

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN DISPOSITIVO PORTÁTIL PARA EL
CONTROL DE HUMEDAD EN CULTIVO DE MAÍZ FERTIRRIGADO BAJO EL
INVERNADERO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS DE LA
UNIVERSIDAD DE NARIÑO**

**ROMER ORLANDO PANTOJA CUASQUEN
LUIS ALBERTO BURBANO PANTOJA**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
SAN JUAN DE PASTO
2013**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN DISPOSITIVO PORTÁTIL PARA EL
CONTROL DE HUMEDAD EN CULTIVO DE MAÍZ FERTIRRIGADO BAJO EL
INVERNADERO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS DE LA
UNIVERSIDAD DE NARIÑO**

**ROMER ORLANDO PANTOJA CUASQUEN
LUIS ALBERTO BURBANO PANTOJA**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Electrónico**

**DIRECTOR
M.SC. DARIO FERNANDO FAJARDO FAJARDO
INGENIERO ELECTRONICO**

**CODIRECTOR
Ph.D HUGO RUIZ ERASO
INGENIERO AGRÓNOMO**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
SAN JUAN DE PASTO
2013**

NOTA DE RESPONSABILIDAD

"La Universidad de Nariño no se hace responsable por las opiniones o resultados obtenidos en el presente trabajo y para su publicación prima las normas sobre el derecho de autor ".

Acuerdo 1. Artículo 324. Octubre 11 de 1966, emanado del honorable consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

Nota de aceptación

Presidente de Tesis

Jurado 1

Jurado 2

San Juan de Pasto, Octubre del 2013

AGRADECIMIENTOS

Los autores manifiestan sus especiales agradecimientos a:

Departamento de Ingeniería Electrónica, Por su compromiso con la enseñanza académica y personal de sus estudiantes, a sus Docentes por compartir sus conocimientos, pieza fundamental en la formación profesional.

Ph.D. Hugo Ruiz Eraso, Ingeniero Agrónomo, Director Departamento de producción y sanidad vegetal, Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad de Nariño, Por su confianza, apoyo incondicional, su dedicación y tiempo durante la ejecución del proyecto.

Grupo de Investigación de cultivos andinos de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad de Nariño, por el apoyo suministrado en el desarrollo del proyecto.

M.Sc. Dario Fernando Fajardo Fajardo, Ingeniero Electrónico, Director del programa de Ingeniería Electrónica de la Universidad de Nariño, por su orientación, Confianza y apoyo.

Álvaro José Cebellion Bastidas, Ingeniero Electrónico, Encargado del Laboratorio de Electrónica de la Universidad de Nariño, por su colaboración y disponibilidad.

Roberto García, Encargado del laboratorio de hidráulica de la Universidad de Nariño, por su colaboración y disponibilidad.

Dedicado a Dios por ser el guía de todas nuestras metas, a mi familia por su amor, animo e incondicional apoyo, a mi novia por su compañía en momentos de dificultad
Romer Pantoja

Dedicado a Dios por evitar que me aleje de su lado, a la memoria de mis abuelitos quienes fueron una compañía divina y con todo mi amor a mi madre, mi tía y mis hermanas que me han apoyado incondicionalmente a lo largo de este arduo camino.

Luis Alberto Burbano

RESUMEN

Los frecuentes cambios de temperatura y la reducción en la precipitación de lluvia a las que se ha visto sometida la superficie de la tierra por consecuencia del calentamiento global, ha generado gran disminución en la humedad del suelo provocando pérdidas al Sector agricultor del Departamento de Nariño; El uso de tecnología dentro de un cultivo que permita controlar la variable de humedad por medio de la utilización de riegos, es la clave para obtener un buen desarrollo y posteriores productos de buena calidad, que se verán reflejados en la economía del agricultor nariñense.

Buscado una disminución en el deterioro del medio ambiente, contribuir con el desarrollo integral del Departamento de Nariño y ayudar con las investigaciones de las Facultades de Ingeniería Electrónica y Ingeniería Agronomía de la Universidad de Nariño, se da a conocer por medio de este documento la implementación de un dispositivo portátil capaz de medir y controlar los cambios de humedad que se encuentran en el suelo, a través de las diferentes etapas de desarrollo de un cultivo de maíz bajo invernadero, con la capacidad de regar la cantidad de agua necesaria según el cultivo lo requería evitando su desperdicio. De esta manera contribuir con tecnología de alto impacto a bajo costo, así como un ahorro de agua como aporte al medio ambiente y en especial en sitios donde este líquido es escaso.

Para determinar el método de diseño del Dispositivo se realizaron diferentes ensayos, que permitieron determinar características principales en el desarrollo de los sensores, tales como: Fuente de alimentación, estructura geométrica y calibración. De igual manera, permitieron establecer los elementos que conforman el dispositivo, como, Filtros, Acoples de señales eléctricas, Micro controladores y Circuitos de Potencia, que garanticen un correcto funcionamiento dentro del invernadero.

ABSTRACT

The frequent changes of temperature and the reduction in the rainfall of rain to that the surface of the land has met submitted for consequence of the global warming, it has generated great decrease in the dampness of the soil provoking losses the Sector farmer of Nariño's Department; The use of technology inside a culture that allows to control the variable of dampness by means of the utilization of irrigations, is the key to obtain a good development and later products of good quality, which will meet reflected in the economy of the nariñense farmer.

Wanted a decrease in the deterioration of the environment, contribute to the development of the Department of Nariño and help with the research of the Faculty of Engineering Electrical Engineering and Agronomy, University of Nariño, is disclosed herein through implementation a portable device capable of measuring and controlling changes of moisture in the soil, through different stages of development of a crop of corn under greenhouse water capacity the amount of water required depending on the crop as required avoiding wastage. In this way technology contribute high impact at low cost and water savings as a contribution to the environment and especially in places where the fluid is low.

To determine the method of design of the Device there were realized different tests, which allowed to determine principal characteristics in the development of the sensors, such as: Feeding source, geometric structure and calibration. Of equal way, they allowed to establish the elements that shape the device, since, Filters, Connect of electrical signs, Mike controllers and Circuits of Power, which guarantee a correct functioning inside the greenhouse.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION	18
1. OBJETIVOS	22
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	22
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	22
2. MARCO TEÓRICO	23
2.1 Importancia del agua en las plantas	23
2.2 El riego pieza fundamental de la agricultura.....	23
2.3 El riego agrícola.....	24
2.4 Evolución de la agricultura.....	25
2.5 Sistemas de riego en la agricultura.....	25
2.6 Relación entre Suelo- Agua-Planta	26
2.7 Principios sobre la relación entre suelo-agua	27
2.7.1 Composición del suelo	27
2.7.2 Textura del suelo.....	28
2.7.3 Estructura del suelo.....	29
2.7.4 Humedad del suelo	30

2.7.5	Tensión de humedad del agua del suelo.....	32
2.7.6	Curvas de retención de humedad	32
2.7.7	Disponibilidad de agua en las plantas	34
2.8	Movimiento de nutrientes del suelo a la raíz.....	35
2.9	Nutrientes y el Cultivo de Maíz	36
2.10	Medición de la humedad del suelo	35
3.	METODOLOGÍA.....	37
3.1	FASE I: REVISIÓN Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO	37
3.2	FASE II: SELECCIÓN DEL TIPO DE SUELO A UTILIZAR EN EL PROYECTO	37
3.2.1	Selección del tipo de suelo a utilizar	38
3.2.2	Tamizaje del suelo	38
3.2.3	Curva característica de retención de humedad.....	38
3.3	FASE III: MEDIDA DEL GRADO DE HUMEDAD	40
3.3.1	Diseño y desarrollo de sensores de humedad	40
3.3.2	Calibración sensor de humedad diseñado	61
3.3.3	Diseño e implementación de las unidades internas del dispositivo	67
3.4	FASE IV: IMPLEMENTACION Y EVALUACION DEL EQUIPO	98

3.4.1	Implementación Etapas de riego	99
3.4.2	Evaluación Etapas de riego.....	105
4.	RESULTADOS	118
5.	RECOMENDACIONES.....	121
6.	CONCLUSIONES.....	122

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Componentes del balance d agua en el suelo	26
Figura 2. Contenido volumétrico de los cuatro componentes principales del suelo considerado ideal para el crecimiento de las plantas.....	27
Figura 3. Triángulo de textura: composición mecánica del suelo.....	29
Figura 4. Clases de estructuras de suelos.....	30
Figura 5. Clasificación del agua en el suelo.....	31
Figura 6. Curvas de retención de humedad para los tres tipos de suelos primordiales.	33
Figura 7. Membranas de presión comúnmente utilizadas poara determinar la curva de retención de humedad para los diferentes tipos de suelos	33
Figura 8. La raíz y sus partes.....	34
Figura 9. Mesa de tensión y ollas de Richards del laboratorio especializado de suelos	39
Figura 10. Curva de retención de humedad.....	40
Figura 11. Molde del sensor de yeso higroscópico	41
Figura 12. Sensor de yeso Higroscópico Terminado	42
Figura 13. Circuito para adquisición de datos sensor de yeso.....	43
Figura 14. Grafica de respuesta de los sensores de yeso a la pérdida de humedad en arena con fuente DC.....	45
Figura 15. Efecto de electrolisis en el sensor de yeso	45
Figura 16. Grafica de respuesta de los sensores de yeso a la pérdida de humedad en suelo con oscilador	47
Figura 17. Grafica de pérdida de humedad del suelo en el segundo ensayo	48
Figura 18. Grafica de respuesta de los sensores de yeso a la pérdida de humedad en suelo con fuente AC.....	49
Figura 19. Grafica de pérdida de humedad del suelo en el tercer ensayo.....	50
Figura 20. Fotografía Láminas de cobre unidas e introducidas en el molde de icopor	51
Figura 21. Molde Final introducido en tubo de pvc de 12 mm	52
Figura 22. Sensor de láminas descubiertas retirado del tubo de pvc.....	52

Figura 23. Sensor de láminas descubiertas de cobre	52
Figura 24. Grafica de respuesta de los sensores de láminas descubiertas de cobre a la pérdida de humedad en suelo con fuente AC	53
Figura 25. Grafica de pérdida de humedad ensayo sensores de láminas descubiertas de cobre.....	54
Figura 26. Grafica de respuesta de los sensores con variación en las láminas descubiertas a la pérdida de humedad en suelo con fuentes AC	56
Figura 27. Grafica de respuesta de los sensores con variación en las láminas descubiertas a la pérdida de humedad en suelo con fuentes AC	57
Figura 28. Caja de lámina de acero diseñada como molde del sensor de bronce.	59
Figura 29. Varilla de bronce unida al cable de cobre	60
Figura 30. Sensor de varillas de bronce descubiertas terminado	60
Figura 31. Varillas de acero introducidas en el molde externo	61
Figura 32. Sensor de varillas de acero terminado.....	61
Figura 33. Curva característica de retención de humedad con ajuste exponencial decreciente	62
Figura 34. Circuito Utilizado en la medida del Voltaje.....	64
Figura 35. Transferpipeta de Alta precisión	64
Figura 36. Curva de respuesta de los sensores dependiendo de la humedad volumétrica.....	65
Figura 37. Curva de respuesta de humedad de los sensores diseñados	66
Figura 38. Curva de respuesta de humedad de los sensores diseñados con ajuste polynomial de grado 3.....	66
Figura 39. Diagrama de bloques del dispositivo	67
Figura 40. Oscilador de puente de Wien.....	69
Figura 41. Realimentación positiva del oscilador de Wien.....	69
Figura 42. Señal Sinusoidal a partir del Oscilador de puente de Wien	70
Figura 43. Circuito seguidor de voltaje para acople con sensor	71
Figura 44. Proceso de rectificación de media onda	71
Figura 45. Circuito rectificador de media onda con filtro	72
Figura 46. Unidad de Sensado Diseñada	72
Figura 47. Esquema de pines del Microcontrolador 18F4550.....	73

Figura 48. Esquema de conexión DS1307	74
Figura 49. sistema de control e interfaz de Usuario diseñado	76
Figura 50. Diagrama de Flujo Unidad de procesamiento y control	77
Figura 51. Esquema de terminales tarjeta de memoria Micro SD.....	80
Figura 52. Socket para Micro SD	81
Figura 53. Diagrama de conexiones de la Unidad implementada para el Guardado de Datos	82
Figura 54. Diagrama de flujo Unidad de guardado de datos.....	83
Figura 55. Unidad de procesamiento, control y guardado de datos diseñada	84
Figura 56. Unidad de Actuadores Electroválvulas diseñado	86
Figura 57. Unidad de Actuadores Electrobombas diseñado	87
Figura 58. Diagrama de bloques de una fuente regulada	88
Figura 59. Fuente de alimentación eléctrica diseñada.....	89
Figura 60. Implementación de las Unidades	90
Figura 61. Unidad de sensado implementada	91
Figura 62. Unidad de sensado terminada	91
Figura 63. Unidad de procesamiento, control y guardado de datos implementada.....	92
Figura 64. Unidad de Procesamiento, Control y guardado de datos Terminada ...	92
Figura 65. Unidad de Actuadores Electroválvulas implementada	93
Figura 66. Unidad de Actuadores Electrobombas terminada.....	93
Figura 67. Unidad de alimentación eléctrica implementada.....	94
Figura 68. Unidad de Alimentación Eléctrica terminada	94
Figura 69. Parte de atrás de la carcasa	95
Figura 70. Parte delantera de la carcasa	96
Figura 71. Dispositivo de control de humedad terminado	96
Figura 72. Fuente de Alimentación eléctrica Dual terminada.....	97
Figura 73. Fuente de Alimentación 24 VAC terminada	97
Figura 74. Diagrama de bloques de la implementación de los 3 sistemas de riego a utilizar en la evaluación del Dispositivo.....	99
Figura 75. Instalación del suministro de agua de riego.....	100
Figura 76. Instalación del suministro de fertilizante	100

Figura 77. Mangueras de suministro de agua y fertilizante instaladas.....	101
Figura 78. Gotero de precisión.....	101
Figura 79. Ubicación del sensor en el macetero	101
Figura 80. Dispositivo listo para el control de humedad.....	102
Figura 81. Etapa de tensiómetros	103
Figura 82. Etapa de peso.....	104
Figura 83. Curva de control de humedad primera semana.....	106
Figura 84. Curva de control de humedad primer mes de evaluación.....	108
Figura 85. Curva de control de humedad final bloque 1	109
Figura 86. Curva de control de humedad final bloque 2	110
Figura 87. Curva final de control de humedad Dispositivo.....	110
Figura 88. Curva de control de humedad tensiómetro 1	112
Figura 89. Curva de control de humedad tensiómetro 2	113
Figura 90. Curva de Control de humedad tensiómetro 3	113
Figura 91. Curva de control de humedad tensiómetro 4	114
Figura 92. Curva final de control por tensiometria	114
Figura 93. Testigo de pérdida de humedad tensiómetros.....	115
Figura 94. Curva final de control por peso	116
Figura 95. Testigo de pérdida de humedad por peso	117
Figura 96. Diagrama de bloques del Dispositivo de control de humedad	118
Figura 97. Relación de ahorro de agua de las tres etapas de riego.....	119
Figura 98. Cultivo de Maíz controlado por Dispositivo	120
Figura 99. Cultivo de Maíz controlado por tensiómetro y peso	120

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación del tamaño de las partículas de suelo.....	28
Tabla 2. Datos Curva de retención de humedad.....	39
Tabla 3. Características láminas de cobre utilizadas en los sensores de yeso	41
Tabla 4. Elementos usados en primer ensayo sensores de humedad de yeso	43
Tabla 5. Diferencia de tensión recolectados en primer ensayo de yeso	44
Tabla 6. Datos obtenidos en el laboratorio especializado de suelos.....	46
Tabla 7. Elementos utilizados segundo ensayo sensores de humedad de yeso ...	47
Tabla 8. Diferencia de tensión recolectado en el segundo ensayo de yeso	47
Tabla 9. Datos de pérdida de humedad por peso recolectados en el segundo ensayo sensores de yeso	48
Tabla 10. Características transformador Utilizado en el tercer ensayo.....	49
Tabla 11. Diferencia de tensión recolectados en el tercer ensayo sensores de yeso	49
Tabla 12. Datos de pérdida de humedad por peso recolectados en el tercer ensayo sensores de yeso.....	50
Tabla 13. Características láminas de cobre utilizadas en los sensores de láminas descubiertas.....	51
Tabla 14. Diferencia de potencial recolectado en primer ensayo sensores de láminas descubiertas de cobre.	53
Tabla 15. Datos de pérdida de humedad por peso recolectados en el primer ensayo sensores de láminas descubiertas de cobre.	54
Tabla 16. Variación en las Características de los sensores de láminas descubiertas.....	55
Tabla 17. Diferencia de potencial recolectado en segundo ensayo sensores de láminas descubiertas	55
Tabla 18. Datos de pérdida de humedad por peso recolectados en el segundo ensayo sensores de láminas descubiertas.	56
Tabla 19. Cantidad de químico a utilizar en los ensayos bajo invernadero	57

Tabla 20. Conductividad de los nutrientes NPK determinado por los sensores de láminas descubiertas de cobre	58
Tabla 21. Características de las varillas de bronce utilizadas en el desarrollo del sensor	59
Tabla 22. Características de las varillas de acero utilizadas en el desarrollo del sensor	60
Tabla 23. Ecuación característica de la curva de retención de humedad	63
Tabla 24. Humedad volumétrica a partir de la ecuación característica de retención de humedad	63
Tabla 25. Cantidad de agua a utilizar	65
Tabla 26. Voltaje obtenido en cada punto a partir de la humedad volumétrica	65
Tabla 27. Ecuación característica de respuesta de humedad de los sensores diseñados	67
Tabla 28. Valores de resistencias, diodos y condensadores para el oscilador de Wien.....	70
Tabla 29. Materiales Utilizados en circuito rectificador de media onda con filtro ...	72
Tabla 30. Cantidad de fertilizante a utilizar determinado por tiempos de activación de los actuadores.....	75
Tabla 31. Descripción pines Micro SD	80
Tabla 32. Características elementos utilizados en el diseño de la Unidad de actuadores	88
Tabla 33. Calculo de la cantidad de agua a utilizar en 40 Kpa	104
Tabla 34. Datos de la Primera semana de evaluación del Dispositivo.....	107
Tabla 35. Fechas de fertilización cultivo de maíz.....	111
Tabla 36. Calculo del peso para una humedad de 40 Kpa	116
Tabla 37. Numero de brotes por etapa de riego	120

LISTA DE ANEXOS

ANEXO I: Sistemas de riego en la agricultura

ANEXO II: Componentes que determinan el balance de agua en el suelo.

ANEXO III: Tipos de transporte de nutrientes del suelo a la raíz

ANEXO IV: Métodos para medir la contenido de agua en el suelo

ANEXO V: Registro de pérdida de humedad durante los 2 meses de evaluación por tensiómetro

ANEXO VI: Registro de pérdida de humedad durante los 2 meses de evaluación por peso

ANEXO VII: Presupuesto de desarrollo Dispositivo por Unidad

ANEXO VIII: Manual de usuario del Dispositivo de control de humedad

Dentro del CD-ROM Se encuentran los siguientes anexos

ANEXO A: Circuitos en pdf de las unidades desarrolladas listos para su impresión

ANEXO B: Fotografías del montaje de las unidades diseñadas en la carcasa

ANEXO C: Datos de evaluación del Dispositivo durante 2 meses en archivos .txt

ANEXO D: Fotografías del control del cultivo de maíz dentro del invernadero

ANEXO E: Programas de control, visualización y guardado de datos desarrollados

GLOSARIO

ACOPLE: Es la Unión de dos etapas de manera precisa

ADC: Conversor análogo digital. Dispositivo electrónico capaz de convertir una entrada analógica de voltaje en un valor binario.

ASPERSOR: es un dispositivo mecánico que en la mayoría de los casos transforma un flujo líquido presurizado y lo transforma en rocío, asperjándolo para fines de riego.

BIOMASA: es la cantidad de materia acumulada en un individuo, un nivel trófico, una población o un ecosistema.

CC: Capacidad de campo. Contenido de agua que retiene un suelo en contra de la fuerza de gravedad, en condiciones de equilibrio y cuando no existe extracción de agua del suelo por parte de las plantas.

CRAD: capacidad de retención de agua disponible.

CUTÍCULA: es una capa cerosa externa a la planta que la protege de la desecación a la que es expuesta en la atmósfera terrestre, además de proveer una barrera para la entrada de bacterias y hongos.

ENSAYO: Realizar pruebas de determinado tema para minimizar el error y obtener mejores resultados

ESTOMAS: pequeños orificios que abundan principalmente en el dorso de las hojas.

EVALUACIÓN: La evaluación es la determinación sistemática del mérito, el valor y el significado de algo o alguien en función de unos criterios respecto a un conjunto de normas.

FERTIRRIGAR: La fertirrigación es una técnica que permite la aplicación simultánea de agua y fertilizantes a través del sistema de riego

INTERFAZ DE USUARIO: Medio por el cual, un usuario puede comunicarse con una maquina, un dispositivo o una computadora.

INVERNADERO: Un **invernadero** es un lugar cerrado, estático y accesible a pie, que se destina a la producción de cultivos, dotado habitualmente de una cubierta exterior translúcida de vidrio o plástico, que permite el control de la temperatura, la humedad y otros factores ambientales para favorecer el desarrollo de las plantas

LENTICELAS: Las lenticelas son estructuras pequeñas y circulares o alargada que se forman en la corteza o superficie de los tallos y ramas de muchas especies de plantas. Su función es realizar intercambios de gases -respiración y transpiración.

MATERIAL ORGÁNICO DEL SUELO: El material de suelo que contiene cantidades mayores de carbono orgánico a las descritas anteriormente para el material de suelo mineral, se considera como material orgánico de suelo.

MATERIA MINERAL DEL SUELO: es aquella sustancia natural, homogénea, inorgánica, de composición química definida dentro de ciertos límites en cuanto al suelo los límites establecen que todo lo que contenga menos de 12% de carbono orgánico (20,7% de materia orgánica) es considerado material mineral del suelo.

MATERIA MINERAL DEL SUELO: es aquella sustancia natural, homogénea, inorgánica, de composición química definida dentro de ciertos límites en cuanto al suelo los límites establecen que todo lo que contenga menos de 12% de carbono orgánico (20,7% de materia orgánica) es considerado material mineral del suelo.

PARCELA: Parte de un terreno destinada al cultivo

PLANTAS HERBÁCEAS: Son plantas cuyos tallos, independientemente de su tamaño, no han desarrollado estructuras leñosas por lo que su consistencia es más o menos blanda, tierna, flexible y jugosa.

PASCAL: Unidad de presión del sistema internacional de Unidades, se define como la fuerza ejercida por 1 Newton sobre una superficie de 1 m²

PMP: Punto de marchitez permanente. Cantidad de agua retenida en un suelo, que es insuficiente para abastecer adecuadamente a la planta y esta se marchita irreversiblemente.

SENSOR: Dispositivo capaz de detectar magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación, y transformarlas en variables eléctricas.

SISTEMA DE CONTROL: Sistema de control es el conjunto de dispositivos que actúan juntos para lograr un objetivo de control

INTRODUCCION

La agricultura ha sido sin lugar a dudas la principal fuente de ingresos para pequeños y grandes productores del Departamento de Nariño, basando su trabajo en la producción de papa, trigo, maíz, zanahoria y diversidad de productos que brotan en los suelos fértiles del Departamento, no obstante se ha mirado un atraso en la producción con respecto a otros Departamentos del país, debido principalmente por su apego a la agricultura rudimentaria y empírica que ha provocado un daño en la textura, estructura y propiedades químicas del suelo disminuyendo su fertilidad y producción.

Por otro lado, los agricultores del Departamento de Nariño se han mirado afectados por la disminución en los afluentes de agua, ellos han optado por la utilización de riegos al momento de enfrentar la falta de lluvias y el aumento en las temperaturas del suelo, sin embargo, definir cuál es la cantidad de agua aplicable debe ser una decisión coherente con las condiciones físicas y químicas del suelo, mas cuando observamos que hay secciones del suelo que tienen características distintas en cuanto a contenido de humedad, fertilidad del suelo, textura, vigor del cultivo y otros factores que evidencian falta de homogeneidad.

Una ayuda al momento de determinar la cantidad de agua a aplicar en el suelo han sido las investigaciones que se impulsan en invernaderos, estudiando el comportamiento de los cultivos a diferentes grados de humedad, esto tiene como fin identificar el grado de humedad en el cual el cultivo se comporta de una manera más eficiente, agregando al suelo la dosis de agua y fertilizante que solo este requiera. Este tipo de investigaciones necesitan de métodos precisos y controlados que permitan tener certeza en los datos obtenidos, la confiabilidad de estos datos permiten un mejor aprovechamiento de los recursos naturales y ayudan a sentar bases fundamentadas en el desarrollo de los cultivos, para lograr en un futuro no muy lejano cambiar la visión anticuada de los agricultores de nuestro departamento.

El presente trabajo de grado se plantea como una ayuda en las investigaciones de la Facultad de agronomía diseñando un dispositivo portátil para el control de humedad en un cultivo de Maíz fertirrigado. El dispositivo cuenta con un modulo LCD 20X4, para visualización en tiempo real del grado de humedad, también permite variar el grado de humedad al cual se desea tener el cultivo, Programar fechas de fertilización y almacenar los datos en un dispositivo externo que permita hacer un análisis posterior de los datos, El dispositivo va acompañado de un manual de usuario para garantizar un buen manejo y minimizar los errores. .

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar un Dispositivo portátil para el control de humedad en cultivo fertirrigado.

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Realizar la revisión bibliográfica sobre el control de humedad en el suelo y métodos de medición de humedad y desarrollar un documento que contenga el estado de arte de los mismos.
- Diseñar y desarrollar sensores capaces de responder a los cambios de humedad presentes en el suelo.
- Desarrollar el sistema de control e interfaz de usuario para el manejo de los datos de humedad suministrados por los sensores, con la capacidad de controlar los niveles de fertirrigación a través de electroválvulas.
- Realizar el control de fertirriego en cultivo de maíz sembrado en el invernadero de Investigaciones de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad de Nariño, que demuestre la efectividad del dispositivo desarrollado.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Importancia del agua en las plantas

Uno de los componentes más importante de los organismos vivientes es el agua Y sobre todo de las plantas, ya que esta conforma el 80 % o más de la masa de las plantas herbáceas y aproximadamente el 50 % de las leñosas, además, el agua es el medio de transporte de los nutrientes que provienen del suelo y hace parte en los procesos fotosintéticos. El agua se combina con el dióxido de carbono para constituir la biomasa, es decir la planta misma. A pesar de que el agua es componente esencial de la planta, el uso mayor de ésta, no es en la conformación de tejidos vegetales, sino en el proceso de transpiración. Ya que en mayoría de los cultivos agrícolas, el agua evapotranspirada durante su crecimiento representa más del 95% del consumo de éste elemento.

En cada etapa del desarrollo, el estado hídrico de la planta depende del balance entre el agua que la planta absorbe del suelo y la que pierde por transpiración. Un exceso de transpiración con respecto a la absorción determina un balance hídrico negativo, generándose así una situación de déficit cuyas consecuencias dependerán de su magnitud y duración. El estado de déficit hídrico puede influir poderosamente sobre el crecimiento y la producción de materia seca por las plantas, y por ende sobre el rendimiento de grano, forraje, madera, etc.

La importancia ecológica del agua es el resultado de su importancia fisiológica. La única manera en la cual un factor ambiental, como el agua, puede afectar el crecimiento de las plantas, es a través de su influencia sobre los procesos fisiológicos. Casi todos los procesos en la planta son afectados directa o indirectamente por el suministro de agua. EL AGUA EN LAS PLANTAS-Preparado por: José Régulo Cartagena V.- Profesor Asociado.

2.2 El riego pieza fundamental de la agricultura

La implementación del riego en la agricultura ha ayudado a la producción y la calidad de las cosechas, además, dio paso a la siembra en diferentes épocas del año. Ya que si se depende únicamente de la precipitación pluvial y ésta es insuficiente, o se encuentra mal distribuida en el tiempo y en el espacio, se presentarán déficits de humedad, que afectaran el desarrollo y por lo mismo el rendimiento de los cultivos agrícolas.

La lluvia elemento importante del clima, es uno de los componentes de riesgo más característicos en la agricultura, por que raramente suministra la cantidad de agua adecuada para el correcto desarrollo del cultivo; aun en las zonas húmedas, es frecuente que durante los periodos de la época de crecimiento de los cultivos, el agua precipitada sea insuficiente para satisfacer la demanda.

Concretamente en Colombia, la distribución de la lluvia es inadecuada para lograr cosechas económicamente factibles. En efecto, la mayor parte de los estudios climatológicos concuerdan en el hecho que la precipitación pluvial anual no es la adecuada debido a que gran parte de esta se concentra en algunos periodos y en otros prevalece la sequía. De lo anterior se deduce que en gran parte del territorio nacional el riego es necesario.

En general, la agricultura de riego es más fructífera que la de temporal. Las razones por la que los productos aumentan cuando los cultivos se riegan adecuadamente son varias, entre las más importantes están: 1) el correcto desarrollo de los cultivos sin déficits hídricos, 2) la posibilidad de sembrar más plantas por hectárea, 3) genera un uso adecuado de los fertilizantes y 4) pueden utilizarse mejores variedades de plantas, las cuales se han desarrollado para la agricultura de riego.

2.3 El riego agrícola

Para regar un cultivo, el agricultor de riego debe formularse cuatro preguntas fundamentales; las respuestas concretas y cuantitativas a estas preguntas permiten el uso eficiente y racional del agua, el lavado de nutrientes, bajos rendimientos de los cultivos y pérdidas económicas en la unidad de producción. Ya que estas definen la tecnología de riego a usar en cada situación (combinación específica de suelo, cultivo y clima). Las cuatro preguntas fundamentales son: 1) ¿Por qué regar?, aquí se define el beneficio económico que se espera obtener al incorporar un terreno de temporal al riego. 2) ¿Cuándo regar?, responde a la frecuencia y los criterios para definir cuándo regar. 3) ¿Cuánto regar?, se define el tiempo y el volumen de agua a utilizar en una unidad de riego y 4) ¿Cómo regar?, responde a la forma de aplicar el agua al suelo, lo que constituye el método de riego.

El riego agrícola está relacionado directamente a las indicaciones anteriores, pero concretamente, con el agua en el suelo y el cultivo. De tal manera que Gurovich (1999) lo define de la siguiente manera: *El riego es la aplicación oportuna y uniforme de agua a un perfil de suelo para reponer en éste, el agua consumida por los cultivos entre dos riegos consecutivos.*

2.4 Evolución de la agricultura

El desarrollo de la agricultura genera un cambio crucial en la evolución cultural del hombre. Debido a que este dependió de la cacería y la recolección para su alimentación durante milenios. Con la agricultura, los humanos comenzaron a dominar el mundo vegetal y animal, con el fin de mejorar su alimentación y evitar la muerte por inanición, gracias a que poco a poco fueron descubriendo y perfeccionando métodos de cultivación y preservación de alimentos. Esto hizo a los seres humanos más independientes de las fuerzas naturales. Cuando los grupos humanos se dieron cuenta de ésta situación, dejaron de ser nómadas y empezaron a construir pueblos y ciudades.

En los inicios de las sociedades agrícolas, éstas constituían pequeñas aldeas rurales. No obstante, muy rápidamente, conforme la agricultura fue mejorando mediante el empleo de sistemas de riego, algunas sociedades aumentaron hasta convertirse en grandes ciudades, con un gran desarrollo cultural que se manifestaba en la realización de grandes obras de ingeniería como palacios, pirámides o grandes sistemas de canales para llevar agua, y con ellos regar los campos para mantener una agricultura de alto rendimiento, necesaria para mantener a grandes poblaciones.

2.5 Sistemas de riego en la agricultura

Los sistemas de riego tienen diferentes mecanismos y formas, pero el objetivo principal es optimizar el uso del agua en el tiempo y en el espacio. El concepto de técnicas se designa a los procedimientos específicos de aplicación del agua en los cultivos, por ejemplo, el método de riego por gravedad, puede ser utilizando la técnica de inundación o multicompuertas.

Gracias al avance científico y tecnológico en diferentes áreas del conocimiento que se ha visto en los últimos años, la agricultura ha tenido un gran e importante desarrollo; a su vez, la utilización eficiente del agua ha obtenido una gran relevancia, a través de la utilización de técnicas adecuadas de riego para así obtener una mayor productividad por unidad de superficie.

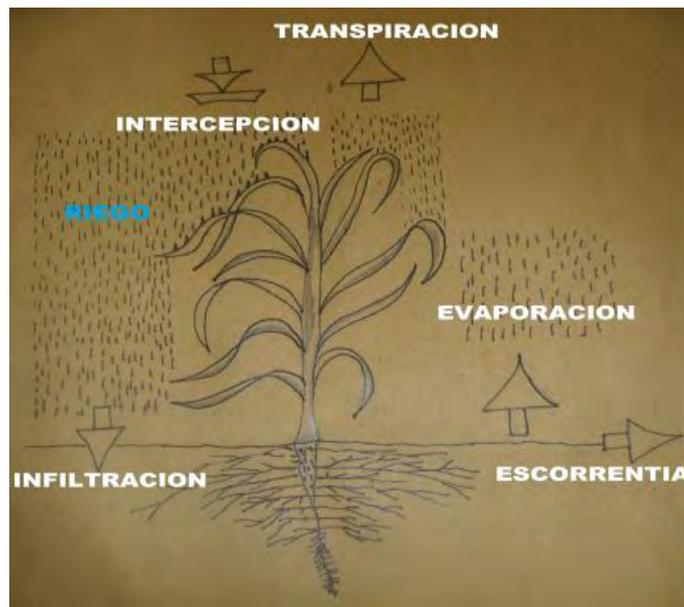
Factores técnicos como el tipo de suelo, el clima, la especie y disponibilidad del agua y factores socioeconómicos, influyen en la escogencia del tipo adecuado de riego a implementar. Los métodos de riego más utilizados, se pueden agrupar en tres tipos como son **riego por Gravedad**, **riego por Aspersión y micro aspersión** y **riego por Goteo** (métodos de riego ver ANEXO I).

2.6 Relación entre Suelo- Agua-Planta

Para la producción agrícola bajo riego, es esencial conocer la relación de suelo – agua – planta. En el caso de usos de sistemas de riego, este conocimiento es particularmente importante en vista del alto costo de la instalación. Aún en áreas de mucha lluvia, la escasez de agua puede limitar el desarrollo de las plantas. Esto puede atribuirse a una errática distribución de lluvia, a una alta **escorrentía** o a una infiltración profunda en suelos con baja capacidad de retención de agua. Por tal razón, la importancia del riego no se limita a regiones áridas y semiáridas.

El suministro de agua a las plantas se ve afectado de una forma u otra debido a que cada cultivo tiene necesidades de agua específicas, y cada suelo tiene sus propiedades. La cantidad de agua en el suelo a un tiempo dado, es un valor sumamente dinámico, ya que, es el resultado neto de la cantidad recibida, ya sea por lluvia o por riego, menos las pérdidas ocasionadas por una serie de componentes que determinan el balance de agua en el suelo Figura 1, tales como las pérdidas por evaporación, interceptación, transpiración e infiltración (véase ANEXO II). La disponibilidad de esta agua para las plantas depende a su vez del sistema de raíces presente, y de “propiedades hidráulicas del suelo (véase anexo 3)” tales como porosidad, conductividad hidráulica y capacidad de retención de agua.

Figura 1. Componentes del balance d agua en el suelo



2.7 Principios sobre la relación entre suelo-agua

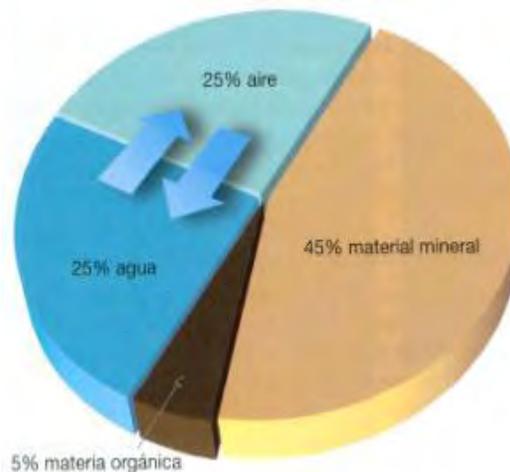
2.7.1 Composición del suelo

La composición del suelo se relaciona con la Geoquímica de la porción de la corteza terrestre expuesta a la atmósfera y sujeta a las influencias bióticas. La corteza terrestre contribuye con material mineral mientras que los organismos introducen el componente orgánico en los suelos, originándose así los dos tipos de materiales que constituyen la fase sólida de los suelos: la materia mineral y la materia orgánica. El contenido de materia mineral presente en diferentes suelos puede ser muy variable, pudiéndose mencionar los rangos siguientes:

Hasta más de 99 por ciento en suelos muy arenosos, de 95 a 97 por ciento en muchos suelos productivos de textura intermedia, alrededor de 92 por ciento en suelos oscuros bien drenados, 60 a 80 por ciento en muchos suelos pobremente drenados y 5 a 60 por ciento en turbas y suelos semiturbosos.

Las fases sólidas (mineral y orgánica) frecuentemente constituyen sólo alrededor del 50% del volumen del suelo, mientras que la solución y el aire del suelo ocupan la otra mitad; Estas fases se muestran en la Figura 2.

Figura 2. Contenido volumétrico de los cuatro componentes principales del suelo considerado ideal para el crecimiento de las plantas



Fuente: [en línea]. <http://www.educarchile.cl/ech/pro/app/detalle?ID=133103>

La densidad de la materia orgánica del suelo es de aproximadamente 1,1 a 1,5 g cm⁻³, en tanto que la de la materia mineral es de 2,7 g cm⁻³ en promedio, por lo cual un contenido relativamente bajo de materia orgánica en el suelo, expresado

en porcentaje en peso, (por ejemplo 5%), ocupa un espacio significativamente mayor cuando se le expresa en porcentaje en volumen de los sólidos.

