

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**“RIEGO POR GOTEO SUBTERRÁNEO INTERMITENTE
CONTROLADO VÍA INTERNET, PARA EL CÉSPED – UNALM”**

TESIS PARA OPTAR POR EL TITULO DE:
INGENIERO AGRÍCOLA

ANTHONY ALFREDO ARANGO MITMA

LIMA – PERÚ

2019

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE INGENIERA AGRÍCOLA

**“RIEGO POR GOTEO SUBTERRÁNEO INTERMITENTE CONTROLADO
VÍA INTERNET, PARA EL CÉSPED – UNALM”**

TESIS PARA OPTAR EL TITULO DE:
INGENIERO AGRÍCOLA

Presentado por:

BACH. ANTHONY ALFREDO ARANGO MITMA

Sustentado y aprobado por el siguiente jurado:

Dr. EDUARDO ABRAHAM CHAVARRI VELARDE

Presidente

Mg. Sc. DAVID RICARDO ASCENCIOS TEMPLO

Asesor

Dra. LÍA RAMOS FERNÁNDEZ

Miembro

Dr. NÉSTOR MONTALVO ARQUÍÑIGO

Miembro

LIMA – PERÚ

2019

DEDICATORIA

A mis padres Alfredo Arango Gómez y Mercedes Mitma Castro por su gran apoyo Incondicional y velar varios años de mí vida para elegir un buen camino, sin duda es maravilloso haber tenido la dicha de que ustedes me dieran la vida, y espero que Dios siga teniendo un largo camino para nosotros juntos.

A mis hermanas Julissa y Melissa por el apoyo brindado y la alegría que traen en mi vida, mejores compañeras no pude haber tenido y nunca olviden que son parte importante de mi vida, son lo mejor que me ha pasado.

A Marshall Kelly Mory Poma por siempre estar presente apoyándome como la fan #1 de mi vida y yo de la suya, llenaste y seguirás llenando mi vida de experiencias que nunca olvidare, gracias por compartir tu vida a lado de la mía y ser mi cómplice, mi fortaleza en los tiempos difíciles.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por la vida y colocar a las maravillosas personas que puso en mi camino

A mi familia por guiarme y darme las herramientas a lo largo de mi vida

A mi patrocinador Mg. Ing. David Ascencios, por compartir su tiempo, conocimientos y consejos que me permitieron crecer y culminar esta etapa de mi vida

A mis Co-asesor Jeisson Lluen por brindarme los conocimientos para iniciar el camino en esta investigación

A la Ing. Karem Meza, por su gran apoyo, tiempo y conocimiento para encaminar hasta culminar esta investigación

A mis compañeros de la carrera Salvatore, Migaly, Martha, Mitzi y Jesús que dedicaron parte de sus días en brindar estupendas ideas y apoyar en las múltiples labores que demandaba esta investigación

A mis compañeros de la promoción 2013-II, en especial a Luis Quispe, Martin Castro y Edwar Riveros por compartir vario años en la carrera universitaria en las amanecidas de chacota y estudio.

A los técnicos de la Unidad de Riego Tecnificado, Cesar Julon, Máximo Mamani y Alex Rivera, por compartir sus conocimientos y de sus chistes

ÍNDICE GENERAL

GLOSARIO	1
RESUMEN	1
ABSTRACT	1
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. OBJETIVO PRINCIPAL	3
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1. ANTECEDENTES	4
2.2. CÉSPED AMERICANO (<i>Stenotaphrum secundatum</i>)	5
2.3. FRECUENCIA DE RIEGO	5
2.3.1. Riego intermitente.....	6
2.4. EVAPOTRANSPIRACIÓN	6
2.4.1. Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET _o)	7
2.4.2. Coeficiente de cultivo (K _c)	7
2.4.3. Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET _c).....	7
2.5. MEDICIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN	8
2.5.1. Estación meteorológica Rain Bird ClimateMinder	8
2.5.2. Ecuación de Penman – Monteith - FAO	8
2.6. HUMEDAD DE SUELO	9
2.6.1. Capacidad de campo.....	10
2.6.2. Punto de marchites	11
2.7. MÉTODO DE MEDICIÓN DE HUMEDAD DEL SUELO	11
2.7.1. Método gravimétrico	12
2.7.2. Reflectometría en el dominio de frecuencia (FDR)	12
2.7.3. Reflectometría en el dominio del tiempo (TDR)	13
2.8. ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA (NDVI)	15

2.8.1. Green Seeker	17
2.9. SISTEMA DE RIEGO POR GOTEO SUBTERRÁNEO	18
2.10. AUTOMATIZACIÓN Y DISEÑO DEL SISTEMA ARDUINO PARA LA IMPLEMENTACIÓN, CONTROL, MONITOREO Y ALMACENAMIENTO	19
2.10.1 Arduino.....	19
2.10.2. Entorno de desarrollo Integrado (IDE).....	20
2.10.3. Lenguaje de programación	20
2.10.4. Señales digitales	21
2.10.5. Señales analógicas.....	22
2.10.6. Señales PWM	22
2.10.7. Librería.....	22
2.10.8. Arduino Mega 2560	22
2.10.9. Sensores.....	23
2.10.10. Actuadores.....	29
2.11. INTERNET DE LAS COSAS	31
2.11.1. Blynk	32
2.11.2. Protocolo de comunicación	33
2.11.3. ESP 32 DEVKIT DEV KIT V1	34
2.11.4. Ethernet Shield 5100	36
III. MATERIALES Y METODOLOGÍA.....	38
3.1. UBICACIÓN DEL ÁREA EXPERIMENTAL	38
3.2. CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS.....	39
3.3. CARACTERÍSTICAS DEL AGUA.....	39
3.4. CARACTERÍSTICAS DEL SUELO	40
3.5. EQUIPOS, MATERIALES E INSUMOS	40
3.6. METODOLOGÍA	42
3.6.1. Variables de interés en un sistema de riego para el control, monitoreo y almacenamiento.....	42
3.6.2. Selección de los actuadores y sensores	43
3.6.3. Selección del medio de comunicación	44
3.6.4. Selección del microcontrolador y códigos de programación	44
3.6.5. Calibración de los sensores	45
3.6.6. Programación del microcontrolador y aplicativo Blynk	46

3.6.7. Implementación del sistema de riego automatizado vía internet	47
3.6.8. Diseño estadístico.....	51
C. Análisis estadístico	52
3.6.9. Variables cuantitativas y cualitativas	54
3.6.10. Poda del césped	57
3.6.11. Control de maleza.....	57
3.6.12. Riego	57
3.6.13. Toma de muestras y datos	58
IV. RESULTADO Y DISCUSIÓN	59
4.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL RIEGO POR GOTEO SUBTERRÁNEO	59
4.1.1. Fuente de almacenamiento	59
4.1.2. Cabezal de riego	60
4.1.3. Arco de riego	62
4.1.4. Unidad de riego	63
4.2. DISEÑO ELECTRONICO	64
4.2.1. Ethernet shield 5100.....	64
4.2.2. Sensor de ultrasonido	65
4.2.3. Sensor de presión	65
4.2.4. Sensor de caudal.....	66
4.2.5. Sensor de humedad del suelo	67
4.2.6. Módulo relé para solenoide.....	68
4.2.7. Módulo relé para bomba	69
4.2.8. Módulo relé para fuente 12V	70
4.3. CALIBRACIÓN DE SENSORES	73
4.3.1. Calibración de sensores de presión	73
4.3.2. Calibración de sensores de caudal.....	74
4.3.3. Calibración de sensores de humedad de suelo	75
4.3.4. Calibración de sensor de ultrasonido	76
4.3.5. Calibración de la estación meteorología Climate Minder	77
4.4. CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN PARA EL SISTEMA DE RIEGO	78
4.4.1. Declaración de variables	78
4.4.2. Programación del código (Void setup).....	79

4.5. APLICATIVO	82
4.5.1. Visualización inicial.....	82
4.5.2. Menú de encendido y apagado de bomba y fuente de 12v.....	83
4.5.3. Menú de nivel de agua en tanque	85
4.5.4. Menú de humedad de suelo.....	86
4.5.5. Menú de presiones.....	87
4.5.6. Menú de caudal	88
4.5.7. Menú de almacenamiento de información	89
4.5.8. Menú de programación de encendido y apagado	91
4.6. FRECUENCIA DE RIEGO	92
4.7. ANÁLISIS DE AGUA	93
4.8. ANÁLISIS DE SUELO	95
4.9. CLIMA	96
4.10. EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA (ETO)	96
4.11. LAMINA DE RIEGO	97
4.12. EVALUACIÓN CUANTITATIVA	98
4.12.1. Humedad de suelo	98
4.12.2. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).....	100
4.12.3. Coeficiente de Uniformidad (CU).....	108
4.12.4. Peso fresco de hojas	112
4.12.5. Peso seco de hojas	116
4.12.6. Crecimiento de hoja	121
4.12.7. Profundidad de raíces	124
4.13. EVALUACIÓN CUALITATIVA	126
4.13.1. Color.....	126
4.13.2. Cobertura.....	132
4.13.3. Uniformidad	137
5. CONCLUSIONES	142
5. RECOMENDACIONES	143
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	144
7. ANEXOS	154

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Características climáticas en la UNALM 2000- 2010.....	39
Cuadro 2: Análisis de parámetros del agua	40
Cuadro 3: Análisis de parámetros de suelo.	40
Cuadro 4: Materiales utilizados en el proyecto	40
Cuadro 5: Equipos utilizados en el proyecto	41
Cuadro 6: Insumos utilizados en el proyecto	41
Cuadro 7: Servicios para instalación	41
Cuadro 8: Clasificación del color	56
Cuadro 9: Clasificación de cobertura	56
Cuadro 10: Clasificación de cobertura	57
Cuadro 11: Resumen de conexiones de sensores y actuadores al Arduino	71
Cuadro 12: Ecuación de calibración del sensor de presión	74
Cuadro 13: Descripción del momento de riego aplicado	93
Cuadro 14: Análisis de parámetros del agua	95
Cuadro 15: Análisis de parámetros del suelo.	95
Cuadro 16: Datos climáticos durante la investigación	96
Cuadro 17: Promedio mensual de la evapotranspiración de referencia.....	97
Cuadro 18: Descripción del momento de riego aplicado	105
Cuadro 19: Análisis de varianza del NDVI en la primera toma de datos.....	106
Cuadro 20: Prueba de Tukey del NDVI en la primera toma de datos.	107
Cuadro 21: Tabla resume del análisis estadístico, variable NDVI.....	107
Cuadro 22: Resumen de los nueve valores de CU para cada tratamiento	109
Cuadro 23: Análisis de varianza de coeficiente de uniformidad en la fecha 07/03/19	110
Cuadro 24: Prueba de Tukey del coeficiente de uniformidad para la fecha 07/03/19..	110
Cuadro 25: Resumen del análisis estadísticos para las nueve muestras de peso fresco	111
Cuadro 26: Resumen de las nueve mediciones de peso fresco de hoja en gramos	114
Cuadro 27: Análisis de varianza del peso fresco de hoja en la primera poda	114
Cuadro 28: Prueba de Tukey del peso fresco de hoja de la primera poda.....	115

Cuadro 29: Resumen del análisis estadístico para las nueve muestras de peso fresco.	115
Cuadro 30: Resumen de las nueve mediciones de peso seco de hoja en gramos.	118
Cuadro 31: Análisis de varianza del peso fresco de hoja en la primera poda	118
Cuadro 32: Prueba de Tukey del peso fresco de hoja de la primera poda	119
Cuadro 33: Resumen del análisis estadístico para las nueve muestras de peso seco	120
Cuadro 34: Resumen de las ocho mediciones de altura de hoja en centímetros	122
Cuadro 35: Análisis de varianza del crecimiento de la hoja en el primer intervalo	122
Cuadro 36: Prueba de Tukey del crecimiento de la hoja en el primer intervalo	123
Cuadro 37: Resumen del análisis estadístico para las nueve muestras de crecimiento	123
Cuadro 38: Resumen de las ocho medidas visuales de color.	127
Cuadro 39: Resumen de las ocho medidas de cobertura verde del césped.	132
Cuadro 40: Resumen de las ocho medidas de cobertura verde del césped.	137
Cuadro 41: Cuadro resumen de variables cualitativas y cuantitativas del tratamiento 1	138
Cuadro 42: Cuadro resumen de variables cualitativas y cuantitativas del tratamiento 2	139
Cuadro 43: Cuadro resumen de variables cualitativas y cuantitativas del tratamiento 3	140
Cuadro 44: Cuadro resumen de variables cualitativas y cuantitativas del tratamiento 4	141
Cuadro 45: Resumen de los valores de NDVI de la investigación.	154
Cuadro 46: Análisis de varianza del NDVI en el segundo muestreo	154
Cuadro 47: Prueba de Tukey del NDVI en el segundo muestreo.	155
Cuadro 48: Análisis de varianza del NDVI en el tercer muestreo.	155
Cuadro 49: Prueba de Tukey del NDVI en el tercer muestreo	155
Cuadro 50: Análisis de varianza del NDVI en el cuarto muestreo.	155
Cuadro 51: Prueba de Tukey del NDVI en el cuarto muestreo	156
Cuadro 52: Análisis de varianza del NDVI en el quinto muestreo	156
Cuadro 53: Prueba de Tukey del NDVI en el quinto muestreo.	156
Cuadro 54: Análisis de varianza del NDVI en el sexto muestreo	156
Cuadro 55: Prueba de Tukey del NDVI en el sexto muestreo.	157
Cuadro 56: Análisis de varianza del NDVI en el sexto muestreo	157
Cuadro 57: Prueba de Tukey del NDVI en el sexto muestreo.	157

Cuadro 58: Análisis de varianza del NDVI en el sexto muestreo	157
Cuadro 59: Prueba de Tukey del NDVI en el sexto muestreo.....	158
Cuadro 60: Análisis de varianza del NDVI en el sexto muestreo	158
Cuadro 61: Prueba de Tukey del NDVI en el sexto muestreo.....	158
Cuadro 62: Análisis de varianza del coeficiente de uniformidad en la fecha 21/03/19.	158
Cuadro 63: Prueba de Tukey del coeficiente de uniformidad para la fecha 21/03/19..	159
Cuadro 64: Análisis de varianza del coeficiente de uniformidad en la fecha 04/04/19	159
Cuadro 65: Prueba de Tukey del coeficiente de uniformidad para la fecha 04/04/19..	159
Cuadro 66: Análisis de varianza del coeficiente de uniformidad en la fecha 18/04/19	159
Cuadro 67: Prueba de Tukey del coeficiente de uniformidad para la fecha 18/04/19..	160
Cuadro 68: Análisis de varianza del coeficiente de uniformidad en la fecha 02/05/19	160
Cuadro 69: Prueba de Tukey del coeficiente de uniformidad para la fecha 02/05/19..	160
Cuadro 70: Análisis de varianza del coeficiente de uniformidad en la fecha 17/05/19	160
Cuadro 71: Prueba de Tukey del coeficiente de uniformidad para la fecha 17/05/19..	161
Cuadro 72: Análisis de varianza del coeficiente de uniformidad en la fecha 31/05/19	161
Cuadro 73: Prueba de Tukey del coeficiente de uniformidad para la fecha 31/05/19..	161
Cuadro 74: Análisis de varianza del coeficiente de uniformidad en la fecha 14/06/19.	161
Cuadro 75: Prueba de Tukey del coeficiente de uniformidad para la fecha 14/06/19..	162
Cuadro 76: Análisis de varianza del coeficiente de uniformidad en la fecha 28/06/19.	162
Cuadro 77: Prueba de Tukey del coeficiente de uniformidad para la fecha 28/06/19..	162
Cuadro 78: Análisis de varianza del peso fresco en la segunda poda	163
Cuadro 79: Prueba de Tukey del peso fresco en la segunda poda.....	163
Cuadro 80: Análisis de varianza del peso fresco en la tercera poda.....	163
Cuadro 81: Prueba de Tukey del peso fresco en la tercera poda.....	163
Cuadro 82: Análisis de varianza del peso fresco en la cuarta poda.....	164
Cuadro 83: Prueba de Tukey del peso fresco en la cuarta poda	164
Cuadro 84: Análisis de varianza del peso fresco en la quinta poda	164
Cuadro 85: Prueba de Tukey del peso fresco en la quinta poda.....	164
Cuadro 86: Análisis de varianza del peso fresco en la sexta poda	165
Cuadro 87: Prueba de Tukey del peso fresco en la sexta poda.....	165

Cuadro 88: Análisis de varianza del peso fresco en la séptima poda	165
Cuadro 89: Prueba de Tukey del peso fresco en la séptima poda	165
Cuadro 90: Análisis de varianza del peso fresco en la novena poda	166
Cuadro 91: Prueba de Tukey del peso fresco en la novena poda	166
Cuadro 92: Análisis de varianza del peso seco en la segunda poda	166
Cuadro 93: Prueba de Tukey del peso seco en la segunda poda	166
Cuadro 94: Análisis de varianza del peso seco en la tercera poda	167
Cuadro 95: Prueba de Tukey del peso seco en la tercera poda.....	167
Cuadro 96: Análisis de varianza del peso seco en la cuarta poda	167
Cuadro 97: Prueba de Tukey del peso seco en la cuarta poda.....	167
Cuadro 98: Análisis de varianza del peso seco en la quinta poda	168
Cuadro 99: Prueba de Tukey del peso seco en la quinta poda	168
Cuadro 100: Análisis de varianza del peso seco en la sexta poda.....	168
Cuadro 101: Prueba de Tukey del peso seco en la sexta poda	168
Cuadro 102: Análisis de varianza del peso seco en la séptima poda.....	169
Cuadro 103: Prueba de Tukey del peso seco en la séptima poda.....	169
Cuadro 104: Análisis de varianza del peso seco en la novena poda.....	169
Cuadro 105: Prueba de Tukey del peso seco en la novena poda.....	169
Cuadro 106: Análisis de varianza del crecimiento de la hoja en el segundo intervalo	170
Cuadro 107: Prueba de Tukey del crecimiento de la hoja en el primer intervalo	170
Cuadro 108: Análisis de varianza del crecimiento de la hoja en el tercer intervalo.....	170
Cuadro 109: Prueba de Tukey del crecimiento de la hoja en el primer intervalo	171
Cuadro 110: Análisis de varianza del crecimiento de la hoja en el cuarto intervalo....	171
Cuadro 111: Prueba de Tukey del crecimiento de la hoja en el primer intervalo	171
Cuadro 112: Análisis de varianza del crecimiento de la hoja en el quinto intervalo ...	171
Cuadro 113: Prueba de Tukey del crecimiento de la hoja en el primer intervalo	172
Cuadro 114: Análisis de varianza del crecimiento de la hoja en el sexto intervalo	172
Cuadro 115: Prueba de Tukey del crecimiento de la hoja en el primer intervalo	172
Cuadro 116: Análisis de varianza del crecimiento de la hoja en el séptimo intervalo.	172
Cuadro 117: Prueba de Tukey del crecimiento de la hoja en el primer intervalo.	173
Cuadro 118: Análisis de varianza del crecimiento de la hoja en el octava intervalo. ...	173
Cuadro 119: Prueba de Tukey del crecimiento de la hoja en el primer intervalo.	173
Cuadro 120: Presupuesto para la automatización.....	198

Cuadro 121: Valores de evapotranspiración de tanque evaporímetro y estación Climate Minder.	199
--	-----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Curvas de disponibilidad hídrica según tipo de suelo.....	10
Figura 2: Configuración del TDR 350.....	14
Figura 3: TDR 350 FieldScout	15
Figura 4: Espectro de reflectancia de una planta sana y una planta enferma.	17
Figura 5: GreenSeeker de Trimble	18
Figura 6: Plataforma del IDE de Arduino	21
Figura 7: Partes de la placa Arduino Mega 2560	23
Figura 8: Sensor HC-SR04 o ultrasonido.....	25
Figura 9: Sensor de humedad GS1 Decagon Device.....	26
Figura 10: Sensor de presión Analógico HK3022.....	27
Figura 11: Sensor de flujo FS400 efecto hall.	28
Figura 12: Modulo Relay 2 canales.....	29
Figura 13: Válvula solenoide de 12 voltios 1 amperio.....	31
Figura 14: Comunicación de la plataforma Blynk con el hardware.	33
Figura 15: Protocolo o canal de comunicación entre maquinas.	34
Figura 16: ESP 32 DEVKIT DEVKIT V1	35
Figura 17: Ethernet Shield W5100	37
Figura 18: Ubicación geográfica del área experimental.....	38
Figura 19: Código de programación Blynk.	47
Figura 20: Interfaz de nivel de agua en el aplicativo medido con el sensor.....	47
Figura 21: Plano general de automatización.....	50
Figura 22: Ubicación geográfica del área experimental.....	53
Figura 23: Muestra de raíces de 20 centímetros de altura.	55
Figura 24: Interfaz de aplicativo y sensor de ultrasonido en campo	60
Figura 25: Controlador de riego, fuente de alimentación y router	61
Figura 26: Sensores de presión antes y después de los filtros.....	61
Figura 27: Sensor de caudal FS400 al final del cabezal	62
Figura 28: Arco de riego de apertura manual y automática	62
Figura 29: ESP 32 DEVKIT DEVKIT V1 como Datalogger que envía información al aplicativo	63
Figura 30: Datalogger EM-50 Solar	63
Figura 31: Instalación del Ethernet Shield a la placa Arduino Mega 2560.....	64

Figura 32: Conexión eléctrica del sensor de ultrasonido.....	65
Figura 33: Conexión eléctrica del sensor de presión.....	66
Figura 34: Conexión eléctrica del sensor de caudal.....	67
Figura 35: Conexión eléctrica del sensor de humedad de suelo al microcontrolador ESP 32 DEVKIT.....	68
Figura 36: Conexión eléctrica del módulo relé y las electroválvulas.....	69
Figura 37: Conexión eléctrica del módulo relé a la bomba.....	70
Figura 38: Conexión eléctrica del módulo relé a la fuente switching de 12V.....	71
Figura 39: Curvas de calibración de los sensores de presión instalados.....	73
Figura 40: Curvas de calibración de los sensores de caudal instalados.....	75
Figura 41: Curva de calibración para el sensor de humedad GS1.....	76
Figura 42: Curva de calibración de los sensores conectados al datalogger.....	76
Figura 43: Curva de calibración del sensor HCSR04.....	77
Figura 44: IDE de Arduino, declaración de variables.....	78
Figura 45: IDE de Arduino, void setup.....	79
Figura 46: IDE de Arduino, void loop.....	80
Figura 47: Diagrama de flujo del proceso de automatización.....	82
Figura 48: Entorno inicial del aplicativo.....	83
Figura 49: Menú para el control de la bomba y fuente de 12v.....	84
Figura 50: Menú para el control de las electroválvulas.....	85
Figura 51: Menú para el monitoreo del nivel del agua.....	86
Figura 52: Menú para el monitoreo del sensor de humedad de suelo.....	87
Figura 53: Menú para el monitoreo de presiones.....	88
Figura 54: Menú para el control de las electroválvulas.....	89
Figura 55: Menú de almacenamiento de información de presiones y caudales.....	90
Figura 56: Menú de almacenamiento de información de humedad volumétrica de suelo.....	91
Figura 57: Menú de programación de riego.....	92
Figura 58: Riego del tratamiento T2 (T2-R1, T2-R2 y T2-R3).....	93
Figura 59: Restricciones en el uso del agua para riego.....	94
Figura 60: Evapotranspiración mensual (marzo, abril, mayo y junio).....	97
Figura 61: Contenido de humedad del suelo para el tratamiento T4.....	99
Figura 62: Contenido de humedad de suelo para el tratamiento T2.....	100

Figura 63: Cobertura con valor de NDVI 0.18	102
Figura 64: Cobertura con valor de NDVI 0.41	102
Figura 65: Cobertura con valor de NDVI 0.50	103
Figura 66: Cobertura con valor de NDVI 0.63.....	103
Figura 67: Cobertura con valor de NDVI 0.74.....	104
Figura 68: Cobertura con valor de NDVI 0.80.....	104
Figura 69: Dato quincenal del valor del NDVI en césped.....	106
Figura 70: Calculo de humedad de suelo con TDR 350.....	109
Figura 71: Unidades experimentales después de la poda.	112
Figura 72: Peso fresco de hoja.....	113
Figura 73: Muestras de césped antes de introducirlas al horno durante 24 horas.	116
Figura 74: Peso fresco de hoja.....	117
Figura 75: Crecimiento de hoja.	121
Figura 76: Profundidad de Raíces T1-R1.	124
Figura 77: Profundidad de Raíces T2-R3.....	125
Figura 78: Profundidad de Raíces T3-R2.....	125
Figura 79: Profundidad de Raíces T4-R2.....	126
Figura 80: Color - Tratamiento T1 – Riego 2 veces al día. Mayo.....	128
Figura 81: Color - Tratamiento T2 – Riego 3 veces al día.....	129
Figura 82: Color - Tratamiento T3 – Riego 1 vez al día.	130
Figura 83: Color - Tratamiento T4 – Riego cada 3 días.....	131
Figura 84: Cobertura verde - Tratamiento T1 – Riego 2 veces al día. 13 junio	133
Figura 85: Cobertura verde - Tratamiento T2 – Riego 3 veces al día.	134
Figura 86: Cobertura verde - Tratamiento T3 – Riego 1 vez al día.....	135
Figura 87: Cobertura verde - Tratamiento T4 – Riego cada 3 días.	136
Figura 88: Curva de humedad del tratamiento T3.....	174
Figura 89: Curva de humedad del tratamiento T1.....	174
Figura 90: Icono de aplicativo Blynk	185
Figura 91: Ingreso del aplicativo Blynk	185
Figura 92: Interfaz del aplicativo Blynk.....	186
Figura 93: Icono - desconexión del sistema	186
Figura 94: Icono - acceso al sistema.....	187
Figura 95: Interfaz de control de bomba	187

