <li>•Velocidad: 30MIPs</li> <li>•9 canales de ADC de 10 bits,</li> <li>•Voltaje de alimentación: 2.5 ~ 5.5V</li> </ul>	10	10	10	6	<b>9</b>
----------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----	----	----	---	----------

En la tabla 2-9 se califica al módulo de comunicación XBee en proporción a su costo, sensibilidad, frecuencia y potencia de transmisión.

**Tabla 2-9:** Puntuación XBee. Fuente: Autores

XBee	Características	Frecuencia	Costo	Potencia transmisión	Sensibilidad	Puntaje
Módulo XBee ZB S2C	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Frecuencia: 2.4GHz</li> <li>•Rango Indoor/Urbana: hasta 200ft (60m)</li> <li>•Rango Outdoor-línea de vista: hasta 4000ft (1200m)</li> <li>•Sensibilidad: -102dBm</li> <li>•Power-output: 8dBm</li> <li>•Voltaje de alimentación: 2.1V ~ 3.6V</li> </ul>	10	8	10	10	<b>9.5</b>
XBee Pro Serie2B programable	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Frecuencia: 2.4Ghz</li> <li>• Antena: tipo cable</li> <li>• Sensibilidad: -102dBm</li> <li>• Potencia de transmisión: 63mW (+18 dBm)</li> <li>• Voltaje de operación: 2.7V - 3,6V</li> </ul>	10	7	10	10	<b>9.25</b>
Módulo XBee 2.4Ghz Serie1	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Antena: cable</li> <li>•Sensibilidad: -92dBm</li> <li>•Potencia de transmisión: 1mW (+0 dBm)</li> <li>•Voltaje de operación: 2,8V - 3,4V</li> </ul>	10	10	8	8	<b>9</b>

En la tabla 2-10 se selecciona la batería con respecto al voltaje y la corriente que ofrece, horas de uso y su costo.

**Tabla 2-10:** Puntuación batería. Fuente: Autores

Batería	Características	Voltaje / Corriente	Hora uso	Costo	Puntaje
Batería sellada 6V 1.2A	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Voltaje nominal: 6V</li> <li>• Capacidad nominal: 1.2Ah</li> </ul>	6	7	10	<b>7.6</b>
Batería sellada 4V 4.5A	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Voltaje nominal: 4V</li> <li>• Corriente máxima de carga: 1.35A</li> <li>• Tipo VRLA (ácido-plomo)</li> </ul>	9	7	10	<b>8.6</b>
Batería Seca 6V - 4A Sellada Recargable	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Marca: Fuli Battery</li> <li>• Modelo: FL640</li> <li>• Capacidad: 6V - 4AH / 20HR</li> <li>• Batería Sellada de Plomo - Acido</li> <li>• Recargable</li> <li>• Libre de Mantenimiento</li> </ul>	10	10	9	<b>9.6</b>

## 2.2 Construcción del prototipo

Con respecto a la selección de los dispositivos electrónicos se procede al diseño y construcción del prototipo, se describe una idea de cómo debe quedar y que funciones cumplirá. Partiendo de la descripción, se realiza un diagrama de conexiones siendo referencia para la realización del circuito esquemático en Proteus y pasarlo a físico para así realizar el montaje de los instrumentos que fueron elegidos; se implementan una parte con condensadores de acople, incluyendo las respectivas tierras digital y analógica separadas para que no haya interferencia en las señales enviadas por los sensores, se realiza la programación en el microcontrolador PIC mediante el software C Compiler el cual está programado mediante máquinas de estados.

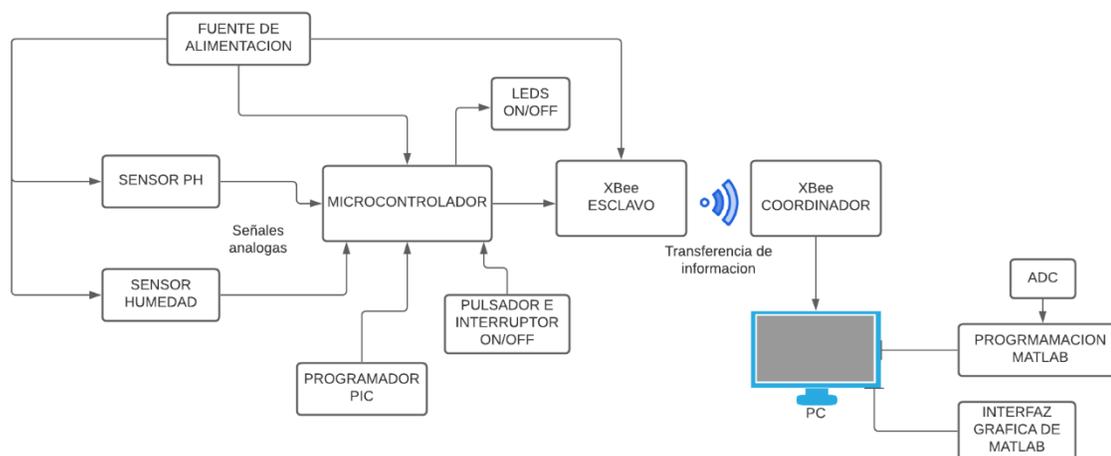
### *2.2.1 Descripción prototipo*

El circuito y la batería que lo alimenta estarán dentro de una caja hecha en acrílico de un color claro, esta caja tendrá a los lados ranuras de ventilación y en la parte superior incluirá un pulsador y un interruptor ON/OFF, los cuales servirán para activar el prototipo al momento en que se necesiten tomar las muestras. Esta caja tendrá un soporte para no estar en contacto con el suelo, este soporte será en forma de trípode el cual se enterrará en el lugar de la toma de los datos. Este prototipo también contará con una salida que permitirá reprogramar todo el circuito en caso de alguna corrección o mejora, además de las respectivas salidas de los sensores.

Al momento en que se va a disponer a realizar la toma de los datos en el cultivo primeramente se debe enterrar el trípode en el suelo y enseguida se deben introducir los sensores en la tierra, para el sensor de pH primeramente se debe observar si la tierra esta húmeda y en caso de que no lo este se procede a humedecerla con agua destilada, eso para no dañar la punta del sensor que es de vidrio, el sensor de humedad no tiene problema alguno al momento de enterrarlo.

Cuando los sensores ya estén enterrados se pulsará el botón para realizar la toma de las variables, desde este momento los sensores esperaran un minuto para que tengan una mejor lectura. Pasado el minuto los sensores enviaran los valores tomados al microcontrolador y este los enviara a través de los módulos XBee a un software instalado en la laptop. En la figura 2-2 expone el diagrama de conexiones, describiendo el funcionamiento del prototipo y se incluye en el Anexo III: manual de usuario.

**Figura 2-2:** Diagrama de conexiones. Fuente: Autores



A través de la caracterización se cumplirán los requisitos básicos para el aseguramiento de la calidad en un instrumento verificando la precisión y repetibilidad de los instrumentos y sistemas de medición. Un sensor calibrado es un requisito previo para obtener resultados de medición precisos y fiables. Este apartado es uno de los requisitos básicos para el aseguramiento de la calidad en un instrumento, una forma rápida y efectiva consiste en utilizar dos puntos para ajustar una recta que describe la relación entre los valores eléctrico y físico.

### 2.2.2 Caracterización sensor Humedad

En este sensor la calibración consistió en tomar dos valores '1' cuando está en el aire y '0' cuando se sumerge en agua, la humedad es inversamente proporcional al valor de la lectura, es decir cuando la humedad es alta la lectura del sensor es baja, en ese orden de ideas, se registra el valor del sensor cuando se expone al aire; como límite del suelo seco "Humedad: 0% RH". Debido a que la humedad del aire varía, este rango de valores está generalmente

entre 520-640, ahora se toma una taza de agua y se inserta la sonda hasta la segunda línea del nivel recomendado; siendo el límite del suelo húmedo "Humedad: 100% RH". En ese momento, de acuerdo con la escala de la pizarra, se registra la profundidad de la inserción del sensor en el agua y cuando se use en el suelo se debe insertar a esa profundidad. Debido a que el valor del sensor se verá afectado por la profundidad del suelo y la rigidez del suelo, solo se puede detectar la humedad relativa del suelo.

Dado que este sensor detectará la humedad del suelo según el principio de detección capacitiva, mostrará una humedad diferente cuando se coloque en una humedad del suelo diferente, una estanqueidad diferente y una profundidad de inserción diferente. Incluso en el mismo lugar y a la misma profundidad, cuando se realiza la segunda inserción, dado que la primera extracción ha provocado el desprendimiento del suelo, la humedad puede ser menor que la primera lectura.

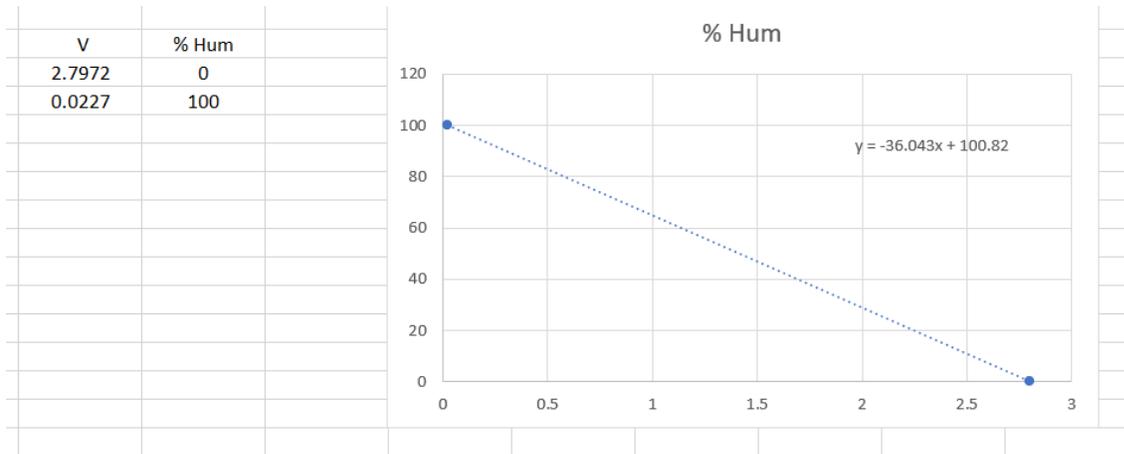
En la Tabla 2-11, se puede observar que los datos del sensor tienen una variación constante siendo la temperatura un valor influyente en la calibración, para ello se realizó un promedio a todos los datos contenidos en cada muestra con el fin de identificar un valor aproximado en cada medio.

**Tabla 2-11:** Datos del sensor de humedad. Fuente: Autores.

Datos del sensor de humedad						
temperatura	Dato hum	aire		temperatura	Dato_ hum	agua
15 -17°	566.6	aire		15 -17°	0.1	agua
15 -17°	566.3	aire		15 -17°	39	agua
15 -17°	567	aire		15 -17°	19.1	agua
15 -17°	567	aire		15 -17°	33.3	agua
15 -17°	567.1	aire		15 -17°	0.1	agua
15 -17°	571.4	aire		15 -17°	1	agua

15 -17°	571.9	aire		15 -17°	0.3	agua
15 -17°	571.5	aire		15 -17°	0.9	agua
15 -17°	571.6	aire		15 -17°	0.6	agua
15 -17°	571.3	aire		15 -17°	0.4	agua
15 -17°	571.6	aire		15 -17°	0.5	agua
15 -17°	571.5	aire		15 -17°	0.5	agua
17 -18°	567.9	aire		17 -18°	0.4	agua
17 -18°	568.7	aire		17 -18°	0.2	agua
17-18°	571.2	aire		17-18°	0.4	agua
17-18°	571.2	aire		17-18°	0	agua
18-19°	571.9	aire		18-19°	0.4	agua
18-19°	571.6	aire		18-19°	0.3	agua
18-19°	573	aire		18-19°	0.3	agua
18-19°	573	aire		18-19°	1.1	agua
18-19°	574.4	aire		18-19°	2.1	agua
18-19°	568.3	aire		18-19°	2.4	agua
18-19°	575.5	aire		18-19°	2.8	agua
18-19°	576	aire		18-19°	3	agua
18-19°	576.3	aire		18-19°	2.9	agua
18-19°	577	aire		18-19°	3	agua
18-19°	577.2	aire		18-19°	3	agua
18-19°	577.4	aire		18-19°	3.3	agua
17-18°	576.7	aire		17-18°	2.8	agua
17-18°	576.2	aire		17-18°	9	agua
17-18°	575.8	aire		17-18°	8.2	agua
17-18°	574.8	aire		17-18°	7.1	agua
572.306875				4.640625		

Teniendo el promedio del valor enviado por el sensor cuando este estaba en el aire y en el agua se realiza la respectiva conversión análoga-digital, posteriormente se realiza una regresión lineal con los dos puntos obtenidos resultando la ecuación del comportamiento del sensor tal y como expone la figura 2-3.

**Figura 2-3:** Calibración sensor humedad. Fuente: Autores

### 2.2.3 Caracterización sensor pH

En este sensor lo ideal es tener una alimentación constante de 5V, mientras esto ocurra mayor será la precisión de lectura de pH, la calibración de este sensor requiere un buffer de solución estándar de pH 4,0 y pH 7,0 como se muestra en la figura 2-5; para la realización de este proceso se tomó como guía el datasheet del sensor el cual brindaba la información adecuada para este procedimiento. Para iniciar se programó el PIC con la finalidad de realizar las lecturas de pH, se tomaron los datos cuando la sonda estaba con la solución estándar de pH 7,0; si el valor final era inferior a 7,0 este se restaba y la diferencia y/o error era tomada como OFFSET que inicialmente tenía un valor de cero, a modo de ejemplo, si el sensor está inmerso en la solución neutra y envía un valor de pH= 6,5 este se comparaba con 7,0 y la diferencia se ingresaba en la variable OFFSET. La ecuación que describe el valor de pH es “ $\text{pHValue} = 3.5 * \text{averageVoltage} + \text{OFFSET}$ ” siendo el OFFSET inicializado en 0 y después modificado por la diferencia dada; se vuelve a tomar el dato hasta que el valor impreso sea de 7,0 o aproximado. Una vez obtenido el valor de pH 7,0, se limpia la sonda

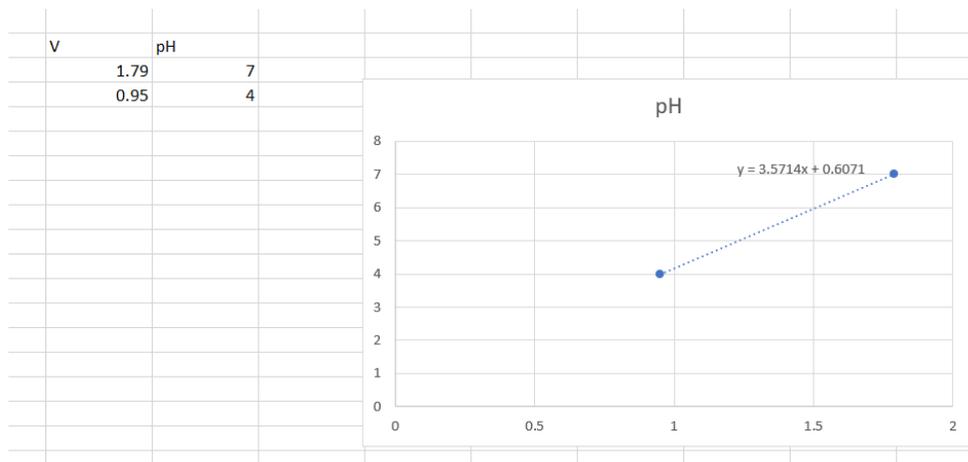
con agua destilada y el papel filtro quedando sin ningún tipo de residuo para introducirla en la solución estándar de pH 4.0, y se ajusta el potenciómetro en la placa del transmisor para ajustar la ganancia hasta que el valor impreso sea alrededor de 4,0. Este proceso se muestra en la Tabla 2-12, donde se registra la temperatura promedio, el voltaje y el valor de pH impreso, de allí salen los dos valores más estables de acuerdo a la solución estándar de pH.