Las fases líquida y gaseosa en conjunto constituyen alrededor de la mitad del volumen del suelo y sus proporciones relativas varían rápidamente a medida que la fase líquida (el agua del suelo) drena o es utilizada por las plantas.

La fase gaseosa, que a menudo ocupa la cuarta parte del volumen del suelo, está compuesta aproximadamente por 80% de nitrógeno, como en el aire atmosférico, siendo el 20 por ciento restante principalmente oxígeno. El aire del suelo de los suelos bien drenados contiene menos de 0,1% de CO₂, pero esta cifra puede llegar a 5 o 10% cuando la aireación es pobre.¹

2.7.2 Textura del suelo

La textura indica el contenido relativo de partículas de diferente tamaño, en el suelo. La textura tiene que ver con la facilidad con que se puede trabajar el suelo, la cantidad de agua y aire que retiene y la velocidad con que el agua penetra en el suelo y lo atraviesa.

Arena-limo-arcilla mostradas en la Tabla 1, son las tres clases en las que se dividen las partículas del suelo. Esta división es importante debido a su relación con el crecimiento de las plantas.

Tabla 1. Clasificación del tamaño de las partículas de suelo

	Sistema del Depto. de Agricultura de EE.UU.	Sistema Internacional
Fracción del Suelo	Diámetros límites en mm.	Diámetros límites en mm.
Arena muy gruesa	2.00 - 1.00	
Arena gruesa	1.00 - 0.50	2.00 - 0.20
Arena Media	0.50 - 0.25	
Arena fina	0.25 - 0.10	0.20 - 0.002
Arena muy fina	0.10 - 0.05	
Limos	0.05 - 0.002	0.02 - 0.002
Arcilla	Menos de 0.002	Menos de 0.002

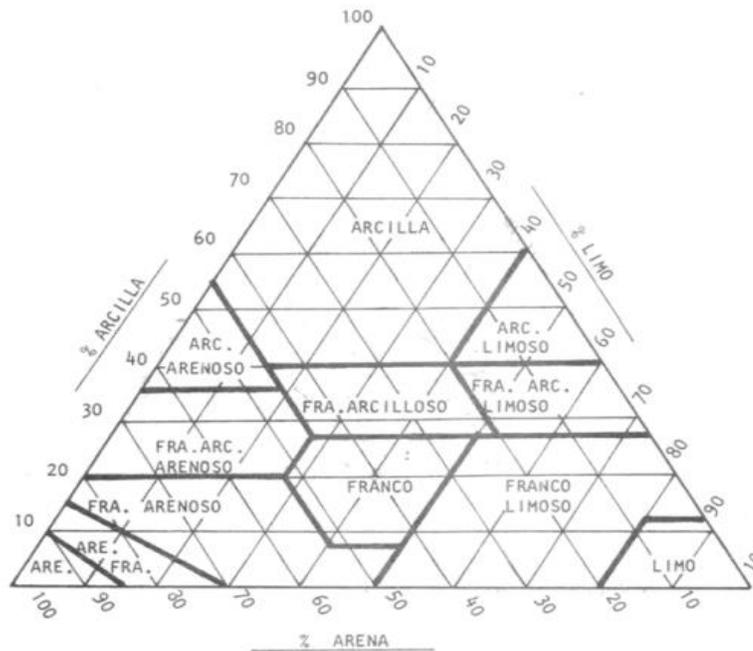
Fuente: Propiedades físicas del suelo: universidad de la república. Montevideo-uruguay. Facultad de agronomía dpto. Suelos y aguas.

La distribución del tamaño de las partículas determina en gran medida la capacidad del suelo para retener el agua. Suelos de estructura fina retienen más

¹ FACULTAD DE AGRONOMÍA-UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA- Dpto. SUELOS y AGUAS - COMPOSICIÓN DEL SUELO - Ing. Agr. Artigas Durán MONTEVIDEO-URUGUAY 2004

agua que los de textura gruesa. Los suelos de textura fina habitualmente son más compactos, el movimiento de agua y aire es más lento y pueden ser más difíciles para trabajar. Se reconocen 12 clases texturales de suelo basado en las proporciones reales de arena, limo y arcilla, mostradas en la Figura 3.

Figura 3. Triángulo de textura: composición mecánica del suelo



Fuente: Propiedades físicas del suelo: universidad de la república. Montevideo-uruguay. Facultad de agronomía dpto. Suelos y aguas.

Suelos de textura mediana son probablemente los mejores para un buen desarrollo de la planta. Sin embargo la relación entre la textura del suelo y la productividad no puede ser universalmente aplicada a todos los suelos, ya que la textura es solo uno de los muchos factores que influye en la producción de las cosechas.

2.7.3 Estructura del suelo

Las partículas individuales del suelo (arena, limo y arcilla) pueden acoplarse para formar agregados. La estructura se refiere al arreglo (orientación, forma y acomodo) de las partículas individuales y agregados del suelo con respecto unas de otras. De esta forma se pueden clasificar los distintos tipos de estructuras en cuatro tipos principales: laminar, prismática, granular y en bloques, mostradas en la Figura 4.

Figura 4. Clases de estructuras de suelos



Fuente: [en línea]. <http://www.monografias.com/trabajos65/propiedades-suelo/propiedades-suelo2.s>

El desarrollo de las plantas se ve afectado considerablemente por la estructura del suelo, principalmente por la retención de humedad, aireación, desagüe y las propiedades erosivas del suelo. La misma puede mantenerse y mejorarse con prácticas de cultivo y riego.

2.7.4 Humedad del suelo

El desarrollo de las plantas se ve afectado gracias a que la humedad que contiene el suelo pocas veces es el adecuado. Por lo cual es necesario regarlos para así obtener buen rendimiento de las cosechas.

Se han formulado muchas representaciones para clasificar el agua del suelo. Un sistema ampliamente utilizado distingue tres tipos principales: Agua gravitacional, agua capilar y agua higroscópica. Este clasificado es meramente físico y la misma puede adaptarse luego al concepto moderno de energía libre asignando unos valores más o menos arbitrarios en la escala de tensión. El cuadro 2 muestra un esquema de la clasificación físico biológico del agua del suelo según lo describe Bonnet.

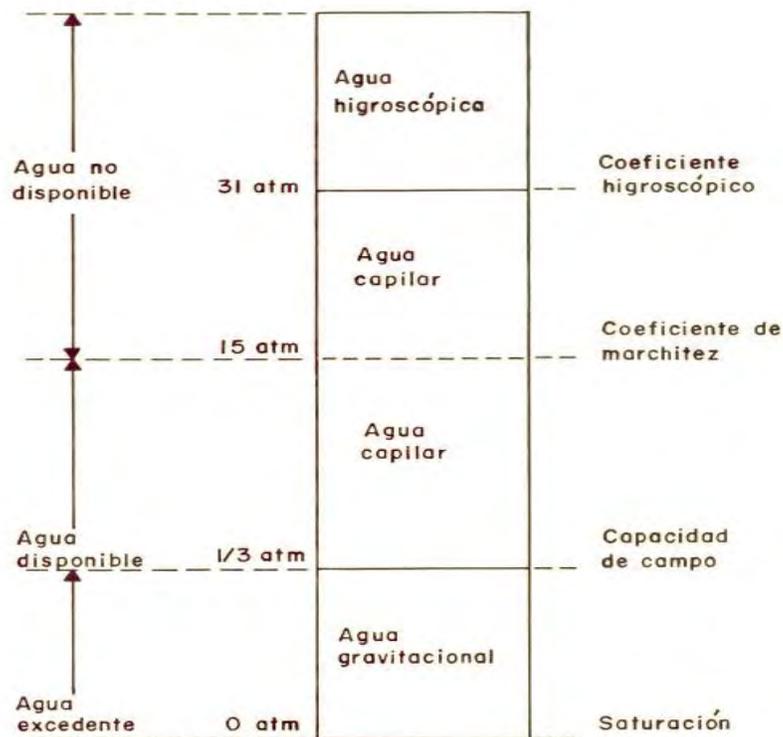
2.7.4.1 Clasificación de la humedad del suelo

Cuando el suelo se riega por efecto de la lluvia o riego abundante, el agua rellenará todas las zonas porosas creando una película gruesa alrededor de las partículas. Bajo estas condiciones se establece un estado de saturación y por ello el agua no está fuertemente retenida a las partículas del suelo. Cuando se vacían

todos los macroporos pero aún continúan llenos los poros capilares, se alcanza el punto denominado capacidad de campo. El agua contenida en el suelo entre su punto de saturación (tensión de 0 atm.) y la capacidad de campo (tensión de 1/3 atm.) se denomina agua gravitacional.

A medida que se extrae la humedad del suelo con causas tales como la absorción por las raíces de las plantas y la evaporación, se reduce el grosor de la película de agua alrededor de las partículas del suelo y aumenta su retención. Si la retención es grande, las pérdidas por transpiración no son renovadas debido a que las plantas no son lo suficientemente rápidas para absorber el agua y estas empiezan a marchitarse. Si luego de esto al colocar las plantas en una atmosfera saturada de humedad estas son capaces de recuperarse de la marchites se dice que están en un estado de marchites incidente. Sin embargo. Si se alcanza un punto en el que la retención es tan grande y por ende el contenido del agua en el suelo es bajo y donde las planta no se recuperan de la marchites aun cuando se colocan en una atmosfera saturada. El contenido del agua del suelo a este punto se denomina marchitez permanente.

Figura 5. Clasificación del agua en el suelo



Fuente: Propia del trabajo de grado

Si el agua del suelo esta retenida a una tensión de 31 atmósferas se logra lo que conocemos como el coeficiente higroscópico. El agua comprendida en el intervalo entre la capacidad de campo y el coeficiente higroscópico se ha denominado agua capilar. Más allá del coeficiente higroscópico (más de 31 atm. de tensión) el agua retenida se denomina agua higroscópica.

En síntesis el agua disponible para las plantas se encuentra en el intervalo comprendido por la capacidad de campo (1/3 atm) y el punto de marchitez permanente. Más allá del punto de marchitez permanente el agua no es accesible a las plantas.

2.7.5 Tensión de humedad del agua del suelo

Para saber con qué fuerza esta retenida el agua a las partículas del suelo se utiliza la medida de tensión de humedad. Cuando la tensión crece disminuye el volumen de la película de agua. Es por esto que es más fácil extraer agua de películas gruesas de humedad mientras es necesaria una tensión superior para extraer agua de películas delgadas.

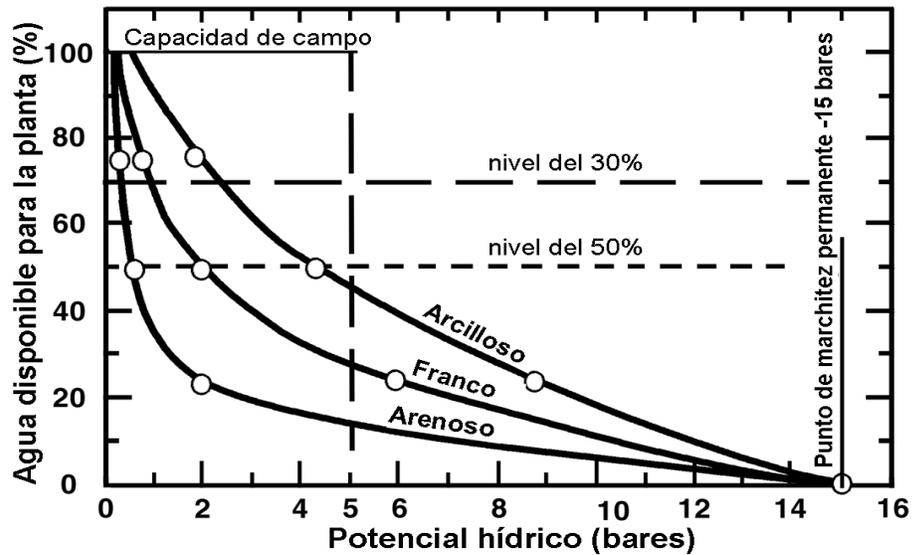
La tensión de humedad es medida en bares, lo que equivale a una unidad de presión negativa o tensión. También se mide en “atmósferas”, en “cm de agua” y en pascales. Una atmósfera es una unidad de tensión equivalente a un kg/cm², o 14.7 libras por pulgada cuadrada (psi), igual a la presión de una columna de mercurio cuya altura es 760 mm (76 cm) o una columna de agua cuya altura es 103 cm además equivale a 100 kilo pascuales. Por ello, en lugar de indicar una tensión de 0.1 atm se indica 10 kilo pascuales. Estas son algunas medidas para indicar la fuerza con la cual está adherida el agua al suelo.

2.7.6 Curvas de retención de humedad

Dado que para un buen desarrollo de la planta es necesario evitar que el potencial de agua en el suelo alcance el punto de marchitez permanente. Por esta razón es necesario conocer la cantidad o el contenido de agua por volumen que puede ser extraído del suelo antes de alcanzar este valor de tensión. La curva de retención de agua nos suministra esta información, ya que representa la relación entre la tensión hidrostática (Potencial de agua) y la cantidad (o por ciento de humedad) presente en el suelo.

Dado que existen diferentes tipos de suelo, cada tipo tendrá su curva característica puesto que esta depende de unas variables tales como: La cantidad de poros (porosidad), la superficie específica de las partículas del suelo, la textura y la estructura. Las curvas de retención de humedad se muestran en la Figura 6.

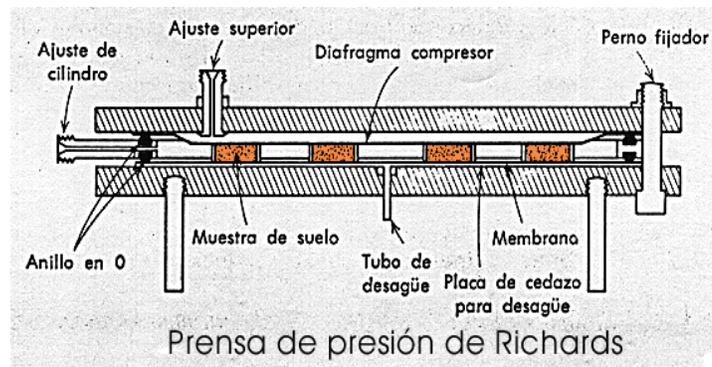
Figura 6. Curvas de retención de humedad para los tres tipos de suelos primordiales.



Fuente: Edward C. Martin. Métodos para Medir la Humedad del Suelo para la Programación del Riego. The university of Arizona. College of agricultura and life sciences.

Gracias al aparato llamado membrana de presión es posible establecer para cada tipo de suelo su respectiva curva de retención de humedad. Este aparato se muestra en la Figura 7, el contiene una membrana sobre la cual se colocan en contacto directo muestras húmedas de suelo, sobre las cuales ejecuta una presión por medio de aire comprimido. La membrana es impermeable al gas comprimido por estar húmeda. El agua es extraída de la muestra de suelo por debajo de la membrana. Solo el agua cuya tensión hidrostática es idéntica a la presión ejercida es retenida por el suelo.

Figura 7. Membranas de presión comúnmente utilizadas para determinar la curva de retención de humedad para los diferentes tipos de suelos



Fuente: [en línea]. <http://edafologia2urjc.wikispaces.com/5.+Medida+del+agua>.

2.7.7 Disponibilidad de agua en las plantas

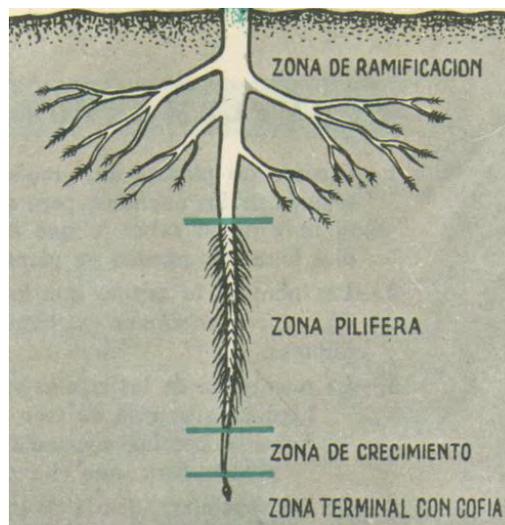
Como se ha indicado, entre la capacidad de campo y el punto de marchites permanente se encuentra el agua disponible para las plantas y es por esto que no se debe permitir que el porcentaje de humedad del suelo disminuya hasta el punto de marchites, ya que en estas condiciones la producción del cultivo disminuirá.

Las raíces de las plantas no son homogéneas y presentan en una estructura ramificada ancha en la capa superior del suelo y se va adelgazando o estrechándose hacia abajo.

En relación a esto, el agua contenida en el suelo a diferentes profundidades no será aprovechada eficazmente por la planta puesto que la zona de la raíz esta desigualmente distribuida.

Cuando la planta haya succionado toda el agua presente en la capa superior del suelo continuara succionando agua de capas más profundas. Sin embargo, la superficie de absorción de las raíces disminuirá, ya que habrá una menor cantidad de raíces en contacto con el agua disponible, la raíz y sus partes se muestra en la Figura 8.

Figura 8. La raíz y sus partes



Fuente: [en línea]. http://thales.cica.es/rd/Recursos/rd99/ed99-0574-02/la_raiz

Las pérdidas por transpiración ocasionadas por días calurosos y periodos de sequía son compensadas por la absorción de agua que producen las raíces. Si el agua disponible en el suelo es escasa, o la superficie de absorción de las raíces es pequeña, ocurrirá un marchitamiento temporal de la planta durante las horas de calor y los periodos de sequía. Esta condición desaparecerá si el ritmo de

absorción es suficiente para equiparar la cantidad de agua perdida por transpiración. Por lo tanto debe regarse la zona de raíces antes de ser utilizada toda el agua disponible, con el objeto de impedir la disminución en la producción producida tanto por la inversión de energía necesaria para absorber las últimas porciones de agua disponible, como por el marchitamiento temporal, que limita la actividad fisiológica de las plantas.

2.8 Medición de la humedad del suelo

La producción de alimentos en todo el mundo depende la disponibilidad suficiente y sostenible de recursos hídricos. La presencia abundante de agua o la escases de esta en el suelo reduce el crecimiento de las plantas y por ende el rendimiento de los cultivos. Para conocer la disponibilidad de agua en el suelo para las plantas es necesario medir tanto el contenido de agua en el suelo como la energía a la cual está retenida (potencial matricial). La naturaleza dinámica del agua en el suelo hace que su medición se considere de vital interés en diferentes campos de investigación. Sin embargo, las medidas de humedad en el suelo se realizan de forma generalizada en campos muy diversos tales como: prácticas agrícolas, evaluaciones biológicas de ecosistemas naturales, numerosas aplicaciones medioambientales y obras civiles entre otros.

Para determinar la humedad del suelo se han creado distintos métodos a través de los años que han hecho parte de la evolución de la agricultura. La mayoría de estos métodos consisten en medir algunas propiedades del suelo que se ven afectadas con cambios en el contenido de humedad. Gracias a la información suministrada por estos métodos se posible realizar un manejo de riego eficiente que proporcione las cantidades adecuadas de agua al suelo para así tener un grado de humedad adecuado para el correcto desarrollo de las plantas.

Entre los métodos más destacados para medir el contenido de humedad del suelo tanto en campo como en invernadero se encuentran: El método de apariencia visual y táctil, el método gravimétrico, La medición con tensiómetro, sonda de neutrones, TDR y bloques de yeso (métodos para medir el contenido de agua en el suelo véase ANEXO IV). Desafortunadamente, cada uno de estos métodos tiene dificultades que lo alejan de una medición de humedad ideal pero son de vital importancia al momento de optar por un desarrollo de cultivo eficiente en cuanto al consumo de agua.

2.9 Movimiento de nutrientes del suelo a la raíz

La transferencia de los nutrientes desde el suelo hacia la planta es producida a través de una secuencia de varios procesos. Principalmente, las plantas absorben agua y nutrientes. La absorción de agua provee el transporte de nutrientes a

través del “flujo de masas, la difusión y la interceptación radicular (véase ANEXO III), desde el suelo hacia las raíces.²

2.10 Nutrientes y el Cultivo de Maíz

El rendimiento de maíz está determinado principalmente por el número final de granos logrados por unidad de superficie, el cual es función de la tasa de crecimiento del cultivo alrededor del período de floración. Por lo tanto, para alcanzar altos rendimientos, el cultivo debe lograr un óptimo estado fisiológico en floración: cobertura total del suelo y alta eficiencia de conversión de radiación interceptada en biomasa. La adecuada disponibilidad de nutrientes, especialmente a partir del momento en que los nutrientes son requeridos en mayores cantidades (aproximadamente 5-6 hojas desarrolladas), asegura un buen desarrollo y crecimiento foliar y una alta eficiencia de conversión de la radiación interceptada. Los nutrientes disponibles en el suelo generalmente limitan la producción de maíz, siendo necesario conocer los requerimientos del cultivo para determinar las necesidades de fertilización. Y así lograr una buena producción.³

Gracias a estos datos es posible la implementación adecuada la fertiirrigación para este tipo de cultivo y así cumplir con sus necesidades nutricionales.

² JUNGK, Albrecht. Movimiento de nutrientes a la interfase suelo-raíz. R.C. Suelo Nutr. Veg., jun. 2001, vol.1, no.1, p.1-18. ISSN 0718-2791.

³ Criterios para el manejo de la fertilización del cultivo de maíz - Fernando O. García - INPOFOS/PPI/PPIC Cono Sur Av. Santa Fe 910 – (B1641ABO) Acassuso – Argentina - fgarcia@inpofos.org

3. METODOLOGÍA

La investigación desarrollada en el presente trabajo de grado se realizó en cuatro fases principales: Revisión y análisis bibliográfico, selección del tipo de suelo a utilizar en el proyecto, medida del grado de humedad, implementación y evaluación del dispositivo, en cada una de ellas fue necesario definir una serie de actividades de corta y larga duración, que fueron estudiadas y organizadas para obtener una coherencia entre la propuesta inicial y el resultado final. Gracias a la ejecución de dichas actividades el cumplimiento de cada uno de los objetivos fue alcanzado.

3.1 FASE I: REVISIÓN Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO

En esta primera etapa fue necesario indagar diferentes fuentes de información; aquellas de tipo documental que incluyeron monografías, revistas, artículos, investigaciones aplicadas y libros, como también de tipo oral, suministradas por expertos en el área de la agricultura y sobre todo en el trabajo de cultivos en invernadero. Finalmente, los temas principales que constituyen la base de nuestra investigación fueron aquellos relacionados con el análisis y preparación de suelo, la fertiirrigación de cultivos bajo invernadero, el manejo de variables de humedad, diseño de sistemas de control y principalmente el diseño, implementación y calibración de sensores de humedad. El marco teórico, anterior a este capítulo es el resultado de esta fase, su contenido fue minuciosamente seleccionado y construido a partir de definiciones propias que surgieron a partir de las diferentes fuentes indagadas, de los antecedentes de trabajos de aplicación similares y de las experiencias adquiridas durante todo el proceso de desarrollo.

3.2 FASE II: SELECCIÓN DEL TIPO DE SUELO A UTILIZAR EN EL PROYECTO

En esta fase se describe el proceso seguido para hacer la selección del tipo de suelo, el cual fue utilizado en el desarrollo de los diferentes ensayos de respuesta de los sensores de humedad diseñados, esto para realizar un buen análisis que nos permitiera tener confiabilidad en el desarrollo, calibración y obtención de la curva de respuesta de grado de humedad en función del voltaje de los sensores. Para ello fue necesario realizar la selección del tipo de suelo a utilizar, tamizar el suelo a 4mm para garantizar la homogeneidad del mismo, dejar secar a temperatura ambiente dentro del invernadero por 35 días, para obtener con la ayuda del laboratorio especializado de suelo de la Universidad de Nariño la curva característica de retención de humedad.

3.2.1 Selección del tipo de suelo a utilizar

Para el desarrollo de la investigación se selecciono con la ayuda del Doctor Hugo Ruiz Eraso un suelo de la zona andina del Departamento de Nariño; la cual ocupa un área aproximada de 691.000 hectáreas, la mayor parte de sus suelos son derivados de cenizas volcánicas, con contenidos de medio a alto de materia orgánica, altos contenidos de potasio y muy bajos de fósforo, suelos generalmente profundos, con texturas predominantes entre franco arcillosa y franco arenosa. El suelo escogido es proveniente del Municipio de Pupiales Nariño, es un suelo de tipo Vitric haspludand con características en su textura de un suelo Franco Arcilloso.

3.2.2 Tamizaje del suelo

Por la textura heterogénea del suelo a utilizar en el desarrollo del trabajo de grado, en el cual se observaban partículas de diferente tamaño e incluso rocas, se observo la necesidad de tamizar el suelo con el propósito de separar las partículas gruesas de las finas, buscando obtener una textura homogénea en el suelo que permita garantizar una distribución equitativa del agua sobre el suelo dentro de los recipientes a utilizar, para esto se utilizo un tamiz a 4 mm proporcionado por el laboratorio de suelos de la Universidad de Nariño, la utilización de este tamiz permite obtener partículas de un tamaño menor a 4 mm; El Tamizaje del suelo fue realizado en el invernadero de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad de Nariño y ubicado en una de las camas del Invernadero, donde se dejo secar a temperatura ambiente por 35 días.

3.2.3 Curva característica de retención de humedad

Cuando el agua se encuentra retenida por el suelo, se genera una tensión que implica efectuar un trabajo para sustraerla de su ambiente, este ambiente es la matriz del suelo, en tanto, más seco se encuentre el suelo, mayor será el trabajo que tiene que ejercer la planta para extraer el agua, la relación que existe entre el contenido de humedad del suelo y el potencial o energía con que esta retenida esta humedad se puede determinar obteniendo la curva de retención de humedad⁴;La determinación de la curva de retención de humedad es una metodología aplicada en la programación de riegos, ya que permite programar el riego únicamente tomando en cuenta la humedad del suelo, esta curva se obtiene al determinar la capacidad que tiene el suelo de retener el agua a diferentes escalas de succión, para determinar la curva se llevo suelo seco del invernadero al

⁴ CALLE Kléber, PROAÑO Jaime. Determinación de la curva de retención de humedad para los principales tipos de suelo en la península de Santa Elena, provincia del guayas. p. 1-2. [en línea]

> <http://www.secsuelo.org/XCongreso/Simposios/Conservacion/Ponencias/7.-%20Determinacion%20Curva.pdf>

laboratorio especializado de suelos, donde con la ayuda de la mesa de tensión y las ollas de Richards; mostradas en la Figura 9; se obtuvieron los porcentajes de humedad volumétrica (Θ_v) a diferentes escalas de succión medida en Kilopascuales, los datos obtenidos se muestran en la Tabla 2 y la curva se muestra en la Figura 10.

Figura 9. Mesa de tensión y ollas de Richards del laboratorio especializado de suelos



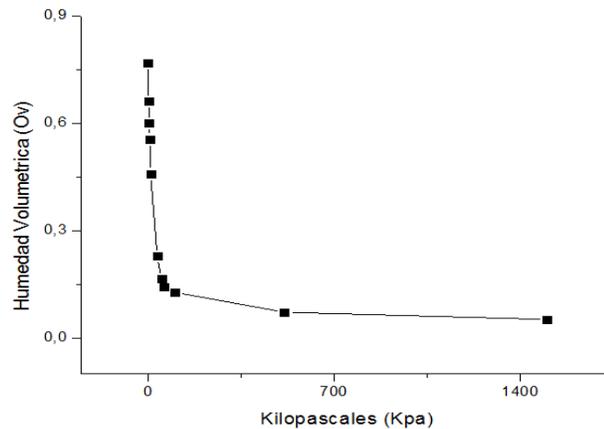
MESA DE TENSION

OLLA DE RICHARD

Tabla 2. Datos Curva de retención de humedad

succión	Kpa	Θ_v (%)
0cm sat	0	76,85
25cm	2,5	65,97
50cm	5,0	59,90
75cm	8,0	55,50
100cm	10,0	45,78
0,3 bar	34,6	22,78
0,5	50,0	16,55
0,6	60,0	14,33
1	100,0	12,72
5	512,9	7,14
15 bar	1500,0	5,15

Figura 10. Curva de retención de humedad



3.3 FASE III: MEDIDA DEL GRADO DE HUMEDAD

En esta fase se describe todo el proceso que permitió cumplir con los dos propósitos definidos en la propuesta, el primero es el procedimiento seguido para el diseño, desarrollo y calibración de los sensores de humedad, que tienen la capacidad de responder a cambios de humedad presentes en el suelo, permitiendo medir el grado de humedad en tiempo real; El segundo propósito, es el diseño del diagrama de bloques de la estructura interna del dispositivo final, así como el desarrollo de las unidades del sistema de control e interfaz de usuario que permite realizar las acciones de control necesarias para obtener el cumplimiento del segundo y tercer objetivo.

3.3.1 Diseño y desarrollo de sensores de humedad

3.3.1.1 Sensor de yeso higroscópico

El sensor de yeso higroscópico diseñado consta de dos láminas de cobre en paralelo, las cuales funcionan como electrodos, con el principal propósito de medir la resistencia del materia que se encuentra en medio de ellas, para nuestro caso, las láminas miden la resistencia del yeso, el yeso completamente seco tendrá una alta resistencia, a medida que se adhiere agua, el yeso va perdiendo resistencia, lo que nos genera una disminución en el voltaje ante la aplicación de una corriente constante, de igual forma cuando el suelo pierde humedad, este succiona la humedad del yeso, provocando un aumento de resistencia y variación de la tensión en los electrodos, esa diferencia de tensión es el que ayuda a determinar el nivel de humedad del suelo, relacionando humedad con diferencia de tensión. Para su desarrollo se utilizó un material higroscópico conocido como yeso de parís, este es comúnmente utilizado en odontología para realizar moldes de piezas

dentales, se lo conoce en el mercado como yeso tipo II, las láminas Utilizadas tiene las característica físicas mostradas en la Tabla 3.

Tabla 3. Características láminas de cobre utilizadas en los sensores de yeso

CARACTERÍSTICAS LÁMINAS	MEDIDA (mm)
Ancho	10
Largo	30

Para el desarrollo de este sensor, se compro una lámina de cobre de 15 cm de largo por 4 cm de ancho con un espesor de 1 mm, de esta se obtuvieron las láminas que fueron adecuadas a las medidas de la Tabla 3; Se utiliza láminas de cobre para el diseño de los sensores ya que es un material resistente a la corrosión, muy buen conductor y de bajo costo, además, es un material altamente utilizado en el diseño de sensores.

Con las láminas listas se procedió a soldar en sus extremos cables de cobre; La soldadura de estas láminas es hecha con estaño sin plomo, ya que con el estaño común es de gran dificultad que se adhiera al cobre; los cables soldados son utilizados como medio de transmisión de la fuente de alimentación eléctrica a las láminas; después de soldar las láminas se procede a ubicarlas en paralelo teniendo en cuenta la separación entre ellas que es un factor de suma importancia al momento de la toma de datos, se decide por una separación de 3 mm porque se busca que el sensor sea lo menos invasivo dentro del cultivo. Para conseguir esta separación, se utilizo un molde de icopor adecuado de tal manera que las láminas se introdujeran en él, manteniendo la separación deseada, una vez introducidas las láminas en el molde de icopor se procede a colocar dicho molde dentro de un tubo de pvc de 12 mm de diámetro el cual sirve como molde externo evitando el derramamiento del yeso; Teniendo en cuenta que las láminas van a quedar totalmente cubiertas por el yeso, el tubo tiene un largo de 4 cm, esto garantiza el total cubrimiento de las láminas, en la figura 11 se muestra las láminas introducidas en el tubo de pvc listas para ser cubiertas por el yeso.

Figura 11. Molde del sensor de yeso higroscópico



Con el molde listo, se hace la adecuación del yeso higroscópico, para esto, se utiliza un recipiente en el cual se coloca un cantidad adecuada de yeso, dependiendo de la cantidad de moldes a rellenar, se le agrega una cantidad mínima de agua al yeso buscando una textura viscosa para evitar que este humedezca el icopor por exceso de agua provocando una debilitación del mismo y posterior derramamiento del liquido, con el yeso listo, se rellena los tubos de pvc, dejándolo secar al sol, después de esto se gira el molde para retirar el icopor utilizado en la separación de las láminas, una vez retirado, se rellena con yeso el lugar donde se encontraba el icopor, dejándolo sacar hasta que el yeso quede completamente duro; Finalmente cuando el yeso está completamente seco, se retira el tubo de pvc haciendo un corte lateral; Para obtener una dureza apropiada en el yeso, con la mas mínima cantidad de humedad dentro de él, se llevaron los sensores de yeso al horno del laboratorio de suelos de la Universidad de Nariño, donde se los dejo secar a una temperatura de 50 °C por 12 horas. En la Figura 12 se muestra el sensor de yeso terminado.

Figura 12. Sensor de yeso Higroscópico Terminado



3.3.1.1.1 Primer ensayo sensor de humedad de yeso

Para determinar que tan apropiados son los sensores de yeso desarrollados en la medición de humedad, se monto un ensayo en el laboratorio de hidráulica de la Universidad de Nariño; este ensayo se lo realizo en arena tamizada a 4 mm para garantizar que sea homogénea y que el flujo de agua va a ser igual en cada una de sus partículas; Se utilizaron 4 recipientes completamente llenos de arena, dentro de ellos se colocaron los sensores ubicados en el centro del recipiente, con la intención de medir la perdida de humedad, para esto, se comenzó agregando

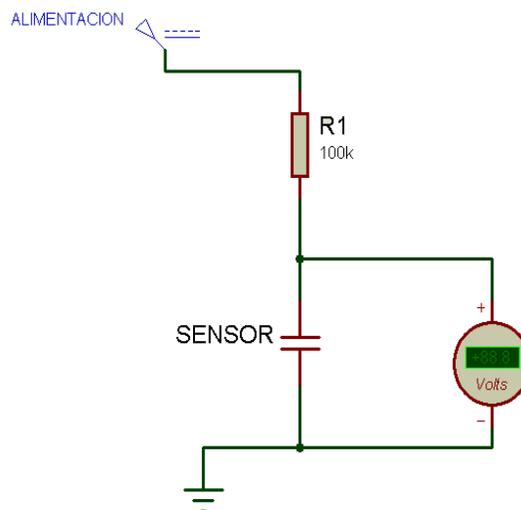
agua hasta que la arena quedara totalmente saturada, los recipientes se colocaron en un lugar descubierto para que pudieran secarse de manera natural con ayuda del aire y del sol, manteniendo estas condiciones por varios días; Con la ayuda de un voltímetro se logro recolectar datos durante diferentes horas del día, ya que a medida que la arena perdía humedad, el sensor entregaba un valor de voltaje diferente. Este primer ensayo fue realizado con una fuente de alimentación de corriente directa DC de 5 voltios. La Tabla 4 muestra los materiales usados en el primer ensayo

Tabla 4. Elementos usados en primer ensayo sensores de humedad de yeso

ELEMENTOS	DESCRIPCION
Muestras de Arena	Arena totalmente seca tamizada a 4 mm
Sensores	4 sensores de yeso Higroscópico
Voltímetro digital	Voltímetro de 4 dígitos

Para la toma de datos se implemento un pequeño circuito, compuesto por una resistencia de 100 k Ω en serie con el sensor, se utiliza este valor de resistencia para realizar el acople de impedancias debido a la alta resistencia que presenta el sensor de yeso, que está en el intervalo de los M Ω , la resistencia se conecta entre el terminal positivo de la fuente de alimentación y uno de los extremos del sensor de yeso, el otro extremo va aterrizado, los valores de diferencia de tensión son medidos entre tierra y la unión de la resistencia con el sensor, este circuito es utilizado en todos los ensayos desarrollados, en la Figura 13 se muestra el circuito implementado.

Figura 13. Circuito para adquisición de datos sensor de yeso.



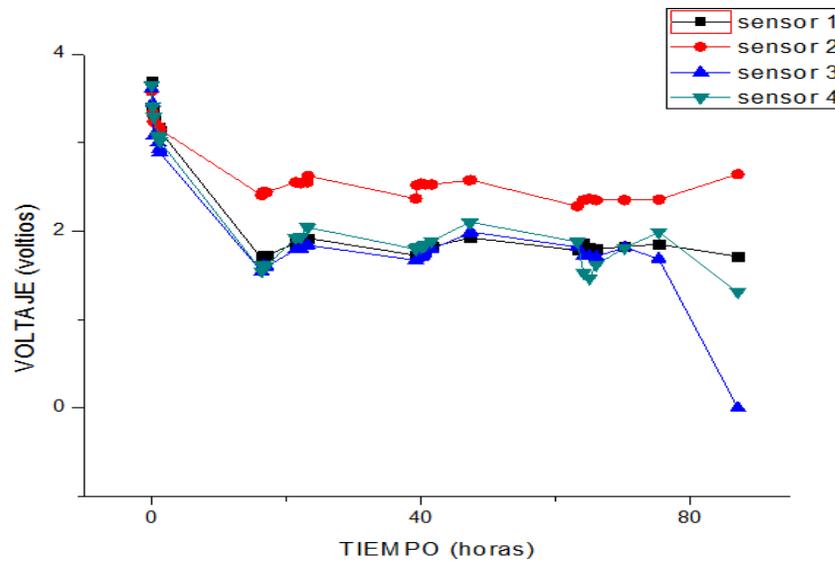
El primer ensayo se realizo por un intervalo de 3 días, en los cuales se tomaron valores de diferencia de tensión a diferentes horas del día, estos datos son mostrados en la Tabla 5.