Figura 96: Interfaz electroválvulas	188
Figura 97: Interfaz de encendido y apagado de válvula	188
Figura 98: Interfaz de humedad de suelo.....	188
Figura 99: Interfaz de monitoreo de presión	189
Figura 100: Interfaz de monitoreo de caudal.....	189
Figura 101: Interfaz del monitoreo de nivel de agua.....	189
Figura 102: Interfaz de programación de encendido automático	190
Figura 103: Acceso para modificación de programación.....	190
Figura 104: Programación horaria de encendido automático.....	190
Figura 105: Sensores de presión sin mantenimiento	191
Figura 106: Lectura de diferencia de presión en aplicativo.....	192
Figura 107: Filtro de anillas antes y después de limpieza	193
Figura 108: Tubo de 160 mm y ubicación de sensor ultrasonido.....	193
Figura 109: Interfaz de ingreso de datos de la estación automática Climate Minder..	194
Figura 110: Interfaz de Software de estación automática Climate Minder	194
Figura 111: Lectura de evapotranspiración de la estación Climate Minder	195
Figura 112: Comportamiento de la presión y caudal.....	196
Figura 113: comportamiento del sensor de humedad de suelo.....	196
Figura 114: Línea de purga - Purga final.....	197
Figura 115: Línea de purga - Purga inicial	197
Figura 116: Evapotranspiración de tanque evaporímetro y estación automática Climate Minder	199
Figura 117: Elaboración de controlar de riego	200
Figura 118: Prueba de electroválvulas.....	200
Figura 119: Arco de riego automatizado	200
Figura 120: Integración de placas en el controlador.....	200
Figura 121: Arco de riego manual	200
Figura 122: Arco de riego manual y automatizado	200
Figura 123: Perfilado de las unidades de riego.....	200
Figura 124: Calibración de sensores de humedad de suelo	200
Figura 125: Reparación de manguera subterránea	200
Figura 126: Instalación de tubería de luz para cableado eléctrico.....	200
Figura 127: Riego uniforme de la unidad de riego al inicio de la investigación.....	200

Figura 128: Extracción de suelos para método gravimétrico	200
Figura 129: Conexión del módulo relé al tablero de arranque directo	200
Figura 130: Calibración de sensores de humedad con datalogger EM -50G	200
Figura 131: Pesaje de los pesos frescos de césped.	200
Figura 132: Calibración del sensor de presión	200
Figura 133: Zanjeado para colocar tubería de luz	200
Figura 134: Tapado de zanja de tubería de luz	200
Figura 135: Instalación de tubería de luz y cajas de pase.....	200
Figura 136: Implementación de arco de riego automatizado	200
Figura 137: Pase de cable y distribución	200
Figura 138: Calibración del sensor de caudal.....	200
Figura 139: instalación del sensor de presión.....	200
Figura 140: Instalación del sensor de caudal.....	200
Figura 141: Primera poda	200
Figura 142: Instalación de sensor de humedad.....	200
Figura 143: Eliminación de la maleza	200
Figura 144: instalación de sensor de humedad de suelo.....	200
Figura 145: Pesos de hoja de césped humedad.....	200
Figura 146: Análisis de calidad de agua.....	200
Figura 147: Datalogger EM-50.....	200

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: ANÁLISIS DE DATOS ESTADÍSTICOS	154
ANEXO 2: CONTENIDO DE HUMEDAD VOLUMÉTRICA.....	174
ANEXO 3: CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN PARA EL CONTROL MONITOREO Y ALMACENAMIENTO DE UN SISTEMA DE RIEGO AUTOMATIZADO.....	175
ANEXO 4: MANUAL DE MANEJO OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL SISTEMA DE RIEGO AUTOMATIZADO.....	185
ANEXO 5: PRESUPUESTO DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.....	198
ANEXO 6: GRÁFICOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	199
ANEXO 7: PANEL FOTOGRÁFICO.....	200

GLOSARIO

Hardware: Conjunto de elementos físicos o materiales que constituyen una computadora o un sistema informático.

Software: Es la parte intangible de una computadora que permite al usuario el control del hardware que viene a ser el componente físico, brindando el soporte a otros programas informáticos

Arduino: Es una plataforma de desarrollo basada en una placa electrónica de hardware libre que posee un microcontrolador re-programable y una serie de entradas o pines que permiten la conexión a los diversos sensores compatibles con esta.

IDE: Sus siglas en inglés Integrated Development Environment, que traducido al español significa Entorno de Desarrollo Integrado, siendo este un entorno de programación compatible con la plataforma Arduino, el cual consiste de los siguientes elementos: editor de código, un compilador, un depurador y un constructor de interfaz gráfica.

PWM: Sus siglas en inglés Pulse Width Modulation, que traducido al español significa modulación por ancho de pulso, este es un tipo de señal de voltaje utilizada para enviar información o variar la cantidad de energía que es enviada.

Bits: Unidad mínima de información escrita en 1 o 0, el conjunto de bits forma una unidad mayor de información que puede expresar una imagen, música, etc.

Hertz (Hz): Unidad de frecuencia, llamada también Hercio, relacionada con la propagación de las ondas electromagnéticas

Opensource: Traducido al español significa “código abierto”, es la expresión con la que se conoce cuando un software, hardware y desarrollo es libre, logrando tener acceso al código fuente y a su elaboración.

Optocoplador: Es un dispositivo de protección que emite y recibe señal como si fuera un interruptor que es activado con luz emitida por un diodo, logrando aislar el sistema eléctrico entre dos circuitos mientras este funciona como interruptor.

Piezoeléctrico: Fenómeno que ocurre en determinados cristales, al ser sometidos una tensión mecánica en su masa, esta adquiere polarización eléctrica apareciendo una diferencia de potencial.

Puerto Serie: Medio de comunicación de datos digitales, normalmente utilizado de ordenadores como las computadoras o laptops hacia los puertos periféricos de otros dispositivos, este es un medio por el cual se transmite la información enviando un solo bit a la vez.

Smartphone: Equipo móvil inteligente, también conocido como celular, cuenta con una mayor capacidad de procesamiento de información, almacenamiento de información y realizar múltiples actividades.

IoT: Es una abreviación a un concepto que se refiere a interconexión digital de objetos cotidianos vía internet.

Widget: Es una pequeña aplicación que brinda un acceso a funciones que son frecuentemente usadas, ya sea para visualizar información o control.

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo determinar la frecuencia de riego adecuada para el césped americano (*Stenotaphrum Secundatum*), para obtener condiciones estéticas aceptables utilizando un sistema de riego por goteo subterráneo automatizado vía internet a través de la plataforma libre Arduino y Blynk, desarrollando un aplicativo móvil “GrootSmart”, que permitió la conexión del usuario con el sistemas de riego por goteo subterráneo, con el cual se logró controlar el encendido y apagado de las electroválvulas y la bomba, además permitió monitorear y almacenar valores de presiones, caudal, nivel de agua y la humedad volumétrica del suelo. El estudio se realizó en los meses de marzo, abril, mayo y junio del 2019 en un área experimental de la Facultad de Ingeniería Agrícola de la Universidad Nacional Agraria La Molina. Se utilizó un diseño experimental completamente al azar, con 4 tratamientos y 3 repeticiones. Los tratamientos fueron: T1 - frecuencia de riego intermitente de 2 veces al día (7:00 am y 5:00 pm); T2 –frecuencia de riego intermitente 3 veces al día (7:00 am, 5:00pm y 11:00pm); T3 – frecuencia de riego 1 vez al día (7:00 am); T4 – frecuencia de riego cada 3 días (7:00 am). La evapotranspiración de referencia (ET_o) se obtuvo de la estación automática Climate Minder de Rain Bird. Se evaluaron parámetros cuantitativos: Peso fresco y seco de hojas después de cada corte quincenal, altura de hoja, humedad de suelo con sensores de humedad de suelo, coeficiente de uniformidad de riego utilizando el TDR 350 (Time Domain Reflectometry) y NDVI con el Green Seeker de Trimble. Como parámetros cualitativos del césped se analizó: color, cobertura y uniformidad. La frecuencia de riego intermitente T2 fue la mejor opción para los meses de marzo, abril, mayo y junio del 2019. La automatización y telecontrol del riego por goteo subterráneo tuvo impacto positivo al reducir el tiempo de control, disminuir la cantidad de la mano de obra y brindar una rápida detección de fallas; gestionando el recurso hídrico en forma eficiente.

Palabras claves: Césped americano, riego subterráneo, Arduino, IoT y Blynk

ABSTRACT

The purpose of this research was to determine the appropriate irrigation frequency for American turf (*Stenotaphrum Secundatum*), to obtain acceptable aesthetic conditions using an automated underground drip irrigation system via the Internet through the free Arduino and Blynk platform, developing an application mobile “GrootSmart”, which allowed the user to connect to the underground drip irrigation systems, with which it was possible to control the on and off of the solenoid valves and the pump, and also allowed to monitor and store values of pressure, flow, level of water and volumetric soil moisture. The study was carried out in the months of March, April, May and June of 2019 in an experimental area of the Faculty of Agricultural Engineering of the National Agrarian University La Molina. A completely randomized experimental design was used, with 4 treatments and 3 repetitions. The treatments were: T1 - intermittent irrigation frequency 2 times a day (7:00 am and 5:00 pm); T2 - intermittent irrigation frequency 3 times a day (7:00 am, 5:00 pm and 11:00 pm); T3 - irrigation frequency once a day (7:00 am); T4 - irrigation frequency every 3 days (7:00 am). The reference evapotranspiration (ET_o) was obtained from the Rain Bird Climate Minder automatic station. Quantitative parameters were evaluated: Fresh and dry leaf weight after each biweekly cut, leaf height, soil moisture with soil moisture sensors, irrigation uniformity coefficient using the TDR 350 (Time Domain Reflectometry) and NDVI with the Green Trimble Seeker. As qualitative parameters of the lawn was analyzed: color, coverage and uniformity. The frequency of intermittent irrigation T2 was the best option for the months of March, April, May and June of 2019. The automation and telecontrol of underground drip irrigation had a positive impact by reducing control time, reducing the amount of labor and provide rapid fault detection; managing the water resource efficiently.

Keywords: American lawn, underground irrigation, Arduino, IoT and Blynk

I. INTRODUCCIÓN

Las áreas verdes son indispensables para un desarrollo urbano sostenible, estas no solo definen el atractivo de la ciudad; sino también el mejoramiento de la calidad de vida de los habitantes (MINAM, 2016). Además, tienen beneficios importantes como la generación de oxígeno, reducción de los contaminantes del aire, regulación de las islas de calor urbanas, generación de zonas para la recreación y el realce de la imagen urbana (MML et al., 2014; Soberón, 2014).

Según Eisenberg, Nemcova, Poblet, & Stokman. (2014), las áreas verdes existentes en Lima metropolitana tienen un índice de 3.5 m² / habitante. Sin embargo, la OMS indica un valor mínimo de 9 m² / habitante para tener una ciudad sostenible. Según Ascencios, Montalvo, Meza, & Cifuentes. (2019), el césped americano (*Stenotaphrum Secundatum*) ocupan el 80% de las áreas verdes urbanas. Este tipo de coberturas demandan una fuerte cantidad de agua y debido a la escases del recurso hídrico, el césped deberá crecer bajo estrés y tener una calidad visual adecuada.

Actualmente, el riego por aspersión, riego por goteo superficial y subterráneo permiten tener una alta eficiencia de riego en comparación con el riego por gravedad o cisternas, práctica común en las municipalidades (DGIAR, 2015). Para tener una calidad visual aceptable del césped, se debe conocer la frecuencia de riego adecuada, esta puede ser intermitente, diaria e interdiaria. En el riego intermitente se fracciona la cantidad de agua para mantener la humedad cercana a capacidad de campo y la planta utilice el mínimo de energía para extraer el agua del suelo (Abdelraouf Ramadan, Bakry Ahmed, & Moamen Hamed, 2013). Sin embargo, el fraccionamiento de la lámina y su aplicación demanda mayor tiempo en la operación del sistema de riego y mano de obra, siendo necesario la automatización.

La automatización de los sistemas de riego es una práctica que se viene incrementando en la agricultura, para aumentar el control y la productividad del cultivo, reducir tiempos en la operación, costos en mano de obra, obtener la información en tiempo real y lograr su almacenamiento para el análisis en gabinete (Guijarro-Rodríguez et al., 2018;

Mahzabin, Taziz, Amina, Gloria, & Zishan, 2016). Los sistemas de riego presurizado utilizan la automatización y las nuevas tecnologías como el internet de la cosas, que permiten controlar, monitorear, programar y visualizar la información almacenada vía internet (Fernandez de Córdova Á & Humberto, 2018).

1.1. OBJETIVO PRINCIPAL

- Determinar la frecuencia de riego para el césped americano (*Stenotaphrum secundatum*) utilizando el sistema de riego por goteo subterráneo intermitente controlado vía internet en la UNALM.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar, programar, implementar, controlar, monitorear y almacenar datos del sistema de riego por goteo subterráneo mediante un aplicativo móvil con acceso a internet.
- Evaluar las diferentes frecuencias de riego intermitente, diario y multidiario.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES

El presente trabajo de investigación abarca el concepto de agricultura de precisión con la finalidad de usar la tecnología para la aplicación en el riego convencional. Según, Rodríguez García & Puig Estrada (2012), el sistema de riego superficial y subsuperficial, son métodos de riego de mejor aplicación de agua y diversos son los factores que influyen en su eficiencia, tales como: uniformidad de emisores, envejecimiento, factores químicos, físicos y biológicos que contribuyen al taponamiento de emisores. Se conoce que el sistema de riego por goteo superficial muestra problemas de taponamiento debido a que el agua usada es carbonatada que en contacto con el medio ambiente ocurre precipitaciones que obstruyen los goteros, ocasionando su taponamiento; sin embargo, el valor de CU es elevado. Mientras que el riego sub superficial muestra mejores resultados debido a que tiene un menor número de taponamiento, esto ocurre porque no está en contacto con el medio ambiente, además a mayor profundidad de enterrada menor es el caudal debido al peso de la masa de tierra. Cifuentes Meza (2016), indica que el uso de un sistema de riego por goteo subterráneo para el césped americano brinda excelentes resultados en el color, recuperación al pisoteo y uniformidad para un coeficiente de riego de 0.4 en el mes de abril, mayo, junio y julio.

La aplicación de riego de forma tradicional en los cultivos y áreas verdes traen consigo la necesidad de mayor mano de obra, no obstante existen nuevas tecnologías que apoyan a un mejor manejo y reducción de mano de obra en la aplicación de riego. La automatización de riego cada vez está tomando mayor importancia, con el uso y aplicación de nuevas tecnologías tanto como el uso diversas variedades de sensores, actuadores y microcontroladores que estas obedecen a múltiples plataformas ya establecidas. Según, Simon Mori (2018), existen nuevas tecnologías que permiten la automatización de un sistema de riego como es la plataforma de Arduino, que brinda un lenguaje de programación básico para comunicarnos con el sistema y lograr el control de los actuadores y sensores. Castro C., Chamorro F., & Viteri M. (2016) indica que el diseño de la automatización que se implementó en un cultivo de fresas obtiene datos de humedad

volumétrica captados por el sensor 10HS de Decagon Device, cuando la humedad está por debajo de lo programado el sistema es encendido automáticamente y se apaga cuando llega a una humedad deseada, logrando excelentes resultados en el cultivo de la fresa y verificando la importancia del uso de herramientas tecnológicas para las múltiples aplicaciones en el área agrícola. Según Marylin Mamani, Marco Villalobos (2017), la tecnología brinda facilidad en el monitoreo y control de un invernadero, la obtención de datos se hace con sensores y microcontroladores por medio de una aplicación web desde internet, se planteó esta solución debido que los sistemas de automatización son costosos y difíciles de adquirir, además se requiere automatizar porque existe mucho gasto en movilización de la mano de obra, también se requiere detectar problemas a tiempo, por esto se planteó este sistema de bajo costo, con la finalidad de controlar parámetros de temperatura y humedad relativa del ambiente, iluminación, temperatura y humedad de suelo, cantidad CO₂.

2.2. CÉSPED AMERICANO (*Stenotaphrum secundatum*)

Es una especie de césped que se encuentra establecida en grandes áreas de Lima, ya sea en zonas públicas o privadas (Padilla Soldevilla, 2016). Es oriunda de zonas tropicales y sub tropicales del viejo mundo, posiblemente originaria del Golfo de México, India y África (Monje Jiménez, 2006). El *stenotaphrum secundatum* es una de las especies de estaciones cálidas (Wherley, Dukes, Cathey, Miller, & Sinclair, 2015). Esta especie requiere de las siguientes condiciones para poder establecerse: requiere un suelo fértil y con buen drenaje, su instalación debe ser a inicios de verano y evitar que sea cuando las temperaturas sean frescas, no tolera los suelos compactos e inundados, el pH del suelo debe estar entre 6 y 7.5, si este presenta un pH cercano a 8 presenta áreas amarillentas, además, tiene una tolerancia a la salinidad cercana a 15 mmhos, soporta una sombra cercana del 50%, resistencia a las heladas, resistente a la sequía y apenas es atacada por plagas y enfermedades (Monje, 2016).

2.3. FRECUENCIA DE RIEGO

La frecuencia de riego está definida como el número de veces a regar en un intervalo de tiempo. Para saber el cálculo de la frecuencia de riego se requiere de los siguientes parámetros: evapotranspiración del cultivo y la capacidad de retención de humedad del

suelo. Este cuenta con un almacenamiento de agua disponible que está definida por su textura, la profundidad de raíces y la pedregosidad. Se conoce que el suelo que presenta mayor cantidad de retención de agua viene a ser el arcilloso; sin embargo, el que posee mayor percolación es el suelo arenoso (Martínez B. & Astorga P., 2003). La frecuencia de riego en estas estructuras y texturas del suelo influye en la aplicación del agua evitando el encharcamiento en suelos arcillosos y en suelo arenosos la percolación excesiva. Además, una de las consecuencias de aumentar la frecuencia de riego es que la capacidad de retención del agua por parte del suelo se hace menos importante, convirtiendo a las sales como único motivo para aplicar una lámina mayor de agua (Rawlins, 2010).

2.3.1. Riego intermitente

El riego intermitente o riego por pulsos se refiere al riego por periodos cortos y esperar otro periodo corto, repitiendo varios ciclos con el encendido y apagado de la válvula hasta aplicar la totalidad del agua que se destina el cultivo para determinadas fechas. Esta tecnología viene trayendo efectos positivos, logrando el aumento del rendimiento del cultivo, mejorando su calidad, ahorro del agua, reducción de la percolación y la lixiviación de los nutrientes aplicado a la zona radicular (Abdelraouf Ramadan et al., 2013; Cote, Bristow, Charlesworth, Cook, & Thorburn, 2003). La cantidad de ciclos a elegir dependerá de la mejor respuesta que proporcione el cultivo en base a su rendimiento y mejor humedad de suelo. Además, se debe considerar que la tasa de aplicación coincida con lo que absorbe la planta, logrando una mejora de la eficiencia del riego con las pulsaciones dadas (Phogat, Skewes, Mahadevan, & Cox, 2013).

2.4. EVAPOTRANSPIRACIÓN

La evaporación es la forma en la que el suelo pierde agua y se retira a la superficie en forma de vapor y la transpiración es la pérdida de agua del tejido de la planta y ambos procesos ocurren de forma simultánea. A medida que el cultivo está en crecimiento la incidencia de la radiación solar al suelo va disminuyendo debido al crecimiento del cultivo y finalmente cuando este cubre la superficie la transpiración se convierte en el principal proceso. Esto quiere decir cuando el cultivo está en etapa inicial la evapotranspiración ocurre en forma de evaporación, mientras que la cobertura del suelo

sea más del 90 por ciento de la evapotranspiración se comporta como transpiración de la planta (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006).

Para la agricultura es de importancia conocer los valores de la evapotranspiración para una buena planificación de las labores de riego y generar un ahorro del agua (Feldhake, Danielson, & Butler, 1983).

2.4.1. Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o)

La evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), se refiere al estudio de la demanda de evapotranspiración de la atmósfera, sin considerar el tipo de cultivo y su manejo, este valor cambia según la ubicación y en la época del año en la que se encuentre, es decir que el valor de ET_o variaría en las estaciones de: verano, otoño, invierno y primavera. Este valor viene a ser un dato climático y este puede ser calculado con valores meteorológicos a través del método FAO Penman-Monteith, este método ofrece valores más cercanos al ET_o en cualquier localidad y estación del año (Allen et al., 2006).

2.4.2. Coeficiente de cultivo (K_c)

El coeficiente de cultivo (K_c), es un valor que permite conocer la cantidad de agua que requiere la planta o la evapotranspiración real del cultivo a partir del valor de la evapotranspiración de referencia (ET_o), este valor de K_c está afectado por factores fisiológicos del cultivo y en una pequeña parte por factores climáticos, además debe calcularse para las condiciones locales donde se realizara el cultivo; sin embargo, resulta laborioso el trabajo en campo (control y monitoreo), equipos e inversión, generalmente el valor de K_c puede ser calculado con un lisímetro (Mendonça et al., 2007). El K_c varía de acuerdo al crecimiento del cultivo es por ello que para distintos tiempos de crecimiento (etapa inicial, etapa medía, desarrollo y maduración) se cuenta con distintos valores de K_c, de modo que se genere un curva de K_c versus tiempo para cada cultivo (Allen et al., 2006).

2.4.3. Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_c)

Se refiere a la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c) esto sin considerar las enfermedades, contando con un suelo fértil y con aceptables condiciones de suelo y agua. El valor de la ET_c se refiere a la cantidad de agua que evapora y transpira la planta; sin embargo, esta cantidad es similar a la necesidad de agua del cultivo, definida como la cantidad de agua que requiere la planta, los conceptos son distintos pero los

valores son los mismos, además, es importante considerar un adicional de agua aplicada para el lavado de sales (Allen et al., 2006).

Para el cálculo del valor de la ETc existen varios métodos entre ellos están los métodos directos e indirectos; sin embargo, algunos utilizan estimadores groseros y otros no cuentan con el conocimiento de la dinámica del agua en el suelo-planta-atmosfera. Los métodos directos son los más precisos y sirven para calibrar los métodos indirectos, siendo el método lisimétrico de pesaje el más preciso de todos los métodos continuando con el lisímetro de drenaje y el tanque evaporímetro (Quiroga, Fernández, & Álvarez, 2018).

2.5. MEDICIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

Existen métodos y equipos que calculan el valor de la evapotranspiración. Las estaciones meteorológicas capturan distintos datos climáticos y son introducidas en fórmulas para obtener la evapotranspiración.

2.5.1. Estación meteorológica Rain Bird ClimateMinder

Es una estación meteorológica que brinda datos meteorológicos con múltiples sensores en su equipamiento para obtener datos meteorológicos como: Temperatura ambiente y humedad, velocidad de viento, precipitación, radiación solar, presión y evapotranspiración, esta estación meteorológica capta parámetros del área donde se requiere la información, evitando el uso de las estaciones convencionales porque los datos no reflejan el clima exacto en las condiciones de su campo (RainBird, 2017).

2.5.2. Ecuación de Penman – Monteith - FAO

Este método permite la estimación de la ETo y es aplicable a periodos diarios, siendo uno de los más precisos. Este método empírico incluye a la radiación neta recibida por una superficie de cultivo, el cual puede calcularse fácilmente a través de tablas elaboradas, dado que depende de la latitud del lugar y época del año (Allen et al., 2006).

Según Carvalho & Delgado (2017), el método Penman Monteith FAO presentó mejores valores de la ETo diario, en comparación del método Hargreaves que presentó una sobreestimación de los valores, cumpliéndose con lo mencionado por (Allen et al., 2006),

que dice que el método que se aproxima más al valor de la ETo es el método Penman Monteith FAO, debido a que considera variables aerodinámicas.

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}$$

Donde:

ETo = Evapotranspiración de referencia, expresada en mm/día;

R_n = Radiación neta en la superficie de cultivo ($MJ m^{-2} día^{-1}$);

R_a = Radiación extraterrestre (mm/día);

G = Flujo de calor del suelo ($MJ m^{-2} día^{-1}$);

T = Temperatura media del aire a 2m de altura (°C);

U_2 = Velocidad de viento a 2m de altura (m/s);

e_s = Presión de vapor de saturación (kPa);

e_a = Presión real de vapor (kPa);

$e_s - e_a$ = Déficit de presión de vapor (kPa)

Δ = Pendiente de la curva de presión de vapor ($kPa °C^{-1}$)

γ = Constante psicométrica ($kPa °C^{-1}$)

2.6. HUMEDAD DE SUELO

La planta requiere de agua para su crecimiento y realizar determinadas funciones, para ello requiere de extraer agua que se encuentra almacenada en el suelo, de modo que el principal limitante del desarrollo de la planta será la humedad que almacena el suelo. Si esta agua excede a lo que puede almacenar el suelo o este carece de agua generara variabilidad en el rendimiento del cultivo, por lo que resulta de importancia conocer el valor de la humedad en el campo (Largaespada & Henríquez, 2015).

Para conocer este valor del contenido de humedad en el suelo existen métodos entre ellos directos (gravimetría, placas de Richards) e indirectos (sondas de neutrones, sensores de

constante dieléctrica, sensores de resistencia eléctrica, tensiómetros). Los primeros son métodos precisos y sirven para calibrar los equipos que usan el método indirecto; sin embargo, son destructivos, requieren de tiempo para obtener el valor del contenido de humedad y aplicación de la mano de obra en campo. Mientras que los métodos indirectos, no son destructivos, sencillo de utilizar y se puede obtener el valor de la humedad en tiempo real (Buesa Pueyo, 2013).