**Tabla 2-12:** Datos del sensor de pH. Fuente: Autores

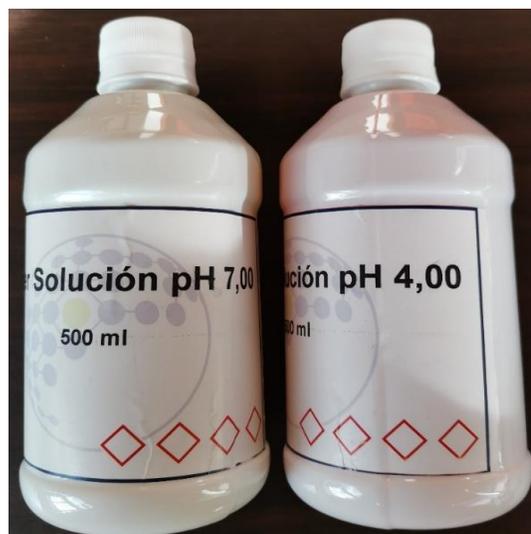
Temp_prom	voltaje	pH
15-17°	1.83v	6.41
15-17°	1.77v	6.19
15-17°	1.80v	7.10 -7.12
15-17°	1.79v	6.88
15-17°	1.77v	6.91
15-17°	1.78v	6.95
15-17°	1.79v	7.03
15-17°	1.79v	7
15-17°	0.97v	4.11
15-17°	1.02v	4.11
15-17°	0.95v	4.05 - 4.06
15-17°	0.93v	3.99
15-17°	1.01v	4.27
15-17°	1.79v	7
15-17°	0.79v	3.44
15-17°	0.80v	3.48
15-17°	0.89v	3.8
15-17°	0.92v	3.9
15-17°	0.93v	3.94
15-17°	0.94v	3.99
17-18°	1v	4.18
17-18°	0.94v	3.99
17-18°	0.96v	4.04
17-18°	0.95v	4.02

Teniendo los datos obtenidos e identificando el voltaje en cada valor de pH se realiza la respectiva regresión lineal, plasmada en la figura 2-4, dando como resultado la ecuación que describe el comportamiento del sensor; siendo esta similar a la que ofrece el datasheet, la diferencia es que en la ecuación dada por el fabricante no dejan un valor estable, si no que este se modifica y se llama como OFFSET siendo un valor a compensar.

**Figura 2-4:** Calibración sensor pH. Fuente: Autores



**Figura 2-5:** Buffers de solución estándar pH. Fuente: Autores

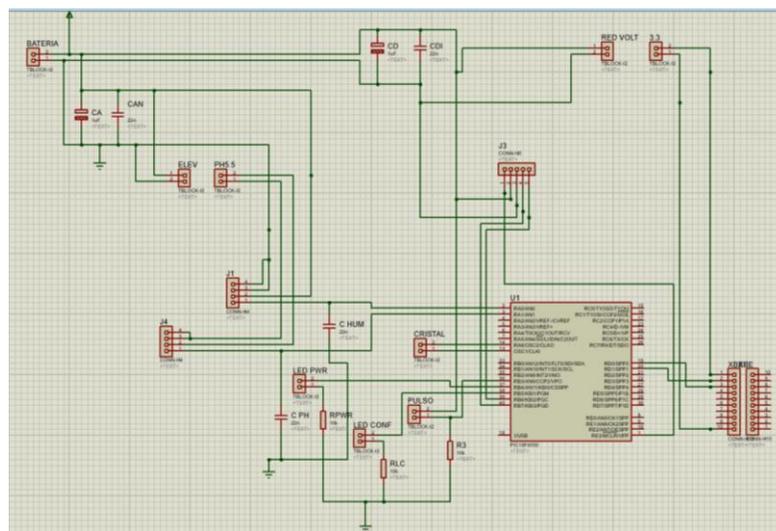


### 2.2.4 Diseño circuito impreso

Para este diseño se utiliza el software Proteus, presente en la figura 2-6, en donde se pueden observar las conexiones de los sensores y demás elementos al microcontrolador. Este circuito consta en dos sensores (sensor de pH y sensor de Humedad), que están conectados a dos pines análogos del microcontrolador. También se puede observar las conexiones en donde ira un elevador y un reductor de voltaje, esto con el fin de mantener estable un voltaje de salida y no dañar los instrumentos como el módulo XBee que trabaja a un voltaje de 3.3V ya que el circuito esta alimentado con 5.0V estables.

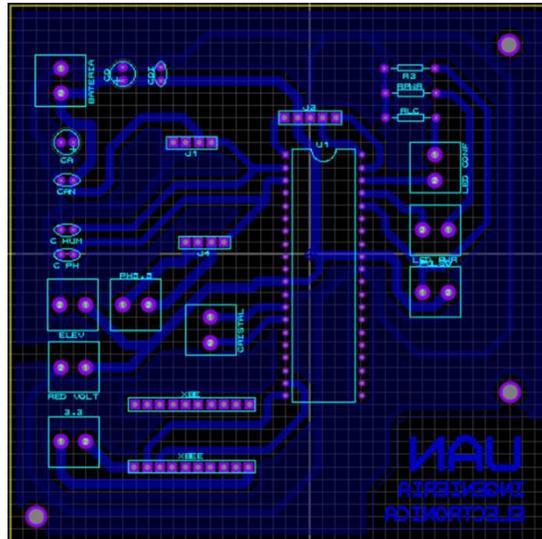
Se observa en la entrada de la batería los condensadores de desacoplo, esto con el fin de compensar las inductancias y evitar los ruidos eléctricos de alta frecuencia, creadas por las pistas de cobre en la tarjeta; en el esquema se pueden encontrar una fila de pines que sirven para conectar un programador con el microcontrolador en caso de realizar una corrección o una mejora a la programación del circuito.

**Figura 2-6:** Esquema del prototipo. Fuente: Autores



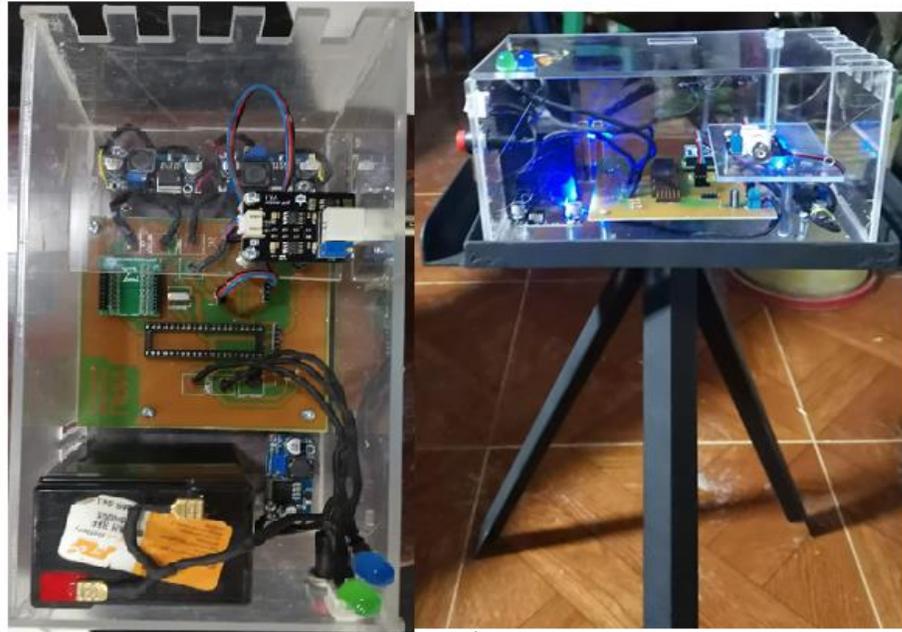
Luego de realizar el diseño del esquema se procede a realizar el diseño de la placa del circuito impreso que llevara el prototipo, el resultado se puede observar en la figura 2-7. Este diseño se realizó en el software de proteus.

**Figura 2-7:** Placa del circuito impreso. Fuente: Autores



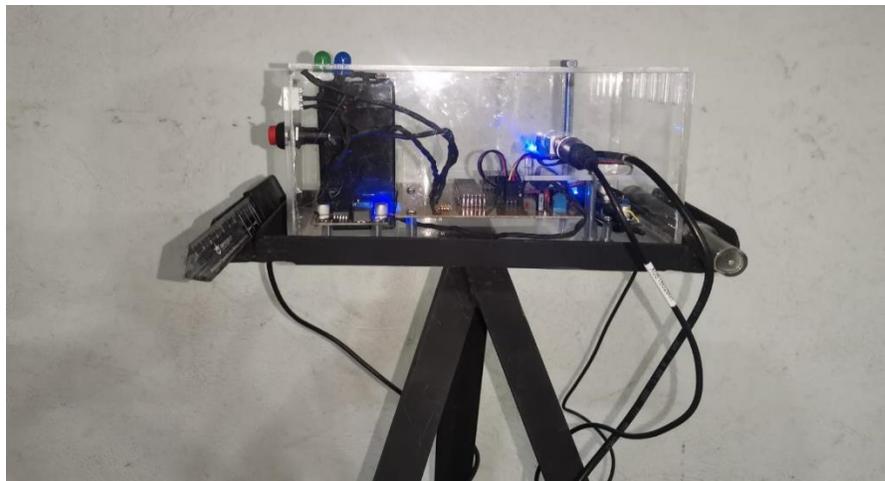
Luego de tener el diseño de la tarjeta se realiza la impresión en una placa en fibra de vidrio y se acoplan los elementos que se eligieron en las matrices de decisión. Para realizar la construcción del prototipo se diseña una caja en acrílico transparente, esto con el fin de poder percibir el funcionamiento de los dispositivos que se implementaron. Se puede observar el montaje del prototipo en la figura 2-8.

**Figura 2-8:** Montaje del prototipo. Fuente: Autores



El prototipo terminado se muestra en la figura 2-9, donde se observa todo el dispositivo como tal, con los sensores conectados y reposando en la base metálica. Esto se hizo para poder manipularlo mientras se traslada para la toma de las muestras de las variables a lo largo del cultivo.

**Figura 2-9:** Prototipo terminado. Fuente: Autores



## 2.3 Recolección de muestras pH y humedad

Esta sección presenta una descripción del cultivo, la toma de muestras y la información que envía el prototipo a través de los módulos de comunicación XBee hacia el computador para realizar el estudio de las variables obtenidas en la toma de datos del terreno.

### 2.3.1 *Ubicación del cultivo*

El cultivo seleccionado (figura 2-10) se encuentra ubicado en Samacá, Boyacá en el sector la cumbre aproximadamente a una latitud  $5^{\circ}28'25.1''$  N y longitud  $73^{\circ}28'08.0''$  W

**Figura 2-10:** Cultivo de papa. Fuente: Autores



### 2.3.2 *Toma de muestras humedad y pH*

Como punto de partida para la toma de muestras se seleccionó como referencia el sistema de riego del cultivo; este cuenta con 36 rociadores distribuidos en todo el terreno, antes de

iniciar se realizan tomas de prueba y calibración de los sensores de pH y Humedad, cabe resaltar que el sensor de pH se debe calibrar cada dos horas para obtener una mayor precisión, al tomar la muestras en cada punto estipulado se realizaron unos huecos en los surcos del cultivo cerca al tubérculo de la planta, estos huecos no eran mayor a 10 cm para la toma de pH, en cuanto al sensor de humedad este ya indicaba la medida a la que se debe insertar. En la figura 2-11 se puede observar el prototipo con los sensores ya insertados en el cultivo listo para la toma de las muestras.

**Figura 2-11:** Toma de las variables de pH y Humedad. Fuente: Autores



Para la muestra de pH la sonda no puede medir directamente la tierra seca, por lo que se debe mojar el suelo con agua destilada antes de la medición. Se clava la sonda de pH que se ha instalado con la punta de la lanza en el suelo húmedo, tal y como lo exhibe la figura 2-12. Se debe presionar con el dedo a un centímetro de profundidad para asegurarse de que el bulbo de vidrio de la sonda toque de cerca el suelo húmedo. Después de la medición, se saca la sonda y se desenrosca la punta de la lanza. Esta se lavaba con agua destilada de ida y

vuelta. Luego se seca la sonda con cuidado con papel filtro y se vuelva a enroscar la tapa protectora en la sonda para la próxima muestra y/o uso.

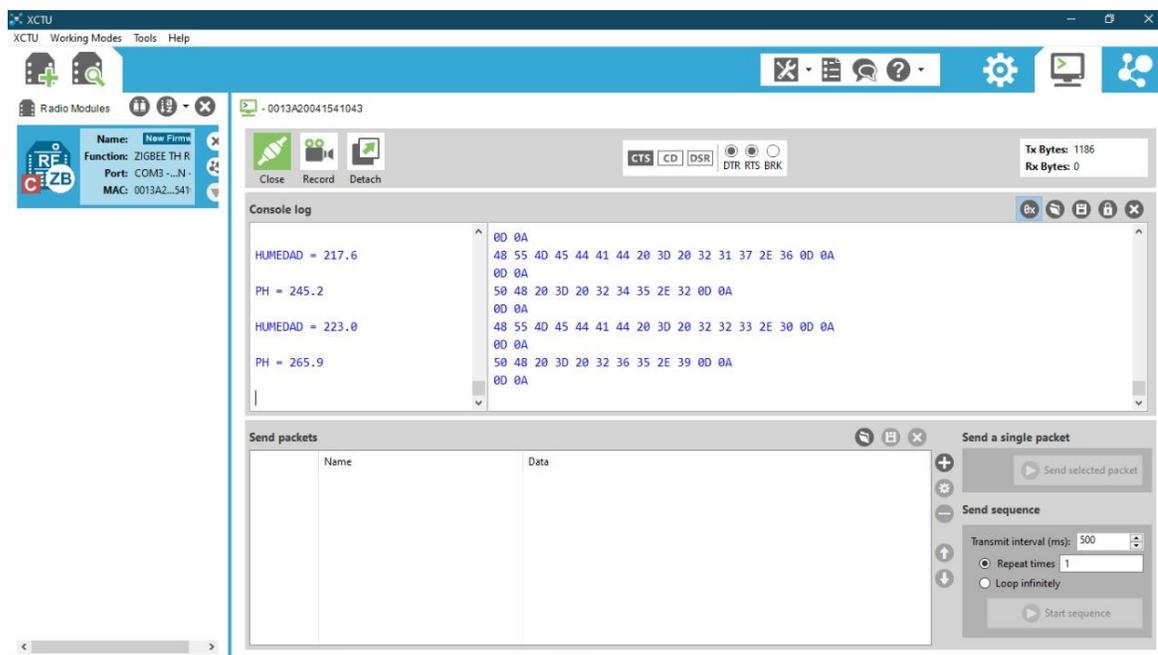
**Figura 2-12:** Sonda con punta de lanza. Fuente: Autores



### 2.3.3 Visualización muestras en XCTU

Una vez los sensores estén introducidos en la tierra y luego de haber pulsado el botón para la toma de datos, estos se envían mediante el módulo XBee y serán visualizados en su interfaz gráfica (XCTU) tal como se ve en la figura 2-13. Estos datos llegan en aproximadamente un minuto después de pulsar el botón.

**Figura 2-13: Datos en XCTU. Fuente: Autores**



### 2.3.4 Recopilación datos en Matlab

En cuanto a la recopilación de datos en Matlab, se carga el archivo “.log” indicado en la figura 2-14, que exporta XCTU, este archivo “.log” está en sistema hexadecimal y se debe realizar una conversión y dejarlo en sistema ASCII, quedando al final un vector con los resultados de cada variable.