Tabla 5. Diferencia de tensión recolectados en primer ensayo de yeso

Tiempo	Diferencia de tensión sensor 1	Diferencia de tensión sensor 2	Diferencia de tensión sensor 3	Diferencia de tensión sensor 4
HORAS	VOLTIOS			
0	3,696	3,582	3,606	3,646
0,16	3,393	3,33	3,445	3,404
0,36	3,256	3,236	3,078	3,293
1	3,181	3,18	3	3,083
1,14	3,16	3,165	2,924	3,051
1,24	3,134	3,148	2,886	3,015
16,37	1,686	2,403	1,539	1,545
16,57	1,726	2,44	1,602	1,615
17,03	1,722	2,439	1,596	1,606
21,41	1,862	2,551	1,79	1,923
22,15	1,858	2,542	1,797	1,93
23,07	1,907	2,55	1,833	2,05
23,25	1,917	2,622	1,84	2,04
39,22	1,724	2,365	1,668	1,794
39,4	1,751	2,52	1,69	1,814
40,03	1,757	2,536	1,706	1,819
40,31	1,771	2,531	1,722	1,829
40,55	1,782	2,526	1,748	1,84
41,56	1,821	2,525	1,796	1,885
47,17	1,92	2,571	1,975	2,097
47,37	1,924	2,576	1,99	2,1
63,2	1,78	2,28	1,819	1,877
64,11	1,86	2,347	1,716	1,53
65,01	1,809	2,364	1,72	1,467
66,01	1,797	2,347	1,71	1,62
70,21	1,821	2,349	1,815	1,81
75,28	1,85	2,356	1,685	1,985
87,03	1,713	2,642	0	1,311

Los datos de la Tabla 5 indican pérdida de tensión en los sensores 3 y 4. Los datos graficados detallan de manera más precisa las perdidas en los sensores de yeso desarrollados, de igual forma se evidencia picos de diferencia de tensión, lo que permite evidenciar que son sensibles al movimiento del agua dentro de los recipientes.

Figura 14. Grafica de respuesta de los sensores de yeso a la pérdida de humedad en arena con fuente DC



Las pérdidas de voltaje se da por un efecto que ocurre en el recipiente conocido como electrolisis, la electrolisis es un proceso químico que ocurre en el agua cuando se introducen unos electrodos (el caso de nuestro sensor), y se alimentan con fuente DC, esto produce un efecto de Oxido-Reduccion⁵; Este efecto produce una oxidación en la lamina de cobre que lleva el valor positivo del voltaje, debilitando la soldadura, esto provoca en el tiempo una pérdida de datos, como el observado en la Figura en el sensor 3 y 4, en nuestro sensor se mira reflejado este efecto, por una línea de color azul que cubre verticalmente el yeso, este efecto se observa en la Figura 15.

Figura 15. Efecto de electrolisis en el sensor de yeso



⁵ Requeijo, D. y Requeijo A. (2002). Química. Editorial Biosfera.

3.3.1.1.2 Segundo ensayo sensor de humedad de yeso

El segundo ensayo se realizó en el Invernadero de la Facultad de ciencias agrícolas de la Universidad de Nariño, este ensayo se desarrolló en el suelo escogido en la fase anterior tamizado a 4 mm, se utilizaron 8 recipientes cerrados de 1 Kilogramo (Kg), cada uno con 900 gramos (g) de suelo, de igual forma que en el primer ensayo el sensor fue ubicado en la mitad del recipiente; Para asegurar que el agua agregada a cada recipiente fuera igual, se tomó como punto de partida una humedad volumétrica de 0,25 lo que significa que el suelo quedara una vez agregado el agua con una humedad de 25 %. Con el suelo seco a temperatura ambiente se comenzó calculando el contenido de humedad al que se encuentra, esto con el fin de saber cuánta agua se debe agregar para llevarlo a la humedad deseada, para esto, se llevó 20 gramos de suelo del invernadero al laboratorio especializado de suelos donde se dejó secar por 24 horas a 105 °C, el contenido de humedad se calcula con la ecuación 1⁶.

$$W(\%) = \frac{Mh - Ms}{Ms - Mr} * 100 \quad \text{Ecuación 1.}$$

Donde :

- W = Contenido de humedad
- Mh = Peso recipiente más la muestra de suelo húmedo (gramos)
- Ms = Peso recipiente más la muestra de suelo seca (gramos)
- Mr = Peso recipiente (gramos)

En la Tabla 6 se muestra los datos obtenidos en laboratorio

Tabla 6. Datos obtenidos en el laboratorio especializado de suelos

VARIABLE	PESO (g)
Mh	66,650
Ms	66,117
Mr	46,650

Una vez aplicada la Ecuación se obtuvo un resultado de 2.73 % de humedad, para lo cual se tiene que agregar un porcentaje de humedad del 22.3% para llevar el suelo a una humedad del 25 %; El agua a agregar se calcula multiplicando el

⁶ Universidad Católica de Valparaíso. Escuela de ingeniería en construcción. Determinación del contenido de humedad. [En línea]

> http://icc.ucv.cl/geotecnia/03_docencia/02_laboratorio/manual_laboratorio/humedad.pdf

porcentaje de humedad obtenido por el peso del suelo a utilizar, esto nos da que tenemos que agregar una cantidad de 207 mililitros de agua.

Los recipientes se colocaron en una de las camas del Invernadero, distribuidos de tal manera que les llegara igual cantidad de luz permitiendo tener una uniforme perdida de humedad; en este ensayo se cambio la alimentación eléctrica de los sensores, la que en el primer ensayo era una fuente DC ahora es un oscilador de 0 a 5 voltios. La Tabla 7 muestran los materiales usados.

Tabla 7. Elementos utilizados segundo ensayo sensores de humedad de yeso

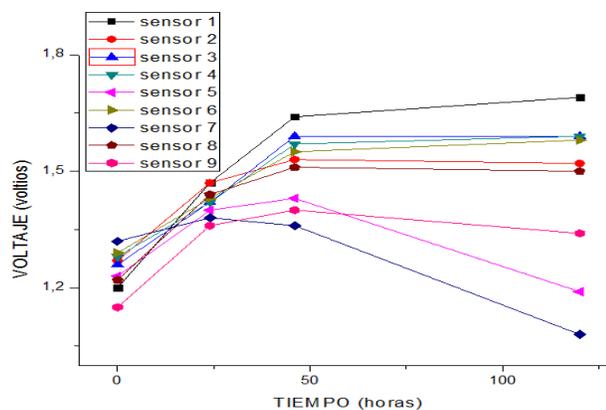
ELEMENTOS	DESCRIPCION
Muestra de suelo	Suelo tamizado a 4 mm, seco por 35 días bajo invernadero
Sensores	8 sensores de yeso
Voltímetro	Voltímetro de 3 dígitos
Fuente de Alimentación	Oscilador de 5 – 0 voltios

En la Tabla 8 y en la Figura 16 se muestran los datos recolectados en el segundo ensayo

Tabla 8. Diferencia de tensión recolectado en el segundo ensayo de yeso

Tiempo Horas	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	VOLTIOS								
0	1,2	1,27	1,26	1,28	1,23	1,29	1,32	1,22	1,15
24	1,47	1,47	1,42	1,42	1,4	1,43	1,38	1,44	1,36
46	1,64	1,53	1,59	1,57	1,43	1,55	1,36	1,51	1,4
120	1,69	1,52	1,59	1,59	1,19	1,58	1,08	1,5	1,34

Figura 16. Grafica de respuesta de los sensores de yeso a la pérdida de humedad en suelo con oscilador



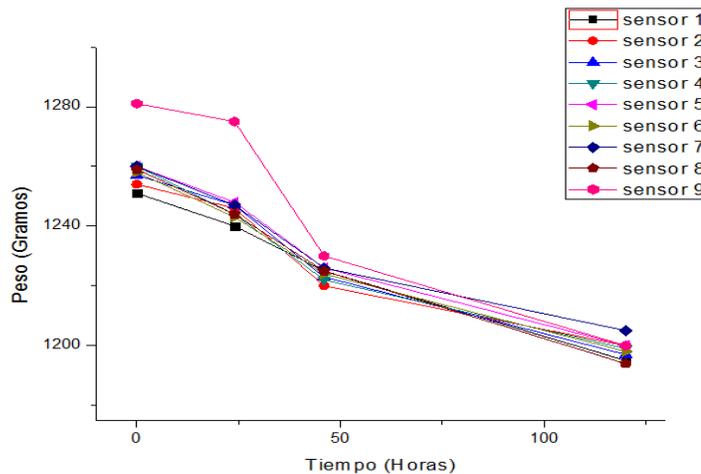
Una vez más en este ensayo se tuvo una pérdida de datos al transcurrir 5 días de haber comenzado, está pérdida se debe a efectos de electrolisis tal como ocurrió en el primer ensayo.

Para el segundo ensayo se llevo un registro de pérdida de humedad en los recipientes por peso, lo que permite validar el comportamiento de los sensores de yeso desarrollados. Estos datos se muestran en la Tabla 9 y En la Figura 17 se muestran el grafico de los datos mencionados anteriormente.

Tabla 9. Datos de pérdida de humedad por peso recolectados en el segundo ensayo sensores de yeso

Tiempo	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Horas	GRAMOS								
0	1251	1254	1257	1260	1260	1258	1260	1259	1281
24	1240	1246	1247	1244	1248	1243	1247	1244	1275
46	1225	1220	1223	1222	1226	1224	1226	1225	1230
120	1195	1200	1197	1199	1200	1198	1205	1194	1200

Figura 17. Grafica de pérdida de humedad del suelo en el segundo ensayo



3.3.1.1.3 Tercer ensayo sensor de humedad de yeso

El tercer ensayo se monto en el Invernadero de la Facultad de Ciencias Agrícolas, se utilizaron los mismos materiales indicados en la Tabla 7, a excepción de la alimentación eléctrica que para este ensayo se utiliza una fuente de alimentación de corriente alterna (AC), proveniente de de un transformador, en la Tabla 10 se indican las características principales del transformador utilizado.

Tabla 10. Características transformador Utilizado en el tercer ensayo

Características	Descripción
Voltaje de entrada primario	110 VAC
Voltaje salida secundario	6 VAC
Corriente de salida	1 A 400 vueltas en el primario 22 vueltas en el secundario

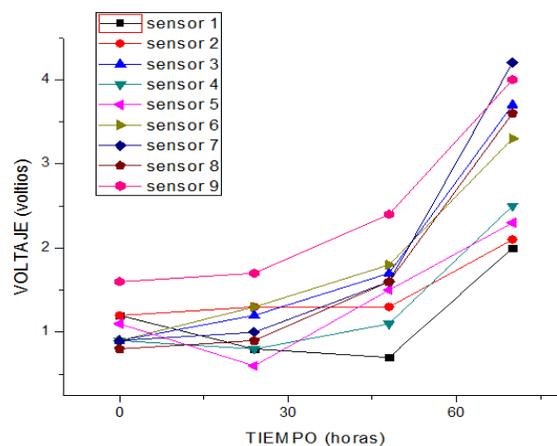
Para este ensayo se siguieron las mismas recomendaciones del ensayo anterior, se lleno los recipientes con 900 gramos de suelo tamizado a 4 mm y se agrego los 207 mililitros de agua, al igual que en los dos anteriores ensayos los sensores fueron ubicados en el centro de los recipientes.

Se llevo un registro de los datos de pérdida de humedad durante 3 días, En la Tabla 11 se muestran los datos obtenidos; Estos datos fueron graficados para observar la respuesta de los sensores a la perdida de humedad en el suelo, en la Figura 18 se muestra la grafica de voltaje en función del tiempo de los sensores de yeso con fuente alterna.

Tabla 11. Diferencia de tensión recolectados en el tercer ensayo sensores de yeso

Tiempo	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Horas	VOLTIOS								
0	1,2	1,2	0,9	0,9	1,1	0,9	0,9	0,8	1,6
24	0,8	1,3	1,2	0,8	0,6	1,3	1	0,9	1,7
48	0,7	1,3	1,7	1,1	1,5	1,8	1,6	1,6	2,4
70	2	2,1	3,7	2,5	2,3	3,3	4,2	3,6	4

Figura 18. Grafica de respuesta de los sensores de yeso a la pérdida de humedad en suelo con fuente AC

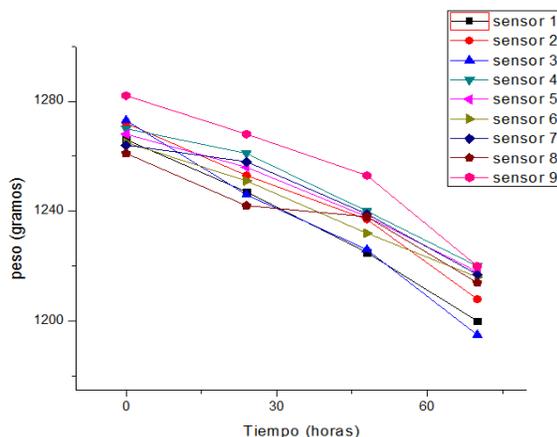


Para garantizar que la medida de pérdida de humedad suministrada por los sensores fuera coherente con la pérdida de humedad en los recipientes, se llevo un registro de peso durante los 3 días; En la Tabla 12 se muestran los datos recolectados durante el tercer ensayo, estos datos fueron graficados para observar su comportamiento, en la Figura 19 se muestra la perdida de humedad en el suelo.

Tabla 12. Datos de pérdida de humedad por peso recolectados en el tercer ensayo sensores de yeso

Tiempo Horas	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	GRAMOS								
0	1266	1272	1273	1270	1268	1265	1264	1251	1282
24	1247	1253	1246	1261	1256	1251	1258	1242	1268
48	1225	1237	1226	1240	1238	1232	1239	1238	1253
70	1200	1208	1195	1220	1218	1216	1217	1214	1220

Figura 19. Grafica de pérdida de humedad del suelo en el tercer ensayo



El tercer ensayo se finalizo cuando el suelo tenía un aspecto seco en la parte superior del recipiente, el análisis de la curva indicada en la Figura 18, da como resultado que la fuente AC es la solución para la electrolisis y nos muestra un correcto funcionamiento de los sensores respondiendo positivamente al cambio de humedad presente en el suelo.

3.3.1.2 Sensor de láminas descubiertas de cobre

El sensor de cobre se desarrollo a partir de los sensores de yeso mencionados anteriormente, se hace una variación del diseño que consiste en dejar una parte de las láminas descubiertas, con el fin de mejorar la respuesta de estos a la perdida de humedad en el suelo, El sensor diseñado consta de dos láminas de

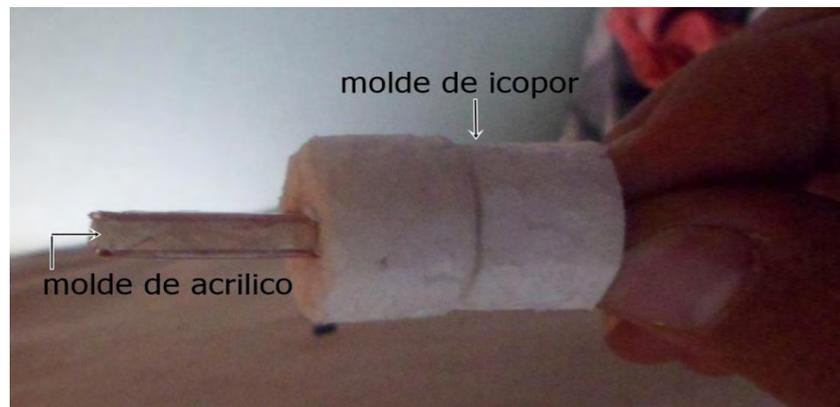
cobre en paralelo, cubiertas en uno de sus extremos por resina, esto con el fin de mantener la separación de las láminas. Se utilizó un material conocido como resina poliéster, es un químico que al mezclarlo con catalizador obtiene una textura dura, similar a la del plástico, estas características lo hacen inmune al contacto con el agua, impidiendo la entrada del líquido a la parte cubierta de las láminas, la resina poliéster y el catalizador se consiguen fácilmente en el comercio.

Para el desarrollo de este sensor, se compraron láminas de cobre de 15 cm de largo por 4 cm de ancho, con un espesor de 1 mm, de las cuales se obtuvieron las láminas que fueron adecuadas a las medidas de la Tabla 13, se les realizó el mismo procedimiento de soldado mencionado en el diseño de los sensores de yeso; Para su desarrollo se utilizaron tubos de pvc y moldes de icopor que evitan el derramamiento de la resina; Para obtener la separación de 3 mm entre las láminas, se utilizaron moldes de acrílico, el cual tiene un espesor de 3 mm; El procedimiento para su construcción comienza uniendo las láminas de cobre soldadas con el molde de acrílico y introduciéndolas en el molde de icopor, este procedimiento se muestra en la Figura 20.

Tabla 13. Características láminas de cobre utilizadas en los sensores de láminas descubiertas

CARACTERÍSTICAS LÁMINAS	MEDIDA (mm)
Ancho	10
Largo	20

Figura 20. Fotografía Láminas de cobre unidas e introducidas en el molde de icopor



Una vez listo este procedimiento, se continúa introduciendo el molde indicado en la Figura 20, en el tubo de pvc de 12 mm utilizado como molde externo, en la Figura 21, se muestra el molde introducido en el tubo de pvc.

Figura 21. Molde Final introducido en tubo de pvc de 12 mm



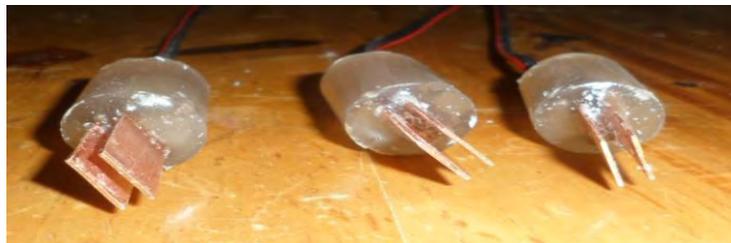
Para obtener el acabado final del sensor, se rellena primeramente con yeso la parte de las láminas que quedara descubierta, se deja secar y se retira el molde de icopor del interior del tubo de pvc, en el lugar donde estaba este molde se rellena con resina ya procesada, se deja secar y se retira el tubo de pvc haciendo un corte vertical, en la Figura 22, se muestra el sensor retirado del tubo de pvc.

Figura 22. Sensor de láminas descubiertas retirado del tubo de pvc



Finalmente con el sensor retirado del molde de pvc utilizado para darle la forma cilíndrica, se retira la parte de yeso, con la intención de que queden las láminas descubiertas, finalmente se retira el molde de acrílico utilizado para mantener la separación de 3 mm, una vez retirado se procede a limpiar y acomodar las láminas, retirando restos de resina y yeso que pudieran filtrarse, el sensor ya terminado es mostrado en la Figura 23.

Figura 23. Sensor de láminas descubiertas de cobre



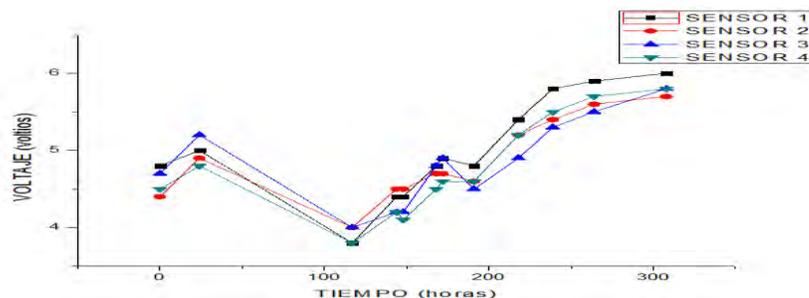
3.3.1.2.1 Primer ensayo sensor de láminas descubiertas de cobre

El ensayo de prueba de los sensores se hizo dentro del invernadero de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad de Nariño, se realizo con las mismas características del tercer ensayo de los sensores de yeso higroscópico, con iguales características de suelo, cantidad de agua y fuente de alimentación eléctrica, se dejo el suelo con una humedad del 25 %, se introdujeron los sensores en la mitad de los recipientes y se llevo el registro de los datos de pérdida de humedad durante 13 días; En la Tabla 14 se muestran los datos obtenidos en el Primer ensayo de los sensores de láminas descubiertas, estos datos fueron graficados para observar la respuesta de los sensores a la perdida de humedad y determinar la sensibilidad del sensor al movimiento de agua dentro del recipiente; En la Figura 24 se muestra la grafica de voltaje en función del tiempo, de los sensores de plástico con fuente alterna.

Tabla 14. Diferencia de potencial recolectado en primer ensayo sensores de láminas descubiertas de cobre.

Tiempo	1	2	3	4
Horas	VOLTIOS			
0	4,85	4,4	4,7	4,5
24	5	4,9	5,2	4,8
117	3,8	4	4	3,8
144	4,4	4,5	4,2	4,2
148	4,4	4,5	4,2	4,1
168	4,8	4,7	4,8	4,5
172	4,9	4,7	4,9	4,6
191	4,8	4,6	4,5	4,6
218	5,4	5,2	4,9	5,2
239	5,8	5,4	5,3	5,5
264	5,9	5,6	5,5	5,7
308	6	5,7	5,8	5,8

Figura 24. Grafica de respuesta de los sensores de láminas descubiertas de cobre a la perdida de humedad en suelo con fuente AC

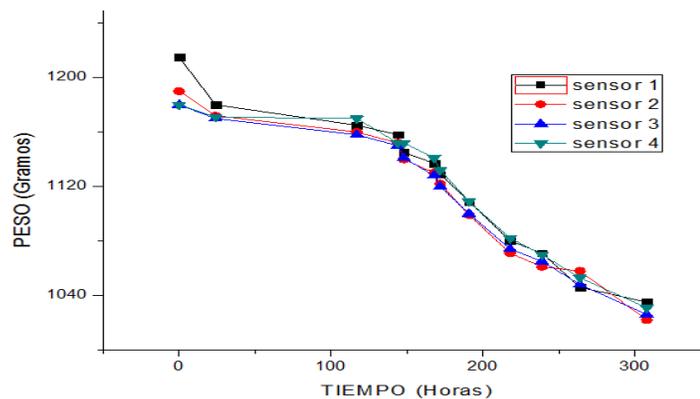


Para validar la pérdida de humedad en el tiempo, se llevo el registro de peso de los recipientes durante 13 días, los datos obtenidos son mostrados en la Tabla 15, y se realiza la grafica de estos datos, la grafica es mostrada en la Figura 25.

Tabla 15. Datos de pérdida de humedad por peso recolectados en el primer ensayo sensores de láminas descubiertas de cobre.

Tiempo Horas	1	2	3	4
	GRAMOS			
0	1215	1190	1180	1180
24	1180	1172	1170	1171
117	1165	1160	1158	1170
144	1158	1152	1150	1152
148	1145	1140	1141	1152
168	1137	1130	1128	1141
172	1129	1122	1120	1132
191	1109	1099	1100	1109
218	1080	1071	1074	1082
239	1071	1061	1065	1070
264	1046	1058	1048	1053
303	1035	1022	1026	1031

Figura 25. Grafica de pérdida de humedad ensayo sensores de láminas descubiertas de cobre.



3.3.1.2 Segundo ensayo sensor de láminas descubiertas de cobre.

Los sensores presentaron una buena sensibilidad al movimiento del agua dentro del recipiente, se detalla esto, en los picos de voltaje entregados por él, como se había explicado anteriormente estos picos se dan por la temperatura del medio externo, que ejerce una tensión sobre el suelo provocando el movimiento del agua dentro del recipiente, esta tensión es ejercida por la temperatura ambiente del

invernadero; Esta propiedad da confiabilidad en el diseño del sensor, permitiendo realizar un segundo ensayo en el cual, se variaron las características de las láminas de cobre utilizadas como electrodos, esto con fin de mirar cual es el efecto producido en la respuesta del sensor a la variación de humedad, esta variación es mostrada en la Tabla 16.

Tabla 16. Variación en las Características de los sensores de láminas descubiertas.

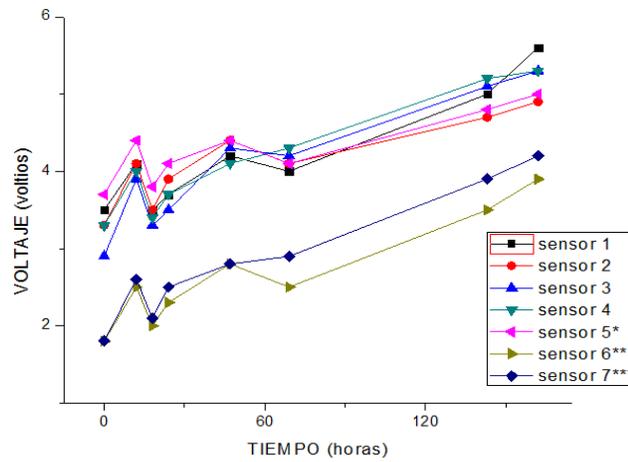
Característica láminas	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5*	Sensor 6**	Sensor 7***
Ancho (mm)	10	10	10	10	20	10	10
Largo (mm)	20	20	20	20	20	20	40
Separación (mm)	3	3	3	3	3	6	3

Los sensores 1, 2, 3, 4 son sensores iguales a los utilizados en el anterior ensayo, con iguales características en sus láminas, el sensor 5 tiene una variación en el ancho de sus láminas, el sensor 6 tiene una variación en la separación y el sensor 7 tiene una variación en el largo; Con estos sensores se evidencio que la estructura geométrica de diseño de los sensores es de gran importancia en su desarrollo, principalmente en el largo y en la separación de las láminas, el segundo ensayo fue montado en el invernadero de la Facultad de Ciencias Agrícolas, con las mismas característica en cuanto a utilización de suelo, agua y fuente de alimentación que en el ensayo anterior; Se llevo un registro de datos de voltaje por 7 días, estos datos son mostrados en la Tabla 17 y su grafica se muestra en la Figura 26.

Tabla 17. Diferencia de potencial recolectado en segundo ensayo sensores de láminas descubiertas

Tiempo Horas	1	2	3	4	5*	6**	7***
	VOLTIOS						
0	3,5	3,3	2,9	3,3	3,7	1,8	1,8
12	4,1	4,1	3,9	4	4,4	2,5	2,6
18	3,5	3,5	3,3	3,4	3,8	2	2,1
24	3,7	3,9	3,5	3,7	4,1	2,3	2,5
47	4,2	4,4	4,3	4,1	4,4	2,8	2,8
69	4	4,1	4,2	4,3	4,1	2,5	2,9
143	5	4,7	5,1	5,2	4,8	3,5	3,9
162	5,6	4,9	5,3	5,3	5	3,9	4,2

Figura 26. Grafica de respuesta de los sensores con variación en las láminas descubiertas a la pérdida de humedad en suelo con fuentes AC

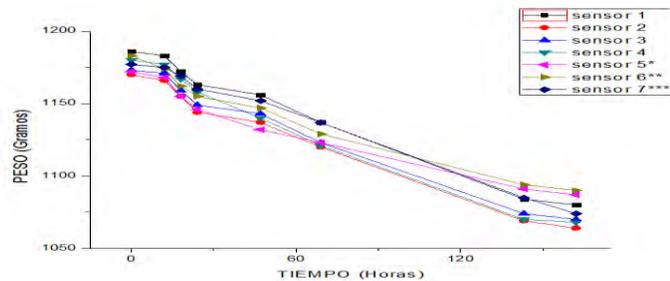


De igual forma que en los ensayos anteriores, se llevo un registro de pérdida de humedad por peso de los recipientes durante los 7 días del ensayo, los cuales permiten validar el comportamiento de los sensores a la pérdida de humedad indicados en la Figura 26, se detalla que aun cuando el voltaje en los sensores 6 y 7 es diferente, la perdida de humedad en los recipientes es igual para todos, esto confirma que la geometría del sensor influye en gran medida al valor de voltaje entregado. Los datos recolectados son mostrados en la Tabla 18 y la grafica de pérdida de humedad en la Figura 27.

Tabla 18. Datos de pérdida de humedad por peso recolectados en el segundo ensayo sensores de láminas descubiertas.

Tiempo	1	2	3	4	5*	6**	7***
Horas	GRAMOS						
0	1186	1170	1173	1180	1172	1183	1177
12	1183	1166	1171	1177	1168	1174	1175
18	1172	1155	1159	1167	1155	1162	1169
24	1163	1144	1149	1158	1146	1155	1160
47	1156	1137	1143	1140	1132	1147	1152
69	1137	1120	1123	1121	1123	1129	1137
143	1084	1069	1074	1070	1091	1094	1085
162	1080	1064	1070	1068	1087	1090	1074

Figura 27. Grafica de respuesta de los sensores con variación en las láminas descubiertas a la pérdida de humedad en suelo con fuentes AC



3.3.1.2.3 Tercer ensayo sensor de láminas descubiertas de cobre

La buena respuesta de los sensores de láminas descubiertas a los cambios de humedad presentes en el suelo, permiten desarrollar un tercer y último ensayo, en el cual se evaluó la respuesta de ellos a la aplicación de fertilizantes; Los fertilizantes a utilizar tanto en el desarrollo de este tercer ensayo como en el ensayo final del dispositivo, en el cual se controlara la humedad de un cultivo de maíz fertirrigado, son Nitrogeno (N), Fosforo (P) y Potasio (K) como elementos mayores y Calcio (Ca), Magnesio (mg) y azufre (S), como elementos secundarios y los microelementos, todos estos constituyen los elementos esenciales necesarios en una fertirrigación, que fueron determinados por el codirector del trabajo de grado; Cuyas cantidades se describen en la Tabla 19⁷.

Tabla 19. Cantidad de químico a utilizar en los ensayos bajo invernadero

Nutri- mento	Nutrimiento					Diluido en ml	Maceta 1 Kg ml
	nivel	Por maceta	Por suelo (36 macetas)	En el compuesto	por suelo (36 macetas)		
	Kg/h	g	g	%	g		
N	200	0,10	3,60	46	7,83	360	10
P	500	0,25	9,00	22	40,90	360	10
K	200	0,10	3,60	52	6,92	360	10
Ca	500	0,25	9,00	40	22,50	360	10
Mg	300	0,15	5,40	29	18,62	360	10
S	100	0,05	1,80	23	7,83	360	10
Cu	10	0,005	0,18	36	0,50	360	10
Zn	20	0,01	0,36	48	0,75	360	10
Mn	40	0,02	0,72	28	2,57	360	10
Fe	50	0,025	0,90	19	4,74	360	10
Mo	10	0,005	0,18	40	0,45	360	10

⁷ SÁNCHEZ, Alberto. INSUASTY, Ruth. CHAVEZ, Germán. Manual de prácticas de laboratorio FERTILIDAD DE SUELOS. Editorial Universitaria- Universidad de Nariño. Primera edición. 2009. P. 35.

B	10	0,005	0,18	12	1,50	360	10
---	----	-------	------	----	------	-----	----

Los nutrimentos utilizados fueron suministrados por el laboratorio de suelos de la Universidad de Nariño y cada uno de ellos tiene diferentes compuestos químicos, estos son detallados a continuación:

- N = $\text{CO}(\text{NH}_2)$
- P = $\text{NaH}_2\text{PO}_4\text{H}_2\text{O}$
- K = KCL

Para el ensayo se toma cada nutrimento individualmente con el fin de mirar si es o no conductor de electricidad; Para esto, se utilizaron 3 recipientes de 1 Kg en los cuales se colocaron individualmente 500 ml de N, 500 ml de P y 500 ml de k, se introdujeron los sensores de láminas descubiertas alimentados con una fuente AC de 6 voltios, comprobando que quedaran totalmente sumergidos dentro del nutrimento y se tomaron valores de diferencia de tensión en cada sensor, determinando que de los tres nutrimentos a utilizar, el único que presento propiedades conductivas era el nutrimento N. Los datos obtenidos en este ensayo son mostrados en la Tabla 20.

Tabla 20. Conductividad de los nutrientes NPK determinado por los sensores de láminas descubiertas de cobre

Nutrimento	Voltaje entregado por los sensores (voltios)
Nutrimento N	5,1
Nutrimento P	0
Nutrimento K	0

El valor de (0) voltios para los nutrimentos P y K, son interpretados desde el punto de vista del sensor como un circuito abierto, lo cual evidencia la falta de propiedades conductivas en estos nutrimentos.

En este último ensayo se determino que el valor de voltaje baja al agregarle el nutrimento NPK, ya que en un suelo a 25 % de humedad utilizado en los anteriores ensayos, el sensor de láminas descubiertas entrega un voltaje de 3,5 voltios aproximadamente, sabiendo según la Tabla 19, que para una maceta de 1 Kg de suelo hay que agregarle 10 ml de cada elemento, se agregan al suelo 30 ml de NPK bajando el voltaje a 2,6 voltios.

Determinado que el sensor de láminas descubiertas tiene una alta sensibilidad al movimiento del agua dentro del recipiente y por consiguiente a la pérdida de humedad en el suelo, se desarrollaron 2 tipos de sensores de diferente material, para determinar que sensor es más resistente a la corrosión.

3.3.1.3 Sensor de varillas de bronce descubiertas

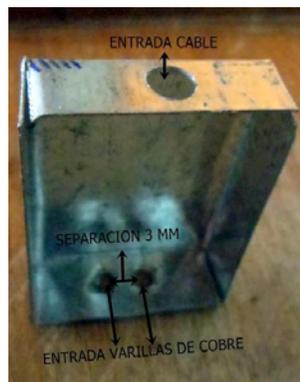
Para el diseño del sensor se compraron varillas de 3mm de diámetro por 1 metro de largo de bronce, las cuales fueron adecuadas según la Tabla 21, estas varillas son comúnmente utilizadas en soldadura autógena.

Tabla 21. Características de las varillas de bronce utilizadas en el desarrollo del sensor

CARACTERISTICAS VARILLAS DE BRONCE	MEDIDA (mm)
Largo varilla	100
Ancho varilla	3

Este sensor diseñado corresponde a una variación del sensor de láminas descubiertas de cobre mencionado anteriormente, ya que, únicamente se cambian las láminas de cobre por varillas de bronce, se utilizan varillas por su estructura cilíndrica que permite tener mejor cubrimiento del suelo sobre ellas disminuyendo posibles errores por mal cubrimiento de los sensores; Al igual que en los sensores diseñados anteriormente se mantiene una separación de 3 mm entre cada varilla, para que el sensor funcione como electrodos dentro del suelo, Para mantener la separación se diseño una caja de lamina de acero la cual fue adecuada según los requerimientos, la caja diseñada como molde del sensor se muestra en la Figura 28.

Figura 28. Caja de lámina de acero diseñada como molde del sensor de bronce



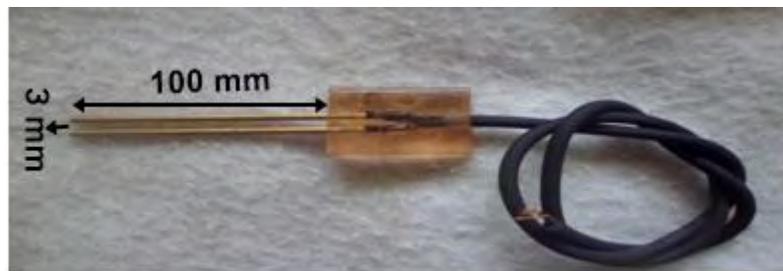
A las varillas de bronce se les hace en uno de sus extremos un corte superficial alrededor de la varilla, con el fin de unir a él cables de cobre, se hace esto por la dificultad al momento de soldar los cables; Para que estos cables no se suelten de la varilla se utiliza una cinta termoencogible de 3mm la cual al aplicarle calor se contrae hasta quedar totalmente adherida a la varilla, en la Figura 29 se muestra el procedimiento realizado.

Figura 29. Varilla de bronce unida al cable de cobre



Con las varillas listas se procede a introducirlas en la caja diseñada como molde externo, ya introducidas, se procede a cubrirlas con resina procesada; Esta resina es la misma utilizada en el diseño del sensor de láminas descubiertas de cobre, se deja secar y se retira el molde externo, en la Figura 30 se muestra el sensor de bronce ya terminado.

Figura 30. Sensor de varillas de bronce descubiertas terminado



3.3.1.4 Sensor de varillas de acero descubiertas

Para el desarrollo del sensor se compro una varilla de acero inoxidable industrial de referencia 324, tienen un diámetro de 3 mm por 1 metro de largo, esta varilla fue adecuada a las medidas de la Tabla 22.

Tabla 22. Características de las varillas de acero utilizadas en el desarrollo del sensor

CARACTERÍSTICAS VARILLAS DE ACERO	MEDIDA (mm)
Largo varilla	50
Ancho varilla	3

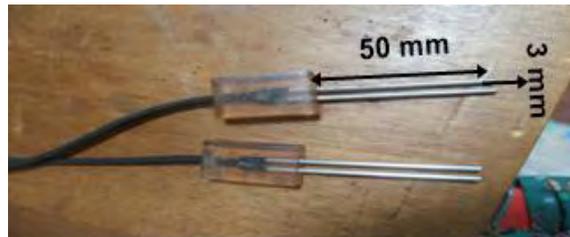
Para el diseño del sensor de acero se siguen los mismos pasos del sensor de bronce; en la Figura 31 se muestran las varillas de acero introducidas en el molde externo.

Figura 31. Varillas de acero introducidas en el molde externo



De igual manera que en el anterior diseño se utiliza resina para mantener la separación de las varillas, el sensor de acero termina se muestra en la Figura 32.

Figura 32. Sensor de varillas de acero terminado



Terminado el diseño de los sensores de láminas descubiertas, se realizó una prueba para determinar cuál de ellos era más resistente a la corrosión provocada por la humedad del suelo, para esto, se colocaron los tres tipos de sensores de láminas descubiertas dentro de recipientes de suelo saturado conectados a una fuente de corriente alterna, se dejó por una semana, al finalizar se retiraron los sensores del suelo, observando que en el sensor de acero inoxidable no había ningún cambio en sus electrodos, en cambio, tanto en el sensor de láminas de cobre como en el sensor de bronce, se observó la pérdida de brillo y un ligero recubrimiento de manchas negras en sus electrodos que indican la oxidación de estos provocado por el constante contacto con la humedad.