En la Figura 1, se presenta tres curvas de suelo tipo: arenosos, franco y arcilloso en relación a su potencial matrico.

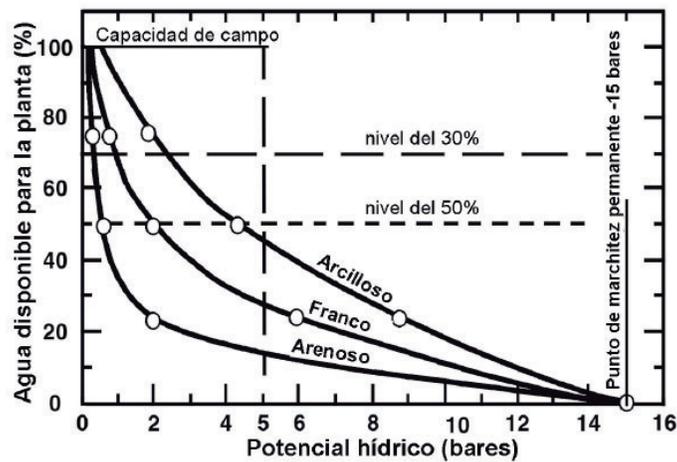


Figura 1: Curvas de disponibilidad hídrica según tipo de suelo.

Fuente: (Martin & Muñoz, 2017).

2.6.1. Capacidad de campo

Después de un evento de saturación del suelo, existe un drenaje del agua en el suelo favorecido por la gravedad, durante este proceso existe una disminución de la humedad del suelo. La velocidad de drenaje dependerá de la conductividad hidráulica del suelo, es decir, que será rápido en suelos arenosos y lentos en suelo arcillosos. El drenaje ira disminuyendo llegando a un punto donde se hace insignificante, a este punto se le llama capacidad de campo (Zotarelli, Dukes, & Morgan, 2013). Esto quiere decir que en los poros de mayor tamaño (macro poros) ya se encuentra con aire y una película de agua, mientras que en los poros de menor tamaño (micro poros) retienen el agua que la fuerza de gravedad no puede extraer, haciendo una semejanza de un potencial matrico de 0.33

atmosferas, este evento es favorable para la planta, debido a que encuentra una fuente de agua donde sus raíces podrán hidratarse (Pizarro, 1996).

Según Martin & Muñoz (2017), cuando el suelo alcanza la capacidad de campo, es semejante decir que el suelo está al 100% de la humedad disponible o cuenta con un valor aproximado de 0.1 bares de tensión, en este punto el agua es fácilmente retirada de las partículas del suelo y conforme se va absorbiendo el agua la tensión ira aumentando.

2.6.2. Punto de marchites

Definida como humedad de suelo donde la planta ya no puede absorber el agua y ocasionan la marchitez de esta hasta su muerte (Zotarelli et al., 2013). Debido a la pérdida de humedad del suelo cuando la película de agua en los macro poros es más fina por la evaporación, el suelo llega a un punto donde la planta tiene dificultades para absorber agua por sus raíces, es decir, este llega a un potencial matrico de 15 atmosferas. Para llegar a este punto de marchitez interviene no solo las condiciones climáticas, sino también la densidad y desarrollo de raíces, condiciones osmóticas del suelo, etc. (Pizarro, 1996).

Según Martin & Muñoz (2017), en el punto de marchitez existe agua en los micro poros, pero este debe poseer una succión mayor a 15 atmosferas de tensión para poder ser extraída, generalmente para los cultivos comerciales esto no es posible.

2.7. MÉTODO DE MEDICIÓN DE HUMEDAD DEL SUELO

La humedad del suelo tiene una influencia significativa en la agronomía y diversas ramas que involucran la masa de suelo, múltiples parámetros dependen del valor de la humedad tales son los siguientes: consistencia, compatibilidad, densidad, contracción, agrietamiento e hinchazón. Además, juega un rol importante en el desarrollo del cultivo (Susha Lekshmi, Singh, & Shojaei Baghini, 2014).

En la actualidad existen varios métodos para determinar la humedad del suelo, esta medición puede ser por métodos destructivos como es el método gravimétrico u métodos no destructivos como los bloques porosos, sonda de neutrones, etc. (Quinones, Ruelle, & Nemeth, 2003). Es importante saber este valor para una buena gestión del recurso hídrico,

este puede ser aplicado conociendo el abatimiento del agua disponible para la planta (ADP), es decir, cuanto es el porcentaje de humedad que se puede reducir del ADP, también es conocido como Déficit Permitido en el Manejo de Riego (DPM), este valor va a permitir de acuerdo al tipo de suelo y al tipo de cultivo que se encuentre instalado, debido a que en algunos cultivos soportan mayor estrés hídricos que otros, por lo general con un valor de 50% del DPM la planta está entrando en estrés hídrico, es por esta razón que se debe conocer el valor de la humedad de suelo (Martin & Muñoz, 2017). A continuación los siguientes métodos se pueden usar para determinar la humedad del suelo.

2.7.1. Método gravimétrico

El método gravimétrico o termogravimétrico es una técnica clásica que consiste en el secado de una muestra de suelo en un horno durante 24 horas a una temperatura de 105°C, se usa generalmente para conocer el valor del contenido de humedad de suelo, registrando el valor del peso suelo húmedo y luego de las 24 horas registrar el valor de peso de suelo seco. Esta técnica es la más precisa para conocer el valor de humedad del suelo debido a que no está afectada por la salinidad o el tipo de suelo. Sin embargo, es destructiva debido a que la muestra de suelo utilizada ya no puede servir para otras mediciones ya que su estructura ha sido modificada (Susha Lekshmi et al., 2014).

2.7.2. Reflectometría en el dominio de frecuencia (FDR)

Este método mide la humedad del suelo determinando la constante dieléctrica del suelo, midiendo el tiempo en que se carga un condensador que es utilizado como fuente dieléctrica, por esta razón se consideran sensores capacitivos (Buesa Pueyo, 2013). En este caso los electrodos o varillas incrustadas al suelo forman un condensador y con un oscilador se crea un circuito sintonizado, logrando detectar los cambios en la frecuencia de operación (Susha Lekshmi et al., 2014).

Los FDR trabajan en la frecuencia de 10 y 100 MHz, para obtener una medida rápida y económica en comparación a los TDR, el único inconveniente que cuenta este método es que son sensibles a la salinidad y temperatura (Buesa Pueyo, 2013).

Este método al igual que el método capacitivo es específicos del mismo suelo, por lo tanto se debe realizar una calibración de este sensor para obtener datos semejantes a los reales. Según Susha Lekshmi et al. (2014), las técnicas de dominio de la frecuencia permiten una mayor precisión de los datos de humedad de suelo. Sin embargo, resulta sensible a los espacio de aire entre el sensor instalado en el suelo (González Teruel, 2017). Según (Ascencios et al., 2019), este sensor debe estar instalado a la profundidad de raíces del cultivo, que para el caso del césped americano es a 10 cm de profundidad.

2.7.3. Reflectometría en el dominio del tiempo (TDR)

Los instrumentos de medición de reflectancia en el dominio del tiempo o en sus siglas en ingles TDR funcionan enviando una onda electromagnética a través de las agujas de metal y considera el tiempo en que tarda en recorrer el largo de estas agujas hasta el suelo y regresar, transformando el tiempo registrado a un valor de humedad. Entre más humedad cargue el suelo, mayor será el tiempo en que tarde en viajar la onda electromagnética por las agujas hasta el suelo y regresar (Martin & Muñoz, 2017).

El TDR mide la constante dieléctrica del suelo, a través de la velocidad de propagándose la onda electromagnética, que dicha velocidad es semejante a la velocidad de la luz $3 \cdot 10^8$ a la 8 m/s, y se rige bajo la siguiente formula:

$$v = \frac{c}{\sqrt{K}} \dots (1)$$

K: constante dieléctrica

c: velocidad de la luz o propagación de la onda ($3 \cdot 10^8$ m/s)

v: velocidad

Este método es confiable debido a que la constante dieléctrica del agua es un valor alto en comparación del aire y del suelo seco, y por esto se puede deducir que una pequeña variación en la humedad del suelo conlleva a una gran variación de la constante dieléctrica del suelo, para obtener valor de la humedad del suelo.

La onda electromagnética que viaja a través de las agujas es obtenida por un generador de impulsos, esta onda es propagada por un cable coaxial hasta llegas a las agujas del

TDR recorriendo desde el principio hasta el final de la aguja considerando el tiempo de ida y de regreso, este tiempo se puede medir con un osciloscopio (Quinones et al., 2003; Susha Lekshmi et al., 2014). Esta configuración de los componentes se presenta en la Figura 2, donde se visualiza gráficamente la distribución de los componentes mencionados líneas arriba. Conociendo ya los valores del tiempo de recorrido y el espacio que recorrió se llega a la siguiente ecuación:

$$v = \frac{2L}{t} \dots (2)$$

Igualando las ecuación 1 y 2, se tiene despejado el valor de K:

$$K = \left(\frac{tc}{2L}\right)^2$$

Según Quinones et al. (2003), la relación entre el contenido de humedad y la constante dieléctrica está dada por la siguiente ecuación, esto considerando para suelos minerales; sin embargo, se debe realizar una calibración según el tipo de suelo en el que se esté trabajando:

$$\theta = -530 + 0.0292K - 5.5K^2 + 0.043K^3$$

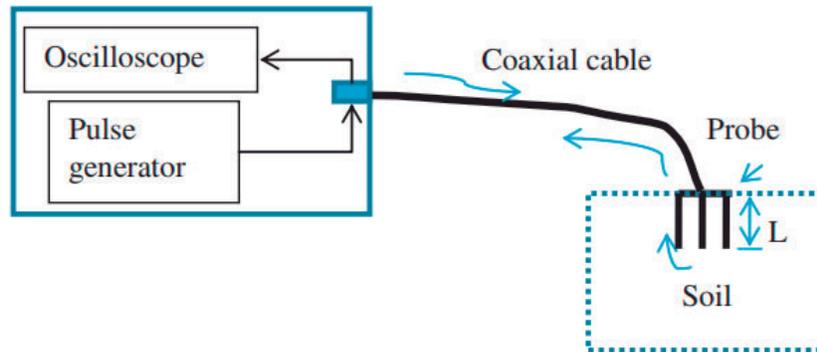


Figura 2: Configuración del TDR 350

FUENTE: (Susha Lekshmi et al., 2014)

Por otra parte, la constante dieléctrica se ve afectada por la densidad aparente del suelo, esto quiere decir que para suelos con una densidad aparente alta (>1.7 g/cm³) el valor de la humedad de suelo leída por el TDR estará sobrevalorada y si la densidad aparente es baja (<1.0 g/cm³) la lectura estará infravalorada, esto es debido a la masa de suelo y aire, un ejemplo es el siguiente: al introducir las agujas de la sonda de TDR al suelo, el área

que tendrá mayor influencia serán los alrededores de las agujas, debido a la existencia de los espacio vacío el valor estará infravalorado porque la constante dieléctrica del aire de un valor bajo, en contraste cuando este espacio de aire está ocupado por agua, el valor de la constante dieléctrica se elevara y brindara un valor sobrevalorado (Quinones et al., 2003).

La constante dieléctrica también depende de la temperatura y el contenido de sales, sin embargo varios estudios mencionan que el error generado por la temperatura y el contenido de sales en el suelo es despreciable en comparación de la calibración, se debe tener mayor énfasis en la buena calibración del equipo (Quinones et al., 2003; Susha Lekshmi et al., 2014).

En la Figura 3, muestra el TDR 350 FIELDSCOUT con las varillas de distintos tamaños que pueden ser adaptadas a este sensor.



Figura 3: TDR 350 FieldScout

FUENTE: (TechnologiesSpectrum, 2014)

2.8. ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA (NDVI)

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), es un índice que estima la calidad, cantidad y desarrollo de la vegetación con sensores remotos ubicados en el

espacio, esto mide la reflectancia o la intensidad de radiación en las bandas electromagnéticas que la vegetación emite o refleja. El índice mide en una imagen satelital la energía emitida o absorbida por la materia terrestre, en específico de las plantas. Este índice genera una información de la intensidad del verdor de la zona, también da la cantidad de vegetación existente en una zona; además, se conoce el estado de salud de la vegetación (Mayorga Arias, Pazos Roldan, & Uvidía Vélez, 2019).

El NDVI es calculado a través la reflectancia de una planta, para ello se usa dos bandas del espectro electromagnético: una de ellas es la banda infrarroja cercana, ubicado en un rango de longitud de onda (700 – 1300 nm) y la banda roja, en un rango de (550-700nm) (Govaerts & Verhulst, 2010; F. M. Padilla et al., 2019).

El valor que refleja la planta será introducida en una ecuación algebraica:

$$NDVI = \frac{(R_{NIR} - R_{Red})}{(R_{NIR} + R_{Red})}$$

Donde:

R_{NIR} : Reflectancia de la radiación del infrarrojo cercano.

R_{Red} : Reflectancia de la radiación del rojo visible.

Como se presenta en la formula el NDVI hace una relación entre la absorción de luz visible y reflectancia de luz infrarroja cercana a la clorofila en la vegetación, el valor del NDVI está entre 0 a 0.99 y guarda una relación directa con la calidad del césped, además este índice se encuentra influenciado por las distintas especie de césped existente, el estrés, fertilización, las plagas y las enfermedades en la vegetación (Caturegli et al., 2016).

Finalmente, el NDVI no puede vincularse a un valor que limita su desarrollo, es decir, en un campo donde el problema es estrés hídrico, el NDVI ira correlacionado fuertemente a la falta de agua; sin embargo, en otro campo donde el nitrógeno es el problema, el valor de NDVI ira fuertemente relacionado a la disponibilidad de nitrógeno en el suelo. Es por esta razón que se debe tener en cuenta varios aspectos en campo. (Govaerts & Verhulst, 2010).

En la Figura 4, se presenta el espectro de reflectancia de una planta sana y una planta enferma, esto considerando un rango del espectro donde es notorio esta variación.

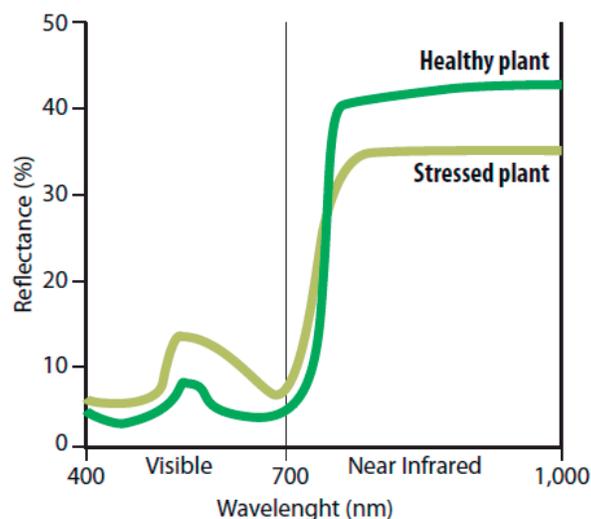


Figura 4: Espectro de reflectancia de una planta sana y una planta enferma.

FUENTE: (Govaerts & Verhulst, 2010)

2.8.1. Green Seeker

El GreenSeeker es un equipo de fácil uso que evalúa la salud o vigor de la planta. El funcionamiento del GreenSeeker es simple, al apretar el gatillo, este emitirá ráfagas de luz roja e infrarroja, y medirá la luz reflejada de las hojas de la planta, este valor muestra el vigor que tenga la planta relacionado a un valor de 0 a 0,99, mientras más elevado sea el valor obtenido, más vigorosa se encuentra la planta (Trimble, 2014).

El cálculo de NDVI basados en imágenes satelitales son influenciados por los siguientes factores: nubosidad, aerosoles, vapor de agua, calibración, geometría espacial y sin duda alguna la incidencia de la radiación solar que está fuertemente vinculado con los efectos del NDVI. Es por estas razones que el sensor óptico portátil GreenSeeker para medir NDVI suena una idea atractiva para evitar las complicaciones, cancelando los efectos perturbadores de la atmosfera, debido a que se encuentra cerca de la planta que se desea analizar. Además, el sensor GreenSeeker no es destructivo y cuenta con una alta tasa de aproximadamente 1000 mediciones por segundo (Govaerts & Verhulst, 2010). Finalmente, el GreenSeeker cuenta con su propia luz, y permite tomar datos tanto de día como de noche, sin generar complicaciones con la interferencia de la luz solar y pueden usarse a cualquier hora del día (F. M. Padilla et al., 2019).

En la Figura 5, se presenta el GreenSeeker, además de los componentes que cuenta internamente.

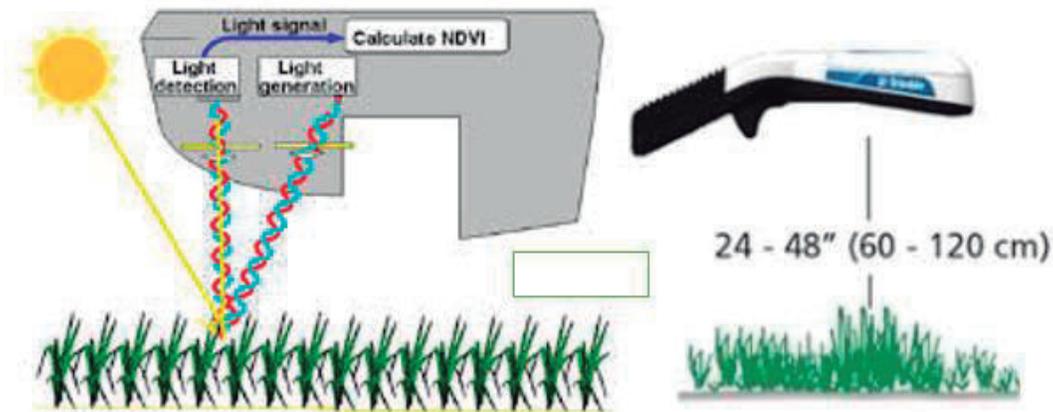


Figura 5: GreenSeeker de Trimble

Fuente: (Trimble, 2014)

2.9. SISTEMA DE RIEGO POR GOTEO SUBTERRÁNEO

La escases del agua generó el uso de nuevas estrategias para un uso óptimo del recurso hídrico que se destina para los cultivos, mejorando o manteniendo su rendimiento a través de riego intermitente, riego deficiente, etc. El riego por goteo subterráneo es un método moderno que consiste en enterrar mangueras o cintas de riego en el subsuelo reduciendo la evaporación directa, percolación y escurrimiento (Sánchez Gutiérrez, Servin Palestina, GutiérrezBañuelos, & Serna Pérez, 2017). Este método de riego alternativo que aprovecha al máximo la aplicación del agua en la agricultura, dado que la cinta de riego al mantener enterrado minimiza la evaporación superficial y eleva el almacenamiento hídrico en el suelo cercano a la raíz, de esta forma se hace un ahorro del agua debido a que es un recurso importante en la producción agrícola; sin embargo, este método trae a su vez dificultades en campo tales como: taponamiento de emisores con materia orgánica, daño por roedores, etc. (Lucero-Vega et al., 2017).

Las ventajas que trae consigo el método del riego por goteo subterráneo son las siguientes:

- Reducción de la pérdida del agua por la evaporación directa
- Aplicación de fertilizantes

- Prolongación de la vida útil del sistema
- Menor cantidad de malas hiervas
- Reducción en el costo de la mano de obra
- Mejor distribución del agua

Los beneficios se pueden ver aplicados en los cultivos hortícolas, leñosos y jardinería (SALEPLAS, 2017).

2.10. AUTOMATIZACIÓN Y DISEÑO DEL SISTEMA ARDUINO PARA LA IMPLEMENTACIÓN, CONTROL, MONITOREO Y ALMACENAMIENTO

La aplicación de la automatización se ha incrementado desde la década de los 90, y el sector agrícola no es ajeno a ello, ha traído enormes ventajas y logrando reducir la ineficiencia e ineficacia de formas tradicionales de trabajo, aplicando el control, manejo y monitoreo (Anaya-Isaza et al., 2016). Además, trae consigo múltiples beneficios los cuales son los siguientes: ahorro de tiempo y costo a los agricultores, facilidad en el manejo del agua, minimiza el error humano, mayor eficiencia en la aplicación, reducción de la mano de obra en campo (Palma, Palma, Molina, & Santana, 2013). La tecnología cada vez va implementándose al campo de la agricultura, cubriendo las necesidades del agricultor, de acuerdo a ello se han implementado sistemas emergentes de bajo costo para el control y monitoreo de la información en campo utilizando sensores, microcontroladores y actuadores (Escobar & Farfán, 2018; Guijarro-Rodríguez et al., 2018). Además, el IoT (internet de las cosas) va introduciéndose en este campo de la agricultura, dando un fácil uso y control de todo un sistema de riego, conectándolo via internet y lograr visualizar esta información desde cualquier parte del mundo y lograr almacenarla para verificar cómo va el funcionamiento del sistema y almacenar esta información para obtener una data histórica (Chaitanya, Ilayarajaa, Karthikeyan, & Teja Reddy, 2017).

2.10.1 Arduino

Arduino es una plataforma libre con un hardware y software de fácil comprensión (Arduino, 2018). Esta placa cuenta con un microcontrolador reprogramable y un conjunto de pines hembras (las cuales están conectadas al microcontrolador) que permiten conectar cualquier modulo (Ethernet Shield), sensor y actuador con la finalidad de poder

interactuar (Torrente Artero, 2013b). Además, facilita una tecnología con un costo reducido y accesible para el público, con la placa Arduino se podrá generar nuevos proyectos donde integraras múltiples sensores para que comanden alguna orden a los actuadores como el encendido de una bomba y esta pueda funcionar de forma autónoma con una fuente de alimentación (Monk, 2012).

La placa de Arduino se seleccionó debido a que es un hardware libre, cuenta con varios modelos y cada una con distintas características como: el tamaño físico, número de pines-hembra ofrecidos, modelo del microcontrolador incorporado y la cantidad de memoria utilizable. Es por ello que se debe de conocer las características que se requiere para el proyecto que se desea elaborar y elegir un modelo que beneficie en el proyecto (Pérez Bladimir, Koo José, Garcia Fernando, 2014; Torrente Artero, 2013a).

2.10.2. Entorno de desarrollo Integrado (IDE)

Las siglas IDE provienen de Integrated Development Environment, y traducida al español significa Entorno de Desarrollo Integrado, este permite facilitar el uso del lenguaje de programación en un entorno llamado “Sketch” en el mundo de Arduino (Torrente Artero, 2013b). El IDE permite escribir códigos que se pueden editar en todo momento, comprobando si está bien o mal escrito el código para poder corregirlo y logrando enviar las órdenes a la placa de Arduino que se está usando, además se puede comunicar vía serie para poder visualizar los datos en una ventana de la plataforma (Herrero Herranz & Sánchez Allende, 2015).

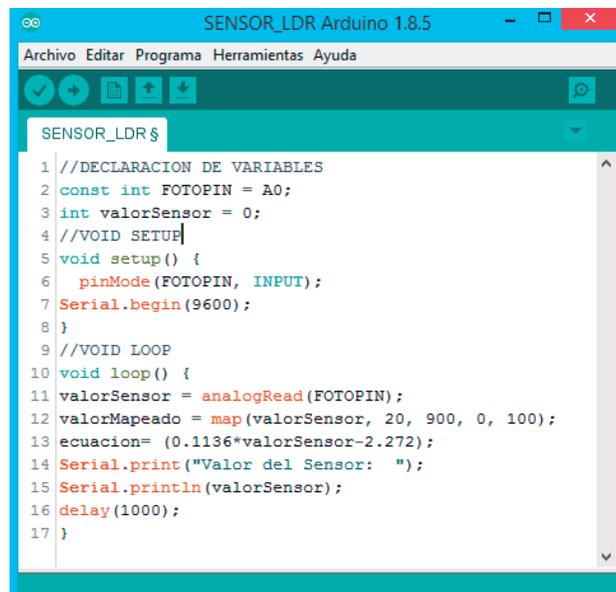
2.10.3. Lenguaje de programación

El lenguaje de programación de Arduino se basa en una simplificación del lenguaje C/C++, es decir, cuando escribimos un código en nuestro Sketch en lenguaje Arduino, estamos usando un conjunto de instrucciones del lenguaje C/C++. Se usa este lenguaje debido a que son muy potentes y flexibles. Además los programas escritos con este código son más eficientes y rápidos. Sin embargo, la persona que se inicia en el lenguaje C/C++ no son demasiados amigables; es decir, son difíciles de aprender. Por esta razón existe el lenguaje Arduino, las personas pueden desarrollar códigos de programación en el sketch de Arduino que funcione, evitando aprender el lenguaje C/C++ para cumplir la misma función. En consecuencia, estamos limitados usar una pequeña parte de todo el dominio

que tiene el lenguaje C/C++, pero es suficiente para las acciones que se desea realizar en los proyectos (Torrente Artero, 2013b).

Todos los códigos escritos en el IDE de Arduino (Sketches) cuentan con tres secciones: Declaración de variables, void setup () y void loop (). En la primera se nombraran las diferentes declaraciones de variables que necesitemos, el void setup () usualmente de ejecuta solo una vez después de enviarse el código o resetear la placa, entre las llaves irán escritas como trabajara los pines de esta, considerándose como dato de entrada o salida (input y output) y el void loop () que es un bucle infinito; es decir, todo lo que va dentro de llaves se ejecutara de forma cíclica.