Figura 2-14: Archivo '.log'. Fuente: Autores

```

muestras_cultivo.log: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
09-18-2021 13:12:24.636, -,AT, " ,0013A20041541043, ZIGBEE TH Reg,4059,COM3 - 9600/8/N/1/N,0,46"

09-18-2021 10:05:24.726,0,RECV,48554D45444144203D203337322E310D
09-18-2021 10:05:24.787,1,RECV,0A0D0A
09-18-2021 10:05:28.945,2,RECV,5048203D203330312E360D0A0D0A
09-18-2021 10:13:07.327,3,RECV,48554D45444144203D203335392E320D0A0D0A
09-18-2021 10:13:11.783,4,RECV,5048203D203330302E35
09-18-2021 10:13:11.840,5,RECV,0D0A0D0A
09-18-2021 10:21:11.634,6,RECV,48554D45444144203D203239332E300D0A0D0A
09-18-2021 10:21:15.858,7,RECV,5048203D203235352E340D0A0D0A
09-18-2021 10:26:36.339,8,RECV,48554D45444144203D203331362E390D0A0D0A
09-18-2021 10:26:40.536,9,RECV,5048203D203238362E330D0A0D0A
09-18-2021 10:30:56.405,10,RECV,48554D45444144203D203330302E300D0A0D0A
09-18-2021 10:31:00.594,11,RECV,5048203D20
09-18-2021 10:31:00.658,12,RECV,3239332E350D0A0D0A
09-18-2021 10:34:38.583,13,RECV,48554D45444144203D203236382E330D0A0D0A
09-18-2021 10:34:42.785,14,RECV,5048203D203237332E300D
09-18-2021 10:34:42.835,15,RECV,0A0D0A
09-18-2021 10:41:57.702,16,RECV,48554D45444144203D203237
09-18-2021 10:41:57.766,17,RECV,32E390D0A0D0A
09-18-2021 10:42:01.921,18,RECV,5048203D203236392E340D0A0D0A
09-18-2021 10:55:53.567,19,RECV,48554D45444144203D203330342E320D0A0D0A
09-18-2021 10:55:57.796,20,RECV,5048203D203239372E390D0A0D0A
09-18-2021 11:00:26.030,21,RECV,48554D45444144203D2032372E370D0A0D0A
Línea 1, columna 1 100% Windows (CRLF) UTF-8

```

Al realizar la conversión de los sistemas Hexadecimal a ASCII se presentaron algunos errores en las letras de los resultados ya que salían cortadas o con espacios de más; para ello se realiza un código de programación en donde se arreglaron estos errores y así dejar una matriz lista para continuar con el siguiente proceso.

#### 2.4 Visualización espacial

Esta visualización se realizará mediante la interpolación de los datos, para ello se carga una imagen del terreno la cual fue tomada con un dron, en esta imagen se muestran los puntos de donde fueron extraídos los valores de pH y Humedad del cultivo, para realizar la interpolación se acudió a un Toolbox que ofrece Matlab la visualización espacial se encuentra en los resultados del proyecto.

### 2.4.1 Visualización aérea del cultivo

Como complemento a la visualización espacial, se requiere la posición en (X, Y) de cada punto en el que se tomaron las muestras de las variables, para ello se tomó una fotografía aérea por medio de un dron, con el fin de pasar los pixeles a metros y así establecer un orden de coordenadas; en cada rociador se colocó un cuadro de cartón paja con cinta reflectiva como se presenta en la figura 2-15.

**Figura 2-15:** Referencia dron. Fuente: Autores



Cuando el dron esté sobre el cultivo y tome la captura de la imagen se puede observar en cierto modo los lugares en donde se tomaron dichas muestras, en la figura 2-16 se observa el resultado de la imagen capturada por el dron.

**Figura 2-16:** Imagen dron. Fuente: Autores



### *2.4.2 Interpolación de los datos*

La interpolación es una técnica que sirve para para agregar nuevos puntos de datos dentro de un conjunto en donde ya se tengan puntos conocidos. En el software de Matlab la interpolación se divide en técnicas para puntos de datos en una cuadrícula y puntos de datos dispersos, para obtener los resultados de las variables de pH y Humedad y observar en donde afectaban el terreno, se utiliza una herramienta de Matlab llamada Curve Fitting para observar el comportamiento de estas variables simulando el área del cultivo tomando los puntos reales sensados realizando una gráfica en 2D

## 2.5 Análisis visualización espacial

Esta sección relacionada con la visualización espacial (mapas de calor) indica el análisis de estos para determinar los puntos críticos que se presentan en el cultivo causando los factores de riesgo con los cuales aumenta la probabilidad de contraer enfermedades. Las variables medidas se comparan con parámetros en los que se desarrollan distintas enfermedades detectando así el factor de riesgo, es decir entre que rangos es más probable que dichos factores aumenten el riesgo a que la enfermedad se desarrolle de manera óptima, afectando el cultivo.

De lo anterior se tienen que suelos ácidos afectan el desarrollo del tubérculo, en la figura 2-17 se observa la clasificación de los suelos según el pH que presente el terreno.

**Figura 2-17:** Suelos según el pH. Fuente (Martinez, 2012)

<b>CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS SEGÚN EL VALOR DE pH</b>		
<b>pH</b>	<b>Evaluación</b>	<b>Efectos</b>
<de 4,5	<b>Extremadamente ácido</b>	<b>Condiciones muy desfavorables</b>
4,5 - 5	<b>Muy fuertemente ácido</b>	<b>Posibles efectos de toxicidad</b>
5,1 - 5,5	<b>Fuertemente ácido</b>	<b>Deficiente asimilación de algunos elementos</b>
5,6 - 6	<b>Medianamente ácido</b>	<b>Adecuado para la mayoría de los cultivos</b>
6,1 - 6,5	<b>Ligeramente ácido</b>	<b>El más adecuado para la asimilación de nutrientes</b>
6,6 - 7,3	<b>Neutro</b>	<b>Efectos tóxicos mínimos</b>
7,4 - 7,8	<b>Medianamente básico</b>	<b>Existencia de carbonato cálcico</b>
7,9 - 8,4	<b>Básico</b>	<b>Deficiente asimilación de algunos nutrientes</b>
8,5 - 9	<b>Ligeramente alcalino</b>	<b>Problemas de clorosis</b>
9,1 - 10	<b>Alcalino</b>	<b>Presencia de carbonato sódico</b>
> 10	<b>Fuertemente alcalino</b>	<b>Poca asimilación de algunos nutrientes</b>

Clara Miguel Sánchez

En cuanto a la humedad afectan el crecimiento del tubérculo, además es un factor de riesgo importante en cuanto al desarrollo de enfermedades y plagas. Una de las enfermedades más comunes en este cultivo es el tizón tardío conocido por los agricultores como la gota, las condiciones ambientales óptimas para el desarrollo del patógeno son temperatura de 12 a 15°C y una humedad relativa de 95 a 100%, los sembríos de papa pueden ser destruidos en 10 a 15 días conllevando a pérdidas totales. (Torres, 2002) La pudrición rosada se produce donde los suelos son húmedos y tienen mal drenaje y como consecuencia, hay acumulación de agua ocasionada por las lluvias o por riego excesivo. Pudrición Negra por *Rosellinia* conocida como mortaja blanca, se beneficia del clima cálido, húmedo y en suelos con bastante materia orgánica, suelos ácidos. La roña de la papa, camanduleo o sarna polvosa, en condiciones de baja humedad, debajo de la lesión se cicatriza el tejido, se oscurece y deteriora dejando una depresión superficial llena de una masa polvosa de esporas aglutinadas; la lesión generalmente, está circundada por bordes levantados del peridermo. Cuando existe alta humedad en el suelo, no hay cicatrización y la lesión se extiende rápidamente formando concavidades o verrugas grandes o úlceras. (Fedepapa, 2010)

### 3. Resultados y discusión

En esta sección se encuentran aspectos importantes como lo son la selección de los instrumentos finales para la construcción del prototipo, la toma de muestras con los sensores, el envío de las variables y la puesta en marcha de resultados; la implementación de Matlab con la conversión de los sistemas de Hexadecimal a ASCII, separando los valores de las variables en su respectivo vector y la obtención del mapa de calor mediante la interpolación en 2D usando Curve Fitting Tool.

#### 3.1 Selección final instrumentos

A continuación, se muestra una tabla 3-1 con los instrumentos elegidos para la construcción del prototipo, estos elementos se eligieron a través de matrices de decisiones para optar por el mejor instrumento de acuerdo a la relación calidad/precio.

**Tabla 3-1:** Instrumentos aptos. Fuente: Autores

<b>INSTRUMENTOS ELEGIDOS PARA REALIZAR EL DISEÑO DEL PROTOTIPO</b>			
	<b>Referencia</b>	<b>Características</b>	<b>Precio</b>
<b>Sensor PH</b>	Kit medición de PH - Análogo Versión PRO	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rango de medición: 0PH ~ 10PH</li> <li>• Exactitud: <math>\pm 0.1</math>PH</li> <li>• Temperatura de operación: 5°C ~ 60°C</li> <li>• Tiempo de respuesta: <math>\leq 2</math>min (En buffer de solución estándar)</li> <li>• Voltaje de entrada: 5V</li> <li>• Exactitud: <math>&lt; \pm 0.2</math>PH (25°C)</li> </ul>	\$ 552,160
<b>Sensor Humedad</b>	Sensor análogo de humedad del suelo a prueba de agua-Gravity	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Voltaje de funcionamiento: 3.3 a 5.5VDC</li> <li>• Voltaje de salida: 0-3VDC</li> <li>• Interfaz: 2,54 de 3 pines</li> <li>• Con cable de 1.5m</li> </ul>	\$ 73.185

<b>Microcontrolador</b>	Microcontrolador Microchip PIC18F4550-I/P	<ul style="list-style-type: none"> <li>•24KB de memoria flash para programación,</li> <li>•RAM de 2KB</li> <li>•EEPROM de 256KB</li> <li>•Velocidad: 48MHz</li> <li>•35 puertos de entrada/salida,</li> <li>•13 canales de ADC de 10 bits,</li> <li>•Voltaje de alimentación: 5V</li> </ul>	\$ 39,389
<b>Sistema comunicación</b>	Módulo XBee ZB S2C	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Frecuencia: 2.4GHz</li> <li>•Rango Indoor/Urba: hasta 200ft (60m)</li> <li>•Rango Outdoor-línea de vista: hasta 4000ft (1200m)</li> <li>•Sensibilidad: -102dBm</li> <li>•Power-output: 8dBm</li> <li>•Voltaje de alimentación: 2.1V ~ 3.6V</li> </ul>	\$ 300,000
<b>Equipo en donde se visualizará la información</b>	LAPTOP	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Tiene el software de Matlab instalado.</li> <li>•RAM instalada: 12,0 GB</li> <li>•Tipo de sistema: Sistema operativo de 64 bits, procesador x64</li> <li>•Edición Windows 10 Home</li> </ul>	Obtenido
<b>Batería</b>	Batería Seca 6V - 4A Sellada Recargable	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modelo: FL640</li> <li>• Capacidad: 6V - 4AH / 20HR</li> <li>• Batería Sellada de Plomo - Acido</li> <li>• Recargable</li> <li>• Libre de Mantenimiento</li> </ul>	\$ 29,500

### 3.2 Toma de muestras

La toma de muestras fue algo tedioso principalmente por que el sensor de pH se tenía que calibrar antes de iniciar a tomar el valor de la variable, y había que repetir el proceso de calibración cada dos horas con el objetivo de garantizar la precisión en la toma de la muestra, por otra parte, este sensor se debe tratar con delicadeza porque el bulbo de vidrio entraba en

contacto con el suelo, además de que no puede estar mucho tiempo dentro del suelo; se debe estar limpiando muy bien con agua destilada antes de tomar la muestra, es decir para la toma de cada punto medida, la sonda debe estar limpia con el propósito de no alterar los valores de cada uno de los puntos del terreno.

En cuanto al sensor de humedad no se presentó ningún inconveniente ya que era más sencillo de manipular, este proceso es largo y demorado, en donde hay que tener en cuenta el clima ya que no ayudaba mucho por las lluvias.

### 3.3 Procesamiento de los datos en Matlab

A continuación, se presenta el procedimiento realizado para el procesamiento y corrección de los datos adquiridos por el módulo XBee y el posicionamiento de los puntos medidos.

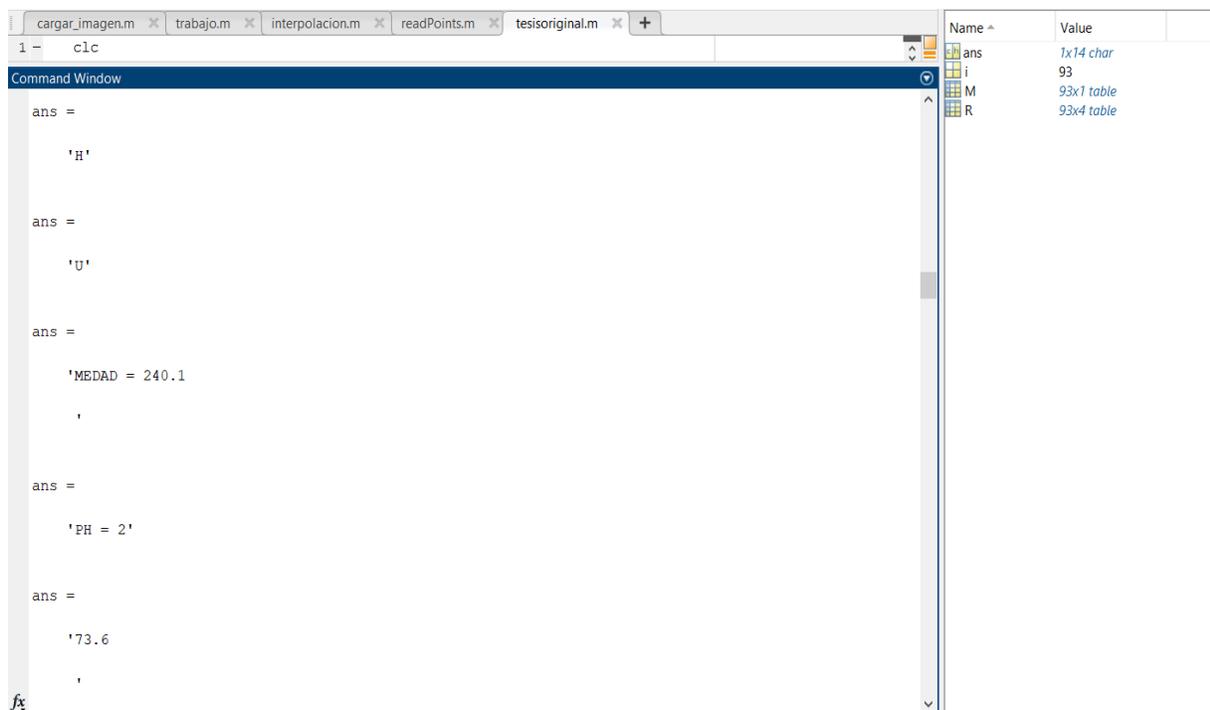
#### 3.3.1 Lectura y conversión archivo de datos “.log”

El programa XCTU del XBee exporta un archivo ‘.log’ cuando se guarda la información, este debía ser exportado y leído en Matlab; uno de los inconvenientes era que el archivo estaba en lenguaje hexadecimal, para ello se realizó la debida programación para convertirlo a ASCII. El resultado se muestra en la Figura 3-1, donde se presentan los errores puesto que presenta ya sea las letras o los números cortados tanto por partes como también por la mitad; lo ideal era que se visualizara “HUMEDAD = 240.1” o “PH = 273.6”, con el fin de separar las variables cada una en su respectivo vector.

Solucionando lo anterior se presenta un error en los espacios, por lo que se concatenan todos los vectores dejándolos todos juntos y en decimales para localizar los espacios, paso seguido

después de identificar el espacio se realiza un salto de línea es decir que cada vez que se encuentre con un espacio lo omite y sigue con la siguiente posición del vector; eliminando los espacios ya se puede realizar la conversión de Hexadecimal a ASCII, ahora bien se crea una matriz de ceros con la función 'zeros' con el fin de almacenar los valores tanto de pH y humedad por separado, tal y como lo muestra la Figura 3-2.