Como resultado de los ensayos desarrollados en el diseño de los sensores, se determinó que el sensor de varillas de acero descubiertas era el más apropiado a utilizar en el control de humedad, por sus características de resistencia a la corrosión y a la electrolisis provocada por el constante contacto con la humedad presente en el suelo.

3.3.2 Calibración sensor de humedad diseñado

La calibración de los sensores de humedad tiene que hacerse de una manera confiable y segura ya que establece la relación del valor medido por el sensor con

un valor convencionalmente real, dando validez y trazabilidad a la medición, esto permite garantizar que el grado de humedad presentado por el sensor sea preciso; Por esto, para la calibración del sensor se utilizó la curva característica de retención de humedad del suelo mostrada en la Figura 10 y que fue proporcionada por el laboratorio especializado de suelos, que avala la exactitud de cada uno de los puntos de humedad a controlar en el diseño del dispositivo.

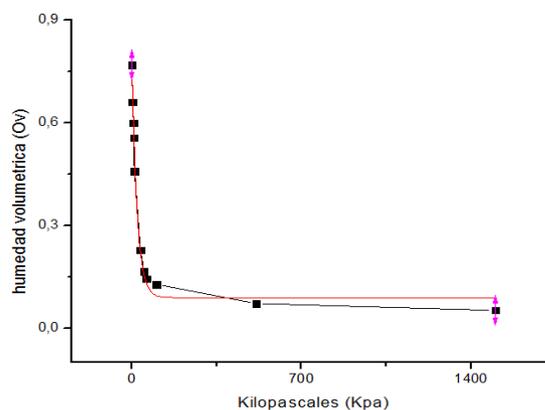
Para la calibración del sensor se comenzó ajustando un modelo matemático a la curva característica de retención de humedad del suelo mostrada en la 08, con el fin de determinar la humedad volumétrica de los potenciales de humedad faltantes, ya que, en los puntos entregados por el laboratorio especializado de suelos no se encuentra los potenciales de 40 y 80 Kpa los cuales están incluidos en el control de humedad que maneja el Dispositivo.

3.3.2.1 Ajuste matemático

Para el ajuste matemático se introdujeron los datos entregados por el laboratorio especializado de suelos de la Universidad de Nariño mostrado en la Tabla 2 al programa Origin8 versión Pro, el cual permite graficar y ajustar diferentes modelos matemáticos buscando un R^2 cercano a 1 que ayuda a evaluar la bondad de cada ajuste. El *coeficiente de determinación* R^2 indica, en qué grado la variabilidad de los datos es explicada o representada por la curva que se ajusta. Este valor está entre 0-1 y el mejor ajuste será aquel que más se acerque a la unidad⁸.

En la Figura 33 se muestra la curva característica de retención de humedad con un ajuste matemático exponencial decreciente.

Figura 33. Curva característica de retención de humedad con ajuste exponencial decreciente



⁸CAMPOS, Daniel. Ajustes de Curvas - Regresión y correlación polinomial. En: Introducción a los métodos numérico: Software en Basic y Aplicaciones en Hidrología Superficial. Noviembre. 2002. p. 100-102.

Este ajuste nos permite obtener la ecuación característica de la curva, con un R² de 0,98922, en la Tabla 23 se indica la ecuación matemática obtenida.

Tabla 23. Ecuación característica de la curva de retención de humedad

Ecuación	$Y = Y_0 + A * \exp (R_0 * X)$ Y = Humedad volumétrica , X= Potencial de Humedad		
Ajuste R²	0,98922		
Variable	Y ₀	A	R ₀
Valor	0,08854	0,65448	- 0,0468

Con la ecuación característica de la curva de retención de humedad se encontraron los potenciales de humedad faltantes dentro de la curva original, obteniendo unos nuevos datos los cuales son mostrados en la Tabla 24.

Tabla 24. Humedad volumétrica a partir de la ecuación característica de retención de humedad.

Kpa	Humedad Volumétrica (θ_v)
20	0,34522
30	0,24928
40	0,18920
50	0,15158
60	0,12802
80	0,10402
100	0,09461
500	0,07142
1500	0,05153

Los datos de humedad volumétrica encontrados son utilizados para determinar la cantidad de agua a utilizar en la calibración de los sensores; Lo que se hizo es multiplicar la humedad volumétrica por una cantidad de suelo conocida, esto nos da la cantidad de agua a utilizar en cada uno de los potenciales de humedad, una vez encontrada la cantidad de agua, se la agrega al suelo y se introduce el sensor de varillas de acero diseñado, se espera a que el suelo quede totalmente cubierto por el agua para tomar el dato de voltaje, con el fin de garantizar que hay una homogeneidad de humedad en el suelo, este voltaje es lo que permite relacionar humedad volumétrica con voltaje entregado por el sensor; obteniendo una función de la forma $\theta_v = f(v)$; Para determinar la cantidad de agua a utilizar en cada potencial se utilizo 500 gramos de suelo, Los datos obtenidos son mostrados en la Tabla 25.

Para determinar el voltaje de cada potencial de humedad se energizaron los sensores con una señal sinusoidal de amplitud 3.2 voltios pico, se modifico el circuito mostrado en la Figura 13 para la medida del voltaje, en este caso, se cambio de ubicación la resistencia de 100 K Ω y el sensor, con el propósito de medir el voltaje en la resistencia y ya no en el sensor, esta configuración del circuito es mostrado en la Figura 34; Para su calibración se utilizaron recipientes cerrados en los cuales se colocaron 500 gramos de suelo, más la cantidad de agua a utilizar, la cantidad de agua se agrego con una transferpipeta mostrada en la Figura 35, la cual es utilizada en el laboratorio de suelos para procesos químicos, es una herramienta de muy alta precisión, lo cual reduce el margen de error en la toma de los datos, ya agregada el agua se introdujo los sensores diseñados y se tomaron los valores de voltaje, en la Tabla 26 se muestran los datos de voltaje obtenidos.

Figura 34. Circuito Utilizado en la medida del Voltaje

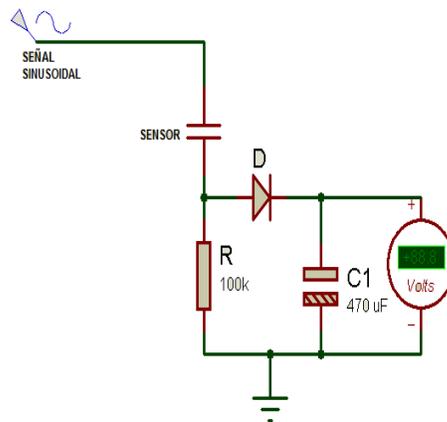


Figura 35. Transferpipeta de Alta precisión



Tabla 25. Cantidad de agua a utilizar

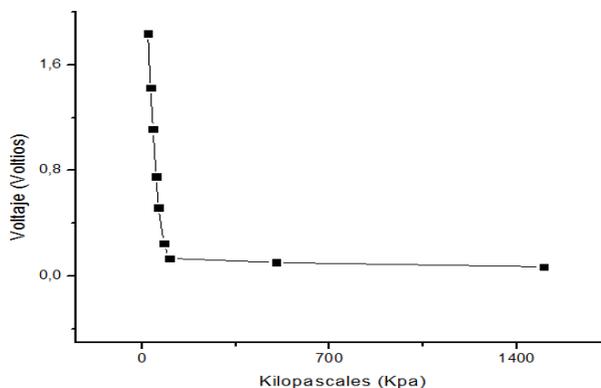
Kpa	Humedad Volumétrica (Θ_v)	Cantidad de suelo (g)	Cantidad de agua (ml)
20	0,34522	500	172,61
30	0,24928	500	124,64
40	0,18920	500	94,60
50	0,15158	500	75,79
60	0,12802	500	64,01
80	0,10402	500	52,01
100	0,09461	500	47,30
500	0,07142	500	35,71
1500	0,05153	500	25,76

Tabla 26. Voltaje obtenido en cada punto a partir de la humedad volumétrica

Kpa	Humedad Volumétrica (Θ_v)	Voltaje sensor (V)
20	0,34522	1,836
30	0,24928	1,423
40	0,18920	1,114
50	0,15158	0,754
60	0,12802	0,519
80	0,10402	0,250
100	0,09461	0,135
500	0,07142	0,105
1500	0,05153	0,071

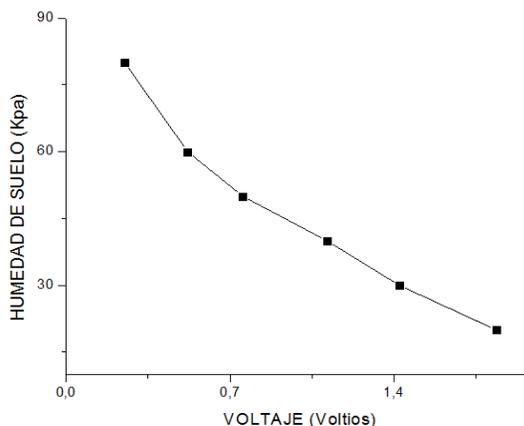
Con los datos obtenidos en la Tabla 26, se grafican para detallar el voltaje de los sensores dependiendo de la humedad volumétrica de cada potencial, esta grafica se muestra en la Figura 36.

Figura 36. Curva de respuesta de los sensores dependiendo de la humedad volumétrica



Para el trabajo de grado se utilizan los potenciales de humedad comprendidos entre 20 y 80 Kpa, potenciales que comprenden el rango de control del dispositivo diseñado, por lo tanto se toman únicamente estos datos de la Tabla 26. En la Figura 37 se muestra la Curva de respuesta.

Figura 37. Curva de respuesta de humedad de los sensores diseñados



Finalmente para obtener la ecuación de respuesta de humedad de los sensores se ajusta un modelo matemático a la curva de la Figura 37, obteniendo como resultado que el modelo que más se ajusta es de tipo polinomial de grado 3, con un R^2 de 0,9944, en la Figura 38 se muestra el modelo aplicado y en la Tabla 27 se indica la ecuación obtenida.

Figura 38. Curva de respuesta de humedad de los sensores diseñados con ajuste polinomial de grado 3

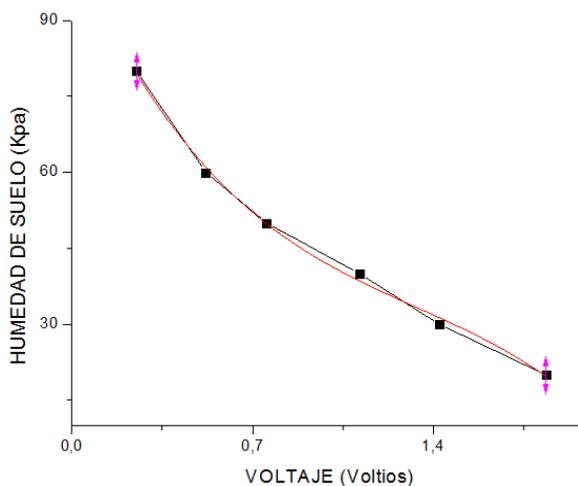


Tabla 27. Ecuación característica de respuesta de humedad de los sensores diseñados

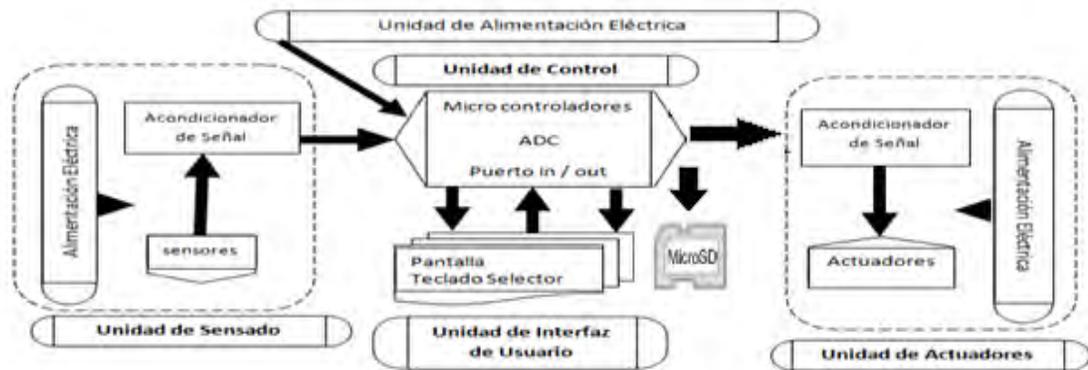
ECUACION	$Y = A + B \cdot X + C \cdot X^2 + D \cdot X^3$ Y = Humedad del suelo , X = Voltaje de sensor			
Ajuste R²	0,9944			
Variable	A	B	C	D
Valor	103,85153	-113,03232	67,69132	-16,93156

3.3.3 Diseño e implementación de las unidades internas del dispositivo

3.3.3.1 Diagrama de bloques de la estructura interna del dispositivo

Se diseña un diagrama de bloques de la estructura interna del dispositivo, detallando de manera rápida las unidades que lo compondrán, obteniendo una idea de cómo interactúan cada una de las unidades diseñadas, generando mayor orden y precisión al momento de su desarrollo. La Figura 39 muestra el diagrama de bloques desarrollado.

Figura 39. Diagrama de bloques del dispositivo



El diagrama de bloques del Dispositivo de control de humedad Diseñado cuenta con: Unidad de Procesamiento y Control, Unidad de Sensado, Unidad de Interfaz de usuario, Unidad de Actuadores, Unidad de Alimentación Eléctrica y se aumento una unidad de guardado de datos en una Micro SD, esta unidad no estaba contemplada dentro del desarrollo del Dispositivo, se implemento por recomendación del CoDirector del Trabajo de grado.

3.3.3.2 Descripción del diseño

El control de humedad del suelo se logra partiendo de la Unidad de sensado, ya que en ella se encuentra la fuente de alimentación de los sensores y la adecuación de la señal, los sensores se encargan de monitorear continuamente el valor de humedad presente en el suelo, cada recipiente de suelo contendrá un sensor. Adecuada la señal proveniente de los sensores, se envía a la Unidad de Procesamiento y control donde se evalúa si el valor de humedad medido está dentro o fuera del rango establecido por el usuario; También, se muestran datos reales de humedad en una pantalla LCD y se guardan en una memoria MicroSD permitiendo un posterior análisis de los datos adquiridos; Dependiendo de la orden de la Evaluación, la unidad de control activa o desactiva los actuadores permitiendo el paso del agua de riego.

La unidad de Procesamiento y control, cuenta con una función de fertilización, en la cual se puede programar 5 fechas de fertilización; Estas fechas serán programadas por un profesional en Agronomía basado en el desarrollo del cultivo y los requerimientos de nutrientes; Dependiendo de la cantidad de fertilizante a utilizar, una señal de control es enviada a los actuadores permitiendo el paso del fertilizante según la cantidad programada.

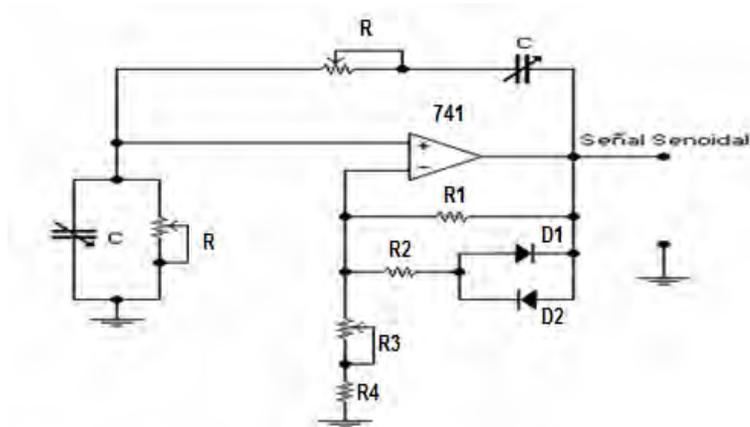
3.3.3.2.1 Unidad de sensado

La unidad de sensado se diseñó con 2 bloques de sensores, cada una de ellos con 4 sensores, con el fin de proporcionar al usuario la posibilidad de mantener cada bloque a diferente potencial de humedad.

La unidad se diseñó partiendo de los requerimientos de alimentación y adecuación de la señal; Debido a que los sensores necesitan de una fuente de alimentación de corriente Alterna AC, se implementó un circuito oscilador sinusoidal, que garantiza un flujo de corriente periódico del terminal positivo al negativo, evitando su corrosión por electrolisis.

Para la señal sinusoidal implementada se utiliza un oscilador en puente de Wien, capaz de generar una señal sinusoidal sin necesidad de una señal de entrada, este es un oscilador de tipo RC y es comúnmente utilizado en instrumentos de laboratorio de frecuencia variable, conocidos como generadores de señales, El circuito cuenta con un amplificador operacional LM741, energizado con una fuente dual de ± 9 voltios, esta realimentado tanto positiva como negativamente, la realimentación negativa configura un amplificador no inversor y la realimentación positiva es la que le da al circuito la característica de oscilador, en la Figura 40 se muestra el circuito implementado.

Figura 40. Oscilador de puente de Wien



Fuente: CISNEROS JIMÉNEZ, Ignacio. Generador de Funciones. Universidad de Guadalajara. Departamento de Electrónica. 2006. p.8

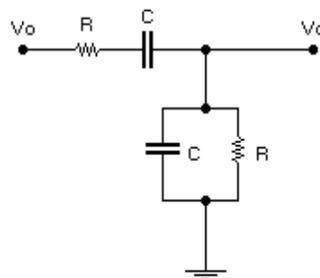
La amplitud de la señal está determinada por la siguiente expresión algebraica.

$$A = 1 + \frac{R_n}{R_m} \quad \text{Ecuación 2.}$$

Donde R_n es el paralelo entre R_1 y R_2 ; y R_m es la serie entre el trimmer R_3 y la resistencia R_4 ; el potenciómetro de R_3 determina si los diodos entran o no en conducción, cuando los diodos entran en conducción cada diodo conduce en un semiciclo, permitiendo fijar una amplitud y son ellos quienes se encargan de estabilizar la señal de salida.

La realimentación positiva mostrada en la Figura 41, permite fijar la frecuencia de oscilación del circuito determinada la Ecuación 3 descrita a continuación.

Figura 41. Realimentación positiva del oscilador de Wien



Fuente: CISNEROS JIMÉNEZ, Ignacio. Generador de Funciones. Universidad de Guadalajara. Departamento de Electrónica. 2006. p. 9.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

Ecuación 3.

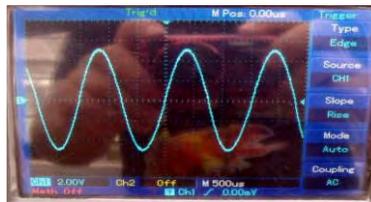
La frecuencia de oscilación depende de R, por esto se utilizan trimers de 50 KΩ que permiten variar y obtener diferentes valores de frecuencia de oscilación de la señal.

Tabla 28. Valores de resistencias, diodos y condensadores para el oscilador de Wien

SIMBOLOGIA	VALOR
TRIMER R	50 KΩ
R1	10 KΩ
R2	4,5 KΩ
TRIMER R3	10 KΩ
R4	2,2 KΩ
D1, D2	1N4007
C	26,11 nF

Diseñado el oscilador del puente de Wien, se obtiene una señal sinusoidal mostrada en la Figura 42.

Figura 42. Señal Sinusoidal a partir del Oscilador de puente de Wien

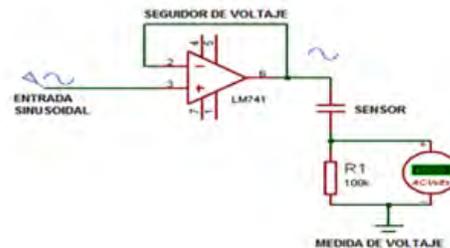


Teniendo en cuenta el numero de sensores de cada bloque y evitar pérdidas por sobrecarga del generador de la señal AC, se decidió implementar para cada bloque un circuito oscilador, ajustando la señal de salida con los trimers de tal manera que tengan iguales características de amplitud y frecuencia.

Para evitar la pérdida de la señal por acople de impedancias con los sensores, se implemento a la entrada de cada sensor un seguidor de voltaje con el amplificador LM741, este circuito aprovecha la característica de alta impedancia de entrada y baja del amplificador operacional para hacer estos acoples, el seguidor de voltaje entrega a la salida la misma señal sinusoidal que en la entrada, teniendo como principal función evitar la atenuación de señales que aun teniendo un buen nivel de voltaje tienen baja potencia en su salida.

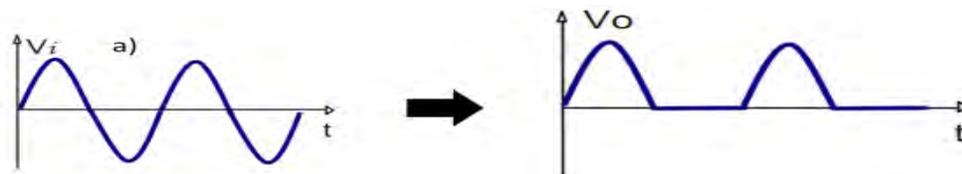
El seguidor de voltaje hace su acople con el circuito utilizado en la medida del voltaje, mostrado en la Figura 34. Así finalmente se obtiene el circuito de acople entre la señal Sinusoidal y el sensor, este circuito es mostrado en la Figura 43.

Figura 43. Circuito seguidor de voltaje para acople con sensor



Debido a que el valor medido en la resistencia es de corriente alterna, por principios de la ley de Kirchoff, quien afirma que en un lazo cerrado, la suma de todas las caídas de tensión es igual a la tensión total suministrada. De forma equivalente, la suma algebraica de las diferencias de potencial eléctrico en un lazo es igual a cero⁹, se miro la necesidad de implementar un circuito que permita manejar valores de corriente directa, ya que el microcontrolador procesa valores de voltaje entre 0 y 5 voltios, por esto, se utilizo un circuito rectificador de media onda, el cual elimina la parte negativa de la señal adquirida y deja la parte positiva para su procesamiento, el proceso de rectificación de media onda en mostrado en la Figura 44.

Figura 44. Proceso de rectificación de media onda



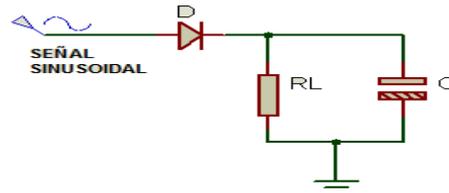
Fuente: CIFUENTES GONZÁLES, Irving Aaron. Diseño y construcción de un sistema para la detección de señales electromiografías. Universidad Autónoma de Yucatán. 2010. p. 20. [En línea].
><ftp://ftp.uady.mx/pub/tmp/smagana/TESIS%20FINALIZADA.pdf>

El circuito rectificador de media onda está conformado por un diodo que no presenta la pérdida de 0,7 voltios típica de los diodos, así los voltajes de entrada como los de salida son iguales, permitiendo rectificar la señal que se le aplique con gran exactitud; Para obtener una señal totalmente lineal se le añade al

⁹ HAYT, William. KEMMERLY, Jack. DURBIN, Steven. Análisis de circuitos en ingeniería. 6 ed. México. McGraw-Hill, 2003. 829p.

rectificador de onda un condensador que elimina el rizo de la señal rectificada, obteniendo como resultado una señal de corriente continua. La figura 45 muestra la configuración de este circuito.

Figura 45. Circuito rectificador de media onda con filtro



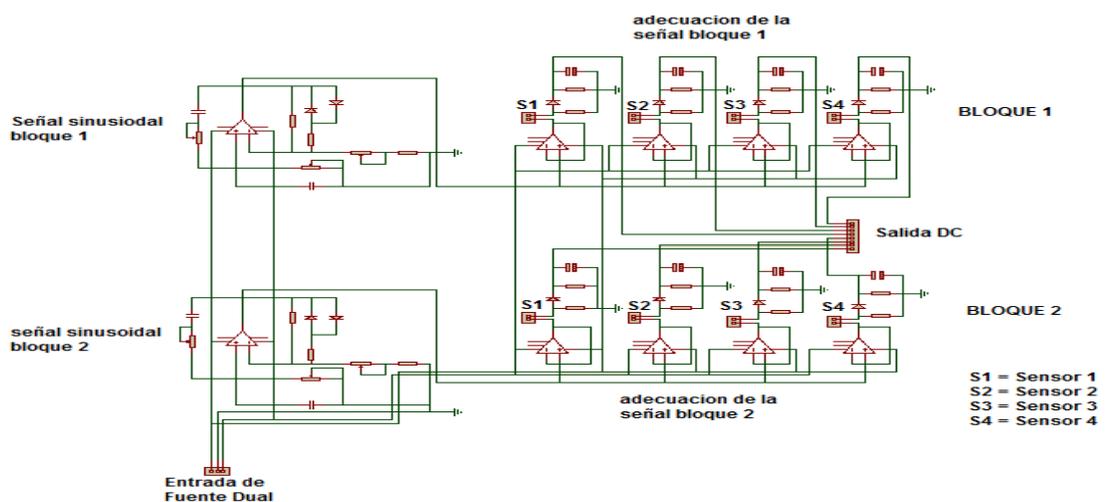
Para el circuito rectificador de media onda con filtro se utilizaron los materiales mostrados en la Tabla 29.

Tabla 29. Materiales Utilizados en circuito rectificador de media onda con filtro

SIMBOLOGIA	VALOR
D	1N4007
RL	10 KΩ
C	470 uF

Finalmente obtenemos el diseño de la unidad de sensado, en la cual se alimenta el sensor con una señal sinusoidal proveniente del Oscilador de puente de Wien, se adecua la señal por medio del seguidor de voltaje y el rectificador de media onda con filtro, dejándola lista para ser procesada por la unidad de procesamiento y control. En la Figura 46 se muestra el diseño completo de la Unidad de sensado.

Figura 46. Unidad de Sensado Diseñada



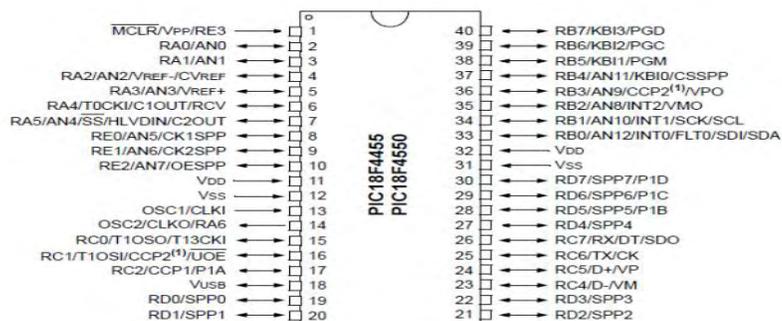
3.3.3.2.2 Unidad de Procesamiento y Control

La unidad de procesamiento y control es la más importante dentro del diseño del dispositivo, ya que es ella quien toma todas las decisiones dependiendo de los datos suministrados por la Unidad de sensado, ella determina donde, cuando y cuanto regar, el procedimiento para el diseño de esta unidad parte de la necesidad de manejar los datos de humedad medidos por los sensores, para este requerimiento se utilizó un Microcontrolador por ser un circuito integrado programable, capaz de ejecutar las órdenes grabadas en su memoria. Está compuesto de varios bloques funcionales, los cuales cumplen una tarea específica. Un microcontrolador incluye en su interior las tres partes principales de una computadora: Unidad central de procesamiento, memoria y periféricos de entrada/salida, convirtiéndolo en un instrumento muy utilizado en el control de diversos procesos.

Para nuestro propósito se utilizó el Microcontrolador 18F4550, pertenece a la familia PIC18MCU, con una frecuencia de trabajo de 4 Mhz, esta frecuencia es generada por un oscilador XT (cristal de cuarzo), la descripción de los pines se muestra en la Figura 47; Se eligió este microcontrolador por su capacidad de memoria de programa, sus 5 puertos Entrada/Salida, la comunicación serial y los 13 canales de entradas analógicas¹⁰.

La alimentación del Pic se realizó con el regulador LM7805 que tiene un máximo de salida de 5 voltios, se coloca este regulador en el diseño de la unidad de procesamiento y control porque la fuente de alimentación diseñada tiene un rango de ± 9 voltios necesaria para la unidad de sensado, la cual genera una onda sinusoidal.

Figura 47. Esquema de pines del Microcontrolador 18F4550

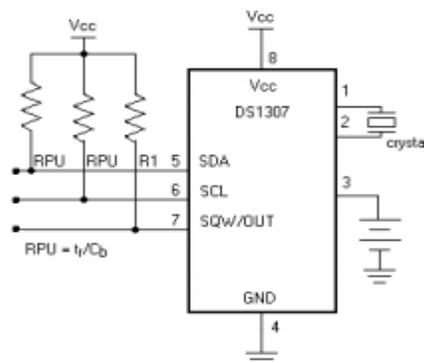


¹⁰ Microchip. Hoja de datos Microcontrolador PIC18F4550. [En línea]
> <http://www.bilbaoelectronics.com/datasheet-pic18f4550.html>

El diseño de la Unidad de procesamiento y control comienza por la adquisición de las señales provenientes de la Unidad de sensado, estas son introducidas al Pic utilizando 8 de sus 13 canales de conversión A/D, estas 8 señales son divididas en dos bloques de 4 cada uno, con el fin de permitir el manejo de 2 bloques de humedad a diferentes potenciales; a cada bloque de 4 se le saca el promedio de voltaje dependiendo del número de sensores a utilizar en cada bloque, este voltaje es introducido en la ecuación de control mostrada en la 028. y que se obtuvo de la calibración de los sensores de humedad diseñados; En ella el valor de voltaje es convertido a Potencial de humedad, este potencial es comparado con el valor establecido por el usuario por medio de la interfaz de Usuario, que estará dentro del rango de 33 a 60 Kpa, la comparación, permite evaluar si la humedad del suelo está dentro o fuera del rango establecido; Si el potencial de humedad esta por fuera del rango, el microcontrolador envía un pulso a los actuadores indicando que se debe regar, si el rango esta dentro del valor establecido, el microcontrolador sigue tomando datos de los sensores, el Diagrama de flujo es mostrado en la Figura 50.

La unidad de procesamiento y control cuenta también con unas fechas de programación de fertilización, para este propósito se utiliza un reloj externo de referencia DS1307¹¹, que permite el manejo de segundos, minutos, horas, días, meses y años, La frecuencia de trabajo del reloj está determinada por un oscilador externo de frecuencia 32.768 Khz¹² con el fin de lograr que el reloj de esta Unidad trabaje igual que un reloj normal de computador, el diagrama de conexión del reloj esta mostrado en la Figura 48; La unidad de control cuenta con 5 fechas de fertilización y la cantidad de fertilizante a agregar está mostrada en la Tabla 30.

Figura 48. Esquema de conexión DS1307



Fuente: DALLAS Semiconductor. Hoja de datos reloj DS1307 [En línea]
> <http://pdf.datasheetcatalog.net/datasheet/maxim/DS1307.pdf>

¹² Hoja de datos. Maxim integrated. DS1307 64x8, Serial, I²C Real-Time Clock [En línea]
> <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS1307.pdf>

Tabla 30. Cantidad de fertilizante a utilizar determinado por tiempos de activación de los actuadores

CANTIDAD DE FERTILIZANTE (ml)	TIEMPO (seg)
10	18
20	36
30	54
40	72
50	90
60	108
70	126
80	144
90	162

El tiempo de fertilización está determinado por el sistema de riego utilizado, se utilizaron goteros de precisión los cuales riegan 2 litros de cualquier líquido por 2 horas, se calculo el tiempo para cada cantidad de fertilizante utilizando regla de 3, este procedimiento es mostrado a continuación.

- **Utilización de regla de 3**

Se realiza el cálculo para 10 ml, se parte sabiendo que los goteros riegan 2 L en 1 Hora

$$\begin{array}{l}
 2000 \text{ ml} \leftrightarrow 3600 \text{ seg} \\
 10 \text{ ml} \quad \leftrightarrow \quad X
 \end{array}
 \qquad
 X = \frac{3600 \text{ seg} * 10 \text{ ml}}{2000 \text{ ml}} = 18 \text{ seg}$$

3.3.3.2.1 Determinación de control de riego

Para indicarle a la Unidad de procesamiento y control cuándo comenzar el riego y durante cuánto tiempo mantenerlo activo, se planteo un sistema de control de riego por picos, basado en el sistema de riego por goteo, es decir, riega cierta cantidad de agua y espera cierto tiempo, se hace esto utilizando los goteros de precisión que riegan 2 litros en 1 hora; Con esta relación se calcula cuanto tiempo debe estar activa la electroválvula para regar 30 ml de agua; La activación se hace tomando la humedad programada por el usuario + 5 Kpa, esto nos da un rango de 5 Kpa de humedad permisible; Cuando el sistema de control detecta que el potencial del suelo esta sobrepasando el límite establecido, activa las electroválvulas y espera un tiempo, si en este tiempo de espera el valor de humedad ha bajado, el Dispositivo espera nuevamente a que la humedad del suelo sobrepase el limite, si no ha bajado, activa una vez más las electroválvulas; Así hasta bajar la humedad al potencial deseado.

3.3.3.2.3 Unidad de interfaz de Usuario

En la unidad de interfaz de usuario se va a utilizar una pantalla LCD de 20x4, en la cual se podrá observar los comandos programados en el micro controlador, como también el valor en tiempo real del potencial de humedad al cual se encuentra nuestro cultivo

La unidad permite la interacción del usuario con el equipo, por medio de 6 pulsadores de los cuales, 3 se utilizan para entrar al menú de selección, donde se selección la cantidad de sensores a utilizar, el potencial de humedad deseado para el cultivo y la programación de las fechas de fertilización; 1 se utiliza para resetear el equipo, 1 para volver a la pantalla de inicio y 1 más para encender la luz de la pantalla LCD.

Además, se le anexo al equipo una salida para el manejo de dos pantallas de display para mostrar el valor en tiempo real del potencial de humedad del cultivo de cada bloque, esto con el fin de facilitar la visualización del potencial de humedad al usuario.

Finalmente en la Figura 50 se muestra el diseño del sistema de control e interfaz de usuario dando cumplimiento al tercer objetivo.