En la Figura N°6 se presenta el Entorno de Desarrollo Integrado de Arduino donde se puede visualizar las tres secciones: Declaración de variables, Void Setup () y Void Loop ()).



```
1 //DECLARACION DE VARIABLES
2 const int FOTOPIN = A0;
3 int valorSensor = 0;
4 //VOID SETUP
5 void setup() {
6   pinMode(FOTOPIN, INPUT);
7   Serial.begin(9600);
8 }
9 //VOID LOOP
10 void loop() {
11   valorSensor = analogRead(FOTOPIN);
12   valorMapeado = map(valorSensor, 20, 900, 0, 100);
13   ecuacion= (0.1136*valorSensor-2.272);
14   Serial.print("Valor del Sensor: ");
15   Serial.println(valorSensor);
16   delay(1000);
17 }
```

Figura 6: Plataforma del IDE de Arduino

FUENTE: IDE de Arduino.

2.10.4. Señales digitales

La señal digital es aquella que cuenta con una variación no constante en el tiempo a esto se les puedes llamar valores discretos, la forma de esta señal es conocida porque básicamente es una onda cuadrada graficada en un eje de tiempo. Por ejemplo, si consideramos como señal el color de las luces de un semáforo, esta será digital, porque

solo puede tener un solo color cada foco y la única función que cumple es prender y apagarse, dejando de transmitir progresivamente su color (Torrente Artero, 2013b).

2.10.5. Señales analógicas

Las señales analógicas son variables debido a que cuenta con infinitos valores posibles, por ejemplo: la temperatura, el sonido, la luz, etc. Sin embargo, requieren de un conversor analógico – digital que traduzca la señal digital a analógico, debido a que los sistemas electrónicos tienen la capacidad de trabajar con señales digitales. Finalmente, se debe tener en cuenta que siempre existirá una pérdida de información durante la conversión de la señal, esta pérdida genera una variación de señal llamada ruido (Torrente Artero, 2013b).

2.10.6. Señales PWM

La abreviatura PWM proviene de “Pulse Width Modulation” que traducido al español es modulación de ancho de pulso. Emite una señal continua cuadrada formada por pulsos de frecuencia constante, logrando variar la duración de los pulsos y con esta lograrla variación proporcional de la tensión promedio (Torrente Artero, 2013b). Se puede aplicar en la variación progresivamente la velocidad de un motor, la frecuencia de sonido de un zumbador, etc.

2.10.7. Librería

Las librerías de Arduino son fragmento de códigos agrupados de forma coherente que facilitan la programación de los proyectos a realizar, permitiendo que el programa sea sencillo y de fácil comprensión.

2.10.8. Arduino Mega 2560

La placa está basada en el microcontrolador Atmega2560. Cuenta con 54 pines de entradas y salidas digitales (de los cuales 14 pueden ser usados como salidas PWN), 16 entradas analógicas y 4 receptores y transmisores serie TTL-UART, cuenta con una memoria flash de 256 kilobytes, una memoria SRAM de 8kb, una EEPROM de 4 kb y su voltaje de trabajo es de 5 voltios (Torrente Artero, 2013b). Se debe de tener en cuenta que las entradas funcionan con 5 voltios, además, cada pin puede brindar 20 mA, si se excede

este valor, el pin se malograra (Arduino, 2018). La placa Arduino Mega 2560 se presenta en la Figura 7.

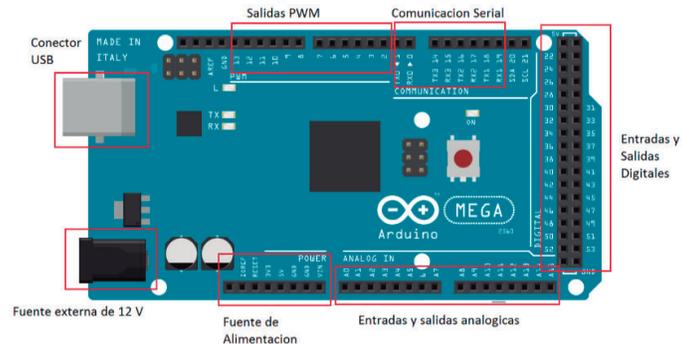


Figura 7: Partes de la placa Arduino Mega 2560

FUENTE: Propia.

Especificaciones:

Microcontrolador: ATmega2560

Tensión de funcionamiento: 5V

Voltaje de entrada recomendado: 7 -12 V

Pines digitales de E/S : 54 (15 son pines PWM)

Pines de entrada analógica: 16

Corriente DC por pin de E/S: 20 mA

Corriente DC para 3.3 V: 50 mA

Memoria flash: 256 kb de los cuales 8kb se usa para el boodloader

SRAM: 8kb

EEPROM: 4kb

Dimensiones: 101.52 mm * 53.3 mm

Peso: 37 gr

2.10.9. Sensores

Arduino ofrece una gama de sensores de todo tipo a usar en su plataforma, además cuentan con propios métodos de conexión y distintos lenguajes de programación para su

funcionamiento, algunos sensores mayormente utilizados en pequeños proyectos son los siguientes: luz, flexión, fuerza, golpes, temperatura, campo magnético, acelerómetro, distancia, movimiento, presión, giroscopio, entre otros. Interactúan con la placa Arduino mediante la conexión con funciones digitales y analógicas (Torrente Artero, 2013b). Se automatizo el sistema de riego con los siguientes sensores:

A. Sensor de nivel de agua HC – SR04

El sensor HC-SR04 es un sensor de distancia de costo reducido que utiliza el ultrasonido para calcular la distancia del sensor hasta el primero objeto que encuentre en un rango de 2 a 400 cm. Además, se destaca por su pequeño tamaño, bajo consumo energético, precisión y costo accesible.

El sensor HC-SR04 posee dos transductores instalados en su parte física: un emisor y un receptor piezoeléctricos, además de los circuitos instalados para su correcto funcionamiento. Según (Fuentes Martinez, 2014), el sensor funciona de la siguiente manera: el emisor piezoeléctrico emite 8 pulsos de ultrasonido (40KHz) luego de recibir luego de recibir la orden en el pin TRIGGER, las ondas de sonido emitidas por el emisor viajan hasta toparse con un primer objeto, el sonido de rebote es captado por el receptor piezoeléctrico, luego el pin ECHO cambia a Alto (5V) por un tiempo igual al que demoro en recorrer la onda desde que fue emitida hasta que fue percibida, el tiempo del pulso ECHO es descifrado por el microcontrolador y es de esta forma como se calcula la distancia del objeto, esto se grafica en la Figura 8. Se debe considerar que el sensor no está afectado por la luz solar o los materiales de color negro, pero si se debe tener en cuenta que los materiales blandos acústicamente difícil de detectar pueden ser la tela o la lana (Naylamp mechatronics, 2017e).

Para calcular la distancia del sensor ultrasonido hasta el primer objeto detectado se puede calcular con la siguiente formula:

$$Distancia (m) = \frac{Tiempo\ del\ pulso\ ECHO * Velocidad\ del\ sonido}{2}$$

Velocidad del sonido = 340 m/s

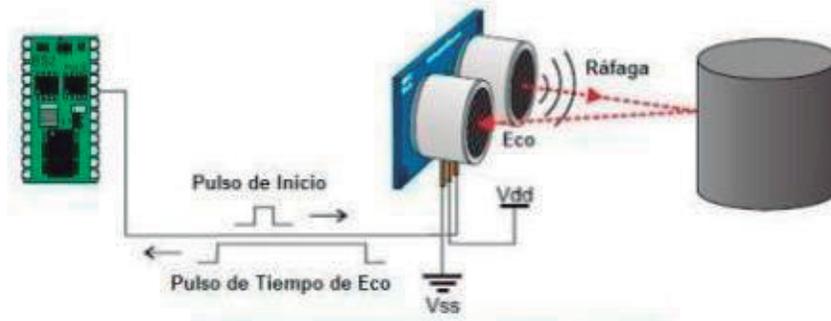


Figura 8:Sensor HC-SR04 o ultrasonido

FUENTE: (electrontools, 2016).

Especificaciones técnicas

- Voltaje de operación 5 voltios DC (corriente continua)
- Corriente de reposo: < 2 mA
- Corriente de trabajo: 15 mA
- Rango de operación: 2 cm a 450 cm
- Precisión: +- 3mm
- Angulo de apertura: 15°
- Dimensiones: 45mm x 20 mm x 15mm
- Tiempo de esperar entre toma de datos: 50 ms

B. Sensor de humedad GS1

El sensor de humedad GS1 Decagon Device, mide el contenido de humedad volumétrica de agua en el suelo, con la constante dieléctrica del medio utilizando las tecnologías de dominio de frecuencia y capacitancia. Este sensor cuenta con un cuerpo hermético que prolonga su duración instalado bajo suelo, cuenta con dos agujas para introducir a la zona donde interesa conocer dicho la valor de humedad de suelo como se presenta en la Figura 9; además, la alta frecuencia de medición del GS1 permite obtener una humedad volumétrica 0 a 57%.



Figura 9: Sensor de humedad GS1 Decagon Device

FUENTE: (Decagon Devices, 2015).

Especificaciones técnicas:

- Intervalo de medición: 10 ms
- Precisión: +/- 0.03 m³ / m³ en suelos típicos
- Calibrando a la mismas condiciones de terreno: +/- 0.01 a 0.02 m³ / m³
- Voltaje de operación: 3.0 VDC a 15 VDC (Voltaje corriente continua)
- Corriente de operación: 15 mA
- Entorno de funcionamiento: -40 a 50 °C
- Rango de medición: 0 a 57% VWC
- Dimensión del sensor: 8.9 cm x 1.8 cm x 0.7 cm
- Tipos de conectores: conector de 3.5 mm (estéreo) o cable desforrado y estañado.

C. Sensor de presión HK3022

EL sensor de presión HK3022 o también llamado transductor de presión transforma una magnitud física a valores eléctricos, es decir, transforma una fuerza por unidad de superficie (ejercida por la presión del fluido) en un voltaje directamente proporcional a la presión (Leon & Lema, 2019).

Su rango de operación es de 0 a 5 bares de presión, ideal para sistemas presurizados como: agua, aceite y combustible. Cuenta con la ventaja con poseer salidas analógicas compatibles con Arduino (Naylamp mechatronics, 2017d).

En la Figura 10, se presenta el cuerpo del sensor analógico HK3022, donde el diámetro de la rosca es de ¼ de pulgada.



Figura 10: Sensor de presión Analógico HK3022

FUENTE: (Naylamp mechatronics, 2017d).

Especificaciones:

- Voltaje de operación: 5.0 VDC (Voltaje en corriente continua)
- Corriente de funcionamiento: ≤ 10 mA
- Rango de presión de trabajo: 0 a 5 bares – 0 a 72.5 psi
- Presión de rotura: 30 bares
- Tiempo de respuesta ≤ 2.0 ms
- Temperatura de trabajo: 0 a 85 °C
- Conexión: Rosca macho G 1/4
- Fluido de trabajo: Gas, Aire comprimido, Agua, Aceite.
- Dimensiones: 2.6 cm x 2.6 cm x 6 cm
- Descripción de salida analógica: Rojo (5V), Negro (tierra), Amarillo (Salida)

D. Sensor de flujo FS400 efecto hall

El sensor de flujo o también llamado Caudalímetro mide la cantidad del agua circundante que atraviesa por una sección transversal en una unidad de tiempo expresada en: litros por minuto (lt/min), litros por hora (lt/hr), metros cúbicos por hora (m³/hr), etc. Este sensor de caudal de modelo FS400 especialmente sirve para medir el caudal en la tubería de 1" de diámetro, el cuerpo del sensor de muestra en la Figura 11.

El funcionamiento de este sensor es por el efecto hall, que a través de una turbina unida a un imán que al ser impactada por el agua que circula por la tubería activa el efecto hall, emitiendo pulsos eléctricos que puede ser traducido con una placa Arduino. Una característica del sensor de efecto hall instalado en este Caudalímetro es que siempre está seco debido a que está alejado del contacto del agua en otra cámara del sensor (Naylamp mechatronics, 2017c).

El Caudalímetro FS400 cuenta con tres cables: rojo (5V), negro (GND) y amarillo (dato de salida de los pulsos del sensor de efecto hall).



Figura 11: Sensor de flujo FS400 efecto hall.

FUENTE: (Naylamp mechatronics, 2017c).

Especificaciones:

Modelo: FS400A

Voltaje de operación: 5VDC a 24 VDC (Voltaje corriente continuo)

Consumo de corriente: 15 mA

Capacidad de carga: 10 mA

Salida: Onda cuadrada pulsante

Rango del fluido: 1 a 60 Lt/min

Volumen promedio por pulso: 3.75 mL

Pulsos por litro: 280

Conexión: Rosca macho externa de 1"

Presión de trabajo máxima: 4 bares

Temperatura de funcionamiento: -25 °C a 80°C

2.10.10. Actuadores

A. Módulo Relé

El modulo relé hace una semejanza a un interruptor, controlado a través de un microcontrolador (Chaitanya et al., 2017). Si se desea controlar voltajes altos como 220 voltios para encender y apagado los siguientes equipos: bombillo de luz, bomba, electroválvula, calentadores de agua y entre otros actuadores. Este módulo relé es capaz de controlar 250 voltios /10 amperios, además cuenta con un sistema optocoplador que logra aislar el sistema si existente alguna falla o corto circuito quemando solo el relé y manteniendo en buen estado la placa de Arduino (Naylamp mechatronics, 2017a). En la Figura 12, se presenta un módulo relé de 2 canales.

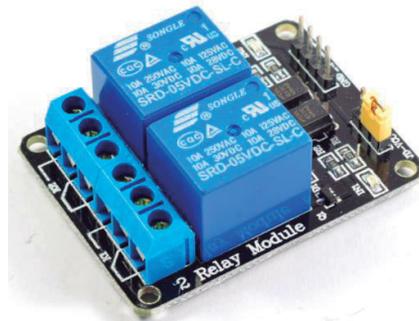


Figura 12: Modulo Relay 2 canales

FUENTE: (Naylamp mechatronics, 2017a).

Especificaciones técnicas:

Voltaje de operación: 5 V DC

Señal de control: TTL (3.3 V o 5V)

Nº de Relay (canales): dependerá del modelo, viene desde 1 canal hasta 16 canales.

Capacidad máxima: 10A / 250VAC, 10A / 30V DC

Corriente máxima: 10 A (Normalmente abierto) / 5 A (Normalmente cerrado)

Tiempo de reacción: 10 ms / 5 ms

Entradas opto-acopladas

B. Válvula solenoide

Permite controlar la apertura y cierre del flujo de agua con un electroimán, este se caracteriza por ser una válvula todo o nada, es decir, o bien se encuentra abierto o cerrado, además, cuenta con 2 partes: el solenoide y el cuerpo de plástico o metal. El funcionamiento de la electroválvula se da cuando se energiza un electroimán que desplaza junto con el diafragma de la válvula, se va mantener abierta mientras se mantenga energizado el electroimán, cuando se retira la energía un resorte se encargara de regresar el diafragma de la válvula a su posición cerrada. Se puede encontrar en el mercado de distintos diámetros comerciales como por ejemplo: $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{4}$ ", 1", 1 $\frac{1}{2}$ ", 2", etc. Puede ser accionada con el microcontrolador Arduino, este se realizara con un módulo relé, permitiendo el control de un voltaje de 12 v que es para energizar el electroimán (Naylamp mechatronics, 2017f). En la Figura 13, se presenta el cuerpo de la válvula solenoide de $\frac{1}{2}$ " de entrada y salida.

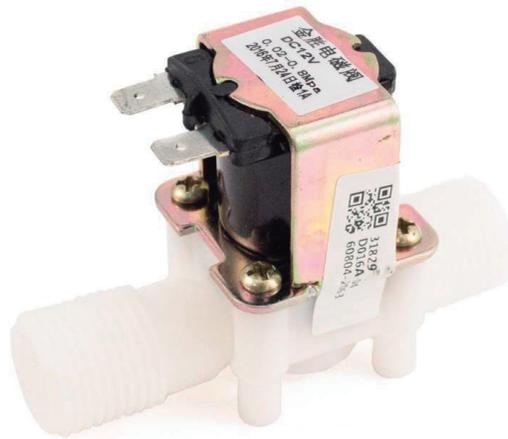


Figura 13: Válvula solenoide de 12 voltios 1 amperio.

FUENTE: (Naylamp mechatronics, 2017f).

Especificaciones técnicas:

Voltaje de operación: 12 V DC

Corriente de operación: 0.6 A

Potencia consumo: 8 W

Temperatura de funcionamiento: 5°C a 100° C

Presión mínima de funcionamiento: 0.2 Bar

Presión máxima de funcionamiento: 8 Bar

Tiempo de respuesta (Apertura / Cierre): 0.15 s / 0.3 s

Estado: Normalmente cerrado

2.11. INTERNET DE LAS COSAS

Se conoce como Internet Of Things (IoT), a un conjunto de tecnologías que se conectan a los objetos mediante distintas redes o medios de comunicación, con la finalidad de generar dispositivos inteligentes que puedan realizar las siguientes labores: capturar,

guardar y administrar información que pueda ser visualizada desde cualquier parte del mundo (Anaya-Isaza et al., 2016). Esto se debe a la comunicación que existe entre los objetos y la conexión vía internet, apoyándose además de las tecnologías inalámbricas como GSM y UMTS, Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, entre otros. Con la finalidad de hacer menor uso de la intervención humana, logrando aumentar la comodidad y la seguridad del usuario final (Betancourt, Gómez, & Rodríguez, 2016). La introducción del internet de las cosas cambia la vida de las personas, ofreciendo acceso a datos, servicios específicos como la educación, asistencia sanitaria o en los medios de transporte, además brinda servicios a las empresas para aumentar su productividad, debido al aumento de la cantidad de datos de información, optimizando y aprovechando los recursos, como consecuencia genera un ahorro de costo (Salazar & Silvestre, 2011).

2.11.1. Blynk

Es una plataforma para el internet de las cosas, brinda aplicaciones móviles personalizables, control y monitoreo de dispositivos en una nube privada, esto es aplicable a cualquier hardware que se encuentre compatible a la plataforma (Blynk, 2019).

La plataforma cuenta con tres componentes principales:

Aplicación Blynk: Puede utilizar widgets que proporciona para generar sus proyectos.

Blynk server: Este es el encargado de comunicar el teléfono y el hardware, a través del Blynk Cloud o ejecutar un servidor privado de Blynk de forma local.

Las bibliotecas de Blynk: Permite la comunicación con el servidor y desarrolla todo los datos entrantes y salientes, esto solo para el hardware compatible (Blynk, 2019).

Para acceder a la conexión y uso del sistema se deberán validar las credenciales preconfiguradas con la tecnología de comunicación deseada con la finalidad de que el dispositivo se enlace y luego vincularse al servidor de Blynk con un código de autenticación llamado token que es entregado al momento de crear un usuario (Mendoza Padilla & Marín Mendoza, 2018).

En la Figura 14, se presenta la comunicación del teléfono con el hardware, utilizando el aplicativo, el servidor de Blynk y las bibliotecas necesarias para la comunicación.

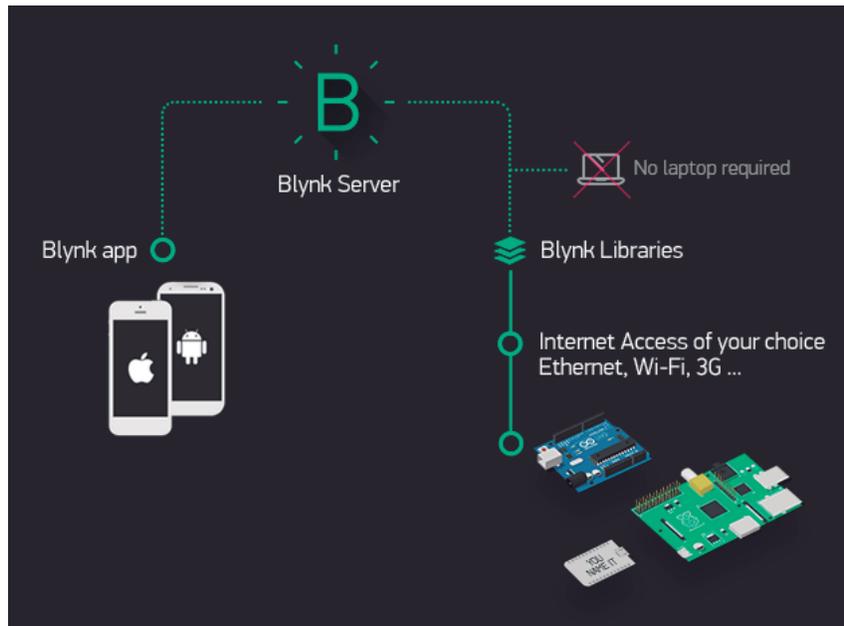


Figura 14: Comunicación de la plataforma Blynk con el hardware.

FUENTE: (Blynk, 2019).

2.11.2. Protocolo de comunicación

Para que dos equipos puedan intercambiar información estas usaran un mismo lenguaje para poder comunicarse que será llamado protocolo de comunicación, este engloba instrucciones, reglas y convenciones que deben seguir los equipos que desean comunicarse para lograr un intercambio de información (Fernandez de Córdova Á & Humberto, 2018). Los protocolos pueden ser de uso libre para todos (estándar abierto), libre para los que cuentan con la licencia (estándar bajo licencia), o de uso exclusivo para el propietario o fabricantes (propietario)(Vega E., Santamaría P., & Rivas T., 2014). En la Figura 15, se presenta que la comunicación entre dos personas es viable porque ambos manejan un mismo lenguaje, y para la comunicación entre dos máquinas se debe manejar un mismo protocolo de comunicación para lograr conectar y mantener una comunicación entre dos Equipos Terminal de Datos (DTE), con el Equipo de comunicación de datos (DCE) (Fernandez de Córdova Á & Humberto, 2018).

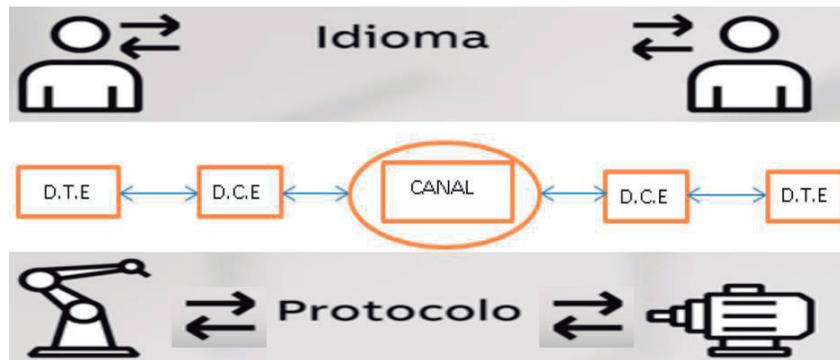


Figura 15: Protocolo o canal de comunicación entre maquinas.

TCP – IP .- Es la familia de protocolos e internet que permite la transmisión de datos entre computadoras de diferentes sistemas operativos (Linux, Windows y MacOS X) implantado inicialmente en la red ARPANET que fue creada en Estados Unidos, se encuentra basada en el protocolo de internet IP (Internet Protocole) y protocolo TCP. El protocolo TCP/IP cuenta con cuatro capas o nivel (Aplicación, Transporte, Internet y Acceso a la red), encargándose de verificar los aspectos de la comunicación y a la vez brinda un beneficio específico a la capa superior

OSI.- Significa interconexión de sistemas abierto o en sus siglas en inglés (OSI, Open System Interconnection), este es un protocolo de comunicación entre computadoras. Cuenta con 7 capas las cuales son: Aplicación, presentación, sesión, transporte, red, enlace de datos y física; este protocolo presenta mayor número de capas en comparación con el protocolo TCP-IP, sin embargo, las funciones son las mismas para la recepción y transmisión de información.

SPI.- (Serial Peripheral Interface) traducida al español significa Interfaz Periférico Serial, este protocolo es usado por microcontroladores para que logren comunicarse, además, permite alcanzar altas velocidades de transferencia de datos. Con una conexión SPI siempre existe un maestro que está conectado a dispositivos periféricos llamados esclavos, los cuales son controlados por el maestro.

2.11.3. ESP 32 DEVKIT DEV KIT V1

La placa ESP32 permite conexiones mediante bluetooth, Wifi y BLE. Cuenta con un CPU de dos núcleos que trabajan de forma independiente y cada uno cuenta con hasta 240 Mhz. Además, cuenta en su interior con periféricos que incluyen: Ethernet, SPI de alta

velocidad, UART, I2S e I2C, sensor de efecto hall y amplificadores de bajo ruido (Serna, 2018).

El beneficio de mayor importancia de la placa es la comunicación via internet y el desarrollo de múltiples aplicaciones para internet de las cosas (IoT). El ESP32 acepta varios lenguajes de programación, librerías y códigos. Puede ser programada en los siguientes lenguajes: Arduino (C++), Simba Embedded Programming Platform (Python), RTOS's (Zephyr Project, Mongoose OS, NuttX RTOS), Micro Python y JavaScript.

En la Figura 16, se presenta el ESP32 o NodeMCU, cuenta con una pequeña presentación que integra Wifi, reemplazando a la versión UNO y MEGA del Arduino con los Shield de Ethernet existentes.