**Figura 3-1:** Error en la conversión. Fuente: Autores



```
1 - c1c
Command Window
ans =
'H'

ans =
'U'

ans =
'MEDAD = 240.1
'

ans =
'PH = 2'

ans =
'73.6
'
```

Name	Value
ans	1x14 char
i	93
M	93x1 table
R	93x4 table

**Figura 3-2:** Matrices Humedad y pH por separado. Fuente: Autores

matrizHumedad	matrizPh
1	1
2	2
3	3
4	4
5	5
6	6
7	7
8	8
9	9
10	10
11	11
12	12
13	13
14	14
15	15
16	16
17	17

De la figura anterior se puede observar que los datos no son los correctos para las variables presentadas, por lo tanto, se realizan las líneas de código respectivas para la calibración de los sensores en Matlab (ADC y la ecuación) para cada uno de los datos y reescribiendo las matrices como las demuestra la figura 3-3. Esta información se complementa en el Anexo IV: pseudocódigo Matlab.

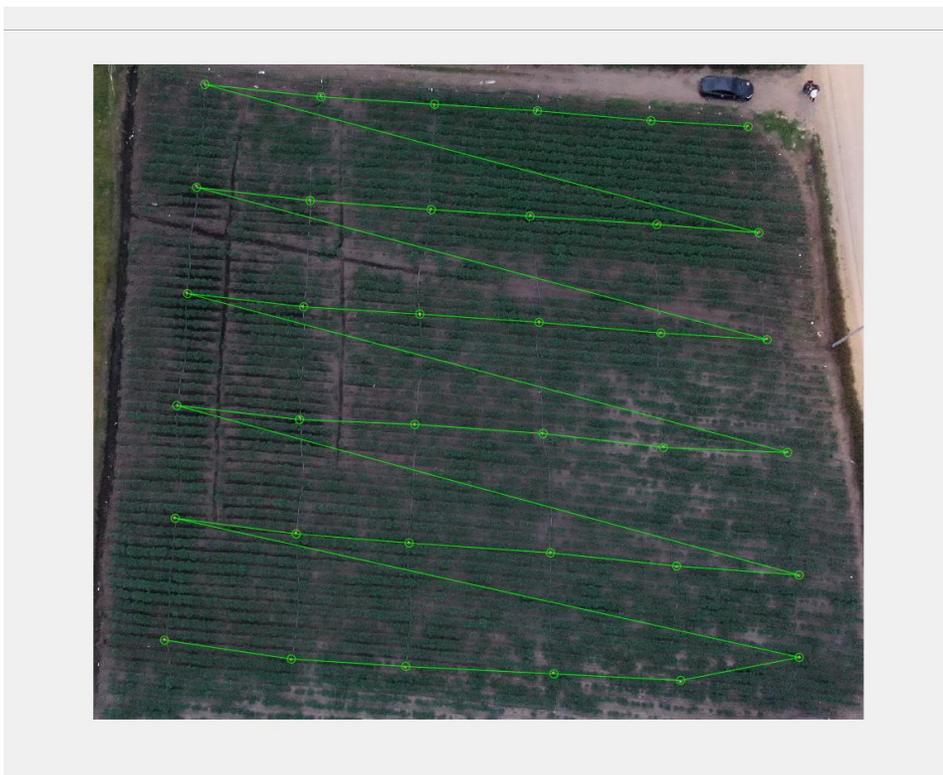
**Figura 3-3:** Humedad y pH. Fuente: Autores

matrizHumedad	matrizPh
1	1
2	2
3	3
4	4
5	5
6	6
7	7
8	8
9	9
10	10
11	11
12	12
13	13
14	14
15	15
16	16
17	17

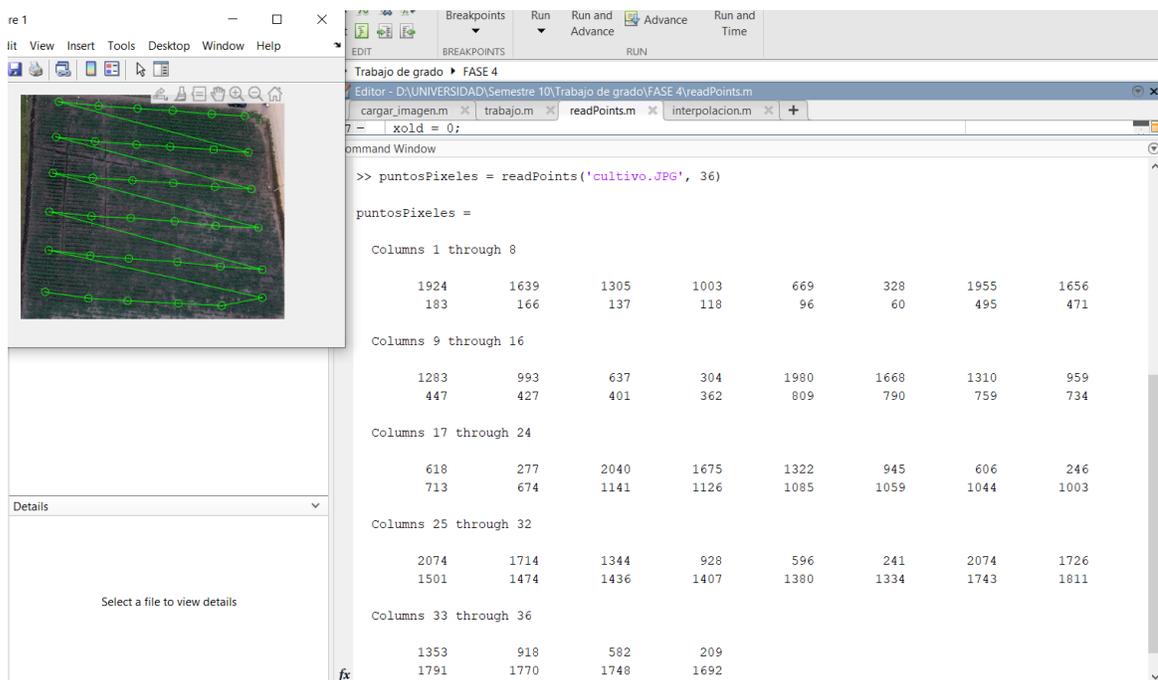
### 3.3.2 Posición de los puntos medidos

Con la implementación de la imagen tomada con el dron sobre el cultivo se realiza con el fin de saber con exactitud el punto en donde se tomaron los datos tanto de pH como de humedad, como lo expone la figura 3-4, para lograr leer los puntos de la imagen Matlab ofrece varias funciones que ayudan a desarrollar dicha lectura; para ello se crea una función que lee los puntos definidos manualmente de la imagen “puntos = readpoints (imagen, n)” mostrando la imagen y definiendo el número de puntos, luego se registra la posición de cada clic del botón 1 del mouse en el figura y se detiene cuando se hace clic en otro botón. La pista de puntos se dibuja a medida que avanza. El resultado es una matriz de 2 x npoints; cada la columna es [X; Y] por un punto.

**Figura 3-4:** Puntos sensados en el cultivo. Fuente: Autores



**Figura 3-5:** Pixeles en X y Y de cada punto. Fuente: Autores



Con estos pixeles, mostrados en la figura 3-5, se realiza la conversión a metros; se toman dos puntos cualquiera del cultivo y se mide la distancia que hay del uno al otro el valor de esta que está dado en metros se usara más adelante, de la figura 3-7 se toman los pixeles de los puntos seleccionados que vienen siendo el punto 2 y 7, y se realiza el siguiente procedimiento determinando 1px es equivalente a 0.029 metros.

$$1955 - 1639 = 316 \text{ pixeles en } X$$

$$495 - 166 = 329 \text{ pixeles en } Y$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{329}{316}\right) = 46.1^\circ$$

1 pixel a metros en X

$$316px(X) = 13.40m * \cos(46.1^\circ)$$

$$1px(X) = \frac{13.40m * \cos(46.1^\circ)}{316} = 0.029m$$

1pixel a metros en Y

$$329px(Y) = 13.40m * \sin(46.1^\circ)$$

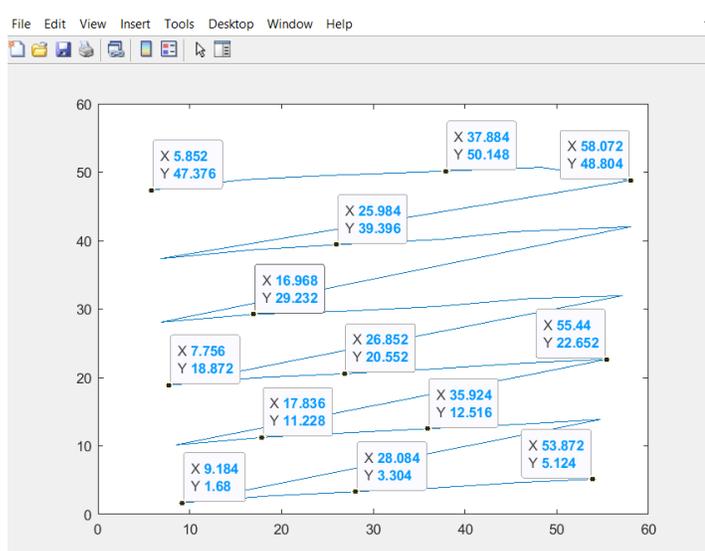
$$1px(Y) = \frac{13.40m * \sin(46.1^\circ)}{329} = 0.029m$$

Ahora bien, se realiza la conversión de cada uno de los puntos con una regla de tres simple, obteniendo así los valores reales en metros de los puntos medidos, los resultados de la conversión son valores coherentes y concuerdan en el campo.

### 3.3.3 Mapas de calor

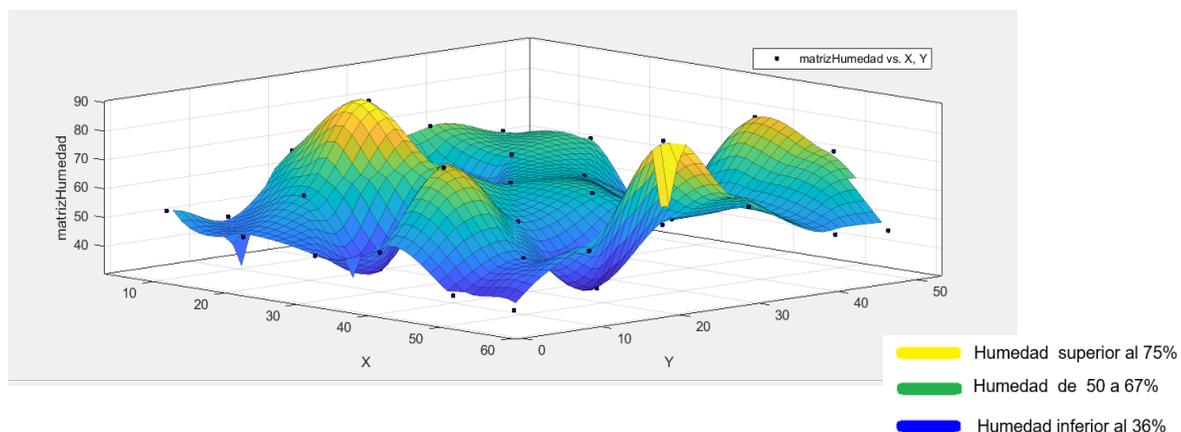
A continuación, se presentan los mapas creados; en la Figura 3-6 se presenta la posición en metros de cada punto, tan pronto se tienen las coordenadas de posicionamiento en (X, Y) dadas como variables independientes y el respectivo vector de las variables dependientes pH y humedad se ejecuta el Toolbox “cftool (Curve Fitting Tool) herramienta de ajuste de curvas” que ofrece Matlab proporcionando una interfaz flexible en la que puede ajustar de forma interactiva curvas y superficies a datos; utilizando regresión lineal o no lineal, interpolación, suavizado y ecuaciones personalizadas; creando los respectivos gráficos.

**Figura 3-6:** Posición de los puntos sensados. Fuente: Autores

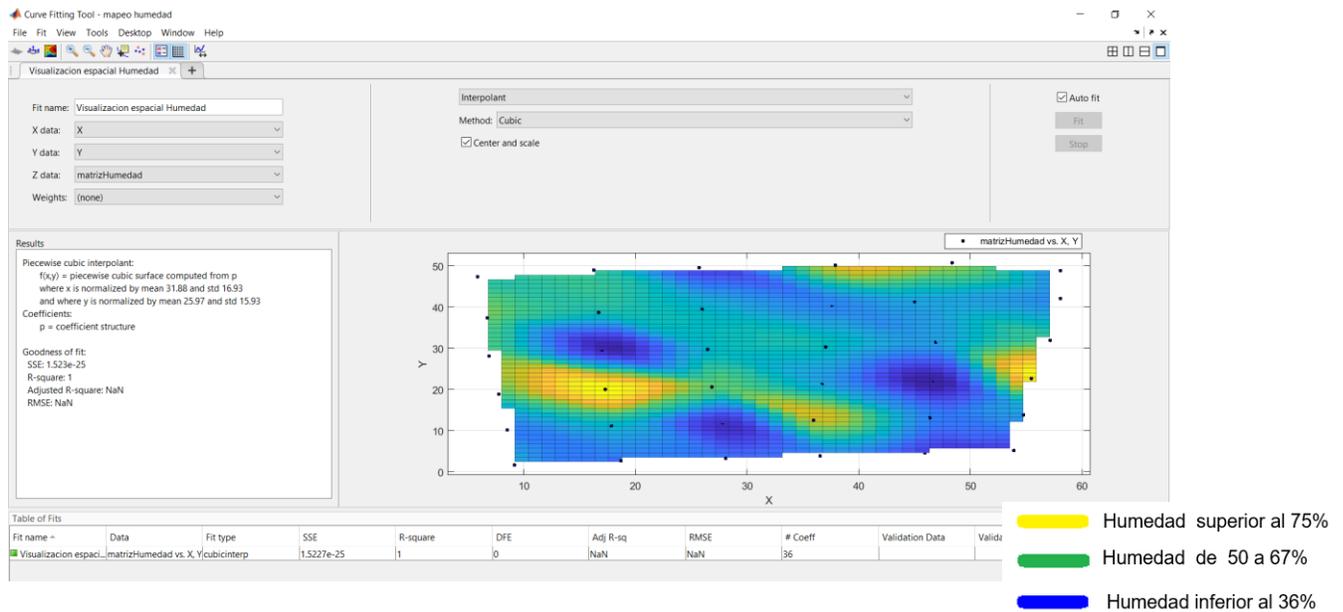


Se presenta el mapa de calor de la variable humedad, en la gráfica se observa por medio de colores los rangos de Humedad tomados en los diferentes puntos del cultivo, estos rangos varían de 40% a 87,81% de Humedad. El color amarillo muestra las zonas del cultivo en donde la humedad pasa del 75% y se muestra de color azul los valores del 55% hacia abajo.