Figura 49. sistema de control e interfaz de Usuario diseñado

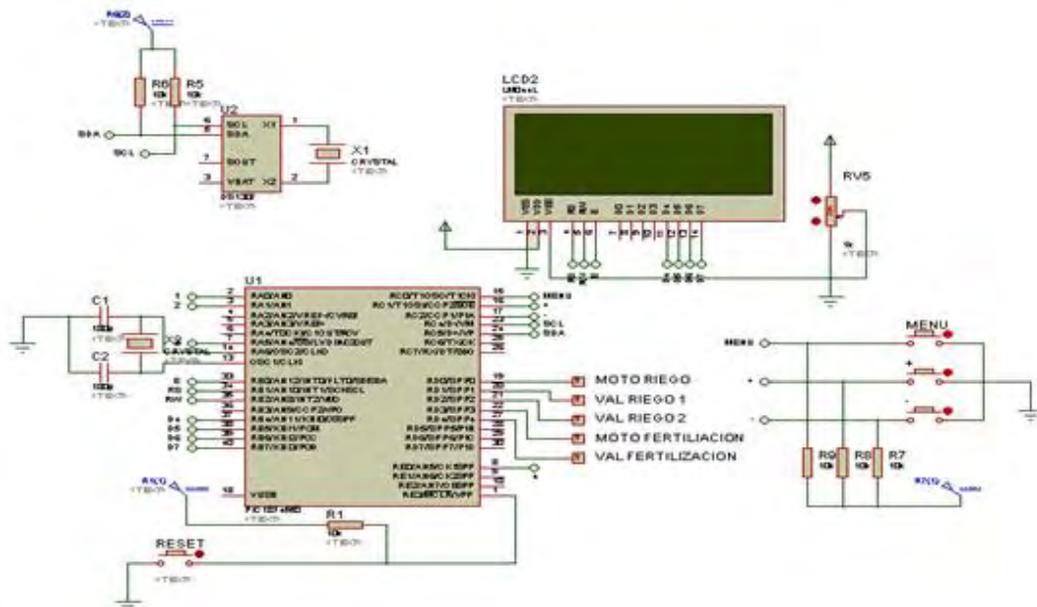
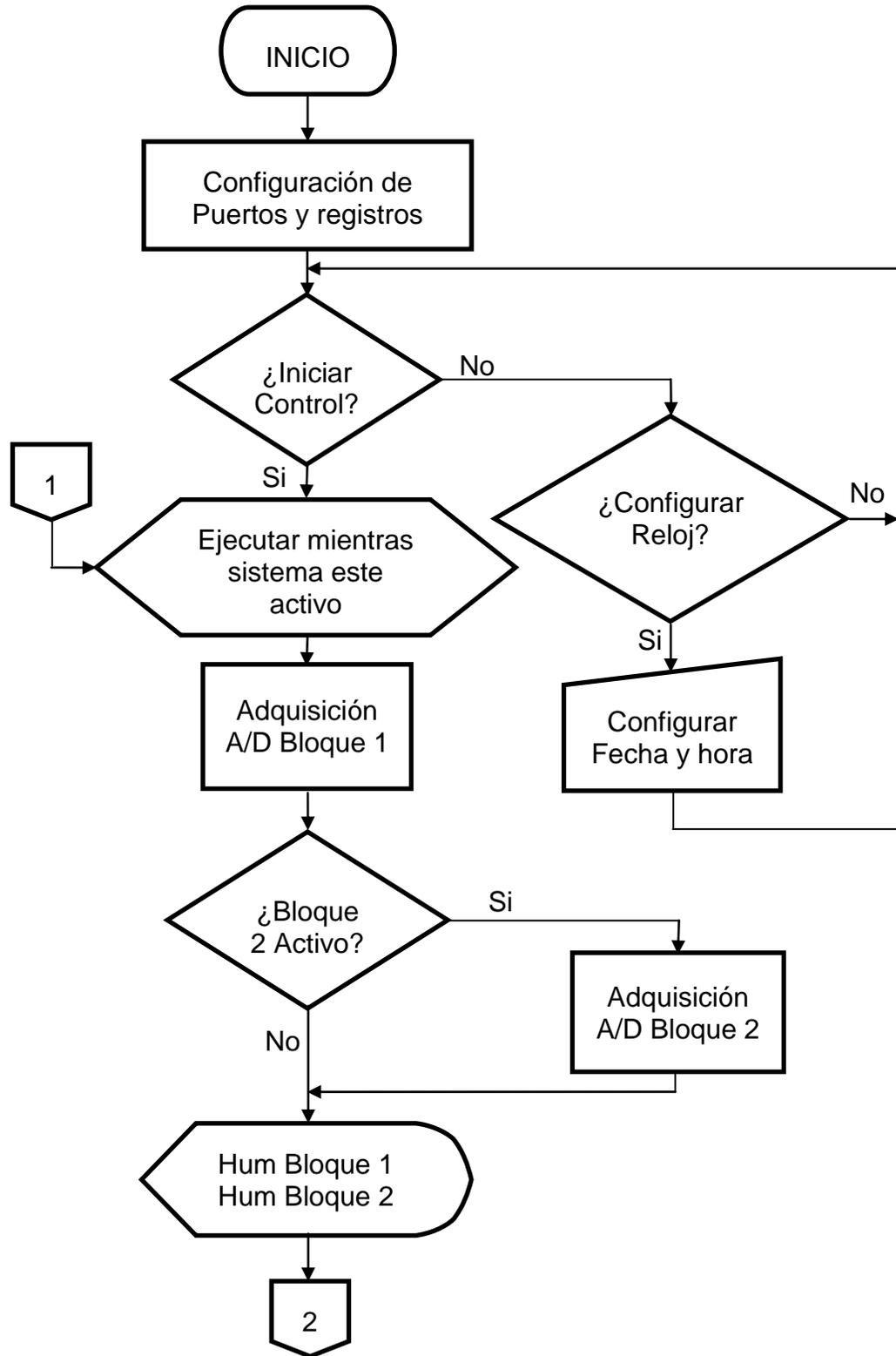
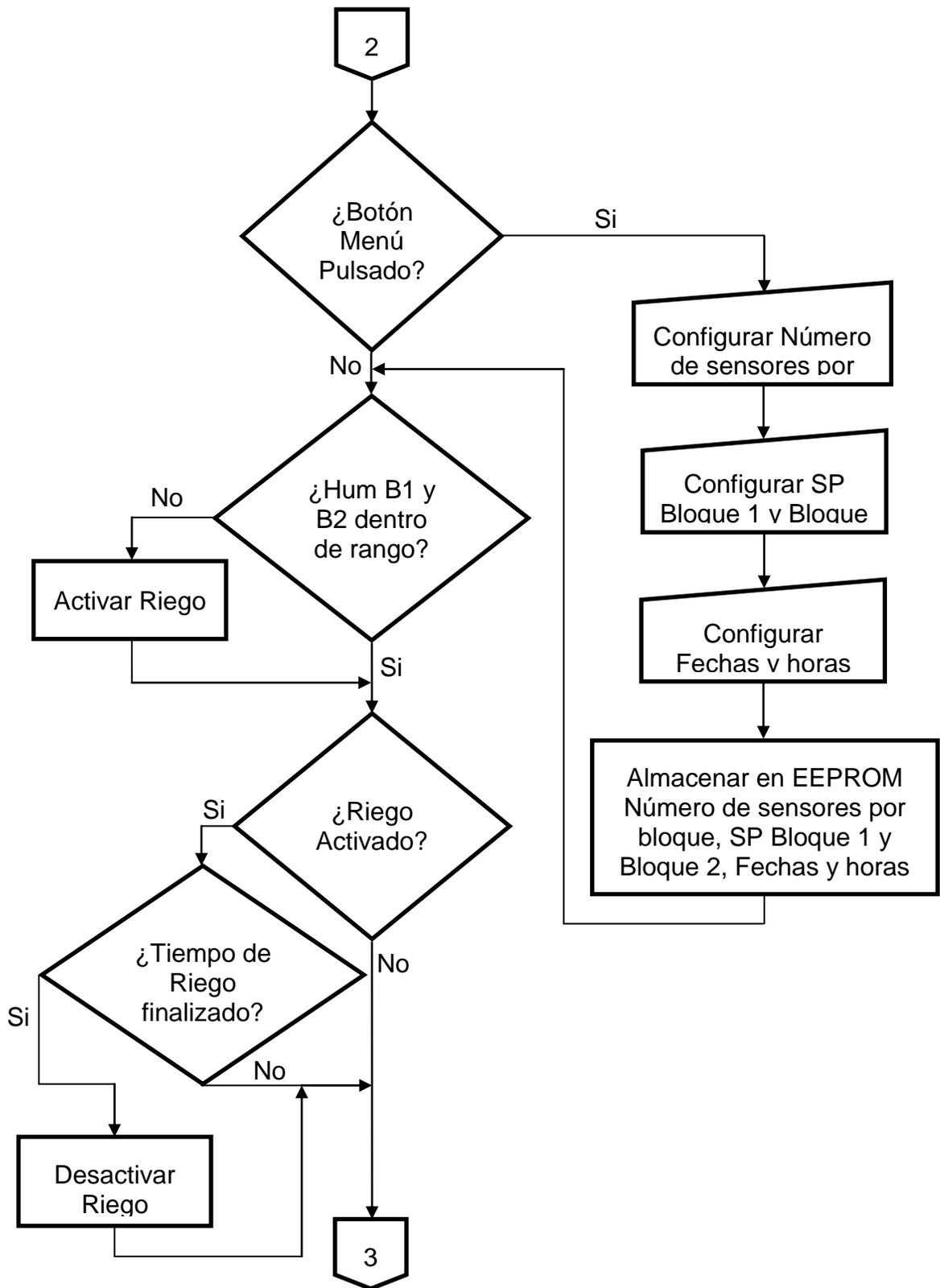
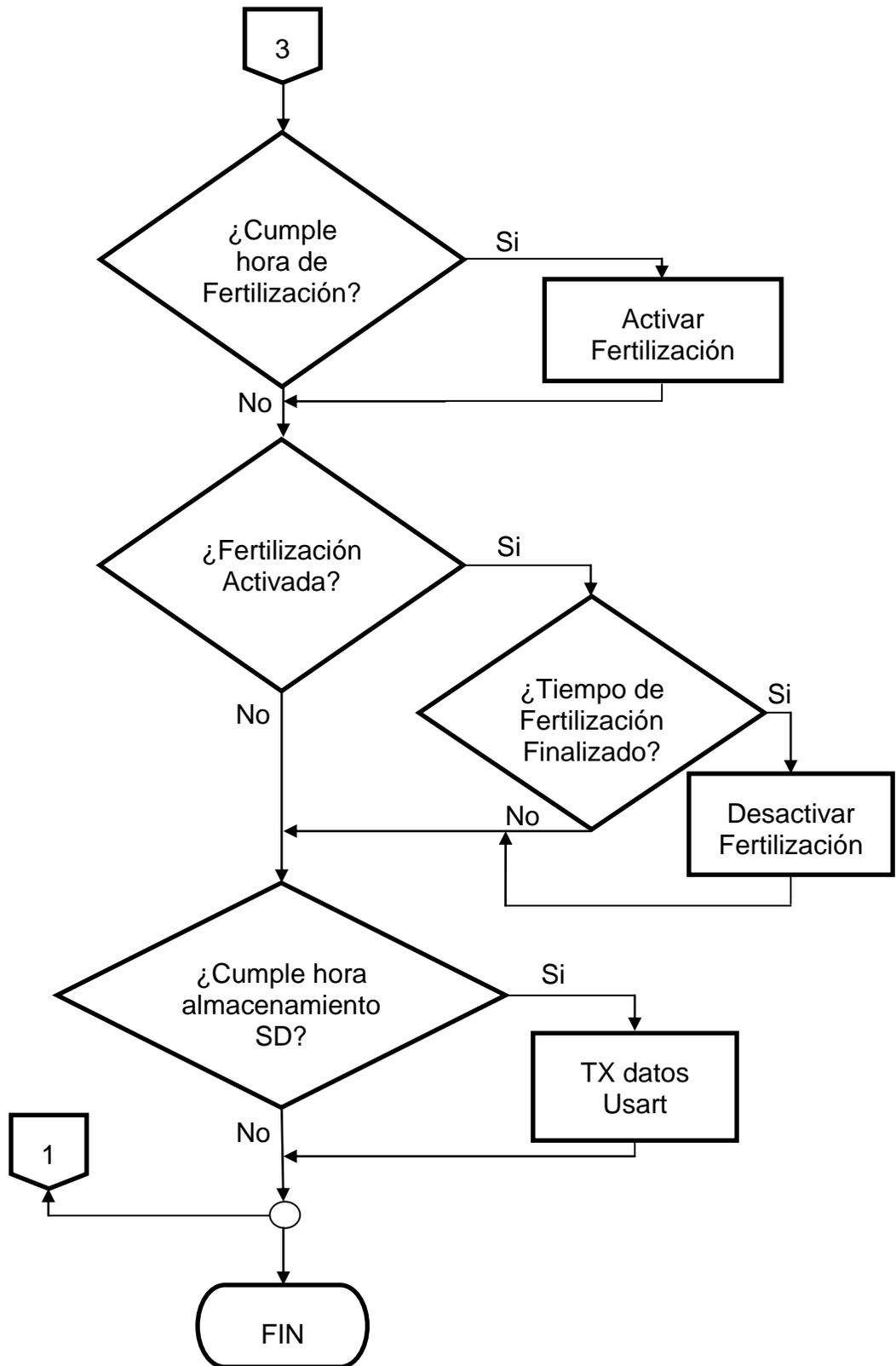


Figura 50. Diagrama de Flujo Unidad de procesamiento y control







3.3.3.2.4 Unidad de guardado de datos en Micro SD

La utilización de una memoria Micro SD en el equipo tiene como principal función registrar los datos de humedad de los dos bloques de control de humedad diseñado en el Dispositivo, esto con el fin de graficar y analizar los datos de pérdida de humedad en el suelo, mirar la respuesta de los sensores y la efectividad del control diseñado.

El registro de datos se hace en una memoria Flash Micro SD de 1 Gb de capacidad, porque tiene bajo consumo eléctrico, pequeño tamaño, alta velocidad y no es volátil; las diversas memorias que existen en el mercado, desde el punto de vista técnico, pueden trabajar mediante dos protocolos serie distintos: El protocolo MultiMediaCard y el protocolo SPI. El primer protocolo es más potente que el segundo porque permite mayor numero de operaciones, pero el segundo es más fácil de implementar ya que se utiliza un bus SPI tradicional.

En la Figura 51 se muestra los pines de que componen una memoria Micro SD y en la Tabla 31 la nomenclatura de dichos pines.

Figura 51. Esquema de terminales tarjeta de memoria Micro SD

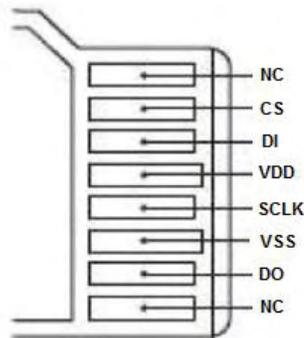


Tabla 31. Descripción pines Micro SD

SIMBOLOGIA	DESCRIPCIÓN
NC	Not Conected
CS	Chip Select/Slave Select (ss)
DI	Master Out/Slave in (MOSI)
VDD	Supply voltage
SCLK	Clock
VSS	Supply Voltage ground
DO	Master in/ Slave out (MISO)
NC	Not Conected

La información se almacena en la memoria Micro SD por medio de la creación de archivos por medio del protocolo SPI, esto se logra usando las especificaciones del sistema de archivos FAT32, propios de la memoria y que es compatible con los sistemas operativos de Windows.

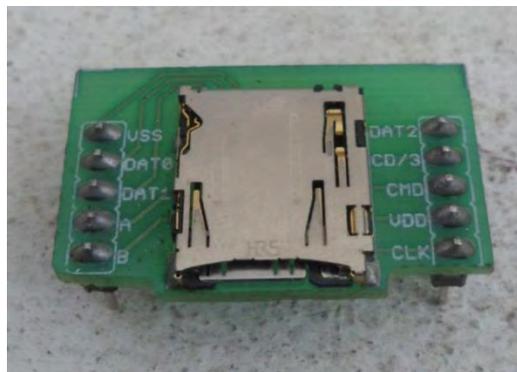
Para el proceso de guardado de datos en la memoria Micro SD se utiliza el PIC 18f4550, se escogió este microcontrolador por sus características tales como, mayor memoria de programa, mayor velocidad de procesamiento y maneja la comunicación serial por protocolos SPI, necesarios para comunicarse con la memoria; En el diseño el microcontrolador estará programado como Maestro y la Memoria funcionará como Esclavo; Las especificaciones de la memoria Micro SD utilizada son:

- Capacidad de 2 Gb
- Fuente de Alimentación de 2,7 a 3,6 Voltios
- Dimensiones: largo 15 mm, ancho 11 mm, espesor 1 mm
- Peso menor a 1 g
- 8 pines de conexión

Las operaciones realizadas por el microcontrolador son: Adquisición de los datos de humedad provenientes del Pic de la Unidad de Procesamiento y control por medio del puerto serial SPI, realiza la conversión de los datos para su procesamiento y los envía a la memoria Micro SD para su almacenamiento, El programa diseñado permite la creación y el borrado de archivos y directorios FAT32, ya que utiliza librerías de funciones para el control de memorias MMC y SD, de soporte FAT32 y FAT 16.

Para la comunicación de la memoria con el Pic se compro un SOCKET para Micro SD, el socket comprado es mostrado en la Figura 52.

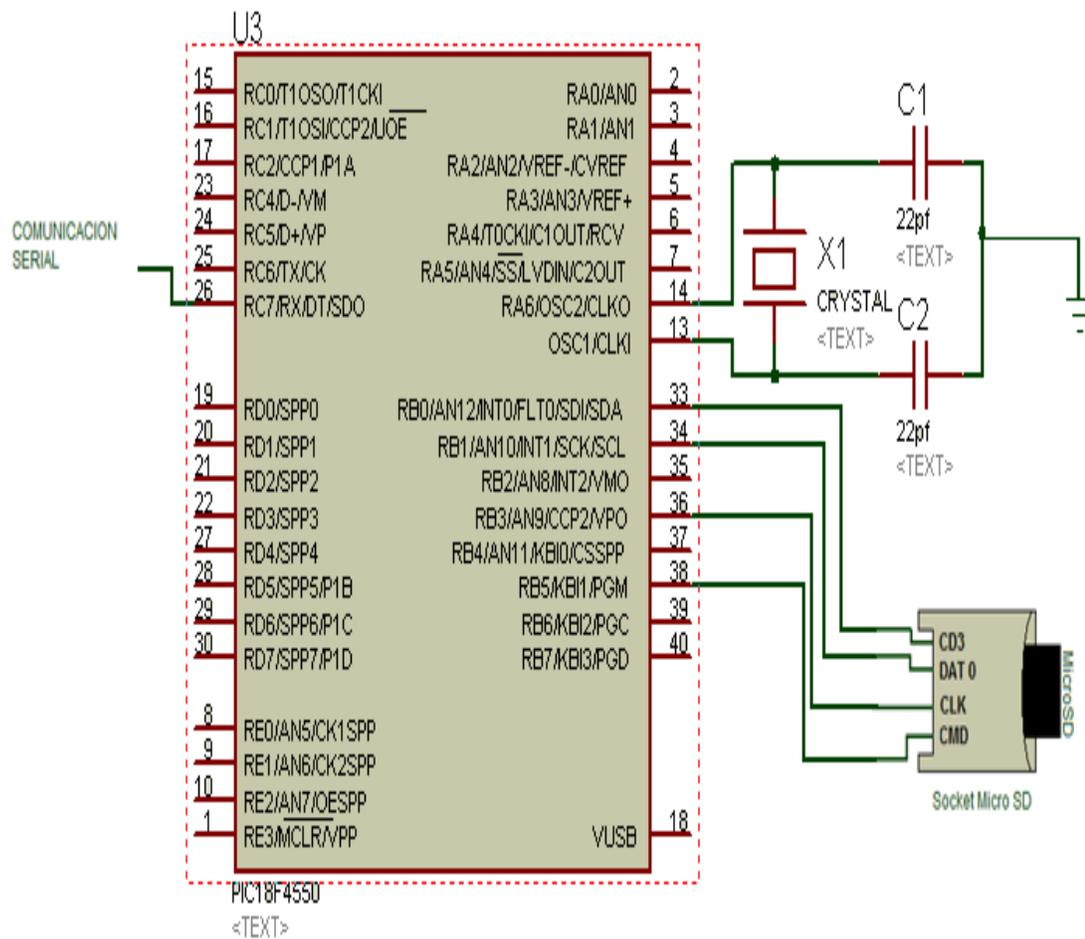
Figura 52. Socket para Micro SD



Debido a que la memoria Micro SD tiene un rango de alimentación máximo de 3,6 voltios, se configuro el voltaje con el regulador LM713, con este, se alimentara el PIC de la unidad de guardado de datos y la memoria Micro SD.

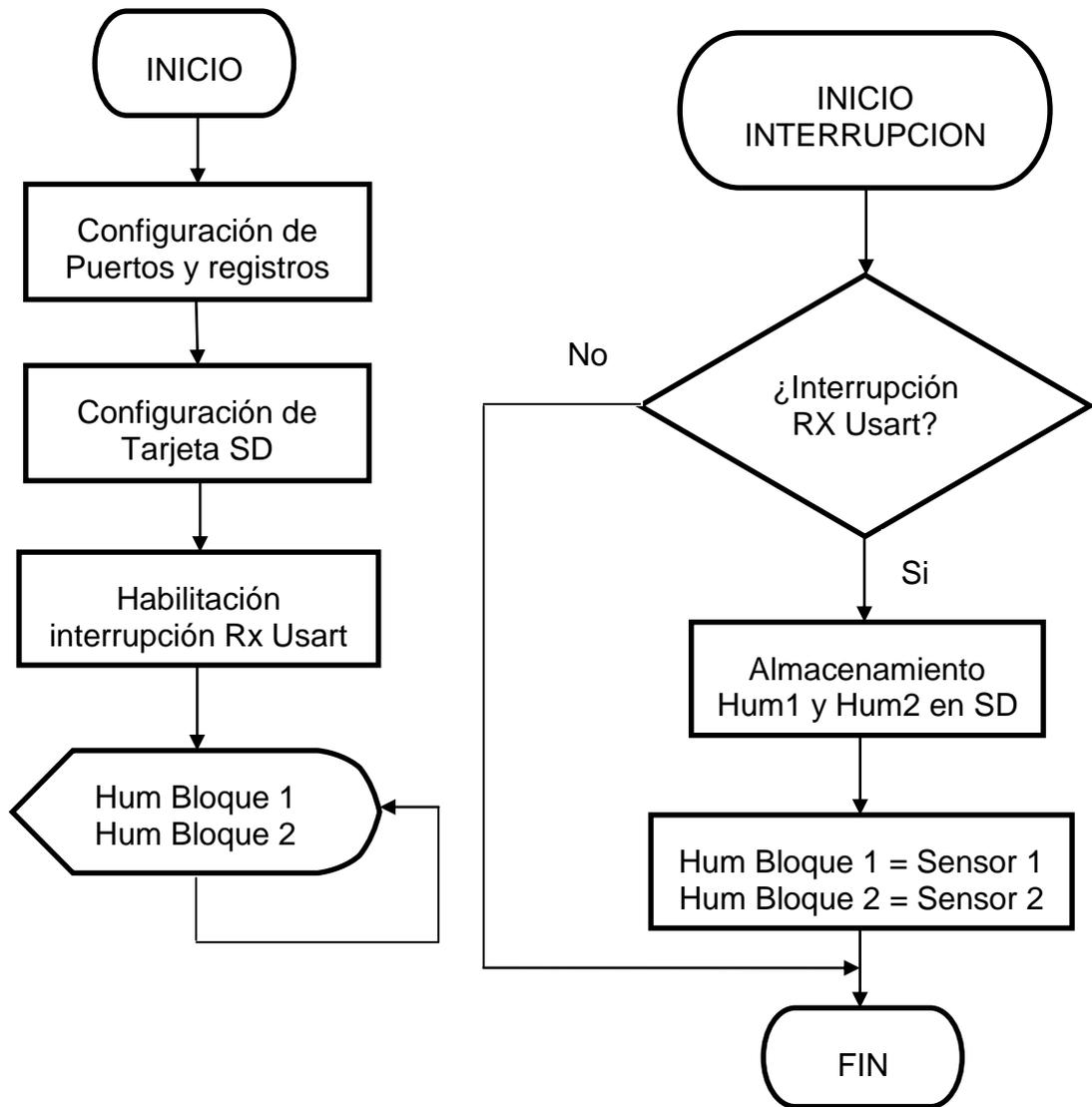
La conexión de la memoria con el Pic se muestra en la Figura 53.

Figura 53. Diagrama de conexiones de la Unidad implementada para el Guardado de Datos



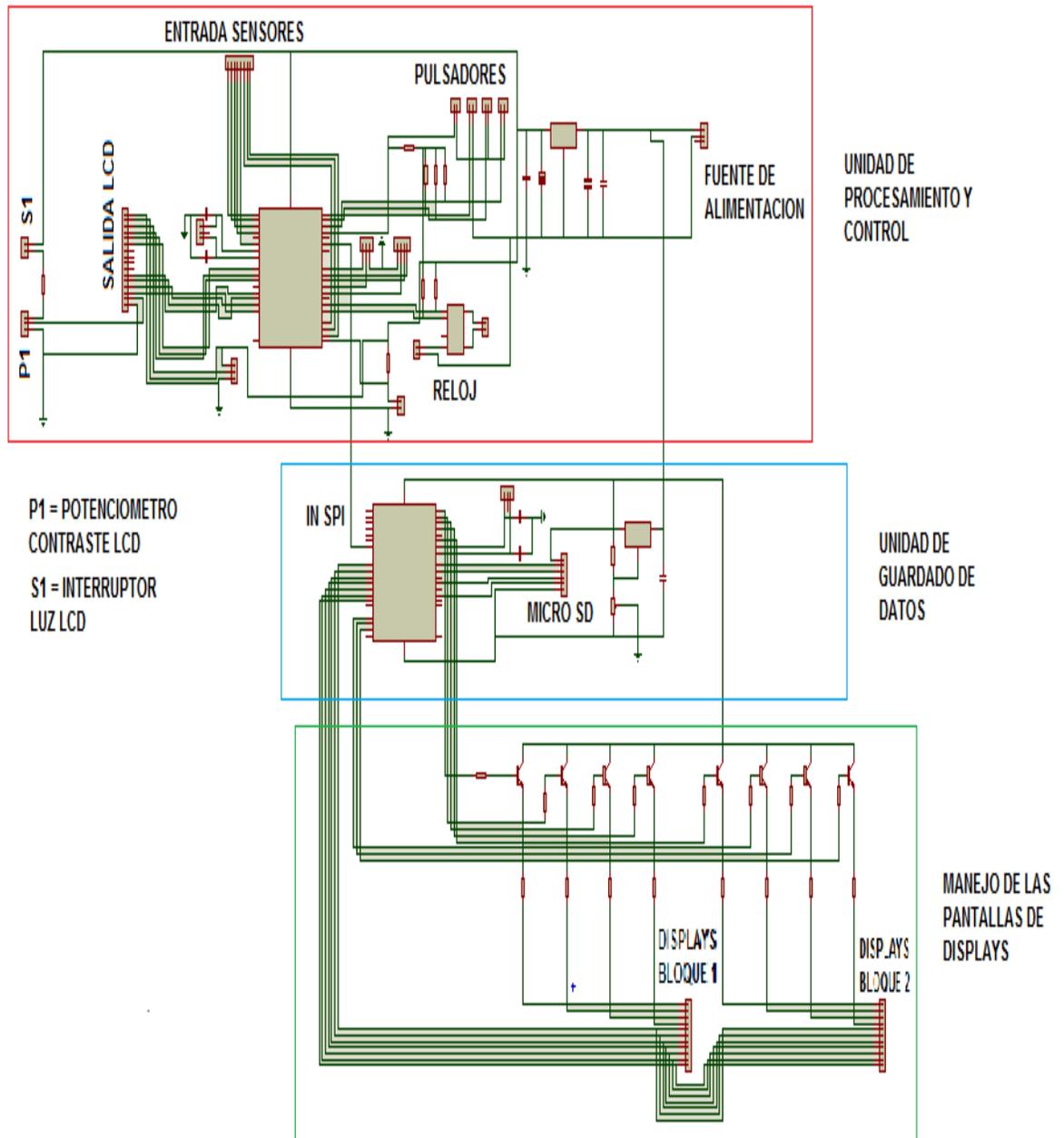
El diagrama de Flujo de la Unidad de guardado de datos se muestra en la Figura 54.

Figura 54. Diagrama de flujo Unidad de guardado de datos



Para la disminución de espacio en el Dispositivo, se unen las Unidades de procesamiento y control con la Unidad de Guardado de datos, realizando un solo diseño de la estas Unidades, el Diseño realizado se muestra en la Figura 55.

Figura 55. Unidad de procesamiento, control y guardado de datos diseñada



3.3.3.2.5 Unidad de Actuadores

La unidad de actuadores esta dividida en dos tipos de actuadores, el primero es el diseño de la etapa de actuadores de las electroválvulas y el segundo el diseño de la etapa de actuadores de las electrobombas.

3.3.3.2.5.1 Unidad de actuadores electroválvulas

Esta unidad se diseño partiendo de la necesidad de activar electroválvulas de 24 VAC, las cuales tiene como función permitir el paso del agua de riego, entran en funcionamiento únicamente cuando la Unidad de procesamiento y control lo defina.

La unidad diseñada cuenta con 3 electroválvulas de 24 VAC de $\frac{3}{4}$ ", normalmente cerrada, cuenta con 1 circuito de potencia para las tres electroválvulas que permite el acople con la Unidad de procesamiento y control, recibiendo señales digitales de ON/OFF; Cada bloque de sensores cuenta con una electroválvula, esto da autonomía a cada bloque para realizar el control específico requerido por el usuario, y tiene una electroválvula para los dos bloques encargada de la fertilización, se utiliza una sola electroválvula para garantizar la adición al suelo de igual cantidad de nutrientes; Cada electroválvula está conectada a una manguera de 16 mm en la cual se encuentran distribuidos los goteros de precisión, dependiendo de la ubicación de las maceteras que contienen los sensores.

La electroválvula adopta la posición de cerrado o abierto, dependiendo de la orden de la Unidad de procesamiento y control, la señal enviada es de tipo digital y se manifiesta en estado alto o bajo; El estado alto permite que la electroválvula se abra para permitir el paso del agua, el estado bajo cierra la electroválvula; debido a que la electroválvula maneja voltaje AC, es necesario realizar un acople que le permita interpretar la señal enviada por la Unida de procesamiento y control y tomar la decisión de cambiar o no de estado, para este propósito se utiliza un Optotriac de referencia MOC3041 y un TRIAC de referencia BT136.

Se eligió el MOC3041 por su detector de cruce por cero que le permite asegurar que el Triac se disparara cuando la señal AC haya cruzado por cero, esto es importante pues evita que la electroválvula esté sometida a cambios bruscos de voltaje durante la conmutación¹³. El Moc es el encargado de interpreta la señal de control y conmutar el Triac para permitir el paso del voltaje AC a la electroválvula. El Triac se eligió dependiendo de la Corriente que maneja la electroválvula, la electroválvula utilizada tiene una corriente de arranque de 300 mA y una corriente

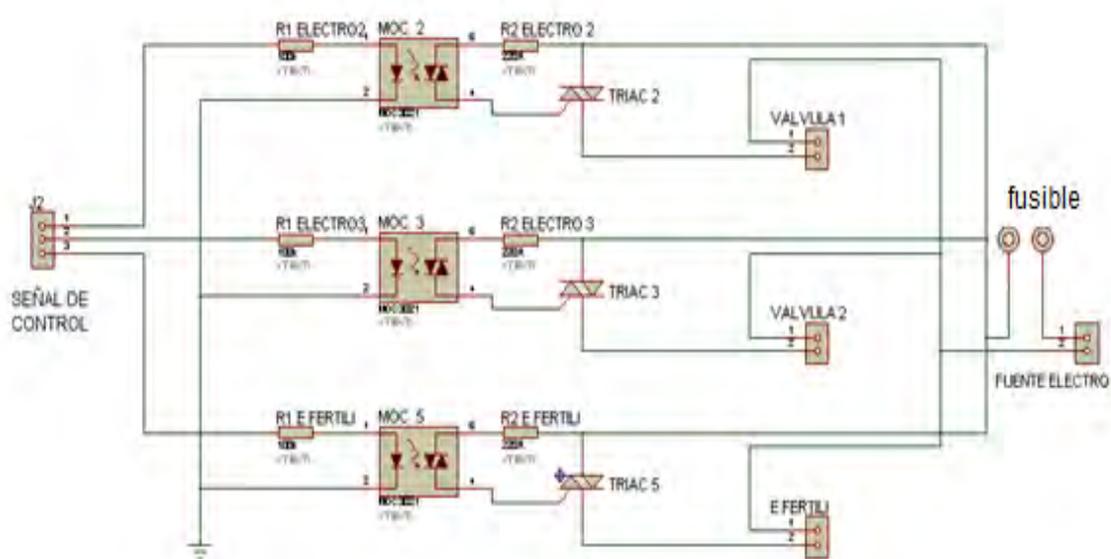
¹³ ON SEMICONDUCTOR, Triac Theory. En: Thyristor theory and desing configuration, HandBook. Noviembre. 2006. p. 22-28.

de régimen de 190 mA¹⁴, y el Triac escogido maneja una corriente 4A¹⁵, lo que garantiza un correcto funcionamiento.

Para la protección del circuito y sus componentes se añadió al circuito de potencia diseñado fusibles de 2 A.

El circuito de potencia diseñado para las 3 electroválvulas en mostrado en la Figura 56.

Figura 56. Unidad de Actuadores Electroválvulas diseñado



3.3.3.2.5.2 Unidad de Actuadores Electrobombas

Esta Unidad al igual que en la anterior partió de la necesidad de Activar motobombas de 110 VAC, Las cuales tienen como función impulsar el agua de riego y el fertilizante.

La unidad diseñada cuenta con 2 motobombas de 110 VAC, al igual que en la anterior etapa se necesitó de un circuito de potencia que permita hacer el acople entre la señal proveniente de la unidad de procesamiento y control y los 110 VAC que activan las motobombas, para esto, se utilizó el mismo Optotriac de la etapa

¹⁴ Ficha Técnica pdf. Electroválvula Rain Bird serie DV con solenoide. [En línea]
> <http://www.poolaria.com/electrovalvulas-riego/249-electrovalvula-rain-bird-serie-dv-con-solenoide.html>

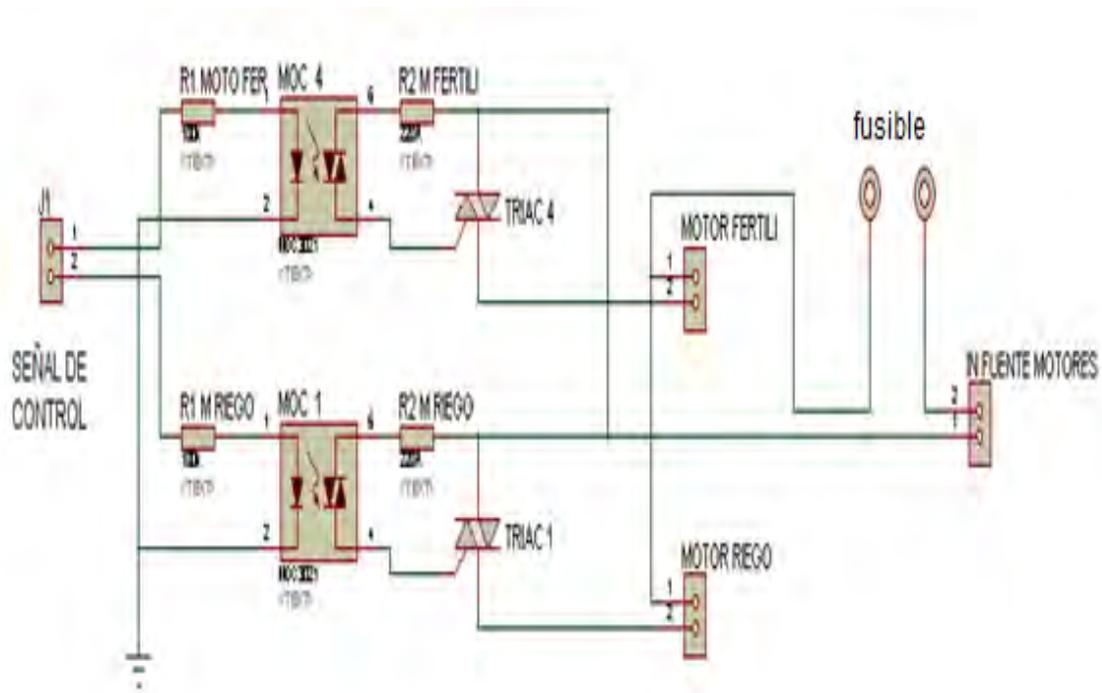
¹⁵ Hoja de Datos. Philips Semiconductors. Triac BT136. [En línea]
> http://www.nxp.com/documents/data_sheet/BT136_SERIES.pdf

de electroválvulas y se cambio el Triac por la demanda de corriente de la motobomba a Utilizar.

El Triac de esta unidad es de referencia BT139 que maneja una corriente de 16 A¹⁶, la demanda de corriente de la electrobomba a utilizar en el ensayo final es de 5 A para su arranque¹⁷, lo que garantiza un correcto funcionamiento de la unidad diseñada; Al igual que en la anterior unidad se añadió al circuito de potencia un fusible de protección de 6 A.

El circuito de potencia diseñado para las 2 electrobombas es mostrado en la Figura 57.

Figura 57. Unidad de Actuadores Electrobombas diseñado



Las características de los elementos involucrados en el diseño de la Unidad de actuadores se muestran en la tabla 32.

¹⁶ Hoja de Datos. Philips Semiconductors. Triac BT139. [En línea]
> http://www.nxp.com/documents/data_sheet/BT139_SERIES.pdf

¹⁷ Ficha Técnica, Electrobomba pedrollo. [En línea]
> http://issuu.com/edarvico.info/docs/curvas_pedrollo_general_2010

Tabla 32. Características elementos utilizados en el diseño de la Unidad de actuadores

ELEMENTO	PARÁMETRO ELECTROVALVULA	PARÁMETRO ELECTROBOMBA
Actuador	3 electroválvulas de 24 VAC con una I nominal de 300 mA	2 Motobombas de 110 VAC con una I nominal de 5 A
Protección	Fusible de 2 A	Fusible de 6 A
Triac	BT 136 de 4 A	BT 139 de 16 A
Optotriac	MOC 3041	MOC 3041

3.3.3.2.6 Unidad de Alimentación Eléctrica

El dispositivo de control de humedad necesita de un voltaje DC para su correcto funcionamiento, por esto cuenta con una fuente de alimentación Dual principal, la cual consiste en una fuente de voltaje AC/DC, con entrada de 110 VAC y salida de ± 9 V; Se hizo necesario el diseño de una fuente dual por las necesidades de la unidad de sensado, ya que esta, necesita de ± 9 V para generar una señal sinusoidal que alimentara los sensores evitando su electrolisis.

El voltaje de entrada de la fuente regulada es provisto por una fuente no regulada constituida por un transformador, un rectificador y un filtro, el voltaje de salida del filtro aun es un voltaje inestable por lo que se hace necesario añadir al circuito una etapa de regulación la cual dará precisión en el voltaje de salida; El diagrama de bloques de una fuente regulada se muestra a continuación.

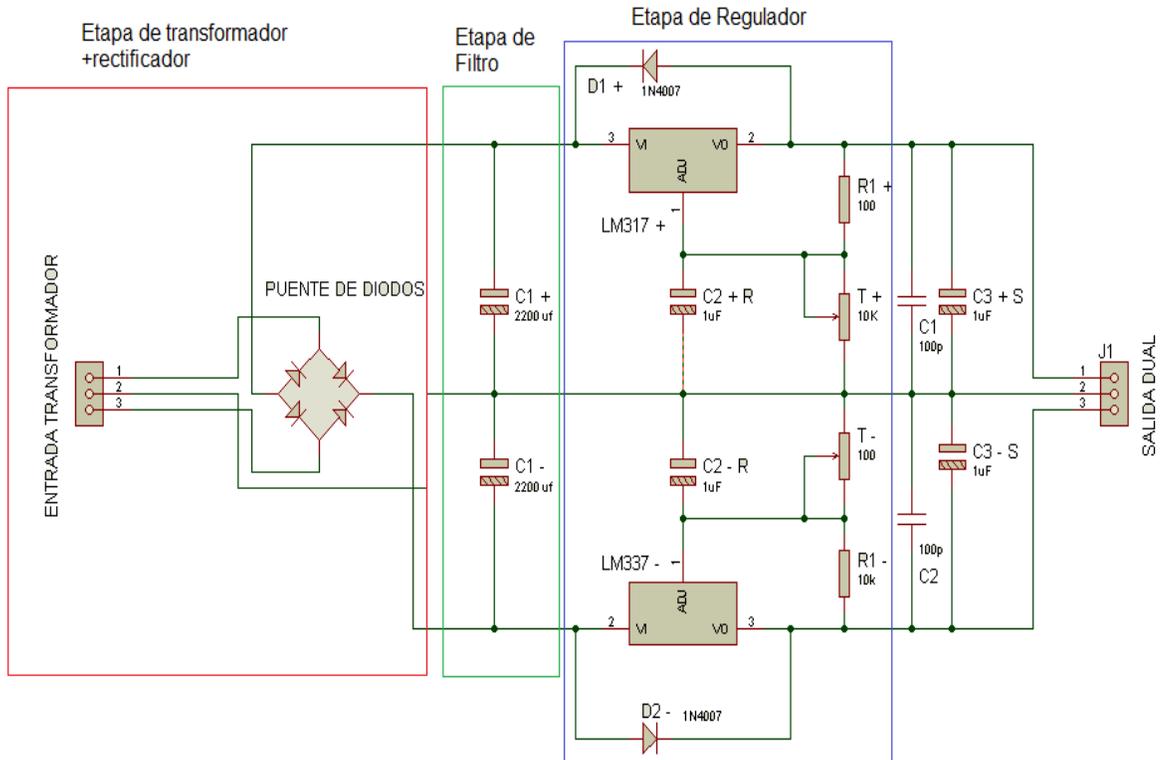
Figura 58. Diagrama de bloques de una fuente regulada



En la etapa del transformador y rectificador, se utilizó un transformador de 110 VAC a 24 VAC con una corriente de 1 A y un puente de diodo el cual separa la parte negativa y positiva de la señal de entrada convirtiéndola en una señal DC, se le da un aspecto lineal a cada parte por separado en la etapa de filtro con condensadores de 2200 μ F, y se envía a la etapa de regulador donde se utilizó como regulador positivo el LM317 y como regulador negativo al LM337, para graduar el voltaje de salida y obtener el voltaje deseado se utilizaron trimers de 10 k Ω .