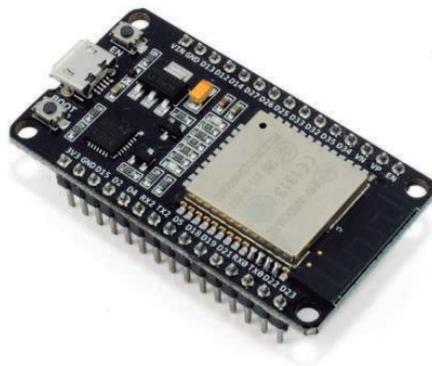


Figura 16: ESP 32 DEVKIT DEVKIT V1

Fuente: (Naylamp mechatronics, 2017b)

Especificaciones técnicas:

Voltaje de alimentación (USB): 5 V DC

Voltaje de E/S: 3.3 V DC

Pines GPIO: 24 (La mayoría de pines como E/S)

Antena en PCB

Memoria: 448 Kbyte ROM, 520 Kbyte SRAM, 16 Kbyte SRAM, 4 MBytes

Procesador secundario: Consumo reducido para operaciones básicas

UART: 2

Seguridad: Estándares IEEE 802.11 incluyendo WFA, WPA/WPA2 y WAPI

2.11.4. Ethernet Shield 5100

Es una placa con circuito impreso que complementa a la placa de Arduino UNO y MEGA acoplándose perfectamente en los pines de estas. El “shield” o escudo en su traducción al español, brindan capacidades y complementan la funcionalidad de la placa Arduino. Este Ethernet Shield 5100 contiene el chip Ethernet Wiznet W5100 el cual recibe un IP, es por esto que brinda específicamente conexión a una red cableada de internet (TCP/IP), el cual cuenta con un puerto estándar RJ-45 para su conexión al cable de internet, y para habilitar esa función se adiciona en el código de programación la librería “Ethernet” la cual podemos encontrar en las librerías que vienen en el IDE de Arduino (Vega E. et al., 2014)

El Ethernet Shield 5100 funciona con 5 voltios de energía que es proporcionado por la placa Arduino UNO o MEGA, la comunicación de información de la placa con el chip W5100 es mediante el protocolo de comunicación (SPI) por los pines 10, 11, 12 y 13 por lo que no se debe aplicar alguna función a los pines. Es importante tener en cuenta que el Shield cuenta con un puerto para memoria SD que también se comunica mediante el protocolo (SPI) y este agrupa los pines 4, 11, 12 y 13 de la placa Arduino, esto quiere decir que solo una función podrá tener este “Shield” (Torrente Artero, 2013b).

Finalmente, la placa Ethernet Shield 5100 cuenta con una serie de leds con una descripción a lado de las cuales son: “PWR” (significa que el shield y la placa están energizados), “LINK” (Indica la conexión a una red y parpadea cuando existe transmisión de información), “FULLD”(conexión de red Full Duplex), “100M”(cuenta con una conexión de red de 100 megabits por segundo), “RX”(parpadea cuando recibe datos), “TX” (parpadea cuando transmite datos) y “COLL” (parpadea cuando existe una colisión de paquetes en la red) (Ruiz Gutiérrez, 2015).

En la Figura 17, se presenta el shield de Ethernet, cuenta con un puerto RJ45 para la conexión alámbrica con un router.

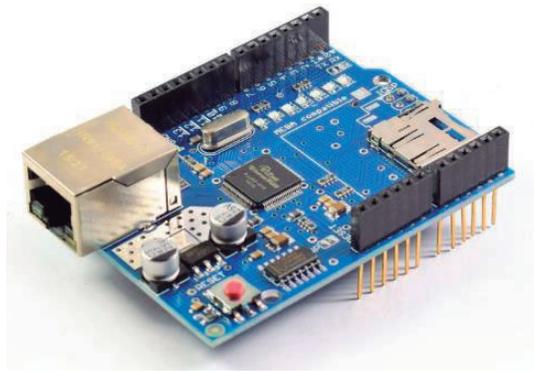


Figura 17: Ethernet Shield W5100

Fuente: (Naylamp Mechatronics, 2017)

Especificaciones técnicas:

- Voltaje de operación: 5 V DC
- Chip Ethernet: Wiznet W5100
- Velocidad Ethernet: 10/100 Mbps
- Conector: RJ45
- Interface (Protocolo de comunicación): SPI
- Compatibilidad: Arduino UNO, Arduino MEGA y Arduino Leonardo
- Lector MicroSD Card

III. MATERIALES Y METODOLOGÍA

3.1. UBICACIÓN DEL ÁREA EXPERIMENTAL

El proyecto se encuentra dentro de las instalaciones de la UNALM. En la Figura 18, se presenta la ubicación del área demostrativa y experimental de riego dentro del campus de la UNALM.

Departamento:	Lima
Provincia:	Lima
Distrito:	La Molina
Longitud:	12°4'49''
Latitud:	72°56'58''
Altitud:	245 msnm



Figura 18: Ubicación geográfica del área experimental

FUENTE: Google Earth (2018).

3.2. CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS

La información climática de La Molina entre los años 2000 y 2010 fue extraída de la estación meteorológica Alexander Von Humboldt, ubicada en la UNALM, el resumen de los datos se presenta en el Cuadro 1.

Cuadro 1: Características climáticas en la UNALM 2000- 2010.

Mes	T máx (°C)	T min (°C)	T prom. (°C)	HR (%)	Vel. Viento (m/s)	Horas de sol diario	ETo (mm/día)
Enero	27.41	19.44	23.42	79.60	1.26	5.32	3.71
Febrero	28.92	20.33	24.63	75.85	1.26	5.95	4.09
Marzo	28.65	19.75	24.20	75.63	1.15	7.02	4.16
Abril	26.86	17.75	22.30	79.07	1.11	7.62	3.72
Mayo	23.27	15.50	19.39	83.24	0.92	5.62	2.65
Junio	19.89	14.20	17.05	87.63	0.77	2.66	1.79
Julio	18.91	14.16	16.53	88.70	0.85	2.04	1.69
Agosto	18.31	13.92	16.11	88.53	0.88	2.40	1.89
Septiembre	19.98	13.95	16.96	88.07	0.99	3.23	2.33
Octubre	21.18	14.52	17.85	86.09	1.08	4.37	2.85
Noviembre	22.69	15.67	19.18	84.25	1.10	5.01	3.16
Diciembre	25.06	17.41	21.23	82.74	1.14	4.89	3.32
Promedio	23.43	16.38	19.90	83.28	1.04	4.68	2.95

FUENTE: Resumen registro climatológico de La Molina (Cifuentes Meza, 2016).

3.3. CARACTERÍSTICAS DEL AGUA

La fuente de agua utilizada para la investigación proviene de los reservorios de la Unidad de Riego Tecnificado, destinada para el riego de las áreas verdes y huerto agrícola de la UNALM. Se usó un tanque rotoplas de 1100 litros para almacenar agua en el área experimental.

El agua extraída del tanque rotoplas se analizó con los equipos de medición del laboratorio de recursos hídricos. El resultado obtenido se presenta en el Cuadro 2. El parámetro de la conductividad eléctrica obtenido de la muestra (0.732 ms/cm), la clasificación para el agua que corresponde es C2, que presenta una salinidad moderada, es decir puede usarse para regar casi todos los cultivos; sin embargo, se debe considerar los lavados de suelo ocasionales. El pH obtenido fue de 7.59, clasificándola como

ligeramente neutra. Finalmente, el oxígeno disuelto obtuvo 2.65 mg/L. Esto quiere decir que en el agua no existe la mayoría organismos o especies sensibles.

Cuadro 2: Análisis de parámetros del agua

Parámetro	Valor	Unidad
Conductividad Eléctrica	0.732	ms/cm
PH	7.78	...
Oxígeno Disuelto	2.55 - 2.75	...
Temperatura	22.4	°C

3.4. CARACTERÍSTICAS DEL SUELO

Se tomaron muestras de suelo en cuatro unidades experimentales (T1-R2, T2-R2, T3-R3, T4-R2), y se obtuvieron los siguientes valores de pH: 9.59, 8.43, 9.11 y 9.63 que corresponden a un suelo ligeramente alcalino, y los valores de conductividad eléctrica fueron los siguientes: 1.6, 1, 1.4 y 2 ds/m que corresponde a un suelo ligeramente salino. En el Cuadro 3, se puede visualizar los datos obtenidos por cada unidad experimental.

Cuadro 3: Análisis de parámetros de suelo.

Tratamiento	CE(ds/m)	PH
T1-R2	1.6	9.59
T2-R2	1	8.43
T3-R3	1.4	9.11
T4-R2	2	9.63

3.5. EQUIPOS, MATERIALES E INSUMOS

En el Cuadro 4, se presenta los materiales, en el Cuadro 6 se presentan los equipos y en el Cuadro 7 los insumos que fueron utilizados en la investigación.

Cuadro 4: Materiales utilizados en el proyecto

Materiales	Cantidad
Pala de filo recto	1
Letreros rotulados	12
Cuaderno de campo	1
Rastrillo	1
Tubería de luz de 1 1/2" PVC de 3m	16
Rollo de Cable #18 AWG	10
Caja de pase de plástico	8

Cuadro 5: Equipos utilizados en el proyecto

Equipos	Cantidad
Estación meteorológica Rain Bird ClimateMinder	1
Balanza	1
Equipo de laboratorio para análisis de suelo	-
Equipo de laboratorio para análisis de agua	-
Placa Arduino Mega 2560	1
Ethernet shield 5100	1
Sensor de humedad GS1	4
Sensor de humedad GS3	4
Data Logger EM50 DECAGON	2
Sensor HC – SR04	1
Sensor de flujo FS400 Efecto Hall	1
Válvula solenoide	12
Sensor HK-3022	3
Bomba 0.85 HP Pedrollo	1
Tanque Eternit de 1100 L	1
Accesorios de PVC para sistema de riego	Glb
Tablero eléctrico para bomba	1
módulo de madera	1
Césped	Glb

Cuadro 6: Insumos utilizados en el proyecto

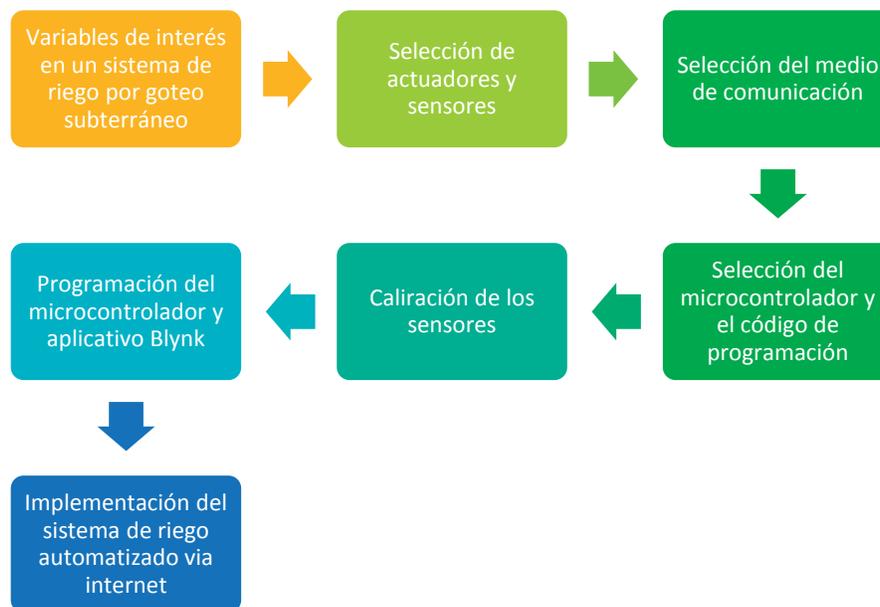
Insumos	Cantidad
Agua para riego de césped	-
Internet Router Entel Inalámbrico	1

Cuadro 7: Servicios para instalación

Servicio	Cantidad
Instalación e tablero de bomba, cerco perimétrico, módulo de madera, sistema de riego y césped	Glb

3.6. METODOLOGÍA

Para la etapa de automatización se llevó a cabo el siguiente proceso donde inicio por conocer las variables de interés del sistema de riego por goteo subterráneo, después se eligieron los sensores y actuadores según la necesidad del sistema, luego se seleccionó el medio de comunicación para escoger el microcontrolador y el código de programación. Los sensores enviaron información, sin embargo, debe guardar relación al valor real a la realidad, para eso se calibro. Finalmente, se unieron los códigos de programación y se verifico el funcionamiento del sistema instalado del sensor y actuador.



3.6.1. Variables de interés en un sistema de riego para el control, monitoreo y almacenamiento

El presente trabajo de investigación se realizó en un sistema presurizado precedente de una tesis titulada, “Requerimiento de agua para el césped americano (*stentaphrum secundatum*) empleando riego por goteo subterráneo, durante el otoño en la UNALM”, este sistema instalado se usó para su automatización

El sistema de riego por goteo subterráneo cuenta con los componentes de un sistema de riego convencional, además se tiene que tener en cuenta el sistema de filtrado, válvulas de aire y líneas de purga, esto con la finalidad de dar una máxima duración y excelente funcionamiento del sistema.

En un sistema de riego por goteo subterráneo la manguera de permanecer enterrada, para esta labor se usó la manguera RainBird modelo XFS0612500 con goteos autocompensado de caudal 2.3 litros/hora. Además, el sistema de riego contó con varias acciones de encendidos y apagados de la bomba y las electroválvulas para controlar y monitorear los parámetros de humedad de suelo, nivel de agua, presión y caudal. A continuación, se mencionan cada uno de ellos:

- El control de encendido y apagado de bomba, es una necesidad para distribuir el agua en la red de tuberías hasta los arcos de riego.
- El control de encendido y apagado de electroválvulas en cada unidad experimental, para distribuir el agua en el área del cultivo o área verde.
- El monitoreo de presión al final de la red de tuberías, antes y después del cabezal de filtrado, es necesario para decidir el momento de la limpieza de los filtros; además, brinda información de sobrepresiones o presiones bajas.
- El monitoreo de la humedad, esencial para decidir el momento y cantidad de riego, para mantener la humedad cercana a la capacidad de campo.
- El monitoreo del nivel del agua en la fuente de almacenamiento, se monitoreo para conocer el volumen de agua existente, también se programó la variable volumen para evitar el funcionamiento de la bomba cuando este vacío el tanque.
- El almacenamiento de los datos de presión y caudal, brindó una data histórica del funcionamiento del sistema para corroborar si el sistema se ha encendido o no, descartando fallas por la automatización, además de corroborar alguna ruptura o fuga de agua en la unidad experimental.
- El almacenamiento de los datos de humedad, brindó información del comportamiento del suelo y la humedad incorporada después de cada.

3.6.2. Selección de los actuadores y sensores

- El sensor de nivel de agua se utilizó para conocer la cantidad de agua en el tanque, el sensor lanza una onda de sonido y rebota con el primer obstáculo, regresando la onda al sensor, con esto podemos determinar la distancia del nivel de agua ya que conocemos la

velocidad del sonido y el tiempo en que demora la onda en salir y regresar. Este sensor se colocó en un tubo de alcantarilla de 160mm que está conectado mediante vasos comunicantes al tanque de 1100 litros.

- El sensor de presión permitió conocer las presiones en el sistema de riego, dejando de lado el uso de manómetro, debido a que se calibro en base a su información, esto se logró porque el sensor es compatible con el software de Arduino.

- El sensor de flujo se instaló en el cabezal de riego para conocer el caudal en litros por segundos que conduce en la tubería.

- La electroválvula de 12 voltios y el modulo relé, permitió el control de la apertura y cierre de las electroválvulas de cada unidad experimental, debido a que la función del relé es de interrumpir o dejar pasar el fluido eléctrico a través del solenoide, la orden es comandada desde el microcontrolador.

- La bomba y módulo relé, permitió impulsar el caudal y aumentar la presión en el sistema de la red hidráulica, la bomba estuvo conectado a un tablero de arranque directo que contó con dos pulsadores: normalmente abierto (NO) para encender la bomba y normalmente cerrado (NC) para apagar la bomba, estas fueron reemplazadas con dos módulos relé, manteniendo la configuración eléctrica de modo que una tenga conexión (NO) y el otro modulo relé sea (NC).

3.6.3. Selección del medio de comunicación

La comunicación se realizó mediante una red de internet, el Arduino Mega 2560 utilizo un Shield Ethernet 5100, el cual le permitió la comunicación del sistema con el aplicativo móvil mediante una red de internet, y el ESP32 Dev Wroom contó con recepción Wi-Fi en su estructura; además, utilizo los mismos códigos de programación de Arduino permitiendo conectarse a la red de internet de forma inalámbrica.

3.6.4. Selección del microcontrolador y códigos de programación

Existen múltiples microcontroladores del hardware Arduino, que usan el mismo entorno de programación, en este proyecto se utilizó dos microcontroladores: primero el Arduino Mega 2560 y segundo ESP 32 DEVKIT DEVKIT V1. Se usó el primero porque cuenta

con varios pines digitales, pines analógicos y pines PWM, que para fines de la investigación se necesitó de 20 entradas para los dispositivos considerados en un sistema de riego y el segundo por su gran ventaja de captar la red Wi-fi. Ambos microcontroladores usan el lenguaje C++. El entorno de programación de Arduino es de fácil acceso y comprensión, la información se puede obtener desde internet, tanto como la descarga libre del software hasta manuales para el dominio y uso de la plataforma.

El software de Arduino trabajó con la plataforma de Blynk, este permitió el dominio del proyecto elaborado con la creación de un aplicativo móvil, el cual brindó la función de controlar, monitorear, almacenar la información del sistema de riego a través de una interfaz gráfica amigable y todo esto será conectado a una red de internet en el cual podremos acceder desde cualquier parte del mundo.

3.6.5. Calibración de los sensores

El IDE de Arduino permitió insertar una ecuación de calibración para la correcta lectura del sensor. Los valores del sensor oscilan entre 0 a 1023 bits, sin embargo son valores en unidades de información llamadas bits, por lo tanto se debe convertir a bares o metros de columna de agua por eso se realizó una calibración del sensor con el valor real.

a. Calibración del sensor de presión

Para hallar la curva de calibración del sensor de presión se instaló un collarín de doble entrada, en una de las entradas se colocó un punto de toma de presión para colocar un manómetro manual, y en la otra entrada instalar el sensor de presión analógico. La curva de calibración se realizó en una hoja Excel donde se generaron dos columnas, en la primera columna se colocó la lectura en bares del manómetro y la segunda columna los datos del sensor de presión analógico en bits, logrando relacionar bares y bits.

b. Calibración del sensor de humedad

La calibración del sensor de humedad se obtuvo relacionando la señal eléctrica que lee el sensor con la humedad volumétrica obtenida por el método gravimétrico, para ello se instaló el sensor de humedad a 10 cm de profundidad en 4 unidades experimentales, se extrajo las muestras de suelo para obtener la humedad volumétrica en siete días y relacionarla con los bits leídos en el momento que se obtuvo la muestra de suelo.

c. Calibración del sensor de caudal

La curva de calibración se realizó en el banco de prueba del laboratorio de riego y drenaje, se relacionó la frecuencia leída por el sensor de caudal y los litros por segundos obtenidos por una válvula volumétrica mecánica de agua. Se logró variar el caudal con la válvula de alivio del banco de prueba y para cada caudal obtenido se relacionó con la frecuencia leída por el sensor.

d. Calibración del sensor de ultrasonido

Este sensor requiere de la fórmula de movimiento rectilíneo uniforme, donde relaciona la velocidad del sonido que es de 340 metros por segundo y el tiempo que demora la onda de sonido dividida entre 2 debido al tiempo de ida y de regreso, con la finalidad de calcular el espacio en metros del sensor hasta el primero obstáculo que encuentra. Se instaló el sensor en un tubo de alcantarilla de 160 mm, el cual comunico los niveles de agua del tanque de 1100 litros.

3.6.6. Programación del microcontrolador y aplicativo Blynk

La programación del sistema de riego se grabó en la placa Arduino Mega 2560 y ESP 32 DEVKIT DEVKIT, en estas placas se encontraron los códigos de programación de los sensores y actuadores para obtener información, leyendo los sensores y visualizarlos en el monitor serie del software de Arduino con el comando “Serial.print ()”.

La información de un sensor se puede obtener cada cierto tiempo, dependiendo del interés y la necesidad en campo de saber esa información. Para el vínculo con el aplicativo de celular, se ejecutó el lenguaje de programación propio del Blynk, la plataforma brindó las conexiones vía internet para enviar el dato obtenido al aplicativo “GrootSmart”, este código puede visualizar en la Figura 19.

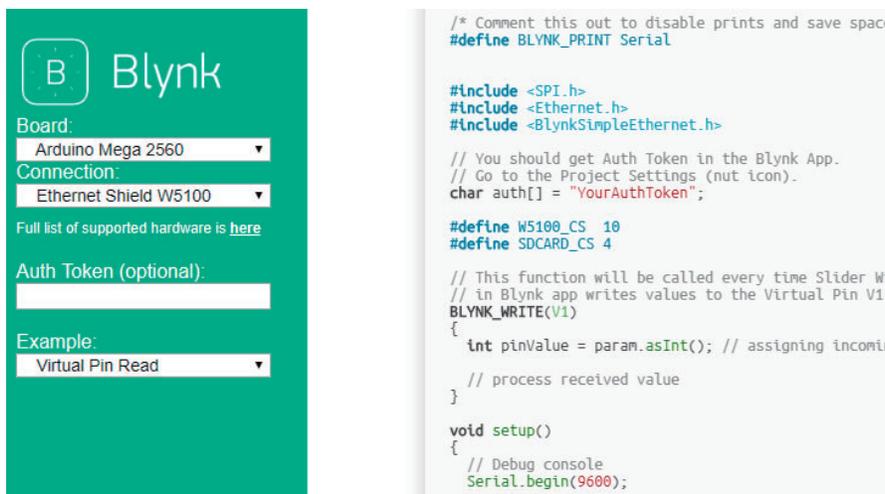


Figura 19: Código de programación Blynk.

FUENTE: Blynk.cc

Finalmente la información almacenada en la nube de internet se visualizó en el aplicativo de celular como se presenta en la Figura 20.

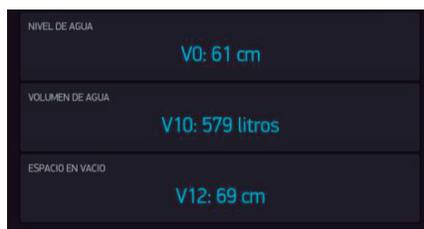


Figura 20: Interfaz de nivel de agua en el aplicativo medido con el sensor.

3.6.7. Implementación del sistema de riego automatizado vía internet

a. Instalación de actuadores

Se realizó modificaciones a los 8 arcos de riego restantes, se dispuso de una tubería paralela para colocar la válvula solenoide de ½”, para la apertura de forma manual o automatizada. Los accesorios que se utilizaron fueron: válvula solenoide ½”, pegamento, tee, reducciones, unión mixta, unión universal y cinta teflón. Se inició con la adquisición del material, luego se lijo las partes internas del tubo para aplicar pegamento y obtener un sellado hermético.

b. Instalación de sensores

Para la instalación de sensores de humedad, presión, caudal y nivel de agua se hicieron las siguientes modificaciones: para el sensor de presión se instaló un collarín de ½” de doble entrada considerando la toma de presión de forma manual con un manómetro y un sensor de presión analógico, se instaló antes, después y al final de la red de tubería del sistema de riego. Para el sensor de nivel de agua se usó un tubo de alcantarilla de 160 mm de diámetro y 1.55m de alto con la finalidad de calcular el nivel del agua, el sensor de caudal se instaló en cabezal de riego con 2 uniones universales roscado de 1” de diámetro. Finalmente el sensor de humedad se instaló en el suelo a una profundidad de 10 cm.

c. Instalación de microcontrolador

El microcontrolador Arduino Mega 2560 se instaló en una caja de 0.3 metros de ancho y 0.4 metros de altura, se atornilló en una plancha de cartón de MDF en el interior de la caja, además se instaló dentro de ella los módulos relé para el control de la bomba y electroválvulas del sistema de riego. En la parte superior a la caja se encuentra la fuente switching de 12voltios y 30 amperios y sirvió como fuente de alimentación para las 12 electroválvulas solenoides en campo. El ESP 32 DEVKIT DEVKIT se instaló intermedio a las parcelas.

d. Instalación de internet

Se utilizó un router de Entel cercano al microcontrolador, debido a que cuenta con conexión alámbrica y el cable de internet que los une es de 1.50 metros.

e. Instalación del cableado eléctrico

Se efectuó el trazado de la zanja de 0.30 metros de ancho y 0.20 metros de profundidad y se colocó tuberías de luz de 1 ½” hasta la unidad experimental, se consideró ese diámetro debido a que pasaron 18 cables AWG calibre 18, además se instaló cajas de pase cada 2 parcelas dando un total de 6 cajas de pase de 0.15 metros de ancho y 0.15 metros de largo, luego se instaló tuberías de ½” hasta llegar a los arcos de riego de cada unidad experimental y finalmente se realizó los empalmes con las 12 electroválvulas, 1 sensor de presión y 4 sensores de humedad.

f. Diseño y prueba del aplicativo

El diseño del aplicativo se realizó con la plataforma de Blynk, la plataforma brinda un entorno amigable y sencillo para la configuración de los widgets en el aplicativo, considerando los necesarios para la lectura, control y almacenamiento de los datos del sistema de riego, sin embargo los widgets no funcionarían si no se genera el código de programación en el sketch de Arduino.

Finalmente el aplicativo brinda la información obtenida en el sistema de riego, logrando el control, monitoreo y almacenamiento de información.

g. Control, monitoreo y almacenamiento de datos del sistema de riego

Se inició con el control del encendido y apagado de la bomba, una vez presurizado el sistema se encendió las 12 electroválvulas en el área experimental, para el monitoreo de los datos de presión, nivel de agua y humedad, se visualizó un crecimiento de los valores de presión en el aplicativo, además se observó el incremento de la humedad volumétrica leída por los sensores GS1, debido a que las parcelas estuvieron sometidas a un riego y finalmente el nivel del agua descendía conforme se utilizaba el agua para el riego de las unidades experimentales. En la Figura 21, se presenta la distribución del sistema de riego automatizado.