**Figura 3-7:** Visualización espacial Humedad. Fuente: Autores



**Figura 3-8: Vista superior Humedad. Fuente: Autores**

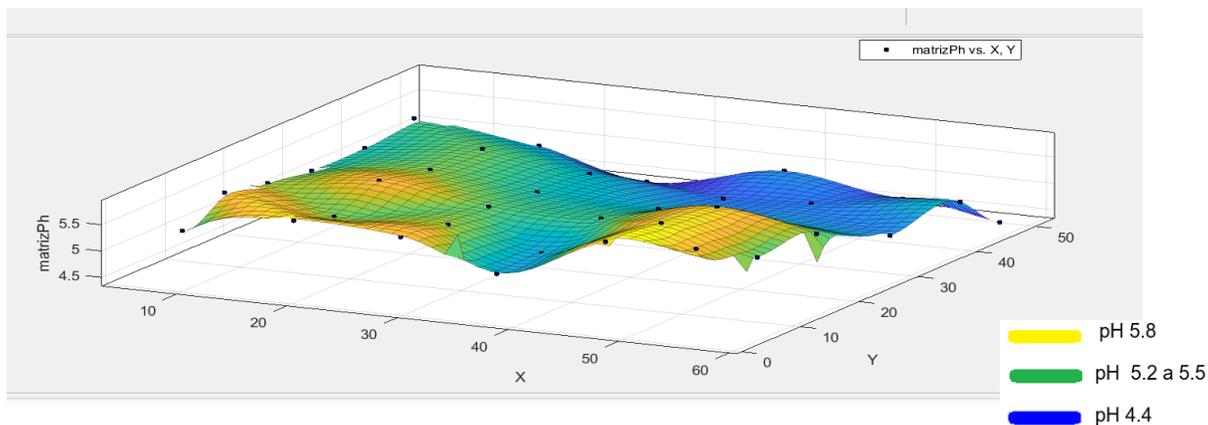


### Análisis del cultivo por Humedad

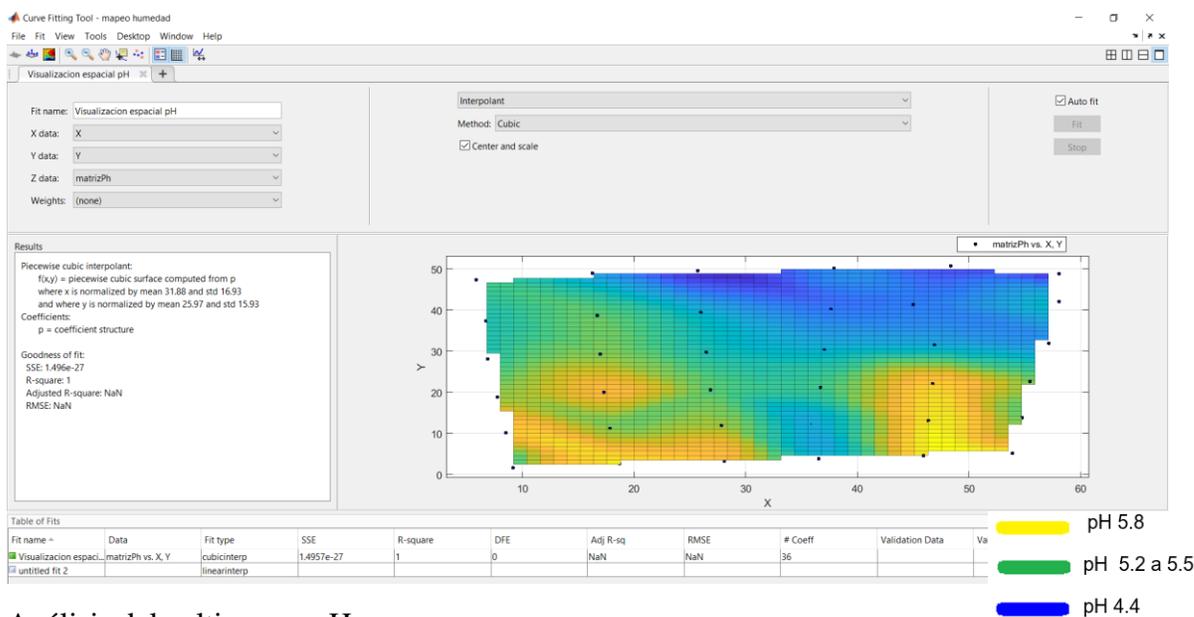
De acuerdo a los mapas obtenidos se observan zonas en óptimas condiciones de humedad para desarrollar roña de la papa, la cual se produce por la baja humedad que hay en el terreno exactamente en los puntos (1,14,23,34) siendo óptimos para desarrollar esta enfermedad. En el punto (17) se observa que hay demasiada humedad a comparación de los otros, en esta zona se puede desarrollar la pudrición rosada como consecuencia de la humedad en exceso, se recomienda verificar si hay acumulación de agua o mal drenaje.

A continuación, se presenta el mapa de calor de la variable pH, en la gráfica se observa por medio de colores los rangos de pH tomados en los diferentes puntos del cultivo, estos rangos varían de 4.5 pH a 5.5 pH. El color amarillo muestra las zonas del cultivo en donde el pH se aproxima neutro (7.0) y el color azul con los valores de pH ácidos inferiores a (5.0).

**Figura 3-9:** Visualización espacial pH. Fuente: Autores



**Figura 3-10:** Vista superior pH. Fuente: Autor



### Análisis del cultivo por pH

De acuerdo a los mapas obtenidos se observan zonas en óptimas condiciones de pH y otras que pueden afectar en el desarrollo del cultivo, los puntos (19,26,27,31,32,33,34,35) del terreno están por debajo de un pH de 5,0 siendo fuertemente ácido provocando posibles efectos de toxicidad, además una de las enfermedades que se puede desarrollar a partir de suelos ácidos es la mortaja blanca.

#### 4. Conclusiones

Al aplicar las matrices de decisión en la selección de instrumentos se permite analizar e identificar las diferentes alternativas que se presentan en los distintos escenarios para el desarrollo del prototipo, utilizando ciertos criterios de manera que se puedan tomar decisiones objetivas empleando un proceso estructurado de manera sistemática.

El dispositivo electrónico que se diseñó e implementó para la toma de las muestras fue el más adecuado, con el propósito de brindarle mayor versatilidad al proyecto, generando así facilidad en su uso con el fin de que el agricultor también pueda emplearlo, ya que si se realizaba una red de sensores a través de todo el cultivo para la toma y monitoreo de estas variables, esta generaba un costo muy elevado por el sensor de pH, además de que este sensor es para pruebas de laboratorio, y no debe permanecer por mucho tiempo enterrado en el suelo.

Para el posicionamiento de los puntos medidos se había implementado un módulo GPS, pero este en las coordenadas tanto de latitud como de longitud variaba solo un dígito en los segundos, cuando la distancia de punto a punto era mayor a 10 metros, lo cual no era muy favorable. Para ello se toma la decisión de marcar los puntos con cinta reflectiva y a través de un dron tomar la fotografía para posteriormente realizar su procesamiento en Matlab obteniendo al final unas coordenadas (X, Y) en metros de los puntos medidos de una forma más precisa y real en cuanto a las dimensiones del cultivo.

El mapa de calor en cierto modo facilita la lectura del comportamiento de estas variables a lo largo del terreno, indicándole al agricultor con exactitud las zonas más afectadas y como tal el estado del suelo donde ha sembrado el tubérculo.

Con la implementación de este proyecto en el campo colombiano, se da un aporte al estudio y análisis de la tierra en un cultivo, siendo es un factor fundamental tanto para el desarrollo como para crecimiento de la planta, esto para saber en qué estado se va desarrollando, si va creciendo sana o si se ha presentado alguna anomalía en ella ya sea porque hubo algún cambio en una de las variables. Mas sin embargo el proyecto no solo sirve para analizar los riesgos que pueden afectar las variables de Humedad y pH en un cultivo de papa, sino que además se pueden realizar diferentes estudios de estas variables en diferentes cultivos, incluso se pueden realizar estudios de suelos, permitiendo investigar y analizar las condiciones del suelo y si este es el adecuado para el cultivo.

Se recomienda en este tipo de análisis ampliar el uso de las variables a estudiar, debido a que se dio un enfoque en solo dos variables, pero en realidad para tener un estudio más completo y detallado sería bueno incluir variables como la temperatura y humedad ambiente y así obtener una lectura más amplia sobre como estos factores abióticos influyen en el desarrollo cultivo. En cuanto a los sensores fueron los más adecuados de acuerdo a la relación calidad-precio, pero en el caso del sensor de pH, se apreciaría tomar las muestras con un sensor más robusto ya que el seleccionado es muy delicado y es más usado para tomar muestras en laboratorio.

## 5. Referencias

- Agarwal, T. (03 de agosto de 2019). *ElProCus - Electronic Projects for Engineering Students*. Recuperado el 23 de septiembre de 2021, de ElProCus - Electronic Projects for Engineering Students: <https://www.elprocus.com/soil-moisture-sensor-working-and-applications/>
- Arce, F. A. (2002). *publicaciones cajamar.es*. Recuperado el 1 de septiembre de 2021, de publicaciones cajama.es: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fpublicacionescajamar.es%2Fuploads%2Fcultivos-hortícolas-al-aire-libre%2F01-cultivos-hortícolas-al-aire-libre.pdf&clen=288914&chunk=true
- Britannica. (1 de abril de 2021). *Britannica*. (l. e. Britannica, Editor, & E. Britannica, Productor) Recuperado el 23 de septiembre de 2021, de Britannica: <https://www.britannica.com/technology/pH-meter>
- Camara de Comercio de Bogota. (2015). *Manual papa*. (L. F. Vasco, Ed.) Bogota, Colombia: Núcleo Ambiental S.A.S. Recuperado el 30 de agosto de 2021
- Ceballos, M. R., Palma Gamboa, O., & Gorricho, J. L. (16 de junio de 2015). *SAGE Journals*. doi:10.1155/2015/123543
- center, i. p. (27 de octubre de 2020). *internacional potato center*. Recuperado el 24 de agosto de 2021, de CIP: <https://cipotato.org/climate-change/>

DFROBOT. (2021). *DFROBOT*. Recuperado el 2021, de DFROBOT:

[https://wiki.dfrobot.com/Gravity\\_\\_Analog\\_Spear\\_Tip\\_pH\\_Sensor\\_\\_\\_Meter\\_Kit\\_\\_\\_For\\_Soil\\_And\\_Food\\_Applications\\_\\_SKU\\_\\_SEN0249#Documents](https://wiki.dfrobot.com/Gravity__Analog_Spear_Tip_pH_Sensor___Meter_Kit___For_Soil_And_Food_Applications__SKU__SEN0249#Documents)

fao.org. (2008). *fao.org*. (fa) Recuperado el 1 de septiembre de 2021, de fao.org:

<https://www.fao.org/potato-2008/es/lapapa/cultivo.html>

Fedepapa. (2010). Plagas y enfermedades de la papa. *Fedepapa*, 28. Recuperado el 9 de Noviembre de 2021, de [http://www.fedepapa.com/?page\\_id=1900](http://www.fedepapa.com/?page_id=1900)

Fernandez Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodologia de la investigacion* (sexta ed.). Mexico D.F: McGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V. Recuperado el 29 de agosto de 2021

HBM. (6 de Diciembre de 2018). *HBM*. Recuperado el 8 de Noviembre de 2021, de HBM:

<https://www.hbm.com/es/4778/metodos-de-calibracion-de-sensores/>

John Deere. (2021). *deere.com*. Recuperado el 1 de septiembre de 2021, de deere.com:

<https://www.deere.com/latin-america/es/equipo-de-labranza>

Kamelia, L., Setya Nugraha, Y., Ridlo Effendi, M., & Priatna, T. (25-26 de julio de 2019).

*IEEE Xplore*. (IEEE, Editor, & 2019 IEEE 5th International Conference on Wireless and Telematics (ICWT)) doi:10.1109/ICWT47785.2019.8978243

Lázaro Pascual, R., R. Sánchez, D., E. Naces, D., & A. Nuñez, W. (9-12 de diciembre de

2015). *IEEE Xplore*. (IEEE, Editor, & 2015 International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and

Control, Environment and Management (HNICEM))

doi:10.1109/HNICEM.2015.7393212

Martinez, B. L. (2012). *Asistencia Tecnica Dirigida en Fertilizacion en el Cultivo de Papa*.

Guia Tecnica, Cajamarca, Peru. Recuperado el 8 de Noviembre de 2021

Mathworks. (2021). *Mathworks*. (The MathWorks, Inc.) Recuperado el 8 de octubre de

2021, de Mathworks: <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>

Medina, B. L. (2012). *Guia Tecnica Dirigida en Fertilizacion en el Cultivo de Papa*. Peru:

Agrobanco. Recuperado el 10 de noviembre de 2021, de

<https://www.agrobanco.com.pe/data/uploads/ctecnica/032-h-papa.pdf>

Mena, D. (8 de Septiembre de 2015). *Wanaleads*. Recuperado el 11 de noviembre de 2021,

de Wanaleads: <https://wanaleads.com/mapas-de-calor-heatmaps-para-optimizar-web/>

Muñoz, M., Sandaña , P., & Orena , S. (28 de abril de 2016). *Manual interactivo de la*

*papa INIA*. Recuperado el 26 de agosto de 2021, de Manual interactivo de la papa

INIA: <http://manualinia.papachile.cl>

O. Flores, K., M. Butaslac, I., M. Gonzales, J. E., G. Dumlao, S. M., & J. Reyes, R. S. (22-

25 de febrero de 2016). *IEEE Xplore*. (IEEE, Editor, & 2016 IEEE Region 10

Conference (TENCON)) doi:10.1109/TENCON.2016.7848600

Ramirez, R. T. (Febrero de 2019). *Researchgate*. doi:10.13140/RG.2.2.30264.80643

- Ryan, V. (2017). *technologystudent*. Recuperado el 25 de septiembre de 2021, de technologystudent: <https://technologystudent.com/pics/picgen1.html>
- Sandoval, K. J. (7 de Marzo de 2016). *Elcampesino.co*. Recuperado el 25 de Marzo de 2021, de Elcampesino.co: <https://elcampesino.co/la-agricultura-colombiana-en-el-contexto-de-la-globalizacion/>
- Sensors, R. (28 de Junio de 2019). *Rechner Sensors*. Recuperado el 8 de Noviembre de 2021, de Rechner Sensors: <https://www.rechner-sensors.com/es/documentacion/knowledge/sensor-capacitivo>
- Smart fertilizer . (12 de febrero de 2020). *Smart fertilizer software*. Obtenido de Smart fertilizer software: <https://www.smart-fertilizer.com/articles/soil-ph/>
- Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. (2001). *Fertilidad de los suelos Diagnostico y control* (Segunda ed.). (F. S. Mojica, Ed.) Bogota, Colombia: EDITORA GUADALUPE LTDA. . Recuperado el 28 de agosto de 2021
- Sparkfun. (2015). *Sparkfun*. Recuperado el 26 de septiembre de 2021, de Sparkfun: [https://www.sparkfun.com/pages/xbee\\_guide](https://www.sparkfun.com/pages/xbee_guide)
- Tecniagricola. (19 de febrero de 2013). *Tecniagricola.es*. Recuperado el 26 de agosto de 2021, de Tecniagricola.es: <https://www.tecnicoagricola.es/la-capacidad-de-campo-de-un-suelo/>
- The MathWorks, I. (2021). *The MathWorks*. Recuperado el 13 de Octubre de 2021, de The MathWorks, Inc.:

<https://la.mathworks.com/help/matlab/interpolation.html#:~:text=La%20interpolaci%C3%B3n%20es%20una%20t%C3%A9cnica,de%20puntos%20de%20datos%20conocidos>.

The MathWorks, I. (2021). *The MathWorks*. Recuperado el 13 de Octubre de 2021, de The MathWorks: <https://la.mathworks.com/help/curvefit/interpolation-methods.html>

The MathWorks, I. (2021). *The MathWorks*. Recuperado el Octubre de 2021, de The MathWorks: [https://la.mathworks.com/help/curvefit/curvefitting-app.html?searchHighlight=curve%20fitting&s\\_tid=srchtitle\\_curve%20fitting\\_1](https://la.mathworks.com/help/curvefit/curvefitting-app.html?searchHighlight=curve%20fitting&s_tid=srchtitle_curve%20fitting_1)

The MathWorks, I. (2021). *The MathWorks*. Recuperado el 8 de Noviembre de 2021, de The MathWorks: <https://la.mathworks.com/discovery/linear-regression.html>

Torres, H. (2002). *Manual de las enfermedades más importantes de la Papa en el Perú*. Manual , Lima,Peru. Recuperado el 9 de Noviembre de 2021

Yara. (2 de febrero de 2018). *Yara*. Recuperado el 26 de agosto de 2010, de Yara: <https://www.yara.com.co/nutricion-vegetal/papa/principios-agronomicos-en-el-cultivo-de-la-papa/>

## **ANEXO I: FICHA TECNICA DEL CULTIVO**

En esta sección se encuentra la hoja técnica del cultivo la cual será entregada al agricultor con los datos obtenidos y las recomendaciones de los mismos.