En la Figura 59 se muestra la unidad de alimentación diseñada.

Figura 59. Fuente de alimentación eléctrica diseñada



3.3.3.3 Descripción de la Implementación

Una vez diseñadas cada una de las Unidades que compondrán el Dispositivo de control de humedad y probado su correcto funcionamiento, se procede a implementar los diseños en tarjetas de circuitos impresos, para las cuales se utilizaron tarjetas de cobre en fibra de vidrio de una capa, hojas de termotransfer que permiten imprimir el circuito diseñado y pasarlo a la tarjeta de fibra de vidrio, cloruro férrico para retirar el cobre de las tarjetas que sobra en el diseño del circuito y que no se utilizara en la implementación y elementos de soldadura superficial.

Para la implementación de las Unidades se partió del diseño de cada una hecho en el software ISIS Proteus suministrado por el laboratorio de la Universidad de Nariño, el cual permite diseñar el impreso utilizando la herramienta ARES; En ella se puede acomodar los componentes del circuito dependiendo de la percepción personal.

Una vez terminada la distribución de los componentes, se genera un archivo PDF el cual contiene el circuito terminado y listo para ser trasladado a la tarjeta de fibra de vidrio; Los pasos para obtener este archivo son:

- Ir a la opción de Output en el Ares del Proteus
- Buscar en el menú que se despliega la opción Export Graphics
- En ella dar click en Export PDF file

En Descargas del Windows del computador aparece el archivo PDF listo para imprimir en la Hoja de termotransfer.

En la carpeta ANEXO A del CD-ROM, Se encuentran los Documentos en PDF de las unidades diseñadas listos para ser impresos.

Para copiar las unidades diseñadas en la tarjeta de cobre se utilizo el método de transferencia de tonner, este es un método artesanal (método de la plancha), en el cual, ya impresos los circuitos en papel termotransferible y ubicado sobre la tarjeta, se aplica calor hasta que los caminos del circuito queden plasmados sobre el cobre de la tarjeta; para lograr plasmar los caminos sobre la tarjeta, se recomienda imprimir los circuitos en impresora laser. Posteriormente se someta la tarjeta a cloruro férrico el cual ataca el cobre que no ha sido cubierto por la tinta del circuito, una vez listas las rutas deseadas, se realizan las perforaciones para realizar el soldado de los componentes.

En la Figura 60 se muestra una parte del proceso de implementación

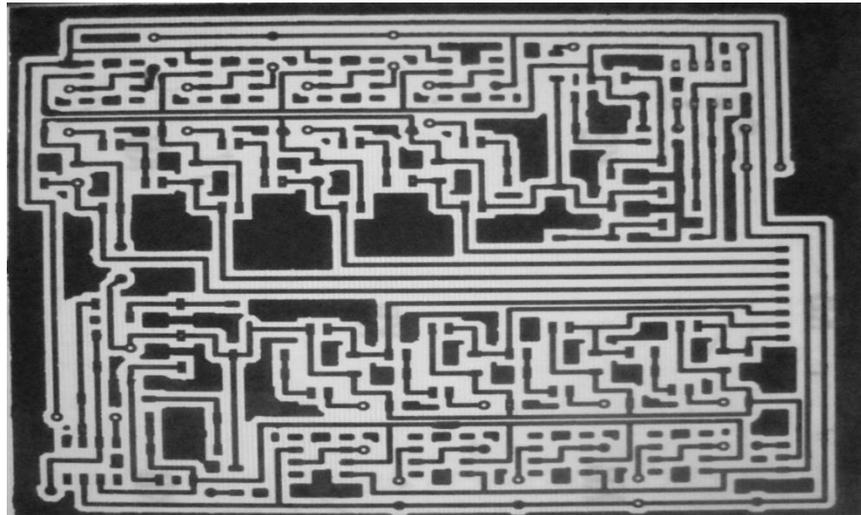
Figura 60. Implementación de las Unidades



3.3.3.3.1 Unidad de sensado

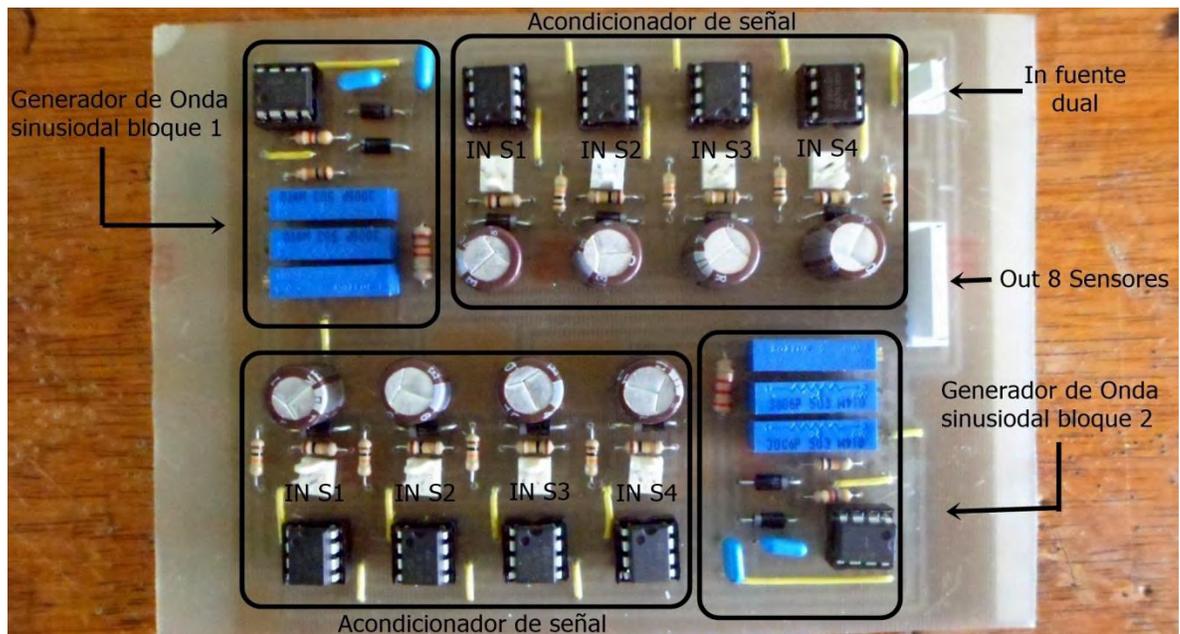
La implementación de la unidad de sensado se muestra en la Figura 61.

Figura 61. Unidad de sensado implementada



La unidad de sensado con sus componentes soldados se muestra en la Figura 62.

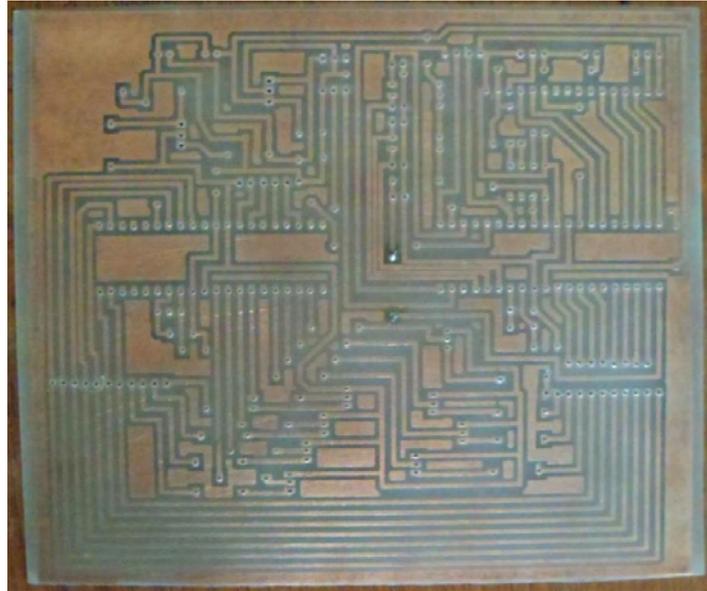
Figura 62. Unidad de sensado terminada



3.3.3.3.2 Unidad de Procesamiento, Control y guardado de datos

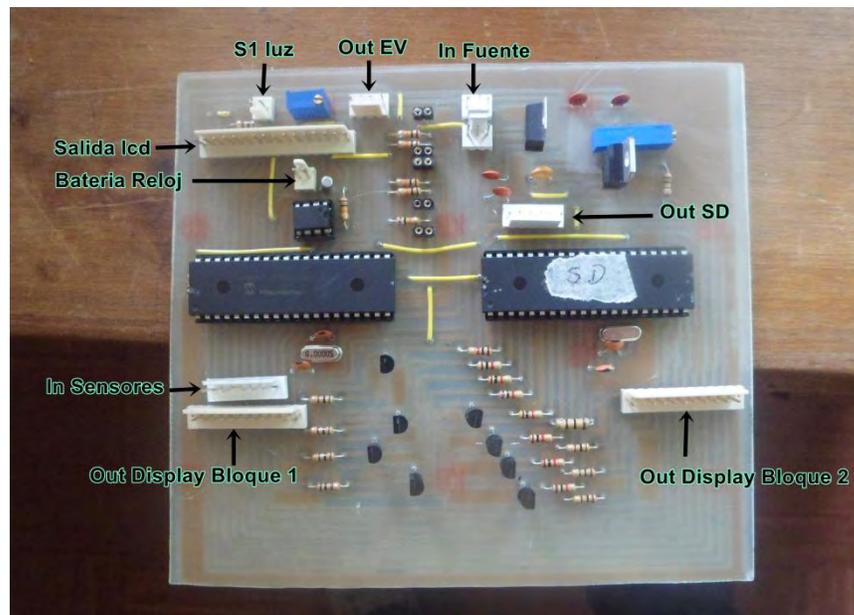
La implantación de la Unidad se muestra en la Figura 63.

Figura 63. Unidad de procesamiento, control y guardado de datos implementada



En la Figura 64 se muestra la tarjeta terminada con sus componentes

Figura 64. Unidad de Procesamiento, Control y guardado de datos Terminada



3.3.3.3.3 Unidad de Actuadores

La implementación de la Unidad de actuadores se divide en dos etapas principales: La unidad de Actuadores Electroválvulas y la Unidad de Actuadores Electrobombas.

3.3.3.3.3.1 Unidad de Actuadores Electroválvulas

La unidad de Actuadores Electroválvulas con sus componentes soldados se muestra en la Figura 65.

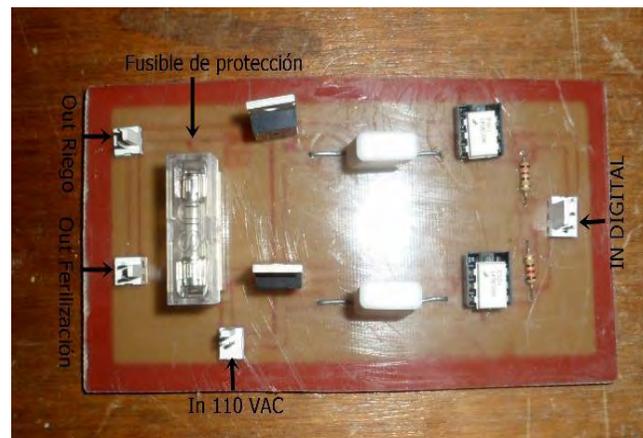
Figura 65. Unidad de Actuadores Electroválvulas implementada



3.3.3.3.3.2 Unidad de Actuadores Electrobombas

La unidad de Actuadores Electrobombas con sus componentes soldados se muestra en la Figura 66.

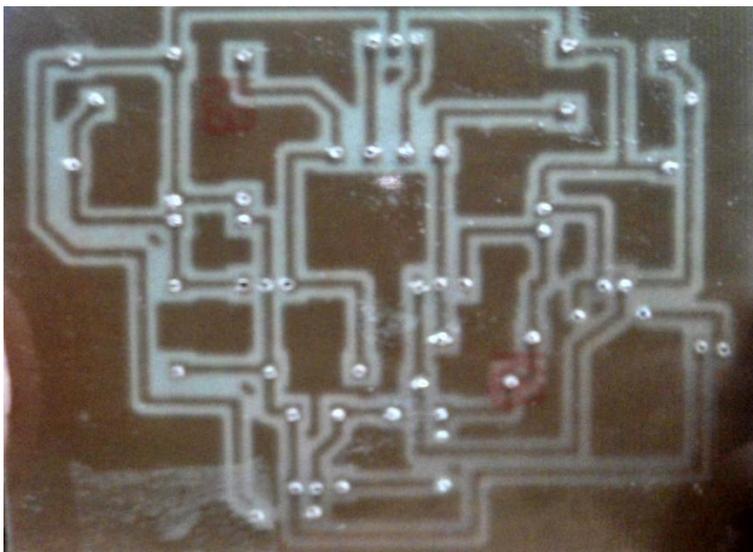
Figura 66. Unidad de Actuadores Electrobombas terminada



3.3.3.3.4 Unidad de Alimentación eléctrica

La implementación de la Unidad de Alimentación Eléctrica se muestra en la Figura 67.

Figura 67. Unidad de alimentación eléctrica implementada



La unidad de Alimentación eléctrica con sus componentes se muestra en la Figura 68.

Figura 68. Unidad de Alimentación Eléctrica terminada



3.3.3.4 Montaje de las Unidades implementadas en la carcasa del dispositivo

Según el tamaño de las tarjetas implementadas para cada unidad, se desarrollo una carcasa plástica con el fin de disminuir el peso del Dispositivo y aislar las unidades de la humedad del ambiente, se tuvo en cuenta la ubicación de cada una de ellas y la disponibilidad de espacio para su conexión.

La Unidad de Alimentación eléctrica dual y la de 24 VAC fue montada en una carcasa aparte, debido al uso que ellas tiene de transformador el cual genera un campo magnético que afecta el correcto funcionamiento del Dispositivo.

Las fotografías del montaje de las Unidades se encuentran en el CD-ROM en la carpeta ANEXO B.

La carcasa del Dispositivo diseñada cuenta con las siguientes características en su estructura externa.

- En la parte de atrás cuenta con las entradas de alimentación de 110 VAC, 24 VAC, fuente de alimentación dual y botón de reset.
- En la parte de adelante cuenta con 8 entradas de sensores, entrada de memoria Micro SD, salida de displays, salida de electrobomba de riego (EBR) y fertilización (EBF), y salida de electroválvula de riego bloque 1(ER1), bloque 2 (ER2) y fertilización (ERF).
- En la parte superior cuenta con pantalla LCD y 5 pulsadores de configuración.

Cada una de estas características son mostradas a continuación.

Figura 69. Parte de atrás de la carcasa

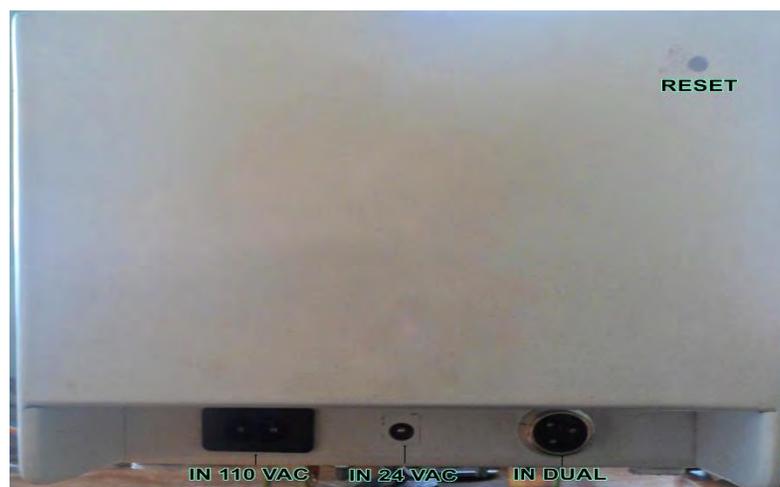


Figura 70. Parte delantera de la carcasa



El Dispositivo final ya implementado con cada una de sus unidades fue pintado de blanco y se realizo un diseño para su cara superior, el dispositivo terminado se muestra en la Figura 71.

Figura 71. Dispositivo de control de humedad terminado

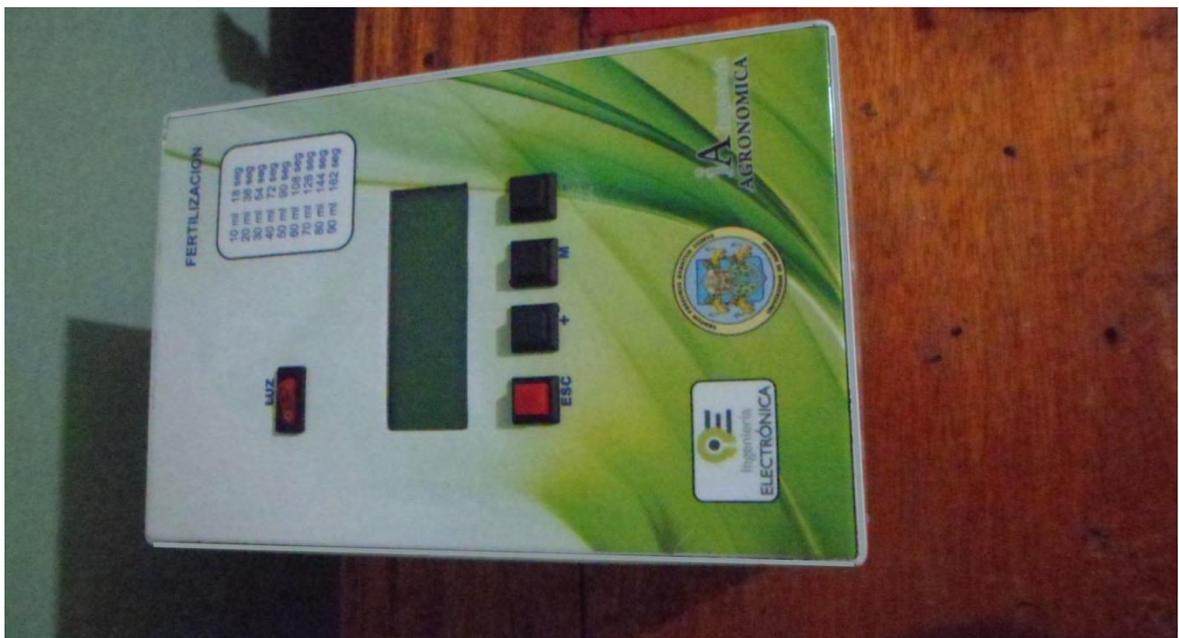


Figura 72. Fuente de Alimentación eléctrica Dual terminada



Figura 73. Fuente de Alimentación 24 VAC terminada



3.4 FASE IV: IMPLEMENTACION Y EVALUACION DEL EQUIPO

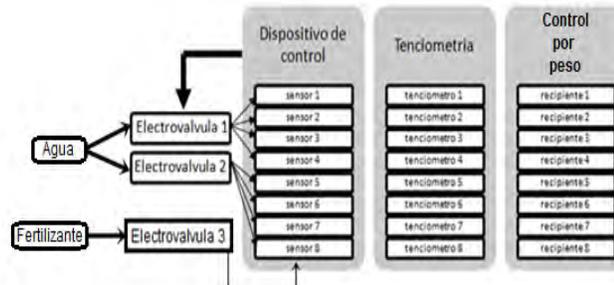
Para la última etapa del proyecto en la cual se evalúa el funcionamiento del Dispositivo, se monto un sistema de riego en el Invernadero de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad de Nariño; El sistema de riego utilizado es de goteo, ya que para él se utilizan goteros de precisión los cuales permiten realizar un control más preciso del suministro de agua y garantizar iguales cantidades de agua por cada gotero, los goteros van insertados en manguera de 16 mm, distribuidos según la colocación de los maceteros que contendrán las semillas de maíz; Se utilizaron tres electroválvulas de las cuales, 2 son para suministro de agua y 1 para suministro de fertilizante; El dispositivo cuenta con 2 salidas para electrobombas, en la implementación del riego se utilizo una sola salida, la salida de la electrobomba de fertilizante ya que el suministro de agua se tomo directamente del acueducto.

Para evaluar el Dispositivo diseñado se montaron 2 etapas de riego mas, la primera se realizo con tensiómetros los cuales fueron suministrados por el laboratorio de hidráulica de la universidad de Nariño y el segundo se monto de acuerdo al peso de los maceteros. Para cada etapa de implementación se llevo registro de pérdida de humedad y gasto de agua durante los 2 meses de prueba; Para la etapa del Dispositivo se utilizo un medidor de caudal, habitualmente utilizado en la casa de familia, para la etapa de tensiómetro, se rego según la indicación del tensiómetro y para la etapa de peso, se rego dependiendo de la pérdida de peso del suelo + agua+ macetero.

Para la evaluación de las tres etapas de riego se determino un rango de humedad comprendido entre 40 y 45 Kpa, lo que nos garantiza que el potencial de 40 Kpa a controlar esta dentro del rango, este potencial fue definido por el CoDirector del trabajo de grado y está acorde a las necesidades de lamina de agua que el cultivo de maíz requiere para cumplir su ciclo fisiológico normal; Para la etapa del Dispositivo, el Dispositivo está programado con este umbral, cuando el potencial de humedad sobrepasa el límite, el Dispositivo activa las electroválvulas; En el caso de los tensiómetros y peso se determinaron acciones de control dependiendo de la etapa.

Para cada una de las tres etapas se utilizaron 8 maceteros de 3 Kg en los cuales se realiza la siembra del cultivo de maíz a controlar, en la Figura 74 se muestra un diagrama de los tres sistemas de riego a utilizar.

Figura 74. Diagrama de bloques de la implementación de los 3 sistemas de riego a utilizar en la evaluación del Dispositivo



3.4.1 Implementación Etapas de riego

3.4.1.1 Implementación Dispositivo

El Dispositivo fue implementado en el invernadero de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad de Nariño, para su implementación se utilizaron los siguientes materiales:

- 1 rollo de manguera de 16 mm para riego
- 6 metros de tubo de pvc DE 1/2"
- Uniones de pvc
- 16 goteros de precisión (2L en 1 hora)
- 3 electroválvulas
- 1 electrobomba
- 1 recipiente para fertilizante
- 8 sensores de humedad
- 1 tablón de madera para la ubicación del equipo
- 1 medidor de consumo de agua
- 1 cheque de cobre para evitar que el agua se regrese
- 3 ventosas de 1/2"
- 1 filtro para agua de riego de 3/4"
- 8 Maceteros de 3 Kg

El agua utilizada para el riego se obtuvo de la tubería de suministro del invernadero, se desplegó tubo de pvc hasta las entradas de las electroválvulas encargadas de permitir o no el paso del agua a las mangueras de riego, para evitar que el agua se regrese por el tubo de pvc hacia la tubería de suministro por consecuencia de la utilización de otros módulos del invernadero, se colocó un

cheque, el cual permite el paso en un solo sentido del liquido; Seguido de este, se coloco un filtro que evita el paso de partículas grandes que puedan ocasionar un taponamiento de los goteros; Antes de las electroválvulas se instalo el medidor de agua, el cual permite llevar un registro de consumo de agua durante la evaluación del Dispositivo; La figura 75 muestra los procedimientos mencionados.

Figura 75. Instalación del suministro de agua de riego



El fertilizante fue ubicado en un recipiente de plástico, el cual fue adecuado para el acople con la electrobomba, a la salida de la electrobomba se ubico la tercer electroválvula que permitirá el paso del fertilizante según el dispositivo le indique, de igual forma que en el suministro de agua se coloco una ventosa la cual eliminara el aire dentro de la manguera, se distribuyo manguera de tal forma que cubriera los dos bloques de control de humedad, esto, con el fin de garantizar igual suministro de nutrientes al cultivo en los dos bloques, para el suministro de fertilizante se utilizo goteros de precisión. La figura 76 muestra este procedimiento.

Figura 76. Instalación del suministro de fertilizante



La instalación de las mangueras de suministro tanto de agua como de fertilizante en la cama del invernadero se muestra en la Figura 77 y los goteros de precisión utilizados en el riego se muestra en la Figura 78.

Figura 77. Mangueras de suministro de agua y fertilizante instaladas



Figura 78. Gotero de precisión



La altura del macetero se dividió imaginariamente en 3 tercios, con el fin de determinar la ubicación de los sensores en el suelo, que para efectos prácticos se ubico en la segunda-tercera parte del mismo, se determino esta posición por el desarrollo de la raíz. La ubicación del sensor se muestra en la Figura 79.

Figura 79. Ubicación del sensor en el macetero



Finalmente ubicados los sensores en los maceteros llenos de 3 Kg de suelo, se ubica el Dispositivo de forma vertical en el tablón de madera para su conexión. En la Figura 80 se muestra el Dispositivo listo para ser utilizado.

Figura 80. Dispositivo listo para el control de humedad



3.4.1.2 Implementación tensiómetros

En la implementación de la etapa de tensiómetros se planteo inicialmente utilizar 8 tensiómetros, 1 para cada macetero; pero, debido al mal estado de algunos de ellos se utilizaron únicamente 4 tensiómetros, los cuales fueron distribuidos en la cama del invernadero, los materiales utilizados se muestras a continuación:

- 8 maceteros de 3 Kg
- 4 tensiómetros

Debido a que los tensiómetros miden la humedad del suelo creando un vacio dentro del tubo de vidrio que es registrado por el vacuómetro, se llevo el suelo seco a una humedad de 40 Kpa, con el fin de realizar el control de humedad dependiendo del potencial mostrado en el vacuómetro.

Para relacionar los potenciales indicados en el tensiómetro con los teóricos, se hizo la conversión de Centibares (Indicados en el vacuómetro del tensiómetro), a Kilopascales; Esta conversión se muestra a continuación.

- $1 \text{ bar} = 101300 \text{ N/m}^2$ sabiendo que $1 \text{ Pascal} = 1 \text{ N/m}^2$ ¹⁸

¹⁸ Metas y Metrólogos Asociados. La guía Metas. 2004. P.1 [En línea]
> <http://www.metas.com.mx/guiamet/La-Guia-MetAs-04-01-Pa.pdf>

$$\begin{aligned} 1 \text{ bar} &= 101300 \text{ Pa} \\ 1 \text{ bar} &= 101,3 \text{ Kpa} & 10^{-2} \text{ bar} &= 1 \text{ centibar} \\ 1 \text{ centibar} &= 1,013 \text{ Kpa} \end{aligned}$$

La anterior conversión indica que 1 centibar es aproximadamente igual a 1 Kpa por lo que se hace la relación directa de Kpa con Centibares.

Para llevar el control de pérdida de humedad con los tensiómetros, se partió de la ecuación de la curva de retención de humedad, mostrada en la 024, la cual nos da la humedad volumétrica en cualquier potencial de humedad, potencial que será controlado por el tensiómetro; El resultado de esta ecuación es multiplicada por el peso del suelo, lo cual no da la cantidad de agua contenida en el macetero del tensiómetro; En la Tabla 25 están consignados los valores de la curva característica de agua del suelo que corresponden a las diferentes tensiones utilizadas que para efectos del presente ensayo se trabajó con la tensión de 40 Kpa, la cual fue se **multiplico** por 3000 g de suelo, esto con el fin calcular la cantidad de agua necesaria para llevar dicho suelo a un potencia de 40 Kpa. Para que el suelo este controlado es necesario que tenga un potencial de 40 Kpa, con el tensiómetro medimos la variación de este potencial, cuando sobrepasa los 45 Kpa, agregamos el agua faltante calculada con la ecuación indicada a continuación.

- Ecuacion control por tensiómetro

$$Y = 567,6 \text{ ml} - ((0,08854 + (0,65448 * \text{EXP} (-0,0468*X))) * 3000 \text{ g})$$

Ecuación 4

X = Potencial de humedad indicado en el vacuómetro del tensiómetro

La Ecuacion 4 resulta de: La resta de la cantidad de agua utilizada para tener un suelo a 40 Kpa, con la variación de la cantidad de agua en el recipiente según el tensiómetro lo indique, esta resta determina la cantidad de agua que se debe agregar al recipiente para tener el suelo a 40 Kpa.

El montaje de esta etapa se muestra en la Figura 81.

Figura 81. Etapa de tensiómetros



3.4.1.3 Implementación por peso

Para la implementación de la etapa por peso se utilizaron los siguientes materiales:

- 8 maceteros de 3 kg
- 1 balanza de 5 kg

Los maceteros fueron distribuidos en una de las camas del invernadero. Para realizar el control de humedad por peso, se utilizo la humedad volumétrica del potencial de 40 Kpa, mostrado en la Tabla 25. Se calculo con ella la cantidad de agua a utilizar en 3000 gramos de suelo para llevarlo a 40 Kpa, la cantidad de agua a utilizar se muestra en la Tabla 33.

Tabla 33. Calculo de la cantidad de agua a utilizar en 40 Kpa

Potencial Kpa	Humedad volumétrica	Cantidad de suelo (g)	Cantidad de agua a utilizar (ml)
40	0,18920	3000	567,6

El peso total del recipiente con el suelo a 40 Kpa se determina de la suma de la cantidad de suelo + la cantidad de agua a utilizar + el peso del macetero.

El control en esta etapa se basa en mantener el peso total calculado anteriormente, así, si este disminuye se le agrega la cantidad de agua que ha perdido.

En la Figura 82, se muestra la implementación de esta etapa.

Figura 82. Etapa de peso



3.4.2 Evaluación Etapas de riego

En la evaluación del dispositivo se llevo registro de pérdida de humedad en cada una de las etapas implementadas anteriormente; Para la etapa del Dispositivo, el registro se lo llevo por medio del guardado de datos en la memoria Micro SD, estos datos fueron graficados para observar y analizar el comportamiento del Dispositivo durante los dos meses de prueba, para llevar el registro de gasto de agua durante los dos meses de prueba se utilizo un medidor de consumo de agua; Para la etapa de tensiómetros, se llevo el registro de pérdida de humedad en Excel, en el cual con la ayuda de la Ecuacion 4 descrita en la implementación de esta etapa, se determinaba la perdida y la cantidad de agua a regar; Para la etapa de peso, se llevo el registro en Excel, en el cual por medio de pesos de los maceteros se obtuvo la perdida de humedad y el gasto de agua durante los 2 meses de prueba.

Para la etapa de tensiómetros, se miro la necesidad de calibrar el tensiómetro en cada toma de datos, esta calibración se la hacía con agua destilada suministrada por el laboratorio de suelos de la Universidad de Nariño, se utiliza agua destilada para evitar el taponamiento de la capsula de yeso que está en constante contacto con el suelo.

La evaluación del Dispositivo comenzó el 23 de Julio y Finalizo el 23 de Septiembre, en este tiempo, se realizo la siembra del maíz en cada uno de los maceteros de las tres etapas, se colocaron 4 semillas de maíz en cada uno de ellos, se sembraron a una profundidad de 3 cm, esto, según recomendaciones del distribuidor de la semilla.

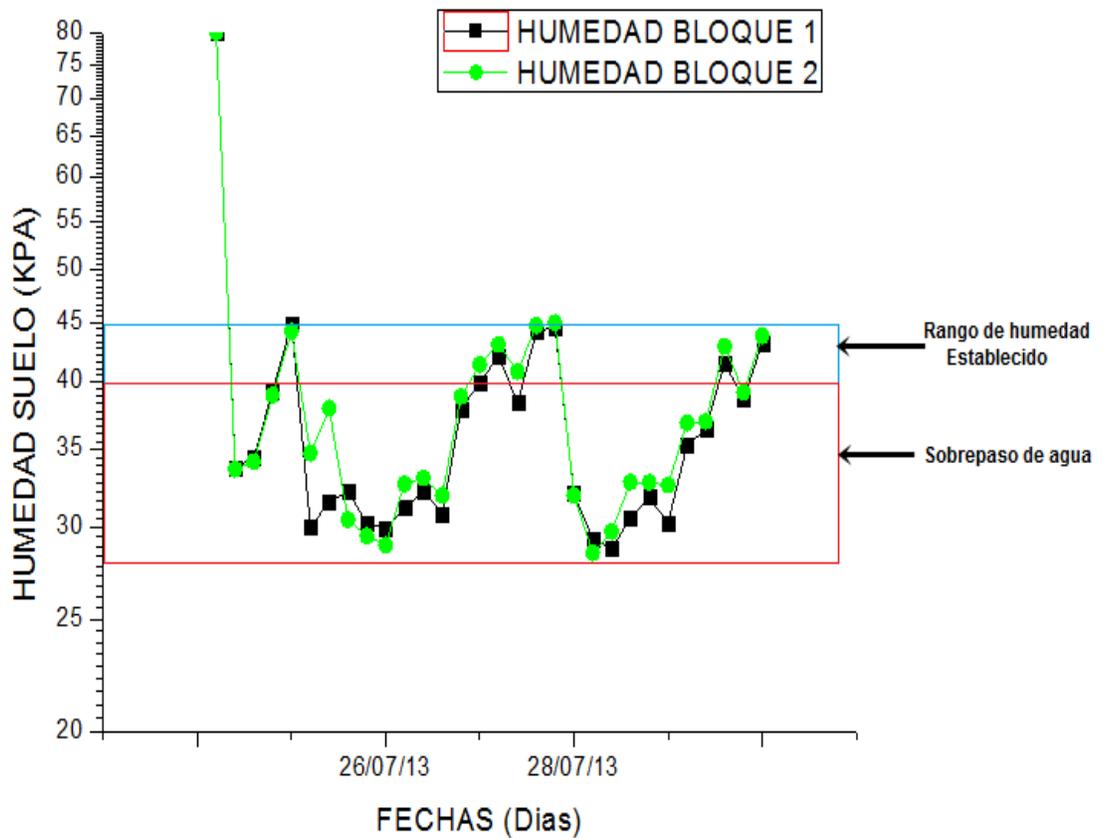
La semilla utilizada en el cultivo de prueba, es suministrada por FENALCE, es un tipo de semilla de Maíz amarillo de referencia FNC31AC con Alta calidad de proteína; Se mantuvo para cada etapa una humedad de 40 Kpa, desde la siembra hasta la finalización de la evaluación.

EL cultivo durante la evaluación fue fertilizado de acuerdo a las cantidades de la **tabla** recomendación del Codirector, para la etapa del Dispositivo se realizó de acuerdo a los contenidos propuestos en la **tabla 20** programaron tres fechas de fertilización, la relación de suministro de fertilizante se obtuvo de la 020, en donde se muestra que para cada Kilogramo de suelo se debe agregar 10 ml de cada fertilizante, con esta relación se obtiene que para 3 Kilogramos de suelo se deben agregar 30 ml de cada componente, esto nos da un total de 90 ml de NPK para cada macetero, estos 90 ml fueron distribuidos en 3 fechas de fertilización, en cada una de ellas se agregaron 30 ml. Para las otras 2 etapas, el suministro de fertilizante se hizo manualmente, con las mismas cantidades, en las mismas fechas y horas.

3.4.2.1 Evaluación Dispositivo

El Dispositivo de Control de Humedad se configuró con 4 sensores por bloque, para mantener el suelo a una humedad de 40 Kpa; En la primera semana de evaluación se realizaron acciones de corrección de la Unidad de procesamiento y control en cuanto a cantidad de agua de riego, esta corrección se hizo, al observar en la curva de control de humedad guardada en la memoria Micro SD, un sobrepaso en el rango de humedad definido, esto se debe porque no se tuvo en cuenta que al momento de desactivarse las electroválvulas, dentro de las mangueras desplegadas para el riego, quedaba una presión de agua que llenaba las pipetas de los goteros, este excedente de agua aumentaba la cantidad de agua agregada en cada pico de riego, lo que generaba un sobrepaso en la cantidad de suministro, la corrección que se hizo fue disminuir el tiempo de activación de las electroválvulas. En la Figura 84 se muestra la curva generada a partir de los datos guardados en la Memoria Micro SD en la primera semana de evaluación.

Figura 83. Curva de control de humedad primera semana



En la Tabla 34 se muestra los datos de la primera semana de evaluación.