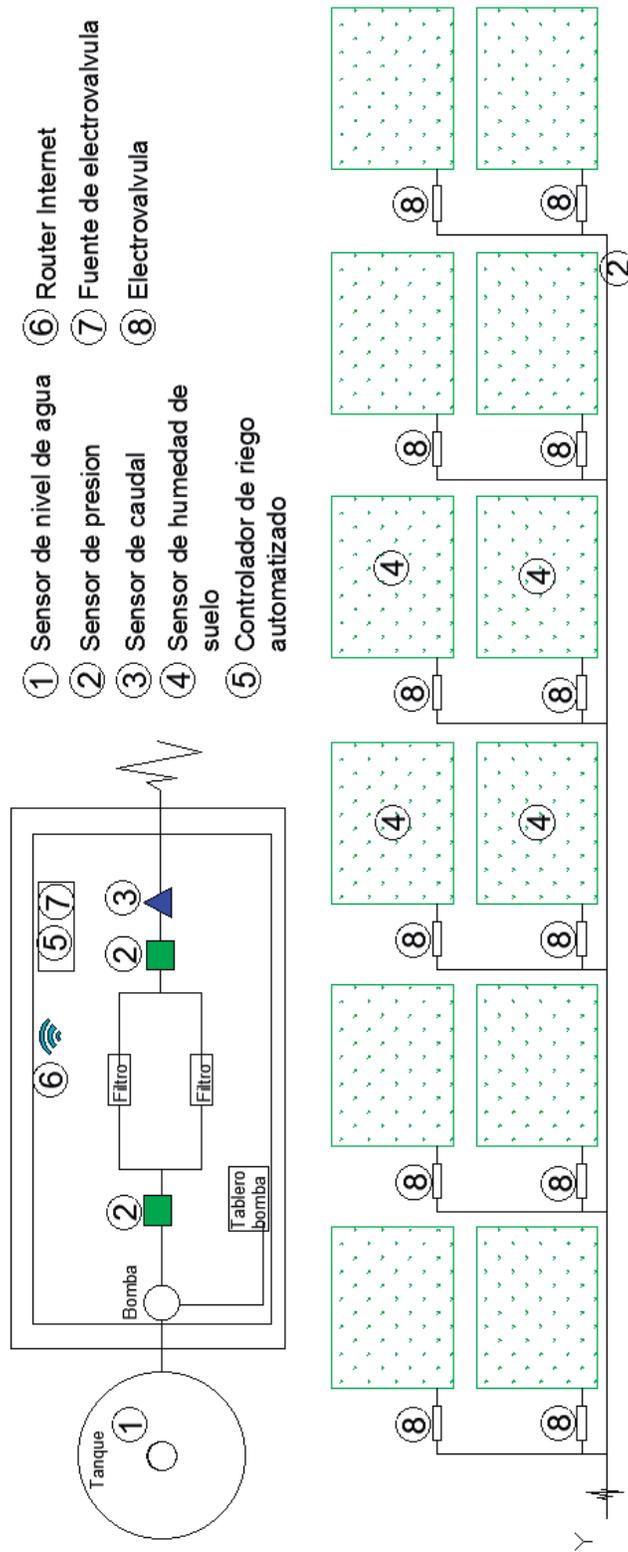


Figura 21: Plano general de automatización.

Se inició por elegir el diseño estadístico, tratamientos, repeticiones y las variables de interés para monitoreo del césped, donde los datos se obtuvieron cada quincena antes de cada poda. Además, cada 20 días se realizó el control de maleza.



3.6.8. Diseño estadístico

El trabajo de investigación se realizó con un diseño completamente al azar en 12 parcelas de césped, contando con cuatro tratamientos y tres repeticiones.

A. Tratamientos

El tratamiento se realizó en función al momento de riego. En la Cuadro 8 se presenta la descripción de cada tratamiento.

Cuadro 8: Descripción de los cuatro tratamientos

Tratamiento	Descripción
T1	Frecuencia de riego intermitente 2 veces al día
T2	Frecuencia de riego intermitente 3 veces al día
T3	Frecuencia de riego 1 vez al día
T4	Frecuencia de riego cada 3 días

B. Unidad experimental

El área de trabajo conto con 12 unidades experimentales de césped sembrado de 3.68 m^2 (1.6 m x 2.3 m) cada una como se presenta en la Figura 22. Además, cada unidad contó con un arco de riego que estuvo conformado por: válvula solenoide de 12 voltios, válvula tipo plasson de $\frac{1}{2}$ ", una válvula de aire de doble efecto de 1", un rociador 1800 UNISPRAY $\frac{1}{2}$ ", y con un punto de toma de presión.

C. Análisis estadístico

El diseño estadístico se realizó con el procedimiento estadístico ANOVA (*Analysis of variance*) o análisis de varianza en español, para un diseño completamente al azar con un nivel de significancia al 5% (prueba de turkey). El análisis estadístico se realizó con el software libre InfoStat.

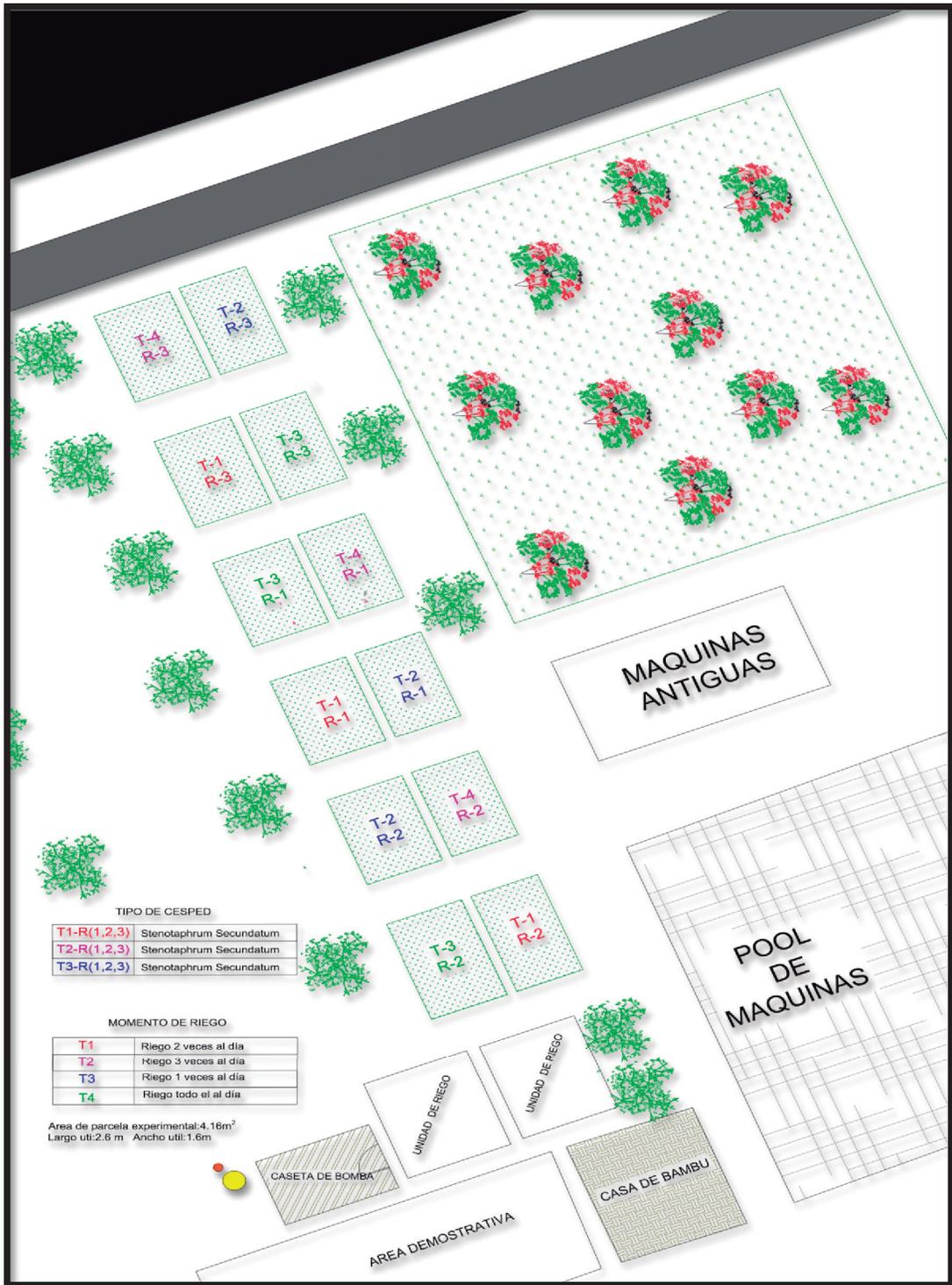


Figura 22: Ubicación geográfica del área experimental

3.6.9. Variables cuantitativas y cualitativas

A. Variables cuantitativas

Frecuencia de Riego

La frecuencia de riego fueron las siguientes: T1 – riego intermitente de 2 veces al día, T2 – riego intermitente de 3 veces al día, T3 – riego de una vez al día y finalmente T4 – riego cada 3 días. La lámina que se aplicó en todo el tiempo del proyecto fue obtenida de la evapotranspiración de referencia (ET_o). Este dato fue calculado con la ecuación de Penman – Monteith modificada a partir de los datos climáticos obtenidos por la estación meteorológica Climate Minder, ubicada a 25 metros del área de investigación.

a) Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

Se realizó la toma de datos de NDVI con el Green Seeker que mide el NDVI de forma indirecta, la medición fue capturada antes de la poda cada 15 días, considerando nueve datos por cada unidad experimental. Además, se realizó una relación de valores obtenidos con el Green Seeker para distintas calidades de césped, con la finalidad de ubicar en que rango de salud y vigor se encuentra cada unidad de césped de acuerdo a cada tratamiento.

b) Coeficiente de Uniformidad (CU)

Se determinó el coeficiente de uniformidad (CU) cada 15 días con la medición de humedad de suelo en 24 puntos en la parcela con el equipo TDR 350.

c) Altura de hoja

Se obtuvo datos de altura de hoja antes y después de cada poda, se midió con una regla de 20 centímetros tomando como referencia el nivel del suelo.

d) Profundidad de raíces in situ

Se obtuvo una muestra de raíces el 05/04/19. Esto se realizó con un cilindro muestreador de 20 cm de largo y 9 cm de diámetro como se presenta en la Figura 23, la extracción se realizó en cuatro unidades de distintos tratamientos. Para calcular la profundidad de raíces

se procedieron a lavar el suelo con agua, separando cuidadosamente la raíz y luego se tomó la medida de la longitud de esta.



Figura 23: Muestra de raíces de 20 centímetros de altura.

e) Contenido de humedad del suelo

Se obtuvo la humedad del suelo a una profundidad de 10 cm con los sensores de reflectometría en el dominio de la frecuencia (FDR) y fueron conectados al ESP 32 DEVKIT y al datalogger EM-50. El ESP 32 DEVKIT vinculó las lecturas de humedad tomadas y las enviaba al aplicativo Blynk y se pudo observar este dato, logrando almacenarla y ver la data histórica desde el aplicativo. El datalogger EM-50 almacenó los datos de los sensores de humedad cada 2 horas y el modo de descarga se realizó con un cable USB conectando un puerto al datalogger y el otro puerto a una laptop.

f) Peso fresco y peso seco

Se realizó la poda del césped cada 15 días, y se tomó de referencia el césped extraído para la obtención de peso fresco y peso seco de un área de 0.8 m² (2.0 x 0.4) metros dentro de cada unidad experimental, para obtener 12 datos de peso fresco y 12 datos de peso seco de césped.

B. Variables cualitativas

a) Color

Se realizó la inspección visual de las 12 unidades experimentales cada 15 días, se usó como referencia la tabla Munsell para clasificar el color del césped como se presenta en el Cuadro 8.

Cuadro 8: Clasificación del color

Color	
Descripción	Valoración
Olive green	3
Light olive green	2
Pale olive	1

b) Cobertura

La cobertura se analizó con el software Fiji Image J, versión 1.49k, donde se tomó una fotografía de (0.8x 0.8) metros en cada unidad experimental cada 15 días y se analizó la cobertura de verdes en la fotografía y se clasificó en rangos como se presenta en el Cuadro 9. La imagen se capturó a una altura de 1.10 metros.

Cuadro 9: Clasificación de cobertura

Cobertura		
Descripción	Rango	Valoración
3	100 - 90	Buena
2	89 - 60	Medía
1	59 - 0	Baja

c) Uniformidad

Se midió la homogeneidad del césped en la unidad experimental, para ver la calidad del césped, relacionando color, tamaño de hoja, densidad, cobertura y otros factores que afectan a las parcelas, se realizó la inspección visual y se valoró según se presenta en el Cuadro 10.

Cuadro 10: Clasificación de cobertura

Cobertura		
Clasificación	Valoración	Descripción
Alta uniformidad	3	Césped homogéneo de color verde y sin suelo desnudo.
Medía uniformidad	2	Césped medianamente homogéneo con reducidas áreas de diferente color y con pequeñas áreas de suelo desnudo o amarillento.
Baja uniformidad	1	Césped con baja homogeneidad con áreas de diferente color considerables y con medianas áreas de suelo desnudo.

3.6.10. Poda del césped

El corte del césped se dio cada 15 días, iniciándose el primer corte el 25 de febrero del 2019 con una motoguadaña, y para fines de la investigación durante los cuatro meses se utilizó una podadora manual de cuchillas helicoidales.

3.6.11. Control de maleza

El control de la hierba mala se realizó cada semana en los meses de enero y febrero y cada 20 días en marzo, abril, mayo y junio.

3.6.12. Riego

Se aplicó un riego pesado los meses de enero y febrero del 2019, con la finalidad de recuperar el césped debido a que no se encontraba en buenas condiciones, para inicios de marzo del 2019 se realizó la diferenciación del riego según sus tratamiento, el tratamiento 1 se rego 2 veces al día en el horario de 7:00 am y 5:00 pm, el tratamiento 2 se rego 3 veces al día en el horario de 7:00 am, 5:00 pm y 10:00 pm, el tratamiento 3 se rego todos los días en el horario de las 7:00 am y finalmente el tratamiento 4 se rego cada 3 días en el horario de 7:00 am.

3.6.13. Toma de muestras y datos

El muestreo del césped para el cálculo del peso húmedo de hojas se realizó con una podadora manual en un área de 0.40 metros de ancho y 2 metros de largo, este material recolectado se acumuló en una canastilla de la podadora, luego se pasó a los sobres los cuales contaban con los datos de la parcela, hora y fecha para luego llevarlas al horno de 105 °C por un día y al día siguiente se retiraba la muestra para poder pesarlas y obtener el peso hoja seca.

Para el cálculo de la cobertura se tomaron capturas de fotos de un área de 0.80 metro de ancho y 0.80 metros de largo para su análisis con el software Image J para obtener la cobertura de área verde en porcentaje. Para la profundidad de raíces se tomó 1 muestra, el 04 de abril del 2019 con un cilindro muestreador de 9 cm de diámetro y 20 cm de profundidad.

Se tomaron datos de forma diaria de la estación meteorológica Climate Minder para obtener el dato de la evapotranspiración para determinar el tiempo de riego en las parcelas de césped americano, además se registraron valores de humedad volumétrica con los sensores GS1 Decagon, presiones del sistema y datos de la válvula volumétrica antes y después del riego. Todos los datos mencionados anteriormente se obtuvieron en un aplicativo de celular en tiempo real y logrando su almacenamiento.

Para los datos de NDVI se hicieron uso del Green Seeker, capturando 9 valores por cada unidad experimental, para el cálculo de DU se usó el TDR 350 tomando 24 valores por unidad experimental para evaluar la uniformidad de riego. Los datos de altura de hoja se tomaron con una regla de 20 centímetros, usando el nivel del suelo como nivel cero.

Para finalizar con los objetivos, el sistema funciono exitosamente y con la finalidad de explicar el funcionamiento del sistema se elaboró un manual del sistema de riego automatizado.

IV. RESULTADO Y DISCUSIÓN

4.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL RIEGO POR GOTEO SUBTERRÁNEO

4.1.1. Fuente de almacenamiento

La fuente contó con un tanque rotoplas con capacidad de almacenar 1100 litros y este se conectó a un tubo de alcantarilla de 160 mm de diámetro, en la parte superior de este tubo se instaló el sensor de ultrasonido protegido con una caja de luz de 10 centímetros de ancho y 10 centímetros de largo.

Este sensor está programado para obtener el espacio de vacío entre el sensor y el espejo de agua, la altura de nivel de agua del tanque y el volumen de agua en litros, además de contar con una sentencia para que la bomba no trabaje en seco debido a los problemas de cavitación que puede generar a la bomba. Según Dewanto & Yoseph. (2018); Garcia Moreno, Bedoya Fierro, & Lopez Martinez (2013), el sensor de ultrasonido detecta el nivel de agua en un tanque y cuando no existe agua disponible comanda al módulo relé el apagado para que la bomba no opere en seco. Según lo mencionado se evitó que la bomba tenga problemas de cavitación y trabaje en seco; sin embargo, existió una formación de gases de vapor de agua dentro del tubo de 160 mm que generó una mala lectura del sensor, que conllevó a no ejecutar la programación debido a que la lectura no era la del nivel del agua sino del colchón de vapor de agua formado dentro del tubo, para evitar esto se realizó agujeros con un taladro en la tapa superior del tubo para que los gases de vapor salgan y no alteren la lectura. En la Figura 24, presenta lo mencionado anteriormente.

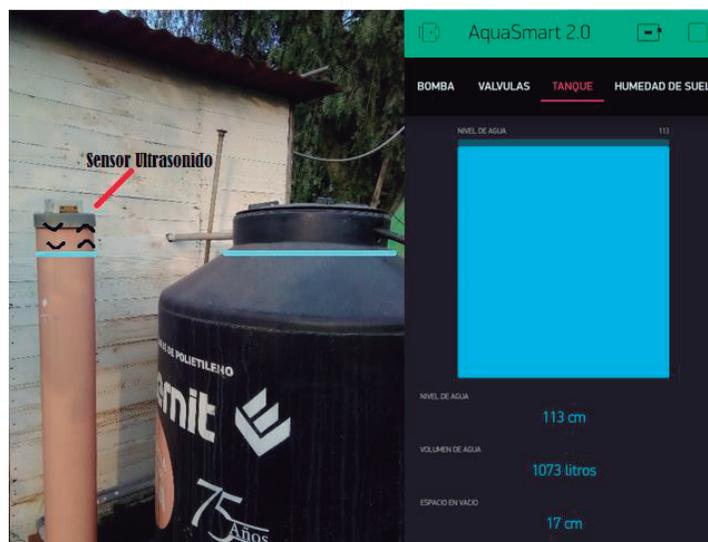


Figura 24: Interfaz de aplicativo y sensor de ultrasonido en campo

4.1.2. Cabezal de riego

En el cabezal de riego se ubicó el controlador de riego elaborado como parte de la tesis, además, se instaló un router de la marca Entel que permitió la conexión del sistema con el aplicativo móvil, para controlar, monitorear, almacenar y visualizar la información desde cualquier parte del mundo en tiempo real. En la Figura 25, se presenta el controlador de riego diseñado por parte de la tesis y la conexión con el router de Entel. Según Pérez Bladimir, Koo José, García Fernando (2014), con la tecnología de hardware libre, software libre y código abierto que nos ofrece la plataforma Arduino, tendremos la posibilidad de múltiples modificaciones e integraciones aumentando las facilidades para un sistema. De acuerdo a lo mencionado el sistema de riego por goteo subterráneo tuvo distintos tipos de requerimientos como conocer el caudal, presión, nivel de agua y humedad de suelo, además de contar con encendido y apagado de electroválvulas y bomba de agua, y esto no fue impedimento para estas tecnologías libres y de fácil acceso, en donde se logró implementar 19 dispositivos electrónicos y trabajo sin presentar fallas en investigación.

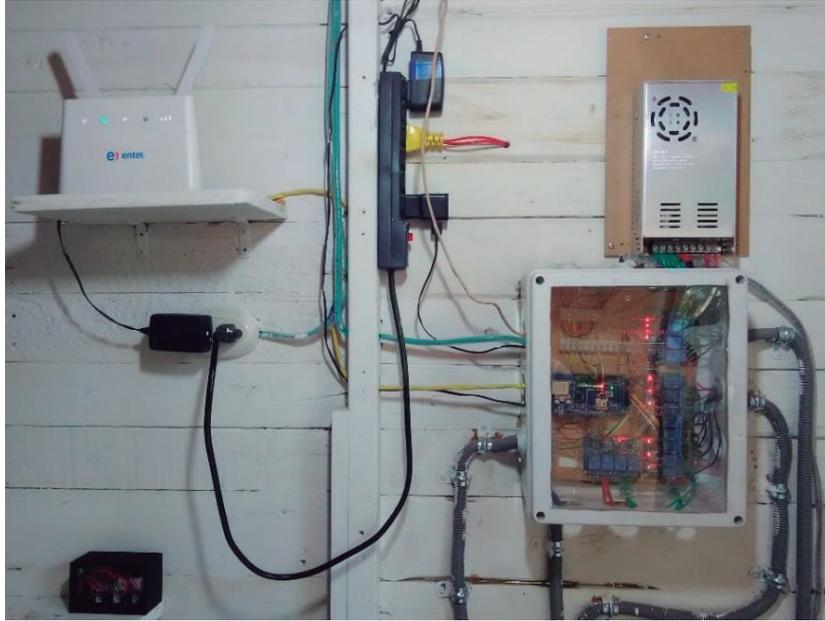


Figura 25: Controlador de riego, fuente de alimentación y router

El controlador de riego comprende desde el encendido, apagado y programación de la bomba y electroválvulas en campo, monitoreo y almacenamiento de nivel de agua, caudal, presión y humedad de suelo.

En la Figura 26, se presenta los sensores de presión analógicos y la toma de presión manual ubicados en un collarín doble de $\frac{1}{2}$ " , esto se encuentra ubicado antes y después del sistema de filtrado.



Figura 26: Sensores de presión antes y después de los filtros

El sensor de flujo que se encuentra después del sistema de filtrado, brinda un control del caudal en litros por segundos que sale del cabezal. En la Figura 27, se presenta el sensor de caudal.



Figura 27: Sensor de caudal FS400 al final del cabezal

4.1.3. Arco de riego

Los arcos de riego de las 12 unidades experimentales contaron con una electroválvula de 12 voltios. Estas electroválvulas de ½" de entrada y salida, se instalaron de forma paralela a la apertura manual como se presenta en la Figura 28.



Figura 28: Arco de riego de apertura manual y automática

4.1.4. Unidad de riego

En cuatro unidades experimentales se instalaron sensores de humedad de suelo GS1 para el monitoreo de la humedad volumétrica del suelo en tiempo real y almacenar la información para el análisis en gabinete, estas unidades experimentales fueron: T1-R1, T2-R1, T3-R1 y T4-R1. Según Ascencios et al. (2019) el sensor de humedad GS1 debe instalarse a 10 cm de profundidad en cada unidad experimental de césped americano. Los sensores de humedad de suelo se conectaron a un datalogger elaborado con la placa ESP 32 DEVKIT DEVKIT V1 y un datalogger EM-50 como se presenta respectivamente en la Figura 29 y Figura30, además se instaló un sensor de presión al final del sistema de riego para ver la presión aguas abajo y descartar posibles fallas a futuro.



Figura 29: ESP 32 DEVKIT DEVKIT V1 como Datalogger que envía información al aplicativo



Figura 30: Datalogger EM-50 Solar

4.2. DISEÑO ELECTRÓNICO

Para el diseño del proyecto se usaron sensores, microcontroladores y actuadores para obtener el control del sistema de riego, en este apartado se presentará las conexiones al microcontrolador Arduino Mega 2560. Los diagramas de las conexiones eléctricas que se realizaron con el software AutoCAD.

4.2.1. Ethernet shield 5100

El Shield de Ethernet 5100 brinda conexión de internet al microcontrolador de Arduino Mega 2560, para enviar la información. En la Figura 31, se presenta la instalación del Shield Ethernet W5100 al microcontrolador Arduino Mega 2560. Según Damian Farrow, Joseph Baker. (2015), cuando se conecta el Ethernet shield W5100 y un Arduino mega 2560, estas se comunican usando el bus SPI a través de los pines ICSP, es decir, no se puede usar para otros fines la entrada digital 4, 10, 50, 51, 52, 53. Conforme a lo mencionado, no se usaron los pines digitales 4, 10, 50, 51, 52, y 53 para la conexión con los sensores o actuadores, debido a que son ocupados por el shield ethernet w5100.

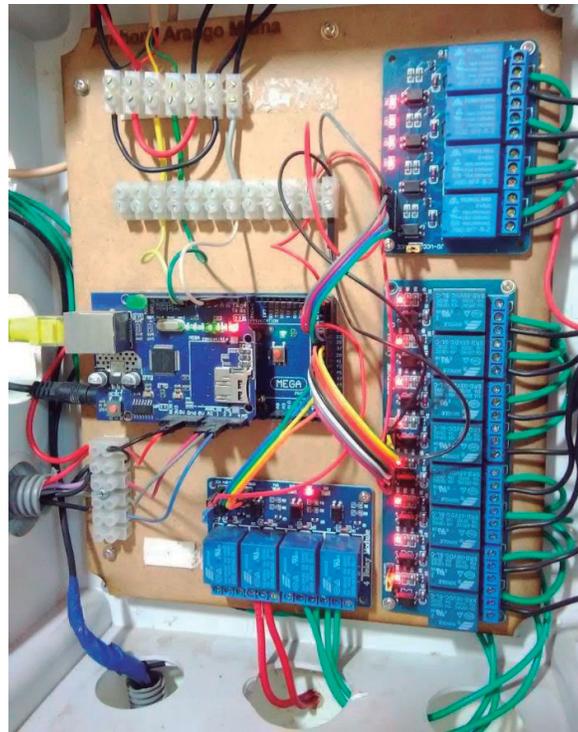


Figura 31: Instalación del Ethernet Shield a la placa Arduino Mega 2560

4.2.2. Sensor de ultrasonido

La función del sensor fue capturar la distancia del primer obstáculo en su camino, en este caso con el nivel de agua. El sensor utilizó 4 cables, dos de ellos para la alimentación: tierra (GND) y voltaje (5V), mientras que el tercer cable TRIGGER y cuarto cable ECHO, envían y reciben una onda sonora por el rebote al tocar un cuerpo. El cable Trigger está conectado al pin PWM 6 mientras que el cable ECHO está conectado al pin PWM 7, como se presenta en la Figura 32.