# Resultado de toma de muestras de Humedad y PH para detectar factores de riesgo en el cultivo

**Fecha:**

**Nombre del agricultor:**

**Cedula:**

**Cuidad de residencia:**

Se realiza un estudio de suelos en donde se tomaron las variables de Humedad y pH del cultivo ubicado en el municipio de Samacá en el sector la cumbre para realizar una detección de que riesgos pueda estar presentando el cultivo, para eso se hace la toma de las variables punto a punto en lugares específicos del terreno. A continuación, se muestran los resultados obtenidos y recomendaciones.

Foto aérea del cultivo donde se muestran los puntos en donde se tomaron las muestras de pH y Humedad

Foto del cultivo estudiado



## Tablas de resultados

Resultados pH tomados en puntos estratégicos del cultivo

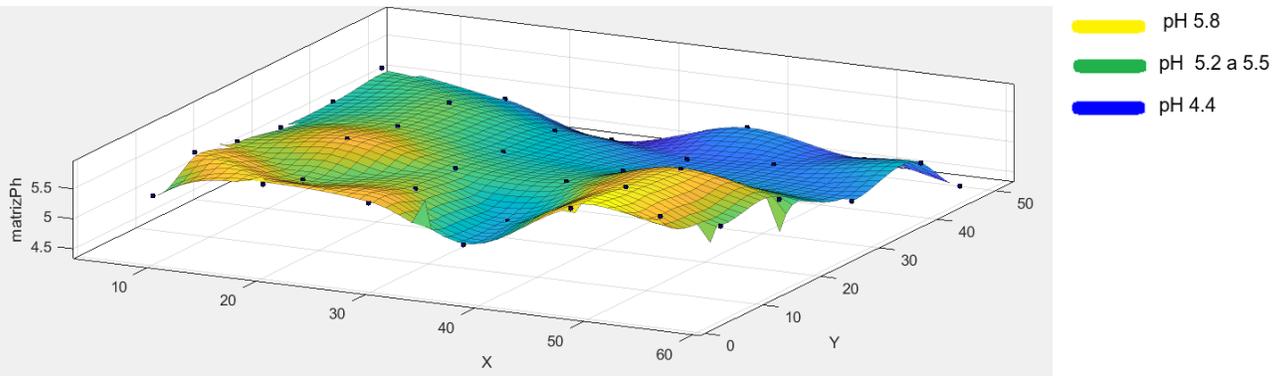
Numero de muestras	Valor de Ph
1	5,88
2	5,87
3	5,09
4	5,62
5	5,75
6	5,4
7	5,33
8	5,82
9	5,05
10	5,44
11	5,41
12	5,7
13	5,37
14	5,71
15	5,31
16	5,35
17	5,66
18	5,45
19	4,93
20	5,01
21	5,07
22	5,18
23	5,41
24	5,23
25	5,12
26	4,83
27	4,8
28	5,05
29	5,35
30	5,21
31	4,4
32	4,54
33	4,87
34	4,41
35	4,92
36	5,27

Resultados Humedad tomados en puntos estratégicos del cultivo

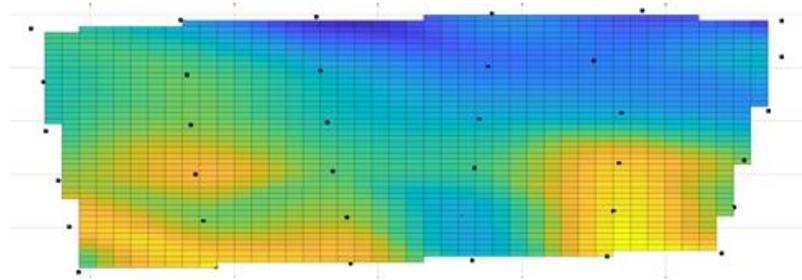
Numero de muestras	Valor de Humedad
1	35,26%
2	37,54%
3	49,20%
4	44,99%
5	47,97%
6	53,55%
7	52,74%
8	47,23%
9	74,80%
10	36,64%
11	58,52%
12	47,83%
13	87,81%
14	33,13%
15	52,74%
16	67,17%
17	87,64%
18	67,17%
19	61,85%
20	53,50%
21	59,12%
22	58,78%
23	33,34%
24	68,21%
25	48,21%
26	54,38%
27	49,01%
28	57,18%
29	61,07%
30	67,70%
31	47%
32	69,81%
33	77,77%
34	35,97%
35	62,48%
36	61,53%

## Visualización espacial

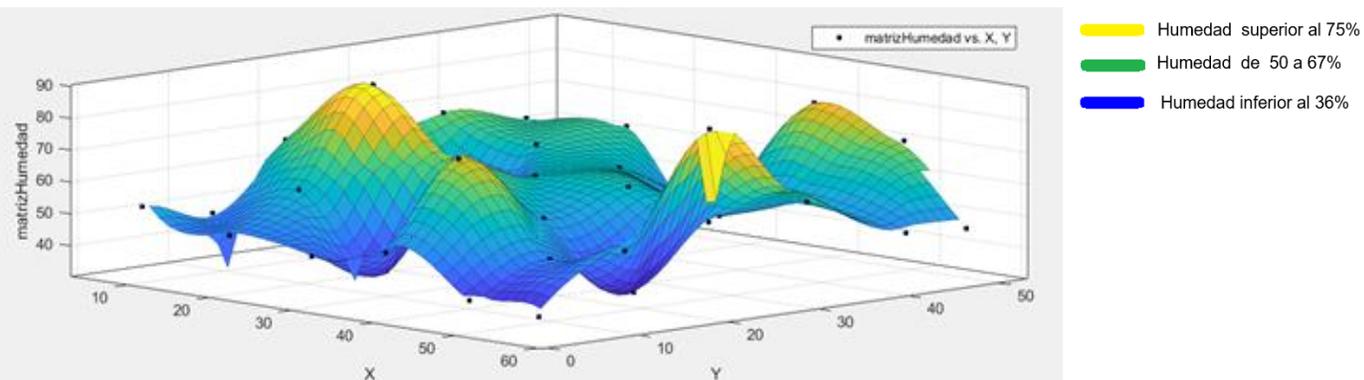
### Resultados pH



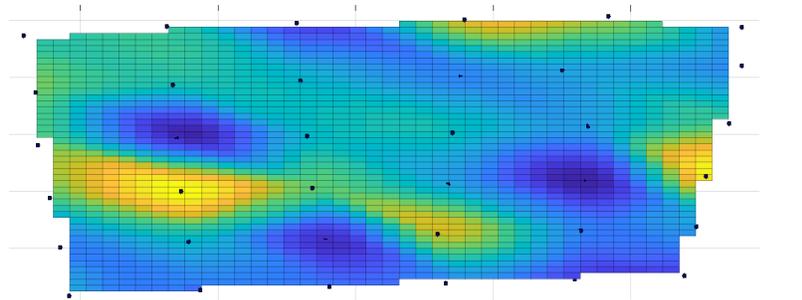
En la gráfica se observa por medio de colores los rangos de pH tomados en los diferentes puntos del cultivo, estos rangos varían de 4.5 pH a 5.5 pH. El color amarillo muestra las zonas del cultivo en



### Resultados Humedad



En la gráfica se observa por medio de colores los rangos de Humedad tomados en los diferentes puntos del cultivo, estos rangos varían de 40% a 87,81% de Humedad. El color amarillo muestra las



## Recomendaciones

- Se le recomienda al agricultor tener cuidado en las zonas donde los rangos de pH son muy bajos (en la gráfica se puede observar de color azul) aplicar carbonato de potasio o cal par poder elevar el nivel de PH requerido por la planta para obtener un buen desarrollo.

- Para el riego del cultivo se le sugiere al agricultor colocar llave registro en el sistema de riego, esto para poder controlar las zonas en donde se necesitan más humedad; también se recomienda realizar la inspección y mantenimiento del sistema de riego ya que hay puntos en los que se presenta fuga. Tener en cuenta que un cultivo de papa requiere de un 70% de humedad para tener un desarrollo optimo, presentando como falencia zonas con baja humedad en la mayoría del terreno.

## ANEXO II: TABLAS DE INSTRUMENTOS APTOS PARA EL PROTOTIPO

**Tabla 6-1:** Tipos de sensores. Fuente: Autores

<b>SENSOR PH</b>				
REFERENCIA	DESCRIPCION	CARACTERISTICAS	PRECIO	WEB TIENDA
Sensor de pH RK500-02	Sensor que permite medir la acidez o alcalinidad de un suelo o una solución. Es de alta precisión, confiabilidad y fácil operación. Usado ampliamente en agricultura, tratamiento de aguas y laboratorios de investigación.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rango de medición: 0-14 pH</li> <li>• Precisión: <math>\pm 0.1</math> pH</li> <li>• Resolución: 0.01 pH</li> <li>• Tiempo de respuesta: &lt;10s (en agua)</li> <li>• Con cable de 2m</li> </ul>	\$ 933,793	<a href="https://www.didacticaelectronicas.com/index.php/sensores/ph/sensor-de-ph-sensores-de-ph-acidez-alkalinidad-rk500-02-rika-electronic-detail">https://www.didacticaelectronicas.com/index.php/sensores/ph/sensor-de-ph-sensores-de-ph-acidez-alkalinidad-rk500-02-rika-electronic-detail</a>
Kit medición de PH - Análogo V2	Kit medidor análogo de pH con mejoras en la precisión de medición. Con conector BNC plug and play que no requiere soldadura, compatible con microcontroladores de 3.3V y 5V. Soporta calibración de dos puntos e identificación automática de soluciones buffer estándar.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Voltaje de alimentación: 3.3~5.5V</li> <li>• Voltaje de salida: 0~3.0V</li> <li>• Exactitud de la medición: <math>\pm 0.1 @ 25C</math></li> <li>• Rango de detección: 0~14</li> <li>• Rango de temperatura: 5~60°C</li> <li>• Punto cero: 7<math>\pm</math>0.5</li> <li>• Resistencia interna: &lt;250M<math>\Omega</math></li> </ul>	\$ 245,140	<a href="https://www.didacticaelectronicas.com/index.php/sensores/ph/kit-medici%C3%B3n-de-ph-an%C3%A1logo-v2-sensor-sensores-medidores-de-ph-sensor-acidez-potencial-de-hidrogeno-dfrobot-detail">https://www.didacticaelectronicas.com/index.php/sensores/ph/kit-medici%C3%B3n-de-ph-an%C3%A1logo-v2-sensor-sensores-medidores-de-ph-sensor-acidez-potencial-de-hidrogeno-dfrobot-detail</a>
Sensor de pH del suelo RK500-22	Sensor con principio de medición electroquímico que permite determinar la acidez o alcalinidad de un suelo. Es de alta precisión, confiabilidad y fácil operación. Usado ampliamente en agricultura, tratamiento de aguas y laboratorios de investigación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rango de medición: 0-14 pH</li> <li>• Precisión: <math>\pm 0.05</math>pH</li> <li>• Resolución: 0.01 pH</li> <li>• Tiempo de respuesta: 30%)</li> <li>• Señal de salida: 4-20mA y RS485 al mismo tiempo</li> <li>• Ciclo de calibración: cada 6 meses</li> <li>• Voltaje de alimentación: 7-30VDC</li> <li>• Con cable de 5m</li> </ul>	\$1,740,970	<a href="https://www.didacticaelectronicas.com/index.php/sensores/ph/sensor-de-ph-del-suelo-rk500-22-sensores-de-ph-acidez-alkalinidad-del-suelo-de-la-tierra-rika-electronic-detail">https://www.didacticaelectronicas.com/index.php/sensores/ph/sensor-de-ph-del-suelo-rk500-22-sensores-de-ph-acidez-alkalinidad-del-suelo-de-la-tierra-rika-electronic-detail</a>

<p>Kit medición de PH - Análogo Versión PRO</p>	<p>Sensor análogo de pH, para aplicaciones de comida y de suelos. Es compatible con Arduino™. Se puede enterrar directamente en material semisólido para medir el pH.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rango de medición: 0PH ~ 10PH</li> <li>• Exactitud: <math>\pm 0.1</math>PH</li> <li>• Temperatura de operación: 5°C ~ 60°C</li> <li>• Longitud del cable: 850mm (Incluyendo el conector BNC)</li> <li>Tarjeta de señal:</li> <li>• Voltaje de entrada: 5V</li> <li>• Exactitud: <math>&lt; \pm 0.2</math>PH (25°C)</li> </ul>	<p>\$552,160</p>	<p><a href="https://www.didacticaelectronicas.com/index.php/sensores/ph/kit-medici%C3%B3n-de-ph-analogo-versi%C3%B3n-pro-sensores-de-ph-ph-sensor-medicion-ph-1-sensor-acidez-potencial-de-hidr%C3%B3geno-ph-dfrobot-detail">https://www.didacticaelectronicas.com/index.php/sensores/ph/kit-medici%C3%B3n-de-ph-analogo-versi%C3%B3n-pro-sensores-de-ph-ph-sensor-medicion-ph-1-sensor-acidez-potencial-de-hidr%C3%B3geno-ph-dfrobot-detail</a></p>
<b>SENSOR HUMEDAD</b>				
<p>Sensor de Humedad de Suelo– Capacitivo</p>	<p>Sensor de humedad de suelo de tipo capacitivo, resistente a la corrosión, compatible con MCUs de 3.3V o 5V</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Voltaje de operación: 3.3 a 5.5V</li> <li>• Salida análoga</li> <li>• Voltaje de salida: 0 a 3 VDC</li> <li>• Interfaz: PH2.0-3P</li> <li>• Dimensión 98x23mm</li> </ul>	<p>\$30,940</p>	<p><a href="https://www.didacticaelectronicas.com/index.php/sensores/humedad/sensor-de-humedad-de-suelo-sensores-de-humedad-del-suelo-de-la-tierra-terreno-soil-capacitivo-dfrobot-detail">https://www.didacticaelectronicas.com/index.php/sensores/humedad/sensor-de-humedad-de-suelo-sensores-de-humedad-del-suelo-de-la-tierra-terreno-soil-capacitivo-dfrobot-detail</a></p>
<p>Sensor de humedad de suelo con sonda</p>	<p>Tarjeta sensora de humedad de suelo con sonda resistente a la corrosión. Compatible con Arduino</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Voltaje de funcionamiento: 3.3-12V</li> <li>• Corriente de funcionamiento: &lt;20mA</li> <li>• Corriente de salida: &lt;30mA</li> </ul>	<p>\$ 23,800</p>	<p><a href="https://www.didacticaelectronicas.com/index.php/sensores/humedad/sensor-de-humedad-de-suelo-con-sonda-sensores-de-humedad-del-suelo-con-sonda-soil-moisture-detail">https://www.didacticaelectronicas.com/index.php/sensores/humedad/sensor-de-humedad-de-suelo-con-sonda-sensores-de-humedad-del-suelo-con-sonda-soil-moisture-detail</a></p>
<p>Sensor de humedad de suelo con ESP32</p>	<p>Módulo sensor de temperatura y humedad de suelo con comunicación WiFi y Bluetooth. Con salida analógica y voltaje de funcionamiento de 5V.</p>	<p>Voltaje de funcionamiento: 5V/1A  Tipo de salida: señal analógica de voltaje  Con chip ESPRESSIF-ESP32 (WiFi y Bluetooth)  Sensor de humedad DHT12  Con conector JST 2 pines de 1.25mm  Con conector USB tipo C  Puede funcionar con batería de litio de 3.7V  Alimentación vía USB</p>	<p>\$ 67,830</p>	<p><a href="https://www.didacticaelectronicas.com/index.php/sensores/humedad/sensor-de-humedad-de-suelo-con-esp32-sensores-de-humedad-de-suelo-de-la-tierra-terreno-esp32-iot-wifi-bluetooth-dht12-dht11-detail">https://www.didacticaelectronicas.com/index.php/sensores/humedad/sensor-de-humedad-de-suelo-con-esp32-sensores-de-humedad-de-suelo-de-la-tierra-terreno-esp32-iot-wifi-bluetooth-dht12-dht11-detail</a></p>