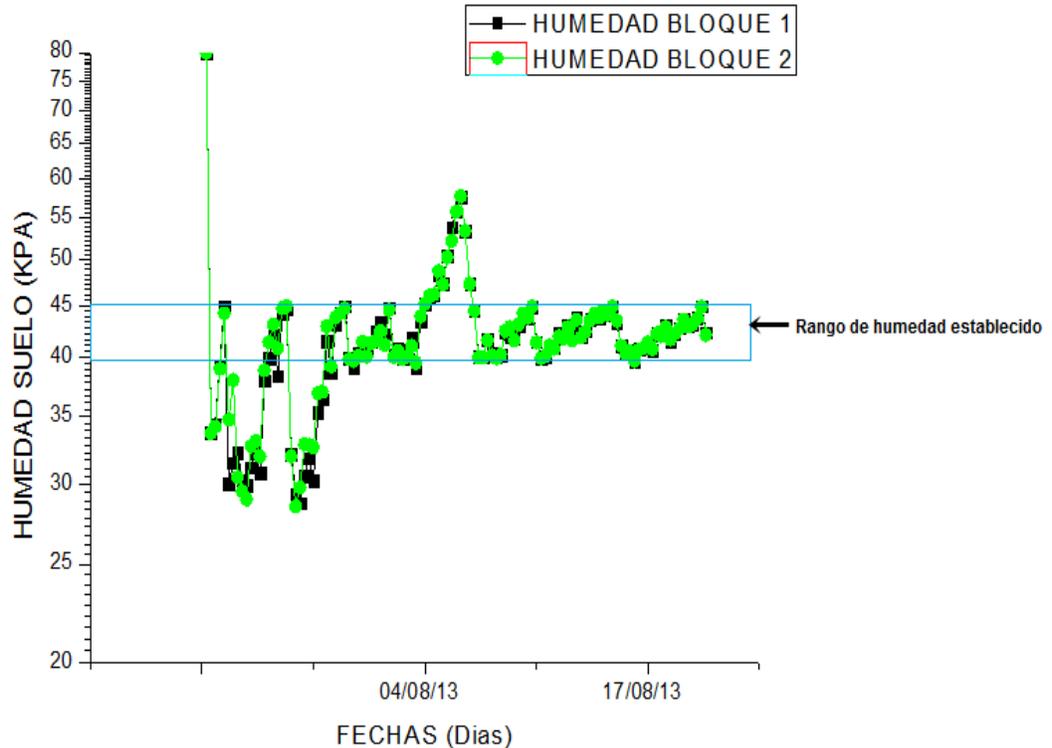
Tabla 34. Datos de la Primera semana de evaluación del Dispositivo

FECHAS	HUMEDAD SUELO	
	KPA	
Días	HUMEDAD BLOQUE 1	HUMEDAD BLOQUE 2
23/07/2013	80	80
23/07/2013	33,77	33,67
24/07/2013	34,41	34,17
24/07/2013	39,3	38,99
24/07/2013	44,96	44,22
24/07/2013	30,05	34,74
25/07/2013	31,5	37,98
25/07/2013	32,23	30,46
25/07/2013	30,24	29,5
25/07/2013	29,95	28,96
26/07/2013	31,17	32,71

26/07/2013	32,21	33,08
26/07/2013	30,81	31,95
26/07/2013	37,94	38,87
27/07/2013	39,92	41,43
27/07/2013	42,15	43,1
27/07/2013	38,36	40,83
27/07/2013	44,21	44,75
28/07/2013	44,64	44,98
28/07/2013	32,08	31,96
28/07/2013	29,34	28,53
28/07/2013	28,75	29,76
29/07/2013	30,55	32,83
29/07/2013	31,84	32,78
29/07/2013	30,27	32,62
29/07/2013	35,29	36,9
30/07/2013	36,4	37,01
30/07/2013	41,5	42,95
30/07/2013	38,71	39,2
30/07/2013	43,21	43,84

Corregido el error de sobrepaso, se continuó con el control de humedad del cultivo de maíz, Generando en el primer mes de evaluación datos de humedad que permitieron obtener una curva de control. Esta curva es mostrada en la Figura 84.

Figura 84. Curva de control de humedad primer mes de evaluación



En la grafica se observa unos puntos que sobrepasan el rango de humedad establecido, este pico se debe a que en ese intervalo de tiempo no hubo agua en el invernadero, por lo que el Dispositivo no pudo hacer el control de humedad; Pero, nos permite evidenciar que los sensores están respondiendo positivamente al cambio de humedad en el suelo.

Pasados los dos meses de evaluación, se extraen el total de los datos de la memoria Micro SD y se realiza la grafica final de control del Dispositivo, la cual nos permite evidenciar el correcto funcionamiento de las Unidades implementadas en el Dispositivo.

La grafica final de control por separado de cada uno de los bloques se muestra en las Figuras 85 y 86, la grafica final de los dos bloques se muestra en la Figura 87 y los datos tanto del primer mes de evaluación como del segundo mes se muestra en el CD-ROM en la carpeta de ANEXO C.

Figura 85. Curva de control de humedad final bloque 1

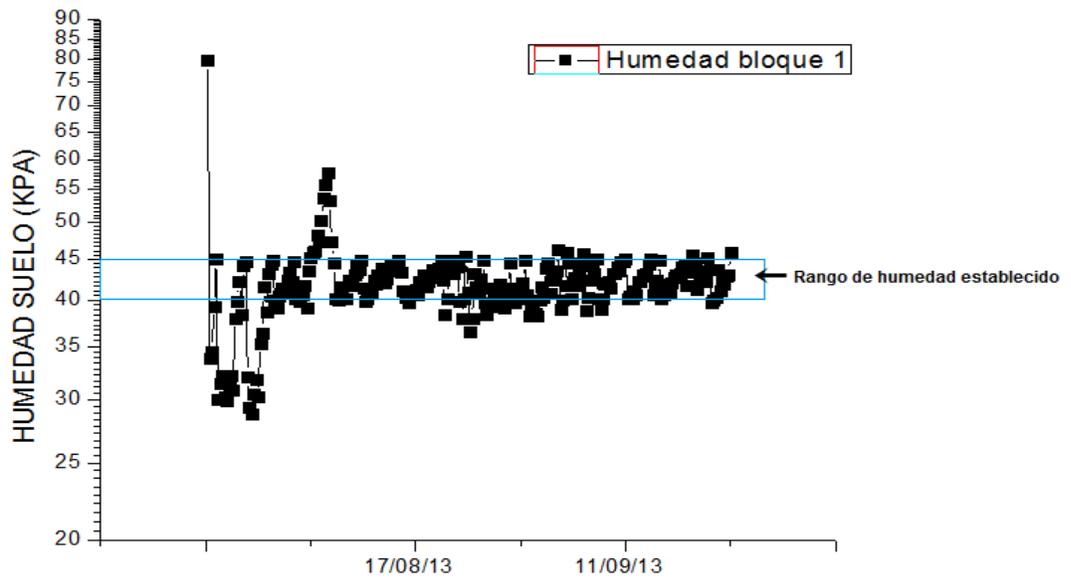


Figura 86. Curva de control de humedad final bloque 2

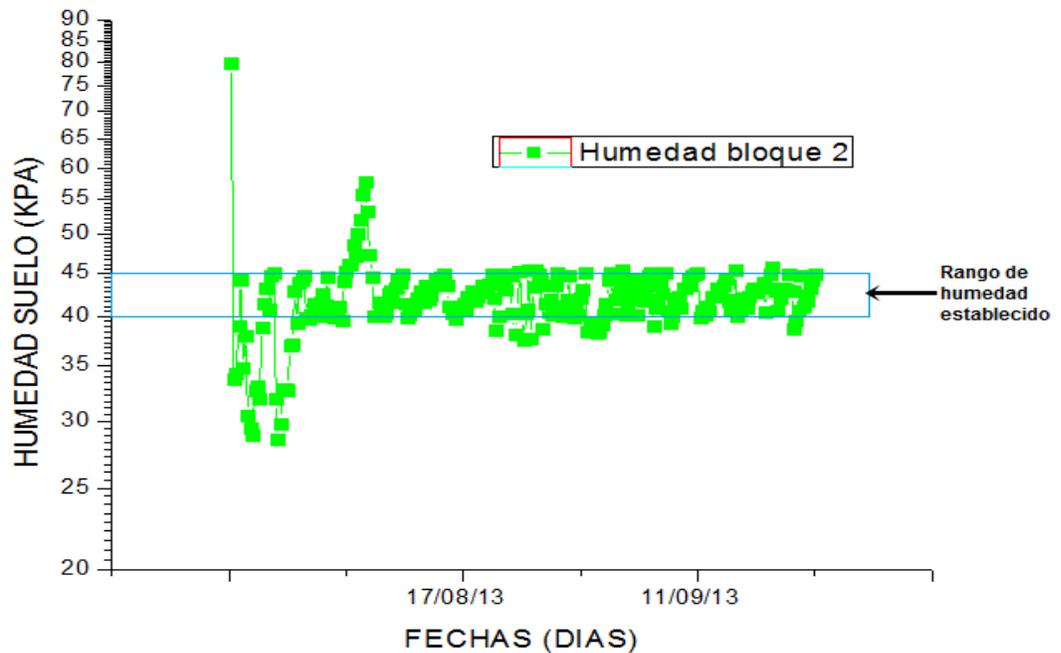
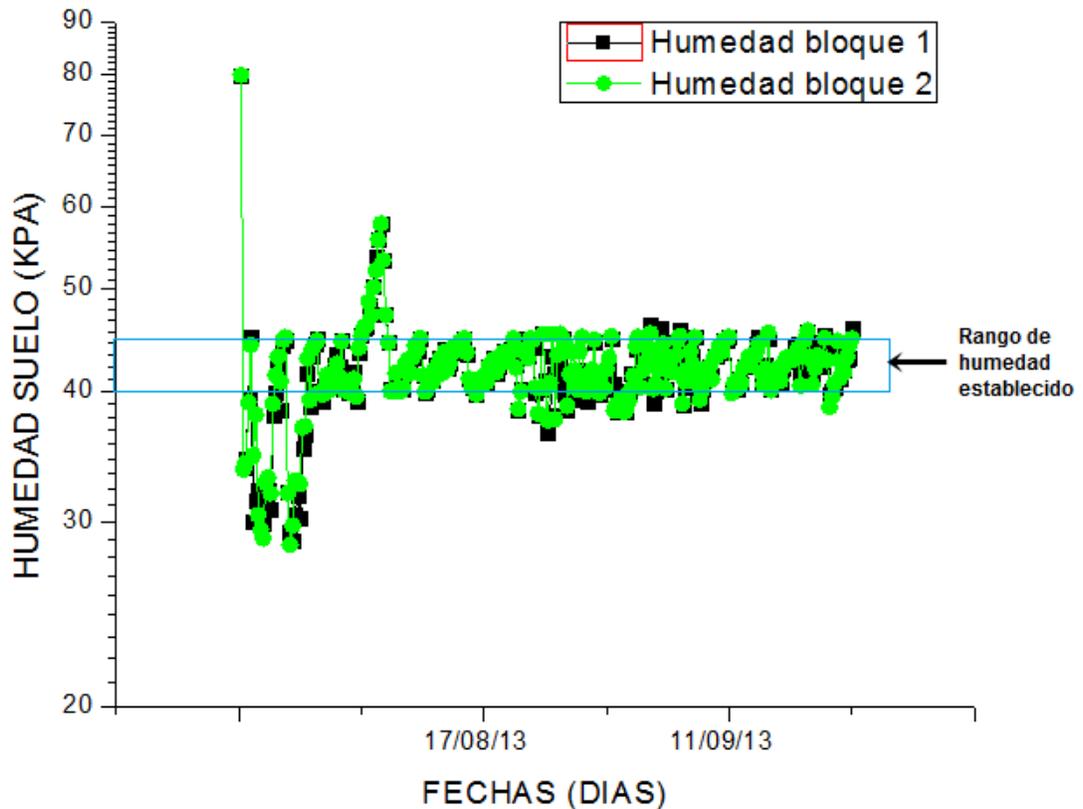


Figura 87. Curva final de control de humedad Dispositivo



El gasto final de agua de riego controlado por el Dispositivo fue de 18 Litros durante los 2 meses de prueba, esta dato fue extraído del medidor de agua instalado en el suministro; Debido a que el medidor nos muestra únicamente en litros, no se puede hacer un cálculo preciso de gasto de agua en mililitros.

Las fechas programadas para la fertilización se muestran en la Tabla 35.

Tabla 35. Fechas de fertilización cultivo de maíz

Fecha fertilización	Hora fertilización	Tiempo de Fertilizacion (Según Tabla 30)
23-08	1:48 p.m	54 seg
25-08	1:40 p.m	54 seg
30-08	1:47 p.m	54 seg

3.4.2.2 Evaluación tensiómetro

La etapa de tensiómetros se implemento con 4 tensiómetros, distribuidos de tal manera que se pueda regar 2 maceteros con 1 tensiómetro, este propósito se logro saltando una macetera por tensiómetro; En esta etapa se puede evidenciar un control poco preciso, debido a que los tensiómetros miden el potencial de humedad del suelo por medio un vacio generado en el tubo y mostrado por el vacuómetro, ellos suministran agua a medida que el suelo se seca, así el suelo no lo necesite, es decir, por capilaridad la humedad sube y baja por el suelo, al subir genera una disminución de humedad en el suelo, por lo que el tensiómetro suministra agua para nivelar el nivel de humedad y este suministro es guardado en el vacuómetro; Cuando el agua baja, se une al agua suministrada por el tensiómetro, por lo que el suelo queda a una humedad menor que la indicada en el vacuómetro, esto genera imprecisión en el control de humedad y por consiguiente mayor consumo de agua.

En las Figuras 88, 89, 90 y 91, se muestra el control de humedad realizado por tensiometria

Figura 88. Curva de control de humedad tensiómetro 1

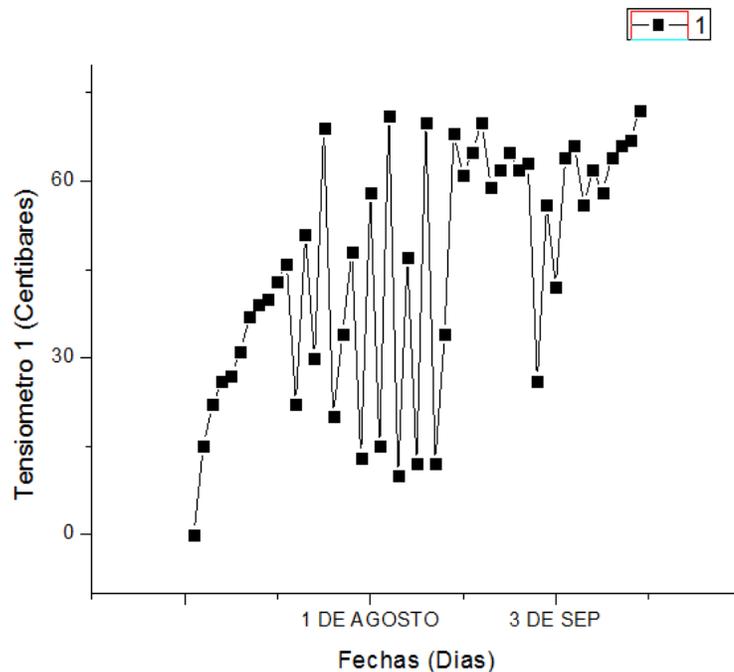


Figura 89. Curva de control de humedad tensiómetro 2

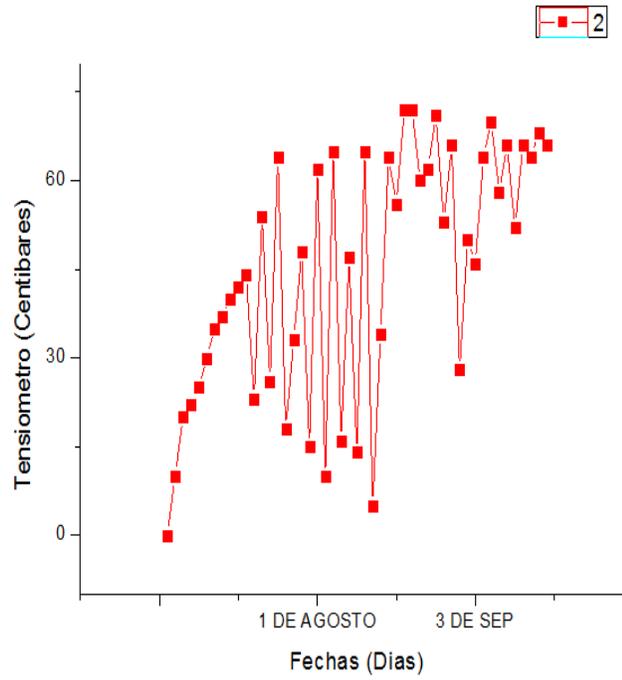


Figura 90. Curva de Control de humedad tensiómetro 3

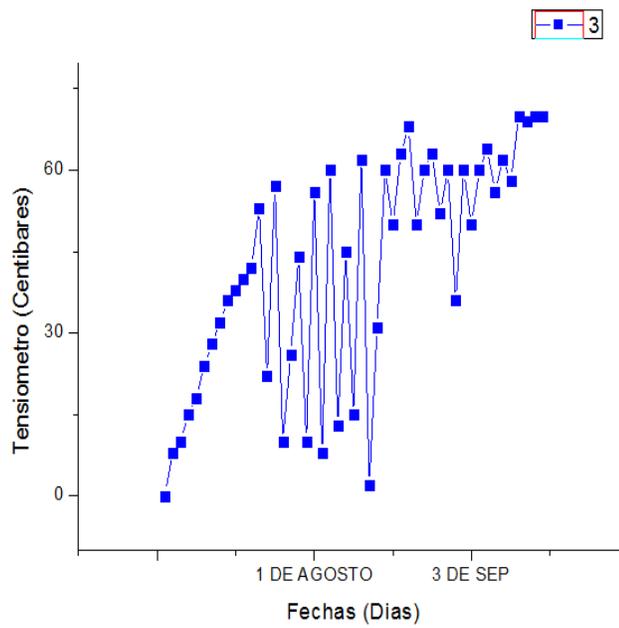
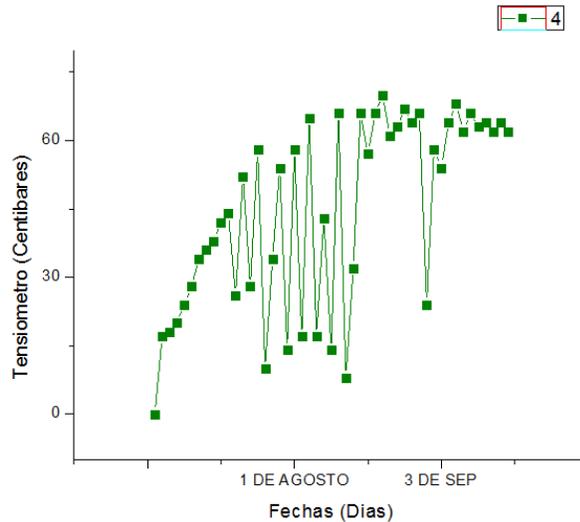


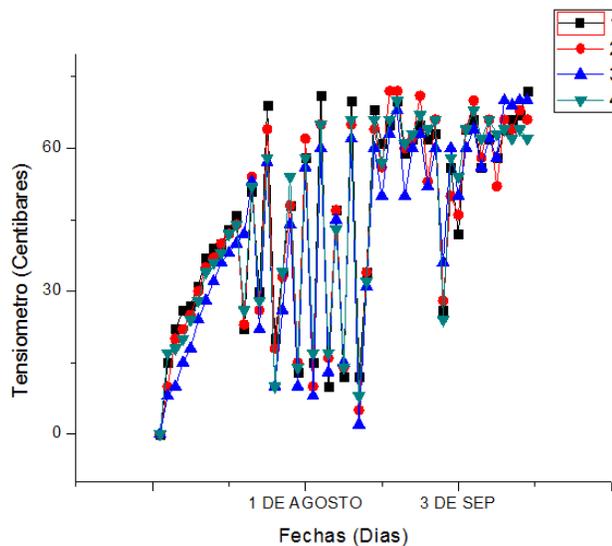
Figura 91. Curva de control de humedad tensiómetro 4



Las curvas de control de tensiómetro tienen casi el mismo comportamiento, lo que evidencia una pérdida de humedad homogénea en cada macetero, pero muestran que no es un control tan preciso, ya que los puntos sobrepasan el nivel de humedad establecido, esto se debe a lo anteriormente explicado.

En la Figura 92 se muestra el control final de los cuatro tensiómetros, y el registro de los datos de pérdida de humedad durante los dos meses de prueba son mostrados en el ANEXO V.

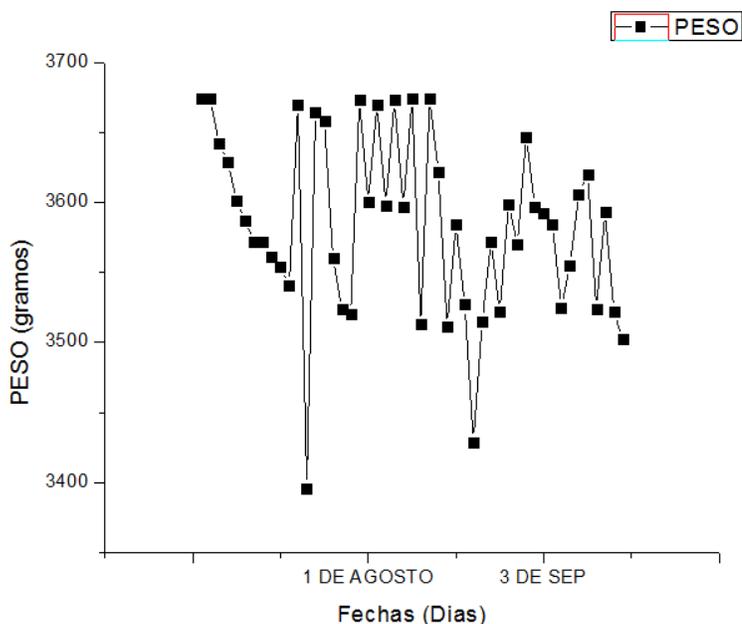
Figura 92. Curva final de control por tensiometria



El gasto final de agua de riego controlado por tensiómetro fue de 23094,2 mililitros lo que equivale a 23,094 litros de agua. Este cálculo se muestra detalladamente en el ANEXO V.

Se llevo también un macetero por peso que sirve como testigo de la pérdida de humedad en los maceteros controlados por tensiómetro, el peso del macetero está establecido para un potencial de 40 Kpa, los datos de pérdida de humedad se muestran en la Figura 93.

Figura 93. Testigo de pérdida de humedad tensiómetros



3.4.2.3 Evaluación por peso

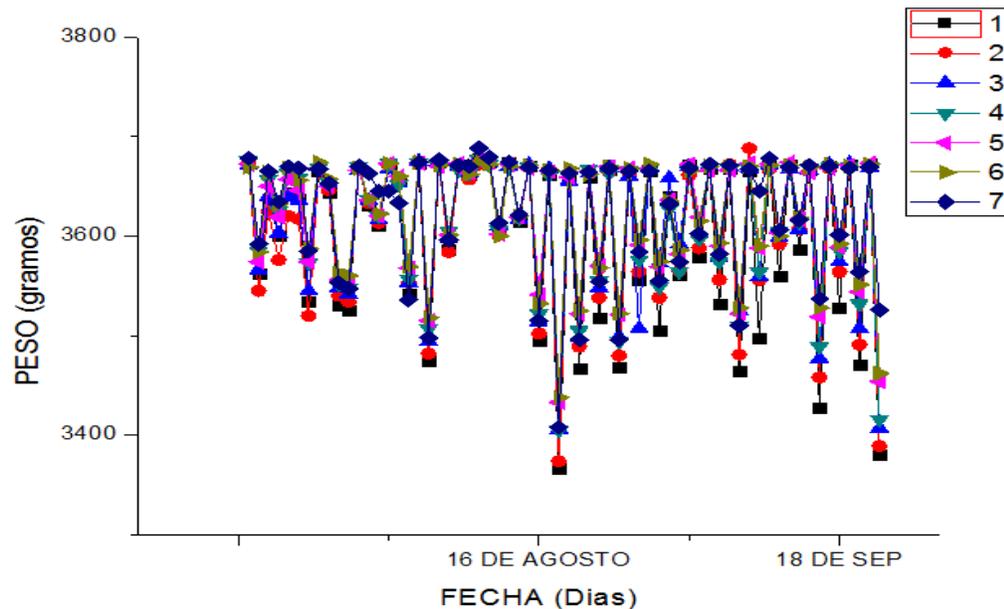
La etapa de control por peso se implemento con 8 maceteros, 7 de ellos contendrán las semillas de maíz y 1 será el testigo de pérdida de peso; Para garantizar que el suelo este a un potencial de humedad de 40 Kpa, se saco de la Tabla 24 la humedad volumétrica de este potencial, se la multiplico por 3000 g de suelo, obteniendo la cantidad de agua que me garantiza que el suelo este a 40 Kpa, el resultado de la suma de la cantidad de suelo + cantidad de agua + peso del macetero, suministra el punto fijo de peso al cual se debe mantener el cultivo, este peso es detallado en la Tabla 36.

Tabla 36. Calculo del peso para una humedad de 40 Kpa

Potencial Kpa	Humedad volumétrica	Cantidad de suelo (g)	Cantidad de agua a utilizar (ml)	Peso Macetero (g)	Total peso 40 Kpa
40	0,18920	3000	567,6	106,4	3674

Para mantener la humedad del suelo a un potencial de 40 Kpa se agrega el agua que ha perdido dependiendo del peso de cada macetera, el agua se agrego con una probeta de 250 ml plástica; En la Figura 94 se muestra la Curva de control de humedad realizada por peso.

Figura 94. Curva final de control por peso

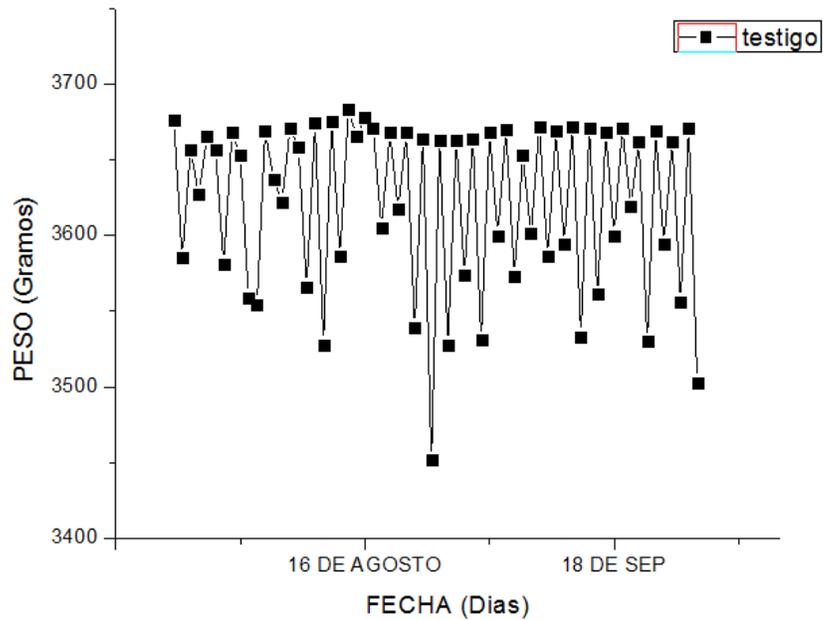


Se relaciono el peso de los maceteros con potencial de humedad, para saber cuándo se sale del rango de riego establecido en la descripción de la Implementación y evaluación del dispositivo; En la curva final se observa el control realizado, cada que el cultivo perdía humedad se le agregaba la cantidad de agua determinada por el peso fijo mostrado en la Tabla 36, el registro de los datos y la relación de peso con potencial durante los 2 meses de evaluación se muestra en el ANEXO VI.

El gasto final de agua de riego controlado por peso fue de 26873 mililitros, lo que equivale a 26,873 Litros de agua. El cálculo del agua gastada se muestra detalladamente en el ANEXO VI.

La grafica del macetero que se utilizó como testigo se muestra en la Figura 95.

Figura 95. Testigo de pérdida de humedad por peso



En el CD-ROM ANEXO D, se encuentran las fotografías del control de humedad hecho en el invernadero de la facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad de Nariño para las etapas evaluadas.

4. RESULTADOS

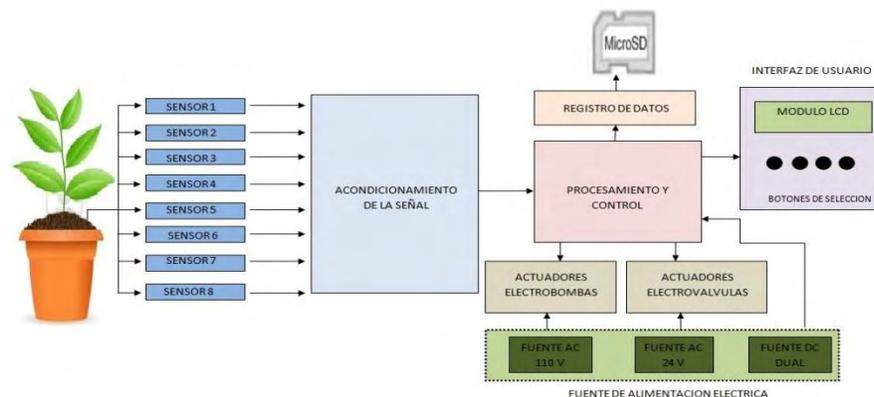
El Dispositivo de control de humedad desarrollado permite controlar y almacenar los datos de humedad y fertilización del suelo en un cultivo de maíz fertirrigado, indica el nivel de humedad al que se encuentra el suelo mediante una pantalla LCD, permitiendo una cómoda y rápida supervisión del nivel de humedad del suelo.

Este dispositivo permite almacenar los niveles de humedad al que se encuentra el suelo durante el proceso de control de fertirriego en una memoria Micro SD, otorgando la posibilidad de realizar un estudio posterior del desarrollo del cultivo.

La interfaz de usuario dispone de dos principales opciones de control. La primera en la cual se puede escoger el numero de sensores a utilizar, los cuales fueron distribuidos en dos bloques, cada uno de ellos de cuatro sensores, con el fin de tener la posibilidad de tener estos bloques a diferentes niveles de humedad. En la segunda opción se puede programar cinco fechas de fertilización, cada una de ellas dependiendo de la curva sigmoideal de desarrollo del cultivo. Para el establecimiento de estas acciones de control, la interfaz de usuario cuenta con un menú de selección, el cual se configura mediante tres pulsadores.

En la siguiente figura 96 se identifican los bloques principales del dispositivo, según se ha mencionado.

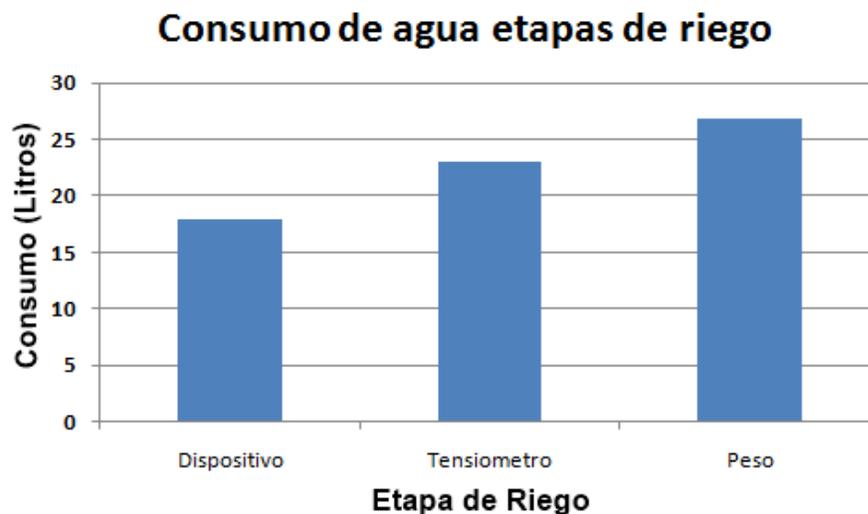
Figura 96. Diagrama de bloques del Dispositivo de control de humedad



El Dispositivo desarrollado cumple con los objetivos de este proyecto, ya que tiene características portables, permite monitorear continuamente la humedad del suelo, permite la presentación real de los datos de humedad, el registro de datos en una memoria Micro SD, tiene sensores de humedad diseñados y acoplados al Dispositivo, Controla la humedad del suelo a diferentes potenciales de humedad, controla la fertilización dependiendo de la cantidad, además, presenta una interfaz de usuario intuitiva para una configuración fácil y rápida.

Como se observo en la etapa de evaluación del Dispositivo, este, permite un control efectivo de la humedad, manteniendo la humedad del suelo al potencial deseado, permitiendo el ahorro del líquido vital e importante para la humanidad como es el agua, este ahorro se puede evidenciar en la Figura 97, donde se relacionan las tres etapas de riego utilizadas.

Figura 97. Relación de ahorro de agua de las tres etapas de riego



El Dispositivo diseñado permite un ahorro en el tiempo de riego, ya que es autónomo y no necesita de supervisión para realizar este procedimiento; En comparación con las dos etapas de riego implementadas para su evaluación, se tiene un ahorro de 2 Horas aproximadamente, ya que ellas necesitan de una evaluación previa para la toma de decisiones.

Se evidencio que con el Dispositivo y un control de riego más detallado, se obtiene disminución en el tiempo de brote de la semilla, ya que, con el control de humedad del Dispositivo, las semillas brotaron en mayor cantidad y rapidez; en la Tabla 37 se indica la cantidad de brotes por etapa de riego a los 15 días de sembrado.

Tabla 37. Numero de brotes por etapa de riego

Etapas de riego	No de semillas sembradas	No de brotes
Dispositivo	32	28
Tensiometro	28	24
Peso	28	18

Uno de los resultados más relevantes en el desarrollo del Dispositivo es el ahorro económico en los sensores de humedad desarrollado; En el mercado, un sensor de humedad de suelo está costando 453.000 pesos, y el sensor desarrollado en el trabajo de grado sale por 5000 pesos.

El crecimiento de la planta a los dos meses de comenzado la evaluación del Dispositivo se muestra a continuación.

Figura 98. Cultivo de Maíz controlado por Dispositivo



Figura 99. Cultivo de Maíz controlado por tensiómetro y peso



5. RECOMENDACIONES

Se recomienda hacer la calibración del sensor dependiendo del suelo a utilizar, la calibración hecha en este trabajo es para el suelo de tipo Vitric hasplusdand con características en su textura de un suelo Franco Arcilloso, siguiendo los pasos del diseño y calibración. Es necesario hacer esta calibración ya que cada suelo trae diferencias en su textura, estructura, materia orgánica y niveles de salinidad.

Se recomienda que el sensor sea totalmente cubierto por el suelo, ya que si este queda por fuera del suelo, los niveles de voltaje varían y presenta inestabilidad proporcionando datos erróneos.

Se recomienda que para el uso de los sensores en maceteras, queden enterrados en igual distancia dentro de ella, al no verificar esta distancia, se tendrá un valor promedio erróneo, debido a que el tiempo de llegada del agua al sensor será menor tiempo, es decir el sensor que quede más cercano de la gota de riego tendrá diferente voltaje que el sensor que este más lejano.

Se recomienda no retirar la memoria micro SD en los tiempos de grabación, estos tiempos son: 8 am, 12 pm, 8 pm y 12 am, ya que en estas horas la unidad de control envía los datos a la Unidad de guardado de datos, si se llegara a retirar, produciría daño en el archivo o no guardado de datos.

Se recomienda verificar las conexiones de entrada y salida de actuadores, como la de suministro de agua antes de iniciar el equipo, ya que si no están en funcionamiento no se iniciara correctamente el monitoreo de la humedad y se necesitaría resetear el Dispositivo.

Se recomienda el uso de Estabilizador eléctrico en el sitio donde se va a utilizar el Dispositivo, ya que un pico de corriente puede dañar las unidades que lo componen.

Se recomienda apoyar investigaciones interdisciplinarias, donde se unan carreras diferentes con el fin de solucionar un determinado problema, no se necesita de grandes inversiones, solo la capacidad humana para solucionarlo; Esta capacidad está dada dentro de la Universidad de Nariño, gracias al compromiso de docentes y estudiantes, mas aun dentro de la facultad de ingeniería donde se forman profesionales con la capacidad de contribuir tecnológicamente en el desarrollo de la región.

6. CONCLUSIONES

Gracias a los diferentes ensayos realizados dentro del invernadero de la Facultad de Ciencias agrícolas de la Universidad de Nariño, Se diseño, probó y analizó 4 tipos de sensores de humedad, de los cuales, se puede concluir que el sensor de yeso higroscópico no es apropiado para el control de humedad en suelos saturados, el sensor de yeso trabaja bien en suelo secos; Los sensores de cobre y bronce permiten un control de humedad por un intervalo de tiempo corto, debido a la corrosión que ataca los electrodos, la cual provoca pérdida de datos y mal funcionamiento; Finalmente, se concluye que el sensor de acero desarrollado es apropiado en el control de humedad, ya que tiene alta resistencia a la corrosión y buena sensibilidad a la variación de la humedad.

El sensor de humedad desarrollado presenta un bajo costo en comparación a sensores que se encuentran en el mercado, disminuyendo su valor en casi un 90%, permitiendo aportar a la Facultad de Ciencias Agrícolas y en especial a grupo de investigación de cultivos andinos, tecnología de alto impacto a muy bajo costo.

La disponibilidad de tecnología dentro de las investigaciones de la Facultad de agronomía es de gran importancia al momento de obtener buenos resultados, ya que el control de humedad en el cultivo, le permite al agrónomo determinar la humedad apropiada para su desarrollo; El dispositivo desarrollado le da gran versatilidad a la comunidad académica del programa de Ingeniería Agronómica, permitiéndole variar el grado de humedad del cultivo, controlarlo y obtener datos de pérdida de humedad, con los cuales puede realizar posteriores análisis; además, se contribuye con el medio ambiente, ya que se evita el desperdicio de un líquido vital como el agua.