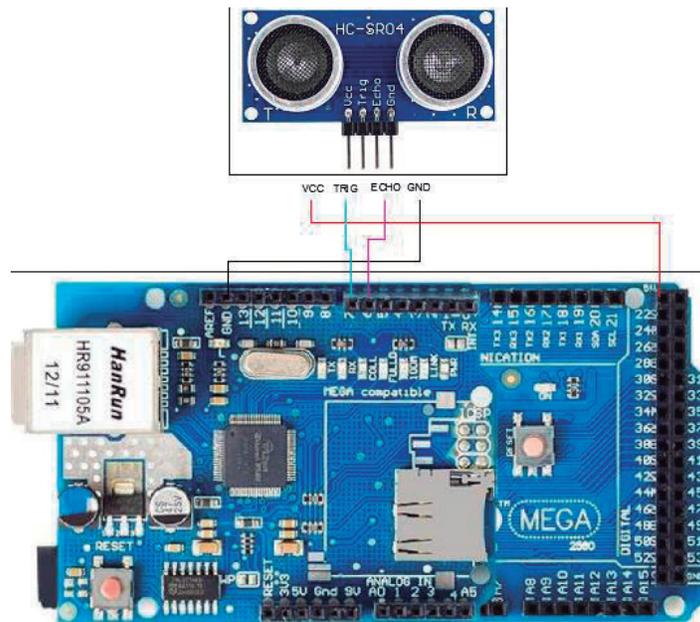


Figura 32: Conexión eléctrica del sensor de ultrasonido.

4.2.3. Sensor de presión

La función del sensor fue medir la presión de agua en el sistema de red de tuberías en un rango de 0 a 2.3 bares, con lo que se cuenta con 3 cables, dos de ellos sirven para la alimentación: tierra (GND) y voltaje (5V) y uno para la información del sensor en señales eléctricas de 0 a 1023 bits. En la Figura 33, se presentan los pines usados (A5, A6 y A7) en la placa de Arduino Mega 2560, los 2 primeros son para saber la presión antes y después de los filtros, el tercero para el sensor conectado al final de todo el sistema hidráulico aguas abajo. Según (Leon & Lema, 2019), para seleccionar el transductor de presión se debe tener en cuenta el rango de trabajo de la presión máxima y mínima, además se debe considerar la precisión estática y térmica, debido a que el fluido circundante puede variar su

temperatura. Según lo mencionado anteriormente, se realizó la selección de este sensor debido a que el rango de trabajo del sistema (0 a 2.5 bar) en donde se instaló estuvo dentro del rango del sensor (0 a 5 bar), además el fluido que circula fue agua y este no presentó cambios bruscos de temperatura, obteniendo como resultado que el sensor HK-3022 es apto para este sistema.

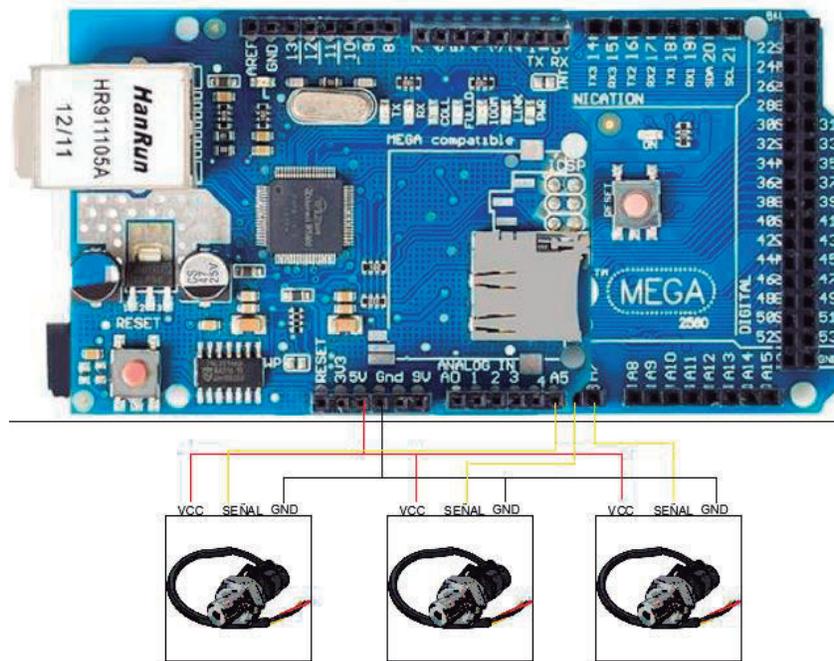


Figura 33: Conexión eléctrica del sensor de presión.

4.2.4. Sensor de caudal

La función de este sensor fue medir el caudal de agua que pasa por una tubería de 1". Posee 3 cables, dos de ellos para la alimentación: tierra (GND) y voltaje (5V) y el tercero que es DATO para envío de información al microcontrolador. Este sensor se conectó en el pin 3 como se presenta en la Figura 34. Este sensor se instaló en el cabezal de riego.

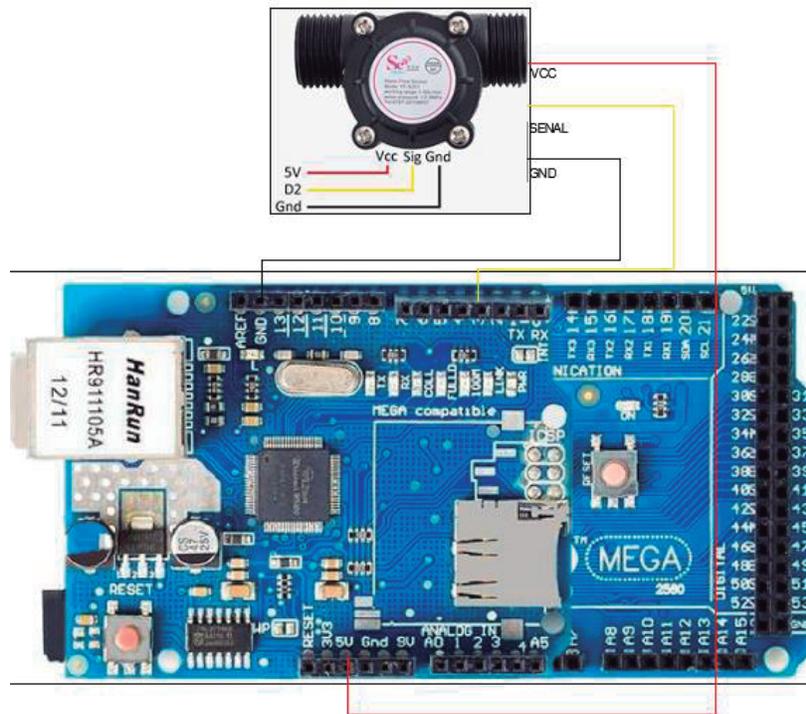


Figura 34: Conexión eléctrica del sensor de caudal.

4.2.5. Sensor de humedad del suelo

Este sensor midió la cantidad de humedad volumétrica en el suelo, utilizo 3 cables, dos de ellos para la alimentación: tierra (GND), voltaje (3.3V) y el tercero DATO para enviar de la información al microcontrolador ESP 32 DEVKIT DEVKIT V1, se instaló cuatro sensores de humedad de suelo GS1 y se conectaron en la entrada GPIO 36, GPIO 39, GPIO34 y GPIO35 como se presenta en la Figura 35. Inicialmente, se usó el Arduino Mega 2560 para la conexión de los cuatro sensores, sin embargo, la longitud del cable desde el controlador hasta la ubicación del sensor era mayor a 25 metros, eso generaba ruido informático en el envío de la información, dando un dato fluctuante. Se buscó la forma de reducir esa longitud de cableado sin embargo el Arduino Mega 2560 no contaba con conexión inalámbrica para poder desplazar el microcontrolador. Según Serna (2018), los problemas de los antiguos Arduinos era su falta conexión inalámbrica, y esto fue solucionado por el primero modelo de la placa ESP 8266 y fue mejorada por el ESP 32 DEVKIT, ambas incorporan conexión inalámbrica. De acuerdo a lo mencionado se corroboro que la placa Arduino Mega 2560 no conto mayor versatilidad debido a que

siempre tiene que ir conectada a una red alámbrica, sin embargo el ESP 32 DEVKIT brinda un desplazamiento por un radio de 29 metros a la redonda del router, y se logró instalar este microcontrolador dentro de ese radio. Por eso se se usó el ESP 32 DEVKIT DEVKIT V1 para la conexión con los sensores de humedad de suelo GS1 y permitió reducir la longitud del cableado utilizando al final 3 metros de cable #18 AWG para cada sensor, de esta manera se evitó la pérdida de información por ruido electrónico. Según Luis (2017) el ruido informático está presente en la lectura de sensores, sin embargo este puede ser reducido acortando la longitud del cableado o aplicando un algoritmo que tome información en un intervalo de tiempo para promediarlo. Corroborando lo mencionado al reducir la longitud de cableado y el ruido informático fue mínimo variando +/- 0.5% en la humedad volumétrica del suelo.

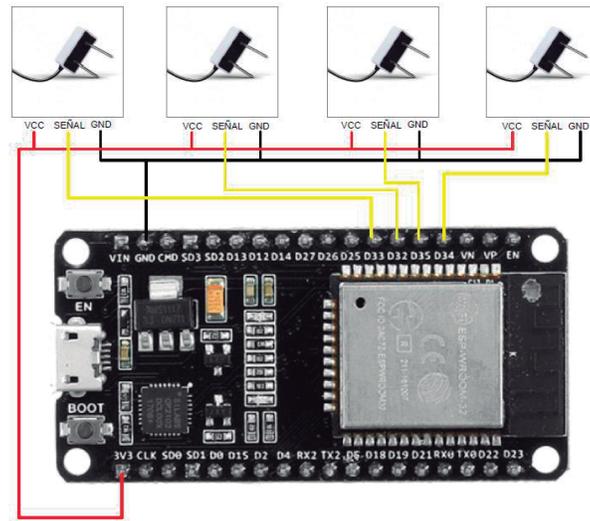


Figura 35: Conexión eléctrica del sensor de humedad de suelo al microcontrolador ESP 32 DEVKIT.

4.2.6. Módulo relé para solenoide

La función de este módulo fue controlar equipos que operan a una corriente de hasta los 230 voltios, esto fue accionado por el microcontrolador a través de los pines digitales del módulo relé. Se usó 12 relés para la conexión de 12 electroválvulas de 12 voltios y 1 amperio cada uno. Para los relés que comandaron las electroválvulas se conectaron en los pines 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40 y 41, como figura en la Figura 36. En la investigación se usó 500 metros de cable #18 AWG para conectar las electroválvulas con

el controlador, se usó este calibre de cable debido a que existe una relación directa entre el amperaje y el número del calibre, además por su bajo costo. La caída de voltaje que hubo del controlador hasta el punto más lejano fue de 1.5 voltios, esto fue compensado por la fuente switching de 12 voltios y 30 amperios que permitió llegar a los 12 voltios a cada válvula solenoide sin dificultad para su correcto funcionamiento.

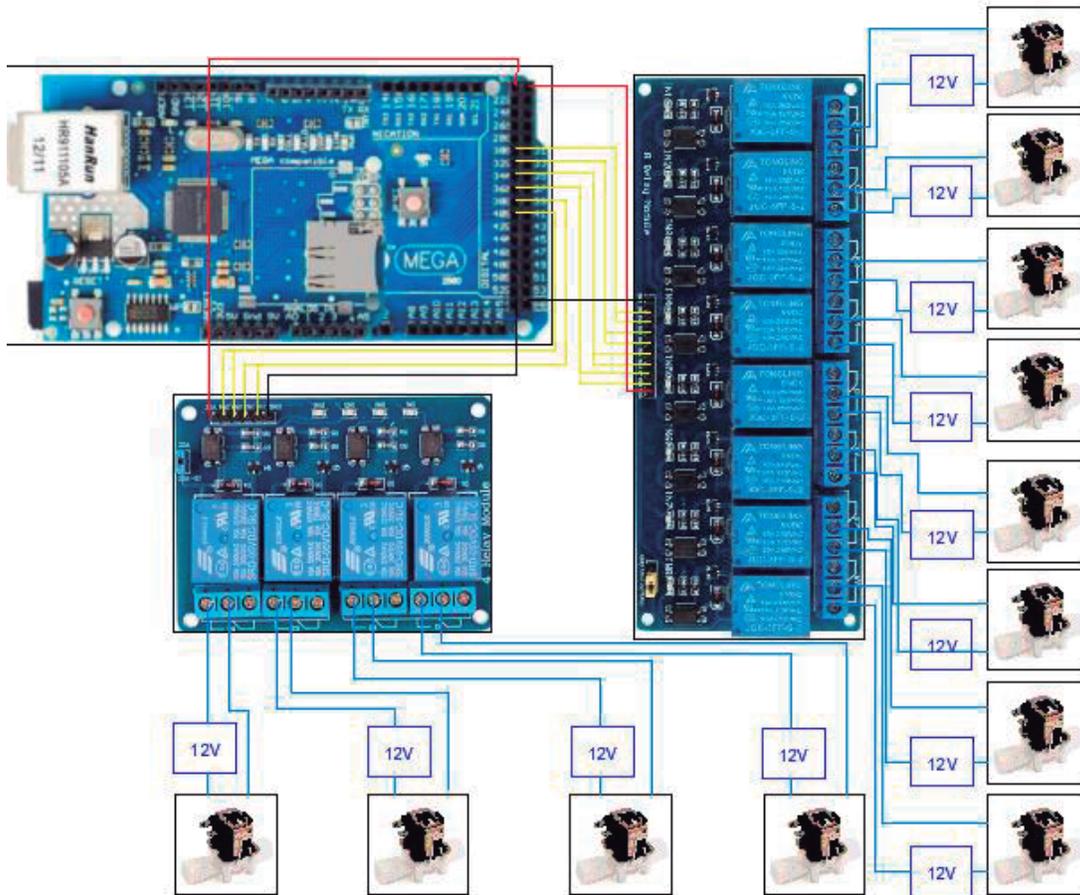


Figura 36: Conexión eléctrica del módulo relé y las electroválvulas.

4.2.7. Módulo relé para bomba

Se realizó el control de la bomba con 2 relés manejado por un voltaje de 220 voltios, uno para comandar el NO (normalmente abierto) que fue para el encendido del sistema y NC (normalmente cerrado) que fue para el apagado del sistema, para ello se usaron los pines 44 y 45 del microcontrolador como se presenta en la Figura 37.

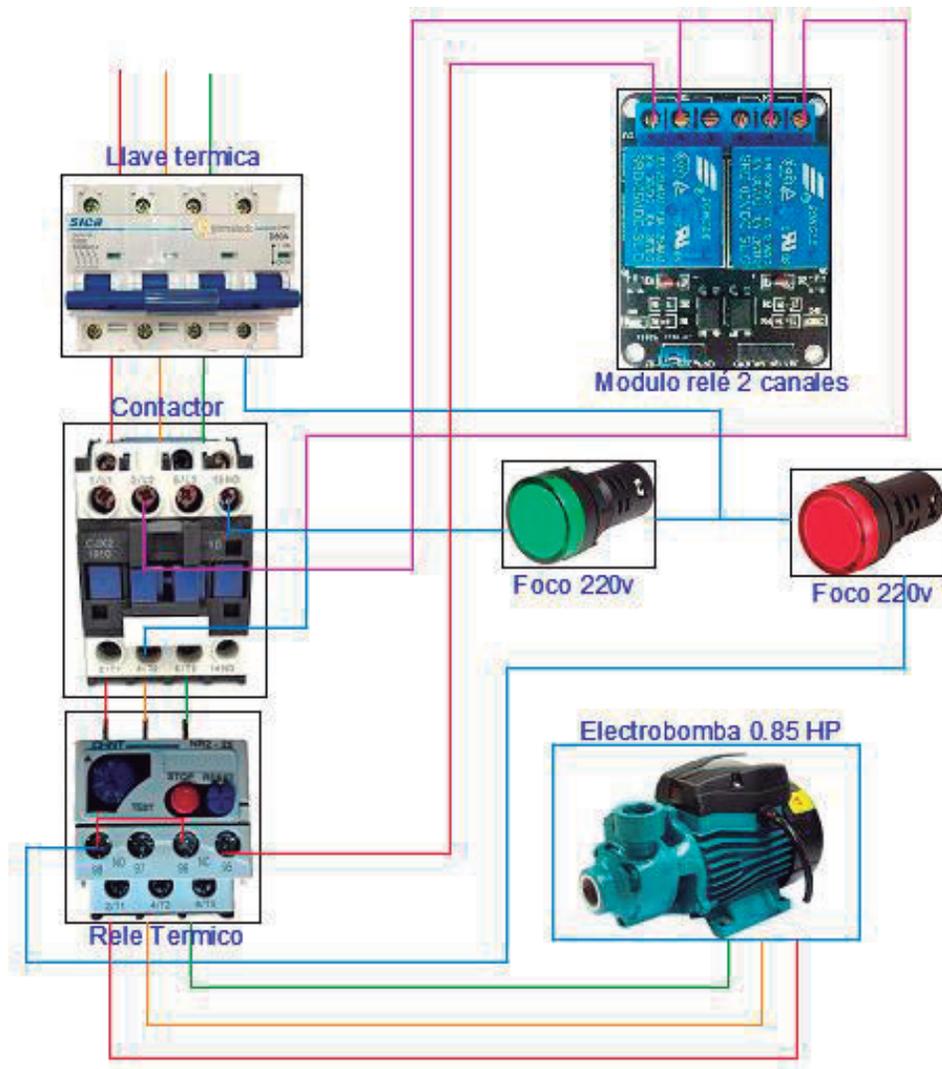


Figura 37: Conexión eléctrica del módulo relé a la bomba.

4.2.8. Módulo relé para fuente 12V

Se usó un relé para el encendido y apagado de la fuente switching de 12 voltios y 30 amperios para que no permanezca conectado las 24 horas del día y que solo realiza su funcionamiento de energizar a las electroválvulas en el momento de riego. Se usó el pin 48 del microcontrolador y las conexiones se presentan en la Figura 38.

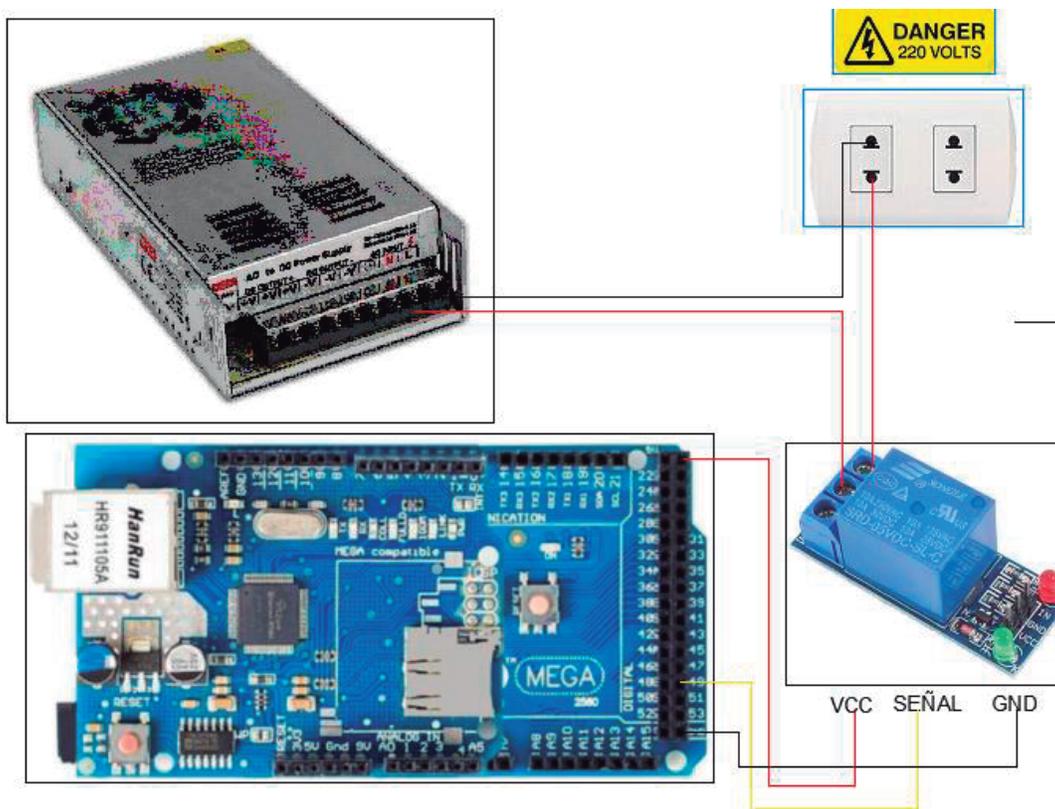


Figura 38: Conexión eléctrica del módulo relé a la fuente switching de 12V.

El Cuadro 11, muestra las conexiones detalladas de los actuadores y sensores en el microcontrolador y en qué zona (digital, analógico o PWM) se encuentra conectado.

Cuadro 11: Resumen de conexiones de sensores y actuadores al Arduino

Nº	Actuador/Sensor	Tipo de entrada	Pin de entrada	Control
1	Modulo relé nº1	Entrada digital	D 30	Válvula solenoide T1-R1
2	Modulo relé nº2	Entrada digital	D 31	Válvula solenoide T1-R2
3	Modulo relé nº3	Entrada digital	D 32	Válvula solenoide T1-R3
4	Modulo relé nº4	Entrada digital	D 33	Válvula solenoide T2-R1
5	Modulo relé nº5	Entrada digital	D 34	Válvula solenoide T2-R2
6	Modulo relé nº6	Entrada	D 35	Válvula solenoide T2-R3

7	Modulo relé n°7	digital Entrada digital	D 36	Válvula solenoide T3-R1
8	Modulo relé n°8	Entrada digital	D 37	Válvula solenoide T3-R2
9	Modulo relé n°9	Entrada digital	D 38	Válvula solenoide T3-R3
10	Modulo relé n°10	Entrada digital	D 39	Válvula solenoide T4-R1
11	Modulo relé n°11	Entrada digital	D 40	Válvula solenoide T4-R2
12	Modulo relé n°12	Entrada digital	D 41	Válvula solenoide T4-R3
13	Modulo relé n°13	Entrada digital	D 44	Bomba encender
14	Modulo relé n°14	Entrada digital	D 45	Bomba apagar
15	Modulo relé n°15	Entrada digital	D 48	Fuente 12 v 30 Amp
16	Sensor GS1 -n°1	Analógico / GPIO	GPIO	Sensor de humedad T1-R1
17	Sensor GS1 -n°2	Analógico / GPIO	GPIO	Sensor de humedad T2-R1
18	Sensor GS1 -n°3	Analógico / GPIO	GPIO	Sensor de humedad T3-R1
19	Sensor GS1 -n°4	Analógico / GPIO	GPIO	Sensor de humedad T4-R1
20	Sensor HK3022 - n°1	Entrada analógica	A 1	Presión antes de sist. filtrado
21	Sensor HK3022 - n°2	Entrada analógica	A 2	Presión después de sist. filtrado
22	Sensor HK3022 - n°3	Entrada analógica	A 3	Presión al final del sist. de riego
23	Sensor de Caudal FS 400 A - n°1	Entrada PWM digital	D 3	Contador de agua en cabezal
24	Sensor de ultrasonido	Entrada Digital PWM	D 6	Nivel de agua de tanque de 1100 Litros
		Entrada Digital PWM	D 7	

4.3. CALIBRACIÓN DE SENSORES

El microcontrolador de Arduino obtiene datos de los sensores conectados, siempre y cuando el código de programación sea el correcto para la lectura del sensor, además fue importante que se encuentre calibrado para su correcto funcionamiento, en este apartado se hablara de la calibración que se realizó a cada sensor.

4.3.1. Calibración de sensores de presión

Según Mayor et al. (2014) para obtener un valor cercano a los valores reales, el sensor de presión debe de someterse a una calibración y compensación. Por tal motivo se realizó la calibración de los tres sensores de presión en el banco de pruebas del laboratorio de riego y drenaje. Se usó un collarín con entrada doble, donde la primera entrada se usó para el sensor analógico y en la segunda entrada por el manómetro marca AZUD. Con el Excel se generó una curva de calibración del sensor donde los valores leídos del sensor analógico en bits fueron colocados en el eje de las abscisas, mientras que el valor en bares que fueron obtenidos por el manómetro se colocó en el eje de las ordenadas como se presenta en la Figura 39 y Cuadro 12.