Sensor análogo de humedad del suelo a prueba de agua-Gravity	Sensor análogo capacitivo de humedad del suelo, es impermeable y con alta protección a la corrosión. Compatible con microcontroladores de 3.3V y 5V.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Voltaje de funcionamiento: 3.3 a 5.5VDC</li> <li>• Voltaje de salida: 0-3VDC</li> <li>• Interfaz: 2.54 de 3 pines</li> <li>• Con cable de 1.5m</li> <li>• Compatible con micros de 3.3V (micro: bit, ESP32, STM8/32) y con Raspberry pi (requiere un ADC externo)</li> <li>• Dimensiones: 175x30mm</li> </ul>	\$ 67,711	<a href="https://www.didacticaselectronicas.com/index.php/sensores/humedad/sensor-an%C3%A1logo-de-humedad-del-suelo-a-prueba-de-agua-gravity-sensores-analogos-de-humedad-del-suelo-de-la-tierra-terreno-soil-analogos-capacitivos-dfrobot-detail">https://www.didacticaselectronicas.com/index.php/sensores/humedad/sensor-an%C3%A1logo-de-humedad-del-suelo-a-prueba-de-agua-gravity-sensores-analogos-de-humedad-del-suelo-de-la-tierra-terreno-soil-analogos-capacitivos-dfrobot-detail</a>
--------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

**Tabla 6-2:** Tipos de baterías. Fuente: Autores

<b>BATERÍA</b>				
REFERENCIA	DESCRIPCION	CARACTERISTICAS	PRECIO	WEB TIENDA
Batería sellada 6V 1.2A	Batería recargable de 6V.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Voltaje nominal: 6V</li> <li>• Capacidad nominal: 1.2Ah</li> </ul>	\$ 22,372	<a href="https://www.didacticaselectronicas.com/index.php/baterias-cargadores/recargables-1/6v/bater%C3%ADa-sellada-6v-1-2a-baterias-cuadradas-selladas-secas-de-acido-recargables-secas-de-%C3%A1cido-plomo-6v-detail">https://www.didacticaselectronicas.com/index.php/baterias-cargadores/recargables-1/6v/bater%C3%ADa-sellada-6v-1-2a-baterias-cuadradas-selladas-secas-de-acido-recargables-secas-de-%C3%A1cido-plomo-6v-detail</a>
Batería sellada 4V 4.5A	Batería recargable, diseñada para sistemas de respaldo y uso cíclico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Voltaje nominal: 4V</li> <li>• Corriente máxima de carga: 1.35A</li> <li>• Tipo VRLA (ácido-plomo)</li> </ul>	\$ 22,610	<a href="https://www.didacticaselectronicas.com/index.php/baterias-cargadores/recargables-1/4v/bater%C3%ADa-sellada-4v-4-5a-recargable-baterias-cuadradas-selladas-secas-de-%C3%A1cido-plomo-recargables-selladas-de-4v-detail">https://www.didacticaselectronicas.com/index.php/baterias-cargadores/recargables-1/4v/bater%C3%ADa-sellada-4v-4-5a-recargable-baterias-cuadradas-selladas-secas-de-%C3%A1cido-plomo-recargables-selladas-de-4v-detail</a>

Batería Seca 6V - 4A Sellada Recargable	Estas baterías tienen diversos usos, ya que es conveniente, confiable y tiene una vida útil excepcional y de gran capacidad.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Marca: Fuli Battery</li> <li>• Modelo: FL640</li> <li>• Capacidad: 6V - 4AH / 20HR</li> <li>• Batería Sellada de Plomo - Acido</li> <li>• Recargable</li> <li>• Libre de Mantenimiento</li> </ul>	\$ 29,500	<a href="https://ferretronic.com/products/bateria-seca-6v-4a-sellada-recargable?_pos=39&amp;_sid=199568b11&amp;_ss=r">https://ferretronic.com/products/bateria-seca-6v-4a-sellada-recargable?_pos=39&amp;_sid=199568b11&amp;_ss=r</a>
-----------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

**Tabla 6-3:** Tipos de microcontroladores. Fuente: Autores

MICROCONTROLADOR				
REFERENCIA	DESCRIPCION	CARACTERISTICAS	PRECIO	WEB TIENDA
Microcontrolador Microchip PIC18F4550-I/P	Microcontrolador Microchip de 8 bits de la familia PIC 18F.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 24KB de memoria flash para programación,</li> <li>• RAM de 2KB</li> <li>• EEPROM de 256KB</li> <li>• Velocidad: 48MHz</li> <li>• 35 puertos de entrada/salida,</li> <li>• 13 canales de ADC de 10 bits,</li> <li>• Interfaz: SCI, UART, I2C, USB, SPI</li> <li>• Voltaje de alimentación: 5V</li> <li>• Encapsulado: DIP-40</li> </ul>	\$ 39,389	<a href="https://www.didacticaelectronicas.com/index.php/microcontroladores/microchip/chips-microcontroladores-micros-mcu-pic-18-de-40-pines-pic18f4550-ip-pic18f4550-i-p-dip40-40-dip-40-through-hole-microchip-detail">https://www.didacticaelectronicas.com/index.php/microcontroladores/microchip/chips-microcontroladores-micros-mcu-pic-18-de-40-pines-pic18f4550-ip-pic18f4550-i-p-dip40-40-dip-40-through-hole-microchip-detail</a>
Microcontrolador Microchip PIC18F4523-I/P	Microcontrolador Microchip de 8 bits de la familia PIC 18F.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 32KB de memoria flash para programación</li> <li>• RAM de 1536 B</li> <li>• EEPROM: 256 B</li> <li>• Velocidad: 40 MHz</li> <li>• 36 puertos de entrada/salida</li> <li>• 13 canales de ADC de 12 bits</li> <li>• Interfaz: I<sup>2</sup>C, SPI, UART/USART</li> <li>• Voltaje de alimentación: 4.2V ~ 5.5V</li> <li>• Encapsulado: DIP-40</li> </ul>	\$ 40,222	<a href="https://www.didacticaelectronicas.com/index.php/microcontroladores/microchip/microcontrolador-microchip-pic18f4523-ip-chips-microcontroladores-micros-mcu-pic-18-de-40-pines-pic18f4523-i-p-40dip-40-dip-40-through-hole-microchip-detail">https://www.didacticaelectronicas.com/index.php/microcontroladores/microchip/microcontrolador-microchip-pic18f4523-ip-chips-microcontroladores-micros-mcu-pic-18-de-40-pines-pic18f4523-i-p-40dip-40-dip-40-through-hole-microchip-detail</a>

Microcontrolador Microchip DS PIC30F4011-30I/P	Controlador digital de señales 16 bits 48KB flash de la familia PIC 30F, Encapsulado DIP-40.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 48KB de memoria flash para programación,</li> <li>• RAM de 2KB</li> <li>• EEPROM de 1KB</li> <li>• Velocidad: 30MIPs</li> <li>• 30 puertos de entrada/salida,</li> <li>• 9 canales de ADC de 10 bits,</li> <li>• Interfaz: CAN, UART/USART, I2C, SPI</li> <li>• Voltaje de alimentación: 2.5 ~ 5.5V</li> <li>• Encapsulado: DIP-40</li> </ul>	\$ 37,485	<a href="https://www.didacticaelectronicas.com/index.php/baterias-cargadores/recargables-1/4v/bater%C3%ADa-sellada-4v-4-5a-recargable-baterias-cuadradas-selladas-secas-de-%C3%A1cido-plomo-recargables-selladas-de-4v-detail">https://www.didacticaelectronicas.com/index.php/baterias-cargadores/recargables-1/4v/bater%C3%ADa-sellada-4v-4-5a-recargable-baterias-cuadradas-selladas-secas-de-%C3%A1cido-plomo-recargables-selladas-de-4v-detail</a>
------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

**Tabla 6-4:** Tipos de Arduino. Fuente: Autores

<b>ARDUINO</b>				
REFERENCIA	DESCRIPCION	CARACTERISTICAS	PRECIO	WEB TIENDA
UNO PLUS Arduino™ Compatible	Tarjeta de desarrollo UNO PLUS. Esta tarjeta es una versión basada en la placa Arduino™ UNO R3. Con alguna mejoras la convierten en una solución alternativa.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Microcontrolador: ATMEGA328P-AU.</li> <li>• Voltaje de operación: 5V/3.3V</li> <li>• Contiene switch de bootloader</li> <li>• Conector micro USB</li> <li>• Jack DC de bajo perfil</li> <li>• Contiene header de salida de energía</li> <li>• Salida de 3.3V</li> <li>• Oscilador de cristal</li> <li>• 8 canales ADC</li> <li>• Soporta conexión con protoboard</li> </ul>	\$ 64,260	<a href="https://www.didacticaelectronicas.com/index.php/sistemas-de-desarrollo/compatibles-con-arduino/arduino-compatible/uno-plus-arduino-compatible-tarjetas-de-desarrollo-wave-10205-sistemas-tarjetas-de-desarrollo-arduino-uno-compatible-atmega328p-au-waveshare-detail">https://www.didacticaelectronicas.com/index.php/sistemas-de-desarrollo/compatibles-con-arduino/arduino-compatible/uno-plus-arduino-compatible-tarjetas-de-desarrollo-wave-10205-sistemas-tarjetas-de-desarrollo-arduino-uno-compatible-atmega328p-au-waveshare-detail</a>
Tarjeta compatible Mega 2560 Rev. 3	Tarjeta de desarrollo compatible con Mega basada en el microcontrolador ATmega2560.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Voltaje de alimentación: 7 a 12V</li> <li>• Microcontrolador tipo SMD</li> <li>• Con cristal oscilador y memoria flash</li> <li>• Contiene entradas y salidas digitales (incluye salidas PWM)</li> <li>• Con entradas análogas y puertos seriales</li> </ul>	\$ 77,112	<a href="https://www.didacticaelectronicas.com/index.php/sistemas-de-desarrollo/compatibles-con-arduino/arduino-compatible/tarjeta-compatible-arduino-mega-2560-rev-3-coma0067-sistemas-tarjetas-de-desarrollo-arduino-compatible-">https://www.didacticaelectronicas.com/index.php/sistemas-de-desarrollo/compatibles-con-arduino/arduino-compatible/tarjeta-compatible-arduino-mega-2560-rev-3-coma0067-sistemas-tarjetas-de-desarrollo-arduino-compatible-</a>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Con conector USB tipo B</li> <li>• Contiene driver CH340 y cable USB tipo B</li> </ul>		<a href="https://www.didacticaelectronicas.com/index.php/comunicaciones/bluetooth/tarjeta-con-bluetooth-3-0-tarjetas-con-modulos-bluetooth-de-comunicacion-comunicaciones-bluetooth-con-modo-esclavo-jdy31-jdy-3-hc-05-hc-06-hc05-hc06-detail">mega-compatible-atmega2560-detail</a>
--	--	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

**Tabla 6-5:** Tipos de bluetooth. Fuente: Autores

MODULO BLUETOOTH				
REFERENCIA	DESCRIPCION	CARACTERISTICAS	PRECIO	WEB TIENDA
Tarjeta con Bluetooth 3.0	Tarjeta PCB con Bluetooth con frecuencia de 2.4GHz, transmisión de hasta 30m y voltaje de funcionamiento de 3.3V. Funciona como esclavo. Compatible con Windows y Linux, para transmisión de datos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Banda de frecuencia de funcionamiento: 2.4 GHz</li> <li>• Interfaz de comunicación: UART</li> <li>• Voltaje de funcionamiento: 1.8-3.6 V (3.3V recomendado)</li> <li>• Potencia de transmisión: 8db (máx.)</li> <li>• Distancia de transmisión máxima: de hasta 30 metros</li> <li>• Sensibilidad de recepción: -97dbm</li> <li>• Temperatura de funcionamiento: -40 ~ 80 grados</li> </ul>	\$ 64,260	<a href="https://www.didacticaelectronicas.com/index.php/comunicaciones/bluetooth/tarjeta-con-bluetooth-3-0-tarjetas-con-modulos-bluetooth-de-comunicacion-comunicaciones-bluetooth-con-modo-esclavo-jdy31-jdy-3-hc-05-hc-06-hc05-hc06-detail">https://www.didacticaelectronicas.com/index.php/comunicaciones/bluetooth/tarjeta-con-bluetooth-3-0-tarjetas-con-modulos-bluetooth-de-comunicacion-comunicaciones-bluetooth-con-modo-esclavo-jdy31-jdy-3-hc-05-hc-06-hc05-hc06-detail</a>
Tarjeta WiFi, Bluetooth GPS, LoRa LILYGO TTGO t-Beam - Versión 1.1	Módulo de desarrollo IoT inalámbrico con comunicación WiFi, Bluetooth, GPS y LoRa. Con soporte para batería 18650 y antena. Versión 1.1	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Módulos GPS NEO-6M, fuente de alimentación de 3 V-5 V</li> <li>•Módulo con antena de cerámica</li> <li>•Guarda los datos de los parámetros de configuración</li> <li>•Con indicador de señal LED</li> <li>•Velocidad de envío predeterminada: 9600</li> </ul>	\$ 134,470	<a href="https://www.didacticaelectronicas.com/index.php/comunicaciones/bluetooth/tarjeta-wifi-bluetooth-gps-lora-lilygo-ttgo-t-beam-tarjetas-modulos-de-desarrollo-inal%C3%A1mbrico-con-de-wifi-bluetooth-esp32-lora-915mhz-t-beam-lilygo-ttgo-18650-iot-gps-neo-6m-detail">https://www.didacticaelectronicas.com/index.php/comunicaciones/bluetooth/tarjeta-wifi-bluetooth-gps-lora-lilygo-ttgo-t-beam-tarjetas-modulos-de-desarrollo-inal%C3%A1mbrico-con-de-wifi-bluetooth-esp32-lora-915mhz-t-beam-lilygo-ttgo-18650-iot-gps-neo-6m-detail</a>