El control permanente del cultivo, evita el déficit de agua o el exceso de agua que ocasionan daños en el desarrollo de la planta, una humedad adecuada en el suelo le facilita a la planta la absorción de los nutrientes, además, un control de suministro de fertilización adecuado logra que el desarrollo y producción de la planta sea de alta calidad.

El desarrollo del trabajo de grado permitió establecer vínculos interdisciplinarios entre el programa de Ingeniería Electrónica y el Programa de Ingeniería agronómica, abriendo puertas a la realización de futuros trabajos de grado, con los cuales se pueda apoyar Investigaciones académicas desde el punto de vista tecnológico.

BIBLIOGRAFIA

COLOMBIA. Ministerio de Agricultura y desarrollo rural – MADR. Gobernación de Nariño, Fondo nacional de fomento Hortifruticola – FNFH. Asociación Hortifruticola de Colombia – Asohofrucol. Sociedad de agricultores y ganaderos del Valle del Cauca – SAG. Desarrollo de la Fruticultura en Nariño. Pasto, Noviembre de 2006.

DE LA HOZ, Joaquin Victoria. Economía del departamento de Nariño; Ruralidad y aislamiento geográfico. Marzo 2007.

SHAQUIÑAN. Asociación de cabildos y/o autoridades tradicionales del nudo de los pastos. Consultoría plan de manejo ambiental.

NARIÑO. Departamento Nacional de Planeación. Agenda Interna. Documento regional. Agenda Interna para la Competitividad y la Productividad. Junio de 2007.

VAZQUEZ POLO, José Rafael. Caracterización de la variabilidad espacial de las propiedades físicas y químicas en los suelos de la granja experimental de la Universidad del Magdalena. Universidad Nacional de Colombia. Sede Palmira.

M^a.D. FERNÁNDEZ, F. Orgaz. E. FERES, J.C. LÓPEZ, Céspedes. Programación del riego de cultivos horticolas bajo invernadero en el sudeste español. Estación experimental "Las palmerillas".

ALARCÓN MELLADO, Luis Hernán, Diseño, Implementación y Optimización de un monitor inalámbrico en un invernadero. Universidad Austral de Chile. Valdivia-Chile 2009.

HERNÁNDEZ RANGEL, L. Enrique. PINEDA, Wilman. BAYONA, Daniel. Sistemas de monitoreo y control vía inalámbrica de humedad y temperatura para invernaderos. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC).

Padovani, Leandro, Automatización y Control de Invernadero. Universidad nacional de Quilmes. Facultad de Ingeniería en Automatización y Control Industrial.

AGUDELO DUEÑAS, Rodolfo. CASTELLANOS GIOVANINI, Dayanna. MEDINA CRUZ, Mauricio. Automatización de sistema de riego para el cultivo de flores tipo exportación. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá D.C.

MEZA OCHOA, Victoria Elena. Suelos parcialmente saturados, de la investigación a la cátedra universitaria.2011.p.28.

Ing. Agr. FERNÁNDEZ DE ULLIVARRI, Juan. Cátedra de edafología. Facultad de agronomía y zootecnia. Universidad nacional de Tucumán.

Ing. Agr. DURÁN, Artigas. Tecnología de tierras y aguas y riego por aspersión. Facultad de agronomía. Universidad de la república. Montevideo - Uruguay 2004

Ing. GARCÍA, Fernando. Criterios para el manejo de la fertilización del cultivo de maíz. Argentina.

Ing. LECAROS BARRAGÁN, José m. El riego por goteo. Universidad católica. Santo Toribio de Mogrovejo. Seminario internacional de riego y 1 fertirrigacion. Chiclayo, 23 y 24 de junio de 2011.

Ing. SÁNCHEZ V, Javier. Fertilidad del suelo y nutrición mineral de plantas. Fertitec s.a.

Ing. ZAMORA CARDONA, Juan Carlos. Cristancho, Fernando. La humedad en las propiedades físicas del suelo. Departamento de física. Universidad nacional de Colombia, Bogotá, 2008

Ing. Agr. SÁNCHEZ, Ramón M. Métodos de riego por gravedad. Catedra de hidrología y riego.

Ing. FLORENTINO, Adriana. Métodos para medir el contenido de agua en el suelo. Instituto de edafología. Facultad de agronomía. Universidad central de Venezuela.

Ing. DE LA FUENTE, Alejandro M. Programación del riego con tensiómetro. Scientia tech asesoría, s.c.

Ing. Agr. DURÁN, Artigas. Composición del suelo. Facultad de agronomía. Universidad de la república. dpto. suelos y aguas. Montevideo - Uruguay 2004

ALBRECHT, Jungk. Movimiento de nutrientes a la interface suelo-raíz. Nutrición vegetal vol.1, no.1, jun. 2001.

CIAMPITTI, Ignacio A. Nutrición de maíz: requerimientos y absorción de nutrientes. Indiana, EE.UU.

Ing. Agr. GARCÍA, Margarita. Nutrición de plantas. Curso horticultura 2010. Facultad de agronomía. Centro regional sur. Departamento producción vegetal Udelar

GARCÍA ARANGO Carolina. La competitividad agrícola como se obtiene, Universidad Nacional de Colombia. 2008. p. 6-8

RÍOS GONZALES Pedro. Automatización del riego en sustratos. Campus Montecillo. Montecillo. Texcoco. EDO. De México. 2010.

ANEXOS

ANEXO I

ANEXO V

REGISTRO DE PERDIDA DE HUMEDAD TENCIOMETROS									
FECHA	HORA	TENCIOMERO (Centibares)							TESTIGO
		1	2	3	4	5	6	7	8
23 DE JULIO	5:00 p.m	15	N.R	10	NR	8	N.R	17	3674
	9:50 p.m	22	N.R	20	NR	10	N.R	18	3642
24 DE JULIO	7:30 a.m	26	N.R	22	NR	15	N.R	20	3629
	11:17 a.m	27	N.R	25	NR	18	N.R	24	3601
	6:43 p.m	31	N.R	30	NR	24	N.R	28	3587
25 DE JULIO	8:20 a.m	37	N.R	35	NR	28	N.R	34	3572
	1:15 p.m	39	N.R	37	NR	32	N.R	36	3572
	5:50 p.m	40	N.R	40	NR	36	N.R	38	3561
26 DE JULIO	8:30 a.m	43	N.R	42	NR	38	N.R	42	3554
	11:08 a.m	46	N.R	44	NR	40	N.R	44	3541
	5:20 p.m	22	N.R	23	NR	42	N.R	26	3670
27 DE JULIO	4:00 p. m	51	N.R	54	NR	53	N.R	52	3396
	5:16 p.m	30	N.R	26	NR	22	N.R	28	3664
29 DE JULIO	3:30 p.m	69	N.R	64	NR	57	N.R	58	3658
	6:00 p.m	20	N.R	18	NR	10	N.R	10	3560
30 DE JULIO	2:40 p.m	34	N.R	33	NR	26	N.R	34	3524
	11:24 a.m	48	N.R	48	NR	44	N.R	54	3520
	11:50 a.m	13	N.R	15	NR	10	N.R	14	3673
1 DE AGOSTO	10:40 a.m	58	N.R	62	NR	56	N.R	58	3600
	11:20 a.m	15	N.R	10	NR	8	N.R	17	3670
5 DE AGOSTO	3:55 p.m	71	N.R	65	NR	60	N.R	65	3598
	4:20 p.m	10	N.R	16	NR	13	N.R	17	3673
6 DE AGOSTO	5:49 p.m	47	N.R	47	NR	45	N.R	43	3597
	6:00 p. m	12	N.R	14	NR	15	N.R	14	3674
8 DE AGOSTO	3:37 p.m	70	N.R	65	NR	62	N.R	66	3513
	4:42 p.m	12	N.R	5	nr	2	N.R	8	3674
9 DE AGOSTO	3:44 p.m	34	N.R	34	N.R	31	N.R	32	3622

12 DE AGOSTO	8:58 a.m	68	N.R	64	N.R	60	N.R	66	3511
13 DE AGOSTO	7:00 p.m	61	N.R	56	N.R	50	N.R	57	3584
16 DE AGOSTO	9:50 a.m	65	N.R	72	N.R	63	N.R	66	3527
22 DE AGOSTO	8:58 a.m	70	N.R	72	N.R	68	N.R	70	3429
24 DE AGOSTO	3:19 p.m	59	N.R	60	N.R	50	N.R	61	3515
26 DE AGOSTO	10:47 a.m	62	N.R	62	N.R	60	N.R	63	3572
29 DE AGOSTO	8:56 a.m	65	N.R	71	N.R	63	N.R	67	3522
30 DE AGOSTO	8:24 a.m	62	N.R	53	N.R	52	N.R	64	3599
31 DE AGOSTO	9:48 a.m	63	N.R	66	N.R	60	N.R	66	3570
1 DE SEP	9:11 a.m	26	N.R	28	N.R	36	N.R	24	3647
2 DE SEP	8:11 a.m	56	N.R	50	N.R	60	N.R	58	3597
3 DE SEP	10:00 a.m	42	N.R	46	N.R	50	N.R	54	3592
4 DE SEP	9:26 a.m	64	N.R	64	N.R	60	N.R	64	3584
9 DE SEP	10:52 a.m	66	N.R	70	N.R	64	N.R	68	3525
11 DE SEP	9:25 a.m	56	N.R	58	N.R	56	N.R	62	3555
12 DE SEP	5:03 p.m	62	N.R	66	N.R	62	N.R	66	3606
13 DE SEP	1:32 p.m	58	N.R	52	N.R	58	N.R	63	3620
16 DE SEP	4:00 p.m	64	N.R	66	N.R	70	N.R	64	3524
18 DE SEP	8:36 a.m	66	N.R	64	N.R	69	N.R	62	3593
20 DE SEP	1:16 a.m	67	N.R	68	N.R	70	N.R	64	3522
23 DE SEP	12:35 p.m	72	N.R	66	N.R	70	N.R	62	3502

CANTIDAD DE AGUA EN ml A APLICAR CON RESPECTO A LA LECTUA DEL TENCIOMETRO										
FECHA		TRATAMIENTO							TESTIGO	CANTIDAD DE AGUA REGADA (ml)
		1	2	3	4	5	6	7	8	
23 de JULIO	5:00 p. m.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	9:50 p. m.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24 DE JULIO	7:30 a. m.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	11:17 a. m.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6:43 p. m.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25 DE JULIO	8:20 a. m.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1:15	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5:50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26 DE JULIO	8:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	11:08 a. m.	53,84213975	53	0	0	0	0	0	0	106,8421398
	17:20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27 DE JULIO	4:00 p. m.	83,3353748	83	97,49563749	97	93,0022273	93	88,2896345	278	635,1
	5:16 p. m.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29 DE JULIO	3:30 p. m.	147,7157163	147	133,690328	133	109,8435923	109	113,6321969	0	893,9
	6:PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30 DE JULIO	2:40PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	11:24 a. m.	66,73777651	66	66,73777651	66	0	0	97,49563749	154	363,0
	11:50 a. m.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1 DE AGOSTO	10:40 a.m	113,6321969	113	127,4557216	127	105,9003637	105	113,6321969	74	805,6
	11:20 a. m.	0	0	0	0	0	0	0	0	0

5 DE AGOSTO	3:55 p. m.	152,8015154	152	136,6629975	136	120,7909415	120	136,6629975	76	954,9
	4:20 p. m.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6 DE AGOSTO	5:49 p.m	60,50492009	60	60,50492009	60	0	0	0	77	241,0
	6:00 p. m.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8 DE AGOSTO	3:37 p.m	150,2920713	150	151	151	127,4557216	127	139,5469402	161	996,2947331
	4:42	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9 DE AGOSTO	3:44 p.m	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
12 DE AGOSTO	8:58 a.m	145,0687845	145	119	119	120,7909415	120	139,5469402	163	908,4066662
13 DE AGOSTO	7:00 p.m	124,1807807	124	112	112	78,11331618	78	109,8435923	90	738,1
16 DE AGOSTO	9:50 A.M	136,6629975	136	148	148	130,6232985	130	139,5469402	147	968,8332362
22 DE AGOSTO	8:58 A.M	300	300	297	297	145,0687845	145	297	245	1781,068784
24 DE AGOSTO	3:19 p.m	117,2778477	117	120,7909415	120	78,11331618	78	124,1807807	159	755,362886
26 DE AGOSTO	10:47 a.m	127,4557216	127	127,4557216	127	120,7909415	120	130,6232985	102	880,3
29 DE AGOSTO	8:56 a.m	136,6629975	136	152,8015154	152	130,6232985	130	142,3472997	152	980,435111
30 DE AGOSTO	8:24 a.m	127,4557216	127	93,0022273	93	88,2896345	88	133,690328	75	750,4
31 DE AGOSTO	9:48 A.M	130,6232985	130	139,5469402	139	120,7909415	120	139,5469402	104	919,5081205
1 DE SEP	9:11 A.M	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
2 DE SEP	8:11 A.M	105,9003637	105	78,11331618	78	120,7909415	120	113,6321969	77	721,4368183
3 DE SEP	10:00 A.M	21,35282909	21	53,84213975	53	78,11331618	78	97,49563749	82	360,5
4 DE SEP	9:26 A.M	133,690328	133	133,690328	133	120,7909415	120	133,690328	90	907,8619255
9 DE SEP	10:52 A.M	139,5469402	139	150,2920713	150	133,690328	133	145,0687845	149	990,6
11 DE SEP	9:25 A.M	105,9003637	105	113,6321969	113	105,9003637	105	127,4557216	119	775,8886459
12 DE SEP	5:03 P.M	127,4557216	127	139,5469402	139	127,4557216	127	139,5469402	68	927,0
13 DE SEP	1:32 P.M	113,6321969	113	88,2896345	88	113,6321969	113	130,6232985	54	760,1773269
16 DE SEP	4:00 P.M	133,690328	133	139,5469402	139	150,2920713	150	133,690328	150	979,2

18 DE SEP	8:36 A.M	139,5469402	139	133,690328	133	147,7157163	147	127,4557216	81	967,4087062
20 DE SEP	1:16 A.M	142,3472997	142	145,0687845	145	150,2920713	150	133,690328	152	1008,4
23 DE SEP	12:35 P.M	155,2474364	155	139,5469402	139	150,2920713	150	127,4557216	172	1016,54217
									TOTAL	23094,2

ANEXO VI

REGISTRO DE PERDIDA DE HUMEDAD POR PESO									
FECHA	HORA	RECIPIENTE 1	RECIPIENTE 2	RECIPIENTE 3	RECIPIENTE 4	RECIPIENTE 5	RECIPIENTE 6	RECIPIENTE 7	Testigo
23 DE JULIO	5:00 p. m.	3675	3673	3671	3676	3672	3669	3678	3676
25 DE JULIO	8:20 a. m.	3562	3545	3566	3585	3574	3584	3592	3585
25 DE JULIO	1:15	3637	3625	3640	3657	3650	3664	3665	3657
26 DE JULIO	11:00 a. m.	3601	3576	3603	3625	3619	3632	3634	3627
26 DE JULIO	11:43 a. m.	3643	3620	3640	3663	3657	3668	3670	3665
26 DE JULIO	5:20 p. m.	3637	3617	3636	3658	3646	3656	3668	3657
27 DE JULIO	2:35 p. m.	3534	3520	3545	3573	3574	3587	3585	3581
27 DE JULIO	2:51 p. m.	3665	3668	3670	3668	3668	3674	3667	3668
27 DE JULIO	5:28 p. m.	3644	3646	3653	3654	3650	3657	3653	3653
29 DE JULIO	3:30 p. m.	3531	3540	3548	3552	3556	3563	3553	3559
29 DE JULIO	5:46PM	3526	3534	3542	3548	3553	3560	3547	3554
29 DE JULIO	6:00 p. m.	3668	3670	3666	3670	3666	3668	3670	3669
30 DE JULIO	2:40 p. m.	3631	3633	3636	3637	3636	3637	3663	3637
30 DE JULIO	6:00 p. m.	3610	3613	3616	3620	3620	3622	3645	3622
30 DE JULIO	6:20 p. m.	3670	3671	3667	3673	3673	3673	3645	3671
31 DE JULIO	11:08 a. m.	3656	3659	3653	3652	3660	3660	3633	3658
1 DE AGOSTO	11:17 a. m.	3542	3553	3553	3557	3568	3569	3536	3566
1 DE AGOSTO	11:30 a. m.	3673	3674	3675	3674	3673	3674	3674	3674
5 DE AGOSTO	4:29 p. m.	3474	3482	3494	3507	3515	3518	3498	3528

5 DE AGOSTO	5:00 p. m.	3674	3674	3675	3671	3670	3671	3676	3675
6 DE AGOSTO	5:20 p. m.	3586	3584	3598	3605	3601	3601	3596	3586
6 DE AGOSTO	6:00 p. m.	3671	3671	3670	3666	3673	3672	3671	3683
8 DE AGOSTO	11:17 a. m.	3661	3657	3664	3663	3663	3662	3670	3665
8 DE AGOSTO	11:30 a. m.	3678	3672	3679	3677	3676	3675	3688	3678
9 DE AGOSTO	4:29 p. m.	3695	3676	3674	3672	3674	3672	3679	3671
12 DE AGOSTO	5:00 p. m.	3611	3601	3610	3606	3602	3600	3613	3605
12 DE AGOSTO	5:20 p. m.	3674	3673	3670	3669	3672	3670	3674	3668
13 DE AGOSTO	6:00 p. m.	3615	3620	3617	3618	3619	3620	3621	3617
13 DE AGOSTO	11:17 a. m.	3670	3669	3672	3670	3668	3671	3669	3668
16 DE AGOSTO	10:29 a.m	3495	3502	3514	3522	3541	3532	3515	3539
16 DE AGOSTO	10:59 a.m	3662	3667	3668	3661	3665	3666	3666	3664
22 DE AGOSTO	9:37 A.M	3366	3374	3406	3405	3433	3438	3408	3452
22 DE AGOSTO	10:16 A.M	3660	3663	3655	3661	3659	3668	3663	3663
24 DE AGOSTO	3:55 P.M	3467	3489	3498	3505	3522	3525	3496	3528
24 DE AGOSTO	4:23 P.M	3659	3665	3663	3667	3665	3662	3664	3663
26 DE AGOSTO	11:11 A.M	3518	3538	3548	3555	3570	3568	3554	3574
26 DE AGOSTO	11:32 A.M	3667	3665	3669	3663	3670	3670	3668	3664
29 DE AGOSTO	9:02 a.m	3468	3480	3499	3494	3521	3522	3496	3531
29 DE AGOSTO	9:48 a.m	3663	3663	3660	3666	3668	3668	3665	3668
30 DE AGOSTO	8:48	3556	3564	3507	3576	3591	3596	3584	3600
30 DE AGOSTO	9:45 A.M	3665	3668	3728	3665	3667	3672	3665	3670
31 DE AGOSTO	9:46 A.M	3505	3538	3573	3549	3569	3574	3555	3573
1 DE SEP	9:15 A.M	3640	3633	3658	3627	3636	3635	3632	3653
2 DE SEP	8:35 A.M	3561	3565	3592	3564	3582	3586	3574	3601

3 DE SEP	8:58 A.M	3671	3661	3670	3666	3672	3665	3668	3672
3 DE SEP	10:29 A.M	3579	3588	3603	3597	3619	3615	3602	3586
3 DE SEP	11:00 A.M	3668	3670	3671	3668	3666	3670	3672	3669
3 DE SEP	9:41 A.M	3532	3556	3579	3574	3590	3593	3582	3594
9 DE SEP	9:51 A.M	3668	3672	3670	3668	3666	3670	3671	3672
9 DE SEP	11:07 A.M	3464	3481	3525	3510	3522	3528	3510	3533
9 DE SEP	11.30 A.M	3665	3668	3668	3667	3673	3670	3667	3671
11 DE SEP	9:33 A.M	3498	3556	3559	3564	3588	3590	3645	3561
11 DE SEP	10:00 A.M	3671	3667	3671	3668	3672	3671	3678	3668
12 DE SEP	5:11 P.M	3560	3592	3599	3605	3603	3600	3606	3600
12 DE SEP	5:20 P.M	3671	3671	3667	3667	3674	3671	3669	3671
13 DE SEP	1:36 P.M	3587	3607	3607	3614	3617	3618	3616	3619
13 DE SEP	2:03 p.m	3667	3665	3666	3668	3664	3669	3671	3662
16 DE SEP	4:12 P.M	3428	3458	3477	3489	3519	3528	3537	3530
16 DE SEP	5:00 P.M	3670	3668	3672	3670	3668	3672	3670	3669
18 DE SEP	8:50 A.M	3528	3564	3574	3585	3589	3592	3601	3594
18 DE SEP	10:00 A.M	3671	3669	3673	3670	3671	3670	3668	3662
20 DE SEP	1:28 P.M	3471	3491	3507	3532	3544	3551	3564	3556
20 DE SEP	3:00 P.M	3673	3671	3669	3670	3673	3672	3669	3671
23 DE SEP	12:47 A.M	3381	3389	3407	3416	3454	3462	3526	3503

RELACION POTENCIAL DE HUMEDAD CON PESO									
FECHA	HORA	RECIPIENTE 1	RECIPIENTE 2	RECIPIENTE 3	RECIPIENTE 4	RECIPIENTE 5	RECIPIENTE 6	RECIPIENTE 7	Testigo
23 DE JULIO	5:00 p. m.	40,18345564	40,3547797	40,5296867	40,09911421	40,44178069	40,70825156	39,9330274	40,09911421
25 DE JULIO	8:20 a. m.	58,37077257	63,44494749	57,30108656	52,78322801	55,29008277	52,99951576	51,33029578	52,78322801
25 DE JULIO	1:15	44,13037612	45,73546975	43,75929339	41,86085356	42,60234979	41,17117281	41,07666245	41,86085356
26 DE JULIO	11:00 a. m.	49,61042196	54,81281227	49,24949808	45,73546975	46,61593205	44,77503226	44,51316028	45,45392342
26 DE JULIO	11:43 a. m.	43,39955439	46,46536578	43,75929339	41,26666632	41,86085356	40,79892953	40,61850715	41,07666245
26 DE JULIO	5:20 p. m.	44,13037612	46,92177968	44,25665269	41,75924267	43,05081235	41,96352146	40,79892953	41,86085356
27 DE JULIO	2:35 p. m.	67,23727142	72,732252	63,44494749	55,53244805	55,29008277	52,35730988	52,78322801	53,66197246
27 DE JULIO	2:51 p. m.	41,07666245	40,79892953	40,61850715	40,79892953	40,79892953	40,26867443	40,89055078	40,79892953
27 DE JULIO	5:28 p. m.	43,28210197	43,05081235	42,27797772	42,17207237	42,60234979	41,86085356	42,27797772	42,27797772
29 DE JULIO	3:30 p. m.	68,3486904	65,11532066	62,48343236	61,24697825	60,06066228	58,09918564	60,94577967	59,20260229
29 DE JULIO	5:46PM	70,27948108	67,23727142	64,43678229	62,48343236	60,94577967	58,92245135	62,80062636	60,64768204
29 DE JULIO	6:00 p. m.	40,79892953	40,61850715	40,98312511	40,61850715	40,98312511	40,79892953	40,61850715	40,70825156
30 DE JULIO	2:40 p. m.	44,90801486	44,64341876	44,25665269	44,13037612	44,25665269	44,13037612	41,26666632	44,13037612
30 DE JULIO	6:00 p. m.	48,04350158	47,55279746	47,07709379	46,46536578	46,46536578	46,16886768	43,16585877	46,16886768
30 DE JULIO	6:20 p. m.	41,96352146	41,6586779	42,27797772	42,38498474	41,55914849	41,55914849	44,64341876	41,75924267
31 DE JULIO	11:08 a. m.	41,96352146	41,6586779	42,27797772	42,38498474	41,55914849	41,55914849	44,64341876	41,75924267
1 DE AGOSTO	11:17 a. m.	64,43678229	60,94577967	60,94577967	59,77167728	56,78262108	56,52738479	66,51526535	57,30108656
1 DE AGOSTO	11:30 a. m.	40,3547797	40,26867443	40,18345564	40,26867443	40,3547797	40,26867443	40,26867443	40,26867443
5 DE AGOSTO	4:29 p. m.	97,57167012	92,36094373	85,31075936	78,59908406	74,89583551	73,58427506	83,14865853	69,49515601
5 DE AGOSTO	5:00 p. m.	40,26867443	40,26867443	40,18345564	40,5296867	40,61850715	40,5296867	40,09911421	40,18345564

6 DE AGOSTO	5:20 p. m.	52,56916703	52,99951576	50,16600962	48,89596764	49,61042196	49,61042196	50,54610068	52,56916703
6 DE AGOSTO	6:00 p. m.	40,5296867	40,5296867	40,61850715	40,98312511	40,3547797	40,44178069	40,5296867	39,53254316
8 DE AGOSTO	11:17 a. m.	41,46064377	41,86085356	41,17117281	41,26666632	41,26666632	41,36315319	40,61850715	41,07666245
8 DE AGOSTO	11:30 a. m.	39,9330274	40,44178069	39,85126423	40,01564111	40,09911421	40,18345564	39,15225447	39,9330274
9 DE AGOSTO	4:29 p. m.	38,65184963	40,09911421	40,26867443	40,44178069	40,26867443	40,44178069	39,85126423	40,5296867
12 DE AGOSTO	5:00 p. m.	47,87823793	49,61042196	48,04350158	48,72192751	49,42902625	49,79370464	47,55279746	48,89596764
12 DE AGOSTO	5:20 p. m.	40,26867443	40,3547797	40,61850715	40,70825156	40,44178069	40,61850715	40,26867443	40,79892953
13 DE AGOSTO	6:00 p. m.	47,23402356	46,46536578	46,92177968	46,76806459	46,61593205	46,46536578	46,31634964	46,92177968
13 DE AGOSTO	11:17 a. m.	40,61850715	40,70825156	40,44178069	40,61850715	40,79892953	40,5296867	40,70825156	40,79892953
16 DE AGOSTO	10:29 a.m	84,76181479	81,07423075	75,34214936	71,89768245	64,77429598	67,97437693	74,89583551	65,45989284
16 DE AGOSTO	10:59 a.m	41,36315319	40,89055078	40,79892953	41,46064377	41,07666245	40,98312511	40,98312511	41,17117281
22 DE AGOSTO	9:37 A.M	232,5168633	216,5839883	164,5454999	165,9243932	132,2320996	127,1771715	161,8301559	114,3388727
22 DE AGOSTO	10:16 A.M	41,55914849	41,26666632	42,06725736	41,46064377	41,6586779	40,79892953	41,26666632	41,26666632
24 DE AGOSTO	3:55 P.M	102,4987012	88,14233538	83,14865853	79,57380126	71,89768245	70,67777336	84,21852182	69,49515601
24 DE AGOSTO	4:23 P.M	41,6586779	41,07666245	41,26666632	40,89055078	41,07666245	41,36315319	41,17117281	41,26666632
26 DE AGOSTO	11:11 A.M	73,58427506	65,80804942	62,48343236	60,35265344	56,27477626	56,78262108	60,64768204	55,29008277
26 DE AGOSTO	11:32 A.M	40,89055078	41,07666245	40,70825156	41,26666632	40,61850715	40,61850715	40,79892953	41,17117281
29 DE AGOSTO	9:02 a.m	101,7728001	93,62346525	82,62197363	85,31075936	72,31280806	71,89768245	84,21852182	68,3486904
29 DE AGOSTO	9:48 a.m	41,26666632	41,26666632	41,55914849	40,98312511	40,79892953	40,79892953	41,07666245	40,79892953
30 DE AGOSTO	8:48	60,06066228	57,8303948	78,59908406	54,81281227	51,53146942	50,54610068	52,99951576	49,79370464
30 DE AGOSTO	9:45 A.M	41,07666245	40,79892953	36,72493383	41,07666245	40,89055078	40,44178069	41,07666245	40,61850715
31 DE AGOSTO	9:46 A.M	79,57380126	65,80804942	55,53244805	62,169504	56,52738479	55,29008277	60,35265344	55,53244805
1 DE SEP	9:15 A.M	43,75929339	44,64341876	41,75924267	45,45392342	44,25665269	44,38424286	44,77503226	42,27797772
2 DE SEP	8:35 A.M	58,64518467	57,56437127	51,33029578	57,8303948	53,43886446	52,56916703	55,29008277	49,61042196
3 DE SEP	8:58 A.M	40,5296867	41,46064377	40,61850715	40,98312511	40,44178069	41,07666245	40,79892953	40,44178069

3 DE SEP	10:29 A.M	54,11517524	52,14763389	49,24949808	50,35507179	46,61593205	47,23402356	49,42902625	52,56916703
3 DE SEP	11:00 A.M	40,79892953	40,61850715	40,5296867	40,79892953	40,98312511	40,61850715	40,44178069	40,70825156
3 DE SEP	9:41 A.M	67,97437693	60,06066228	54,11517524	55,29008277	51,73473577	51,1311933	53,43886446	50,93414065
9 DE SEP	9:51 A.M	40,79892953	40,44178069	40,61850715	40,79892953	40,98312511	40,61850715	40,5296867	40,44178069
9 DE SEP	11:07 A.M	104,7220266	92,98893814	70,67777336	77,17431799	71,89768245	69,49515601	77,17431799	67,60391716
9 DE SEP	11.30 A.M	41,07666245	40,79892953	40,79892953	40,89055078	40,3547797	40,61850715	40,89055078	40,5296867
11 DE SEP	9:33 A.M	83,14865853	60,06066228	59,20260229	57,8303948	52,14763389	51,73473577	43,16585877	58,64518467
11 DE SEP	10:00 A.M	40,5296867	40,89055078	40,5296867	40,79892953	40,44178069	40,5296867	39,9330274	40,79892953
12 DE SEP	5:11 P.M	58,92245135	51,33029578	49,97889391	48,89596764	49,24949808	49,79370464	48,72192751	49,79370464
12 DE SEP	5:20 P.M	40,5296867	40,5296867	40,89055078	40,89055078	40,26867443	40,5296867	40,70825156	40,5296867
13 DE SEP	1:36 P.M	52,35730988	48,5496792	48,5496792	47,39258579	46,92177968	46,76806459	47,07709379	46,61593205
13 DE SEP	2:03 p.m	40,89055078	41,07666245	40,98312511	40,79892953	41,17117281	40,70825156	40,5296867	41,36315319
16 DE SEP	4:12 P.M	137,555474	109,3812141	95,5669259	88,14233538	73,15605921	69,49515601	66,1598277	68,72689767
16 DE SEP	5:00 P.M	40,61850715	40,79892953	40,44178069	40,61850715	40,79892953	40,44178069	40,61850715	40,70825156
18 DE SEP	8:50 A.M	69,49515601	57,8303948	55,29008277	52,78322801	51,9401166	51,33029578	49,61042196	50,93414065
18 DE SEP	10:00 A.M	40,5296867	40,70825156	40,3547797	40,61850715	40,5296867	40,61850715	40,79892953	41,36315319
20 DE SEP	1:28 P.M	99,63963038	86,99209362	78,59908406	67,97437693	63,77214364	61,55131005	57,8303948	60,06066228
20 DE SEP	3:00 P.M	40,3547797	40,5296867	40,70825156	40,61850715	40,3547797	40,44178069	40,70825156	40,5296867
23 DE SEP	12:47 A.M	203,6847195	190,0427192	163,1808028	151,5137342	112,6520006	106,2430578	70,27948108	80,5689029

CANTIDAD DE AGUA A APLICAR CON RESPECTO A LA DIFERENCIA DE PESO										CANTIDAD DE AGUA REGADA
FECHA	HORA	RECIPIENTE 1	RECIPIENTE 2	RECIPIENTE 3	RECIPIENTE 4	RECIPIENTE 5	RECIPIENTE 6	RECIPIENTE 7	Testigo	
23 DE JULIO	5:00 p. m.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25 DE JULIO	8:20 a. m.	112	129	108	89	100	90	82	89	799
25 DE JULIO	1:15	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26 DE JULIO	11:00 a. m.	73	98	71	49	55	42	40	47	346
26 DE JULIO	11:43 a. m.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26 DE JULIO	5:20 p. m.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27 DE JULIO	2:35 p. m.	140	154	129	101	100	87	89	93	893
27 DE JULIO	2:51 p. m.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27 DE JULIO	5:28 p. m.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29 DE JULIO	3:30 p. m.	143	134	126	122	118	111	121	115	0
29 DE JULIO	5:46PM	148	140	132	126	121	114	127	120	1028
29 DE JULIO	6:00 p. m.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30 DE JULIO	2:40 p. m.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30 DE JULIO	6:00 p. m.	64	61	58	54	54	52	29	52	395
30 DE JULIO	6:20 p. m.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31 DE JULIO	11:08 a. m.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1 DE AGOSTO	11:17 a. m.	132	121	121	117	106	105	138	108	948
1 DE AGOSTO	11:30 a. m.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5 DE AGOSTO	4:29 p. m.	200	192	180	167	159	156	176	146	1376
5 DE AGOSTO	5:00 p. m.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6 DE AGOSTO	5:20 p. m.	88	90	76	69	73	73	78	88	635

6 DE AGOSTO	6:00 p. m.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8 DE AGOSTO	11:17 a. m.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8 DE AGOSTO	11:30 a. m.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9 DE AGOSTO	4:29 p. m.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12 DE AGOSTO	5:00 p. m.	63	73	64	68	72	74	61	69	544
12 DE AGOSTO	5:20 p. m.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13 DE AGOSTO	6:00 p. m.	59	54	57	56	55	54	53	57	445
13 DE AGOSTO	11:17 a. m.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16 DE AGOSTO	10:29 a.m	179	172	160	152	133	142	159	135	1232
16 DE AGOSTO	10:59 a.m	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22 DE AGOSTO	9:37 A.M	308	300	268	269	241	236	266	222	2110
22 DE AGOSTO	10:16 A.M	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24 DE AGOSTO	3:55 P.M	207	185	176	169	152	149	178	146	1362
24 DE AGOSTO	4:23 P.M	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26 DE AGOSTO	11:11 A.M	156	136	126	119	104	106	120	100	967
26 DE AGOSTO	11:32 A.M	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29 DE AGOSTO	9:02 a.m	206	194	175	180	153	152	178	143	1381
29 DE AGOSTO	9:48 a.m	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30 DE AGOSTO	8:48	118	110	167	98	83	78	90	74	818
30 DE AGOSTO	9:45 A.M	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31 DE AGOSTO	9:46 A.M	169	136	101	125	105	100	119	101	956
1 DE SEP	9:15 A.M	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2 DE SEP	8:35 A.M	113	109	82	110	92	88	100	73	767
3 DE SEP	8:58 A.M	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3 DE SEP	10:29 A.M	95	86	71	77	55	59	72	88	603

3 DE SEP	11:00 A.M	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3 DE SEP	9:41 A.M	142	118	95	100	84	81	92	80	792
9 DE SEP	9:51 A.M	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9 DE SEP	11:07 A.M	210	193	149	164	152	146	164	141	1319
9 DE SEP	11.30 A.M	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11 DE SEP	9:33 A.M	176	118	115	110	86	84	29	113	802
11 DE SEP	10:00 A.M	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12 DE SEP	5:11 P.M	114	82	75	69	71	74	68	74	627
12 DE SEP	5:20 P.M	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13 DE SEP	1:36 P.M	87	67	67	60	57	56	58	55	507
13 DE SEP	2:03 p.m	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16 DE SEP	4:12 P.M	246	216	197	185	155	146	137	144	1426
16 DE SEP	5:00 P.M	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18 DE SEP	8:50 A.M	146	110	100	89	85	82	73	80	765
18 DE SEP	10:00 A.M	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20 DE SEP	1:28 P.M	203	183	167	142	130	123	110	118	1176
20 DE SEP	3:00 P.M	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23 DE SEP	12:47 A.M	293	285	267	258	220	212	148	171	1854
									TOTAL	26873

ANEXO VII

Presupuesto por Unidad

UNIDAD DE SENSADO			
Elemento	Cantidad	Precio Unitario	Total
Sensores de humedad	8	5000	40000
Conectores sensores	16	1500	24000
Tarjeta de Acople	1	15000	15000
TOTAL			79000

UNIDAD DE PROCESAMIENTO, CONTROL Y GUARDADO DE DATOS			
Elemento	Cantidad	Precio Unitario	Total
Tarjeta Unidad	1	50000	50000
Memoria Micro SD	1	8000	8000
Socket Memoria	1	15000	15000
TOTAL			73000

UNIDAD DE INTERFAZ DE USUARIO			
Elemento	Cantidad	Valor Unitario	Total
Pantalla LCD 20x4	1	35000	35000
Pulsadores	6	1000	6000
TOTAL			41000

UNIDAD DE ACTUADORES			
Elemento	Cantidad	Valor Unitario	Total
Tarjeta de activación Electroválvula	1	15000	15000
Tarje de activación Electrobomba	1	15000	15000
Electroválvulas solenoide de 24 VAC	3	150000	450000
Electrobomba 110 VAC pedrollo	1	350000	350000
TOTAL			830000

UNIDAD DE ALIMENTACION ELECTRICA			
Elemento	Cantidad	Valor Unitario	Total
Fuente Dual	1	25000	25000
Fuente 24 VAC	1	20000	20000
TOTAL			45000

ELEMENTOS IMPLEMENTACION RIEGO			
Elemento	Cantidad	Valor Unitario	Total
Ventosas ½ pvc	3	15000	45000
Manguera 16 mm	1 rollo	25000	25000
Goteros de precisión	16	1000	16000
Cable 110 VAC	5	6000	30000
Recipiente Fertilizante	1	15000	15000
Maceteros 3 Kg	24	3000	72000
Medidor de agua	1	67000	67000
Filtro de agua	1	25000	25000
Tubo de pvc 6m	1	7000	7000
VARIOS	1	NO APLICA	100000
TOTAL			402000

MONTAJE EQUIPO			
Elemento	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
Caja Dispositivo	1	120000	120000
Conectores Varios	varios	150000	150000
TOTAL			270000