**Tabla 6-6:** Tipos de XBee. Fuente: Autores

MODULO XBEE				
REFERENCIA	DESCRIPCION	CARACTERISTICAS	PRECIO	WEB TIENDA
Módulo XBee ZB S2C-Con antena	Módulo de comunicación ZigBee-Pro ZB con antena, compatible pin a pin con las versiones anteriores. Con mejoras en los rangos de comunicación, poder de transmisión y sensibilidad de recepción. El cambio más relevante está en su firmware que reúne todos los seis firmwares.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Microprocesador Ember EM357</li> <li>• Con antena tipo cable</li> <li>• Frecuencia: 2.4GHz</li> <li>• Rango Indoor/Urbana: hasta 200ft (60m)</li> <li>• Sensibilidad: -102dBm</li> <li>• Corriente de recepción: 31mA</li> <li>• Corriente de transmisión: 45mA</li> <li>• Voltaje de alimentación: 2.1V ~ 3.6V</li> </ul>	\$ 168,266	<a href="https://www.didacaselectronicas.com/index.php/comunicaciones/zigbee/modulos/m%C3%B3dulo-xbee-zb-s2c-modulos-tarjetas-zigbee-xbee-zb-s2c-serie-s2c-inal%C3%A1mbricos-wireless-con-antena-digi-detail">https://www.didacaselectronicas.com/index.php/comunicaciones/zigbee/modulos/m%C3%B3dulo-xbee-zb-s2c-modulos-tarjetas-zigbee-xbee-zb-s2c-serie-s2c-inal%C3%A1mbricos-wireless-con-antena-digi-detail</a>
XBee Pro Serie2B programable	Módulo de comunicación ZigBee-Pro S2B de 2.4Ghz, 250 Kbps, que cumple con el estándar IEEE 802.15.4 con un alcance de 90m en interiores (edificios de oficinas) y 1500m en exteriores (con línea de vista), con antena tipo Cable.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Frecuencia: 2.4Ghz</li> <li>• Antena: tipo cable</li> <li>• Sensibilidad: -102dBm</li> <li>• Potencia de transmisión: 63mW (+18 dBm)</li> <li>• Voltaje de operación: 2.7V - 3,6V</li> </ul>	\$ 168,980	<a href="https://www.didacaselectronicas.com/index.php/comunicaciones/zigbee/modulos/xbee-pro-serie2b-programable-modulos-tarjetas-zigbee-xbee-pro-serie2b-serie-2b-inal%C3%A1mbricos-wireless-digi-detail">https://www.didacaselectronicas.com/index.php/comunicaciones/zigbee/modulos/xbee-pro-serie2b-programable-modulos-tarjetas-zigbee-xbee-pro-serie2b-serie-2b-inal%C3%A1mbricos-wireless-digi-detail</a>
Módulo XBee 2.4Ghz Serie1	Módulo de comunicación ZigBee de 2.4GHz, 250 Kbps, 256000 BAUD, que cumple con el estándar IEEE 802.15.4 con un alcance de 30m en interiores (edificios de oficinas) y 100m en exteriores (con línea de vista).	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Antena: cable</li> <li>• Sensibilidad: -92dBm</li> <li>• Potencia de transmisión: 1mW (+0 dBm)</li> <li>• Voltaje de operación: 2,8V - 3,4V</li> </ul>	\$ 133,280	<a href="https://www.didacaselectronicas.com/index.php/comunicaciones/zigbee/modulos/modulo-xbee-24ghz-serie1-modulos-tarjetas-zigbee-xbee-serie1-inal%C3%A1mbricos-wireless-digi-detail">https://www.didacaselectronicas.com/index.php/comunicaciones/zigbee/modulos/modulo-xbee-24ghz-serie1-modulos-tarjetas-zigbee-xbee-serie1-inal%C3%A1mbricos-wireless-digi-detail</a>

**Tabla 6-7:** Tipos de cable serial. Fuente: Autores

<b>Cable serial</b>				
REFERENCIA	DESCRIPCION	CARACTERISTICAS	PRECIO	WEB TIENDA
Cable USB tipo C a TTL serial 5V/3.3V	Cable conversor USB tipo C a TTL, con chip FTDI FT232R, Está diseñado para operar con una potencia de 5V y entrada lógica de 3.3V (5V compatible).	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conector USB tipo C</li> <li>• Conector de 6 pines</li> <li>• Longitud del cable: 1m, 28AWG</li> <li>• La salida de señal de datos es de 3V y la línea de alimentación de 5V</li> <li>• Cableado: Negro: GND, Café: CTS, Rojo: 5V/500mA, Naranja: TXD nivel lógico 3V, Amarillo: RXD nivel lógico 3V, Verde: RTS</li> </ul>	\$ 57,120	<a href="https://www.didac ticaselectronicas.com/index.php/cables/conversor-usb/cable-usb-tipo-c-a-ttl-serial-5v-3-3v-cables-conversores-convertidores-de-ft232-usb-a-serial-uart-usb-tipo-c-tipo-c-a-uart-usb-a-ttl-5v-detail">https://www.didac ticaselectronicas.com/index.php/cables/conversor-usb/cable-usb-tipo-c-a-ttl-serial-5v-3-3v-cables-conversores-convertidores-de-ft232-usb-a-serial-uart-usb-tipo-c-tipo-c-a-uart-usb-a-ttl-5v-detail</a>
Cable serial USB	Convertidor USB a TTL, permite hacer conexiones entre un computador y sus sistemas embebidos por comunicación UART	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Soporta velocidad de transmisión desde 75-128000bps</li> <li>• Sistemas operativos Linux, Mac OS, Windows CE y Windows (XP, Vista Win 7 inc 64 Bit Edition)</li> <li>• 4 cables de conexión y puerto USB</li> <li>• Cable Rojo: VCC, (+5V)</li> <li>• Cable Negro: GND</li> <li>• Cable Verde: TXD</li> <li>• Alambre Blanco: RXD</li> <li>• Longitud: Aprox 1M</li> </ul>	\$ 8,806	<a href="https://www.didac ticaselectronicas.com/index.php/cables/conversor-usb/cable-serial-usb-usb-a-serial-usb-a-uart-cables-conversores-convertidores-de-usb-a-serial-uart-ttl-detail">https://www.didac ticaselectronicas.com/index.php/cables/conversor-usb/cable-serial-usb-usb-a-serial-usb-a-uart-cables-conversores-convertidores-de-usb-a-serial-uart-ttl-detail</a>

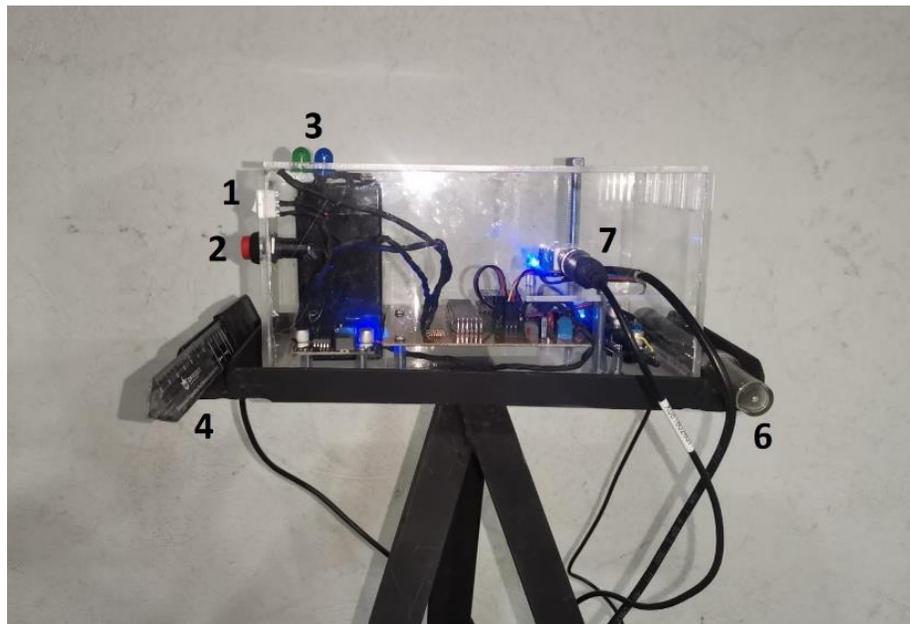
**Tabla 6-8:** Portátiles. Fuente: Autores

<b>Computador</b>			
<b>REFERENCIA</b>	<b>DESCRIPCION</b>	<b>CARACTERISTICAS</b>	<b>PRECIO</b>
Laptop hp Pavilion 15-cw0008la	Laptop con procesador AMD Ryzen 5 2500U with Radeon Vega Mobile Gfx 2.00 GHz	<ul style="list-style-type: none"> <li>• RAM instalada: 12,0 GB (10,9 GB utilizable)</li> <li>• Tipo de sistema : Sistema operativo de 64 bits, procesador x64</li> <li>• Edición Windows 10 Home Single Language</li> <li>• Versión 20H2</li> </ul>	\$ 2,500,000
MateBook D 15	Laptop con procesador AMD Ryzen 7 3700U with Radeon Vega Mobile Gfx 2.30 GHz	<ul style="list-style-type: none"> <li>• RAM instalada: 8,0 GB (6,94 GB utilizable)</li> <li>• Tipo de sistema: Sistema operativo de 64 bits, procesador x64</li> <li>• Edición Windows 10 Home Single Language</li> <li>• Versión 20H2</li> </ul>	\$ 3,200,000

### ANEXO III: MANUAL DE USUARIO

Pates del prototipo

1. Switch ON/OFF.
2. Pulsador.
3. Luces indicadoras.
4. Sensor Humedad.
5. Base metálica (soporte del prototipo).
6. Sensor pH.
7. Salida sensores.



### Elementos del prototipo

1. Batería.
2. Luces indicadoras, led verde: prototipo encendido y led azul: envío de información.
3. Microcontrolador PIC.
4. Modulo XBee.
5. Reguladores de voltaje.
6. Tarjeta transmisión sensor pH.
7. Conector BNC sensor PH.

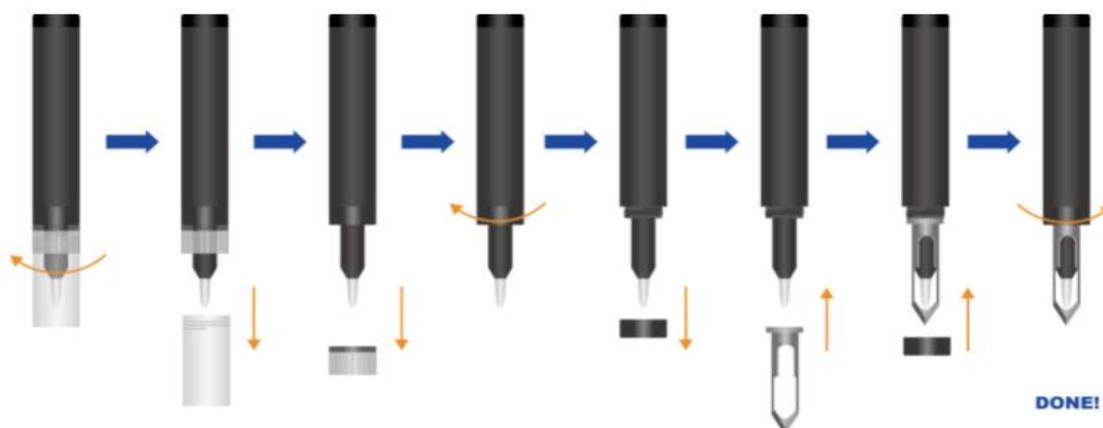


### Instrucciones para tomar las muestras en el cultivo

Al momento de manipular el prototipo se deben tener en cuenta algunas instrucciones para no dañarlo y realizar la toma de muestras correctamente.

1. Primero se debe tener en cuenta que la batería esté conectada al circuito, y así encender el prototipo, el botón de encendido es de color blanco y se encuentra en una parte lateral de la caja del prototipo. Al oprimir el switch de inmediato una luz indicará que el prototipo estará listo para la toma de las muestras.
2. Antes de conectar el sensor de pH se debe quitar el protector e instalar la punta de lanza para proteger la sonda de vidrio al momento de meter el sensor en la tierra. Primero, se debe desenroscar la botella de la solución protectora y sacar la tapa superior con la almohadilla de goma. Después de esto desatornille el anillo fijo e inserte con cuidado el protector de la punta de la lanza en la sonda. Finalmente, vuelva a atornillar el anillo fijo a la sonda para sujetar la punta de lanza. Así como se muestra en la figura.

Figura: Paso a paso de como colocar la punta de lanza. Fuente: (DFROBOT, 2021)



Luego de esto con agua destilada limpie la sonda y séquela con papel filtro, esto se hace para eliminar residuos y no alterar las mediciones que se van a tomar.

Conecte la sonda a la placa de transmisión de señal y déjela reposar en la base metálica que sostiene el prototipo.

3. El sensor de humedad ya viene conectado internamente al circuito, solamente sáquelo del empaque, límpielo con agua destilada y séquelo con papel filtro para eliminar residuos. Luego de esto déjelo reposar en la base metálica.

4. Se debe calibrar el sensor de pH siempre antes de ser utilizado para la toma de muestras, para esto primeramente coloque la sonda en la solución estándar de 7 pH y pulse el botón para tomar la muestra, este valor arrojado se debe restar con el valor de 7,00 y el resultado será el margen de error. Este valor será nuestro offset que se tendrá en cuenta al momento de realizar la conversión análoga digital en el software de Matlab.

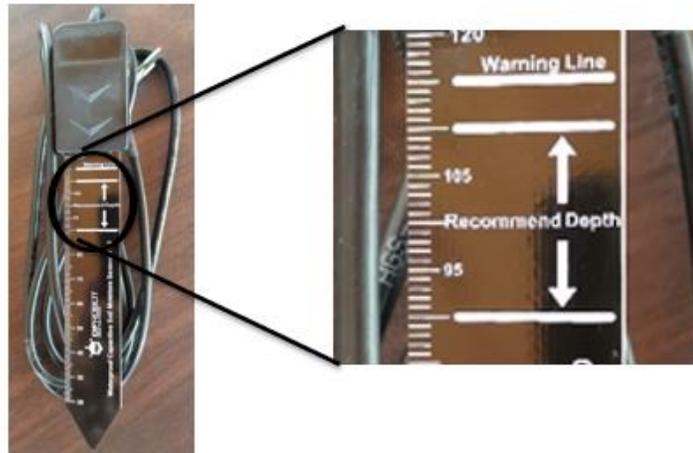
Después de realizar la toma saque la sonda y límpiela nuevamente con agua destilada y séquela con papel filtro, luego coloque la sonda en la solución estándar de 4 pH pulse el botón y ajuste el potenciómetro en la placa del transmisor de señal para ajustar la ganancia hasta que el valor impreso sea estable alrededor de 4,00, limpie la sonda con agua destilada y séquela con papel filtro para eliminar residuos. Después de realizar este proceso el sensor de pH ya está listo para hacer la toma de las variables reales en el cultivo.

5. El paso siguiente es introducir los sensores en el punto del cultivo para tomar las variables de pH y Humedad, tenga en cuenta que para que el sensor de pH obtenga una

buena lectura la zona donde se meterá este sensor debe estar húmeda y libre de material duro o afilado, en caso de que la tierra este seca moje el suelo con un poco de agua pura o destilada antes de hacer la medición.

El sensor de Humedad debe ser introducido hasta la línea de warning como se muestra en la figura

Figura: Warning line. Fuente: Autores



(Recuerde que después de cada toma de muestras deben limpiar los sensores con agua destilada y secarlos con papel filtro, esto para no alterar las siguientes muestras que serán tomadas a lo largo del terreno)

6. Para realizar la toma de las variables en los diferentes puntos del terreno primero asegúrese que los sensores estén correctamente introducidos en el suelo, luego pulse el botón que se encuentra en la parte lateral de la caja del prototipo y espere hasta que el led azul encienda cuando el led parpadee dos veces significa que los valores tomados ya fueron enviados al computador.

7. Al finalizar de tomar las muestras a lo largo del cultivo apague el prototipo y desconecte los sensores.

Para el sensor de pH se debe lavar la sonda, secar muy bien y enroscar nuevamente la tapa protectora para su próximo uso. El sensor de humedad también se debe limpiar y guardar en su empaque.

## ANEXO IV: PSEUDOCÓDIGO MATLAB

INICIO

1. Inicio de variables: offsetPH= 0.73;
2. Entrada: M matriz de datos;
3. Extracción de información de pH y Humedad desde M(i,4)  $\leftarrow$  N;
4. Conversión N;
5. Separa N en dos vectores  $\Rightarrow$  "MatrizpH";  
 $\Rightarrow$  "MatrizHumedad";
6. Conversión de valores:  $5 * \text{MatrizHumedad} / 1023 <- (-36.043 * \text{humedad}) + 100.82 \Rightarrow H$   
 $5 * \text{MatrizpH} / 1023 <- (3.5 * \text{pH}) + \text{offsetPH} \Rightarrow P$ ;
7. Guardar las matrices: P <- H;
8. Importar imagen aérea del cultivo en RGB  $\Rightarrow$  image;
9. Referenciar en la imagen los puntos medidos n: readPoints (image, n)  $\Rightarrow$  I;
10. Conversión de pixeles a metros
11. Creaciones matrices "X" y "Y" con los valores de posición en metros;
12. Calcular el mapa de humedad: cftool(X,Y,H); //Curve fitting tool.
13. Calcular el mapa de pH: cftool(X,Y,P); //Curve fitting tool.
14. Visualización mapas: "P", "H";

FIN