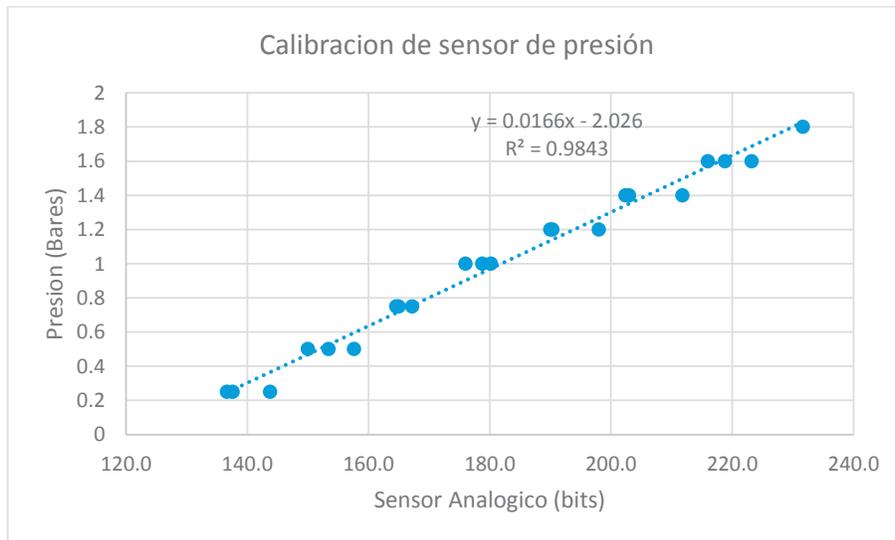


Figura 39: Curvas de calibración de los sensores de presión instalados

Cuadro 12: Ecuación de calibración del sensor de presión

Ubicación del sensor de presión	Curva de calibración	Coefficiente de correlación (R ²)
P1 (Antes del filtro)	$P1 = 0.0166 * X - 2.026$	0.9843

P = Presión en Bar , X = Valor analógico del sensor de presión en Bits

Se interpreta que la curva de calibración tiene un alto índice de correlación entre la lectura del manómetro y el sensor de presión analógico, verificando que los valores obtenidos por el sensor son cercanos a los reales entre 0 y 2 bares. La información se visualizó en el aplicativo para obtener el valor real del sistema a largo de la investigación y verificando que se usó una presión constante en el momento de riego, también sirvió para saber cada cuanto tiempo se debería realizar el mantenimiento de los filtros de anillas.

4.3.2. Calibración de sensores de caudal

Según Lalnunthari & Thanga. (2018), el sensor de efecto Hall, es uno de los sensores más confiables y precisos, la precisión se da por la relación lineal que existe entre la frecuencia de pulso del sensor y el caudal. Por tal razón la calibración de este sensor relaciono los datos obtenidos de una válvula volumétrica mecánica y la lectura de la frecuencia del sensor de caudal. El valor de la lectura de la frecuencia se colocó en el eje de las abscisas y el valor de la lectura de la válvula volumétrica en el eje de las ordenadas, como se presenta en el Figura 40. El sensor de caudal se instaló solo en el cabezal después de los filtros.

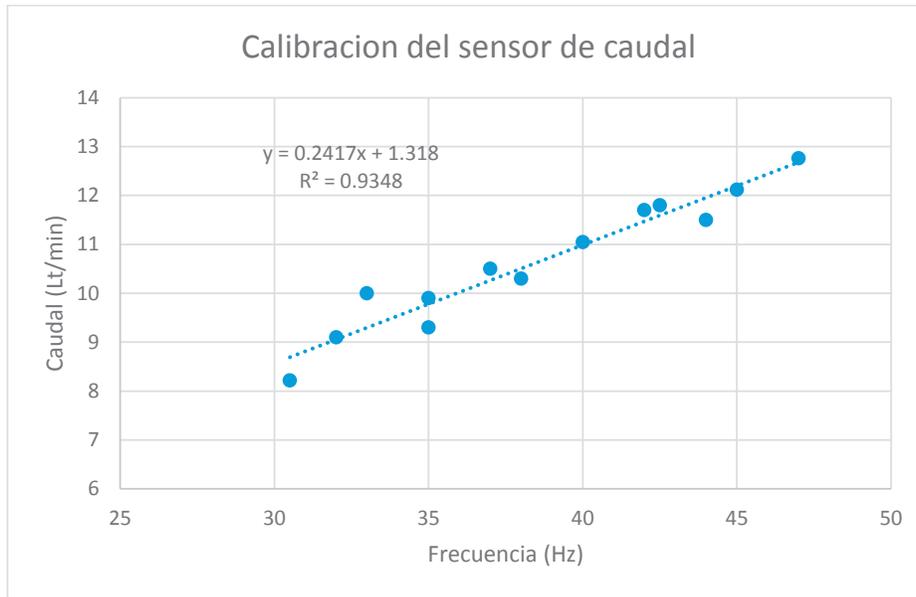


Figura 40: Curvas de calibración de los sensores de caudal instalados.

4.3.3. Calibración de sensores de humedad de suelo

La instalación del sensor de humedad de suelo se realizó en las parcelas: T1-R1, T4-R1, T3-R1 y T2-R1, a una profundidad de 10 centímetros. El sensor se conectó al IDE de Arduino para obtener los datos en corriente eléctrica con unidades en bits; es decir, que para distintos valores de humedad los bits variaron. Según Peters & Ph, (2013) la calibración debe efectuarse en el mismo terreno donde se va a instalar el sensor. Por tal razón se calibro en el mismo terreno de investigación, con la finalidad de obtener los datos en humedad volumétrica del suelo. En la Figura 41, se presenta un índice de correlación de 0.861, indicando una aceptable relación entre la humedad volumétrica y los bits captados por el sensor. En la Figura 42, se presenta la calibración de los sensores conectados al datalogger EM-50.

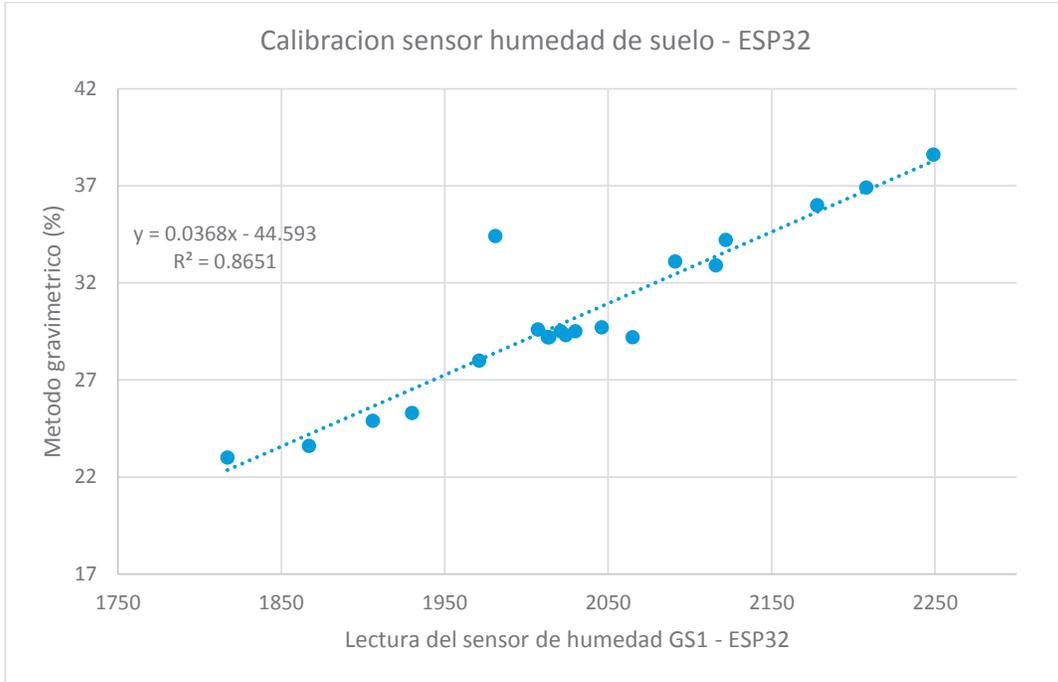


Figura 41: Curva de calibración para el sensor de humedad GS1

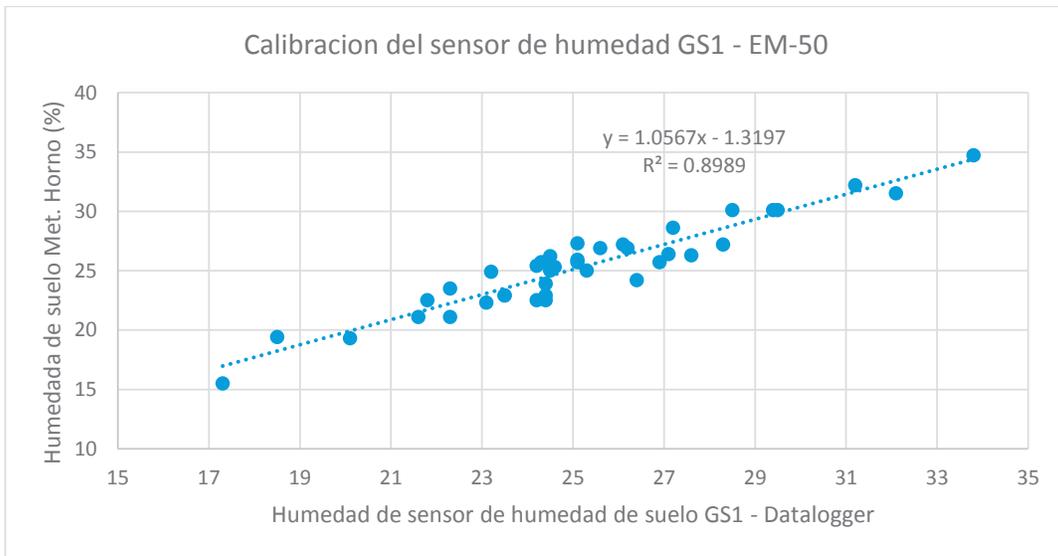


Figura 42: Curva de calibración de los sensores conectados al datalogger

4.3.4. Calibración de sensor de ultrasonido

El sensor de ultrasonido se ubicó en un tubo de PVC para alcantarilla de 160 mm que fue conectado con el tanque rotoplas mediante vasos comunicantes. La calibración se realizó

con una wincha de 3 metros, resultando los valores obtenidos similares a los reales y brindando un coeficiente de correlación de 0.998, como se muestra en la Figura 43.

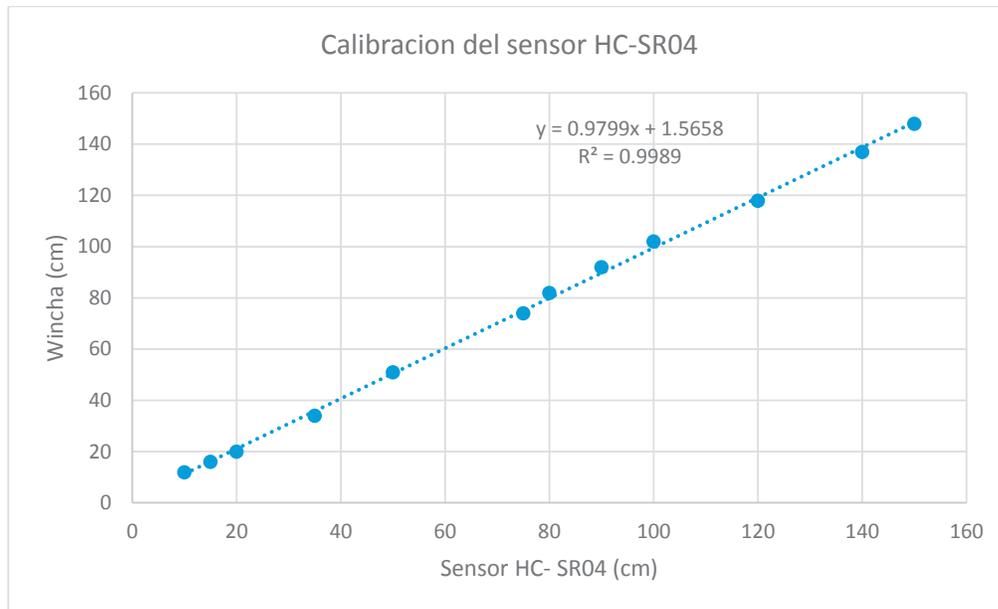


Figura 43: Curva de calibración del sensor HCSR04

Según Fuentes Martínez (2014) colocando el sensor HC-SR04 90° con respecto al nivel de agua brinda un valor aproximado al real con un error de +/- 0.5cm. Esto se ve reflejado en la curva de calibración del sensor HC-SR04.

4.3.5. Calibración de la estación meteorología Climate Minder

Los datos de la evapotranspiración diaria fueron obtenidos con la estación automática Climate Minder, para corroborar los valores si guardan relación con los reales se utilizó el tanque evaporímetro tipo A ubicado a unos 5 metros. Se tomaron valores de evapotranspiración del tanque evaporímetro cada 2 días y 3 días como se presenta en el Cuadro 121.

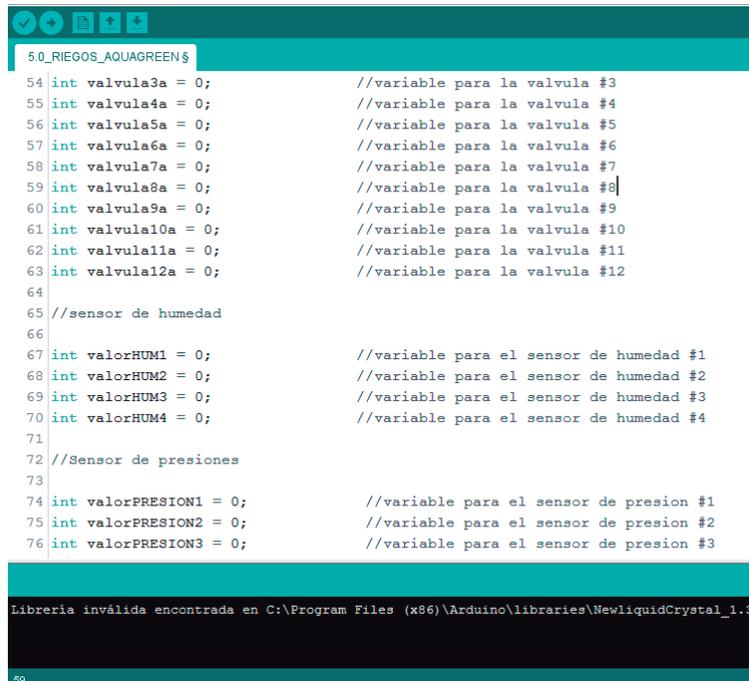
En la Figura 116, se presenta la gráfica de los valores obtenidos con el tanque evaporímetro y estación Climate Minder, donde se puede apreciar que los valores difieren de 0.3 a 2.6 mm/día. En el Cuadro 13, se presenta la sumatoria y la diferencia entre los dos métodos, la diferencia de 6.7 mm fue compensada en el riego cada 25 días.

4.4. CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN PARA EL SISTEMA DE RIEGO

Para la elaboración del código de programación se usó el lenguaje C/C++ y el lenguaje propio de Blynk, para conectar todo el sistema de riego a la placa de Arduino y pueda obtener información y comandar ordenes, todo esto se visualizó a través de un aplicativo de celular que se conectó a una red de internet para acceder al sistema de riego desde cualquier punto de ubicación. El código de programación se desarrolló en el IDE de Arduino, el cual cuenta con la siguiente estructura:

4.4.1. Declaración de variables

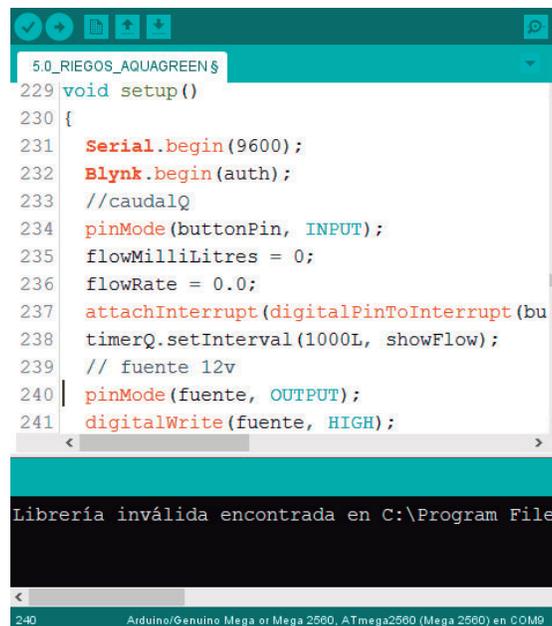
Se utilizó variables para nombrar cada sensor, actuador y fuente de alimentación en el sistema de riego con la finalidad de contar con un orden y sea entendible el código de programación. Cada sensor envía información al Arduino Mega 2560 y tiene que almacenar en una variable para su posterior uso en alguna ecuación o curva de calibración. En la Figura 44, se presenta la sección de declaración de variable en el IDE de Arduino.



```
5.0_RIEGOS_AQUAGREEN $
54 int valvula3a = 0;           //variable para la valvula #3
55 int valvula4a = 0;           //variable para la valvula #4
56 int valvula5a = 0;           //variable para la valvula #5
57 int valvula6a = 0;           //variable para la valvula #6
58 int valvula7a = 0;           //variable para la valvula #7
59 int valvula8a = 0;           //variable para la valvula #8
60 int valvula9a = 0;           //variable para la valvula #9
61 int valvula10a = 0;          //variable para la valvula #10
62 int valvula11a = 0;          //variable para la valvula #11
63 int valvula12a = 0;          //variable para la valvula #12
64
65 //sensor de humedad
66
67 int valorHUM1 = 0;           //variable para el sensor de humedad #1
68 int valorHUM2 = 0;           //variable para el sensor de humedad #2
69 int valorHUM3 = 0;           //variable para el sensor de humedad #3
70 int valorHUM4 = 0;           //variable para el sensor de humedad #4
71
72 //Sensor de presiones
73
74 int valorPRESION1 = 0;        //variable para el sensor de presion #1
75 int valorPRESION2 = 0;        //variable para el sensor de presion #2
76 int valorPRESION3 = 0;        //variable para el sensor de presion #3
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100
101
102
103
104
105
106
107
108
109
110
111
112
113
114
115
116
117
118
119
120
121
122
123
124
125
126
127
128
129
130
131
132
133
134
135
136
137
138
139
140
141
142
143
144
145
146
147
148
149
150
151
152
153
154
155
156
157
158
159
160
161
162
163
164
165
166
167
168
169
170
171
172
173
174
175
176
177
178
179
180
181
182
183
184
185
186
187
188
189
190
191
192
193
194
195
196
197
198
199
200
201
202
203
204
205
206
207
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219
220
221
222
223
224
225
226
227
228
229
230
231
232
233
234
235
236
237
238
239
240
241
242
243
244
245
246
247
248
249
250
251
252
253
254
255
256
257
258
259
260
261
262
263
264
265
266
267
268
269
270
271
272
273
274
275
276
277
278
279
280
281
282
283
284
285
286
287
288
289
290
291
292
293
294
295
296
297
298
299
300
301
302
303
304
305
306
307
308
309
310
311
312
313
314
315
316
317
318
319
320
321
322
323
324
325
326
327
328
329
330
331
332
333
334
335
336
337
338
339
340
341
342
343
344
345
346
347
348
349
350
351
352
353
354
355
356
357
358
359
360
361
362
363
364
365
366
367
368
369
370
371
372
373
374
375
376
377
378
379
380
381
382
383
384
385
386
387
388
389
390
391
392
393
394
395
396
397
398
399
400
401
402
403
404
405
406
407
408
409
410
411
412
413
414
415
416
417
418
419
420
421
422
423
424
425
426
427
428
429
430
431
432
433
434
435
436
437
438
439
440
441
442
443
444
445
446
447
448
449
450
451
452
453
454
455
456
457
458
459
460
461
462
463
464
465
466
467
468
469
470
471
472
473
474
475
476
477
478
479
480
481
482
483
484
485
486
487
488
489
490
491
492
493
494
495
496
497
498
499
500
501
502
503
504
505
506
507
508
509
510
511
512
513
514
515
516
517
518
519
520
521
522
523
524
525
526
527
528
529
530
531
532
533
534
535
536
537
538
539
540
541
542
543
544
545
546
547
548
549
550
551
552
553
554
555
556
557
558
559
560
561
562
563
564
565
566
567
568
569
570
571
572
573
574
575
576
577
578
579
580
581
582
583
584
585
586
587
588
589
590
591
592
593
594
595
596
597
598
599
600
601
602
603
604
605
606
607
608
609
610
611
612
613
614
615
616
617
618
619
620
621
622
623
624
625
626
627
628
629
630
631
632
633
634
635
636
637
638
639
640
641
642
643
644
645
646
647
648
649
650
651
652
653
654
655
656
657
658
659
660
661
662
663
664
665
666
667
668
669
670
671
672
673
674
675
676
677
678
679
680
681
682
683
684
685
686
687
688
689
690
691
692
693
694
695
696
697
698
699
700
701
702
703
704
705
706
707
708
709
710
711
712
713
714
715
716
717
718
719
720
721
722
723
724
725
726
727
728
729
730
731
732
733
734
735
736
737
738
739
740
741
742
743
744
745
746
747
748
749
750
751
752
753
754
755
756
757
758
759
760
761
762
763
764
765
766
767
768
769
770
771
772
773
774
775
776
777
778
779
780
781
782
783
784
785
786
787
788
789
790
791
792
793
794
795
796
797
798
799
800
801
802
803
804
805
806
807
808
809
810
811
812
813
814
815
816
817
818
819
820
821
822
823
824
825
826
827
828
829
830
831
832
833
834
835
836
837
838
839
840
841
842
843
844
845
846
847
848
849
850
851
852
853
854
855
856
857
858
859
860
861
862
863
864
865
866
867
868
869
870
871
872
873
874
875
876
877
878
879
880
881
882
883
884
885
886
887
888
889
890
891
892
893
894
895
896
897
898
899
900
901
902
903
904
905
906
907
908
909
910
911
912
913
914
915
916
917
918
919
920
921
922
923
924
925
926
927
928
929
930
931
932
933
934
935
936
937
938
939
940
941
942
943
944
945
946
947
948
949
950
951
952
953
954
955
956
957
958
959
960
961
962
963
964
965
966
967
968
969
970
971
972
973
974
975
976
977
978
979
980
981
982
983
984
985
986
987
988
989
990
991
992
993
994
995
996
997
998
999
1000
1001
1002
1003
1004
1005
1006
1007
1008
1009
1010
1011
1012
1013
1014
1015
1016
1017
1018
1019
1020
1021
1022
1023
1024
1025
1026
1027
1028
1029
1030
1031
1032
1033
1034
1035
1036
1037
1038
1039
1040
1041
1042
1043
1044
1045
1046
1047
1048
1049
1050
1051
1052
1053
1054
1055
1056
1057
1058
1059
1060
1061
1062
1063
1064
1065
1066
1067
1068
1069
1070
1071
1072
1073
1074
1075
1076
1077
1078
1079
1080
1081
1082
1083
1084
1085
1086
1087
1088
1089
1090
1091
1092
1093
1094
1095
1096
1097
1098
1099
1100
1101
1102
1103
1104
1105
1106
1107
1108
1109
1110
1111
1112
1113
1114
1115
1116
1117
1118
1119
1120
1121
1122
1123
1124
1125
1126
1127
1128
1129
1130
1131
1132
1133
1134
1135
1136
1137
1138
1139
1140
1141
1142
1143
1144
1145
1146
1147
1148
1149
1150
1151
1152
1153
1154
1155
1156
1157
1158
1159
1160
1161
1162
1163
1164
1165
1166
1167
1168
1169
1170
1171
1172
1173
1174
1175
1176
1177
1178
1179
1180
1181
1182
1183
1184
1185
1186
1187
1188
1189
1190
1191
1192
1193
1194
1195
1196
1197
1198
1199
1200
1201
1202
1203
1204
1205
1206
1207
1208
1209
1210
1211
1212
1213
1214
1215
1216
1217
1218
1219
1220
1221
1222
1223
1224
1225
1226
1227
1228
1229
1230
1231
1232
1233
1234
1235
1236
1237
1238
1239
1240
1241
1242
1243
1244
1245
1246
1247
1248
1249
1250
1251
1252
1253
1254
1255
1256
1257
1258
1259
1260
1261
1262
1263
1264
1265
1266
1267
1268
1269
1270
1271
1272
1273
1274
1275
1276
1277
1278
1279
1280
1281
1282
1283
1284
1285
1286
1287
1288
1289
1290
1291
1292
1293
1294
1295
1296
1297
1298
1299
1300
1301
1302
1303
1304
1305
1306
1307
1308
1309
1310
1311
1312
1313
1314
1315
1316
1317
1318
1319
1320
1321
1322
1323
1324
1325
1326
1327
1328
1329
1330
1331
1332
1333
1334
1335
1336
1337
1338
1339
1340
1341
1342
1343
1344
1345
1346
1347
1348
1349
1350
1351
1352
1353
1354
1355
1356
1357
1358
1359
1360
1361
1362
1363
1364
1365
1366
1367
1368
1369
1370
1371
1372
1373
1374
1375
1376
1377
1378
1379
1380
1381
1382
1383
1384
1385
1386
1387
1388
1389
1390
1391
1392
1393
1394
1395
1396
1397
1398
1399
1400
1401
1402
1403
1404
1405
1406
1407
1408
1409
1410
1411
1412
1413
1414
1415
1416
1417
1418
1419
1420
1421
1422
1423
1424
1425
1426
1427
1428
1429
1430
1431
1432
1433
1434
1435
1436
1437
1438
1439
1440
1441
1442
1443
1444
1445
1446
1447
1448
1449
1450
1451
1452
1453
1454
1455
1456
1457
1458
1459
1460
1461
1462
1463
1464
1465
1466
1467
1468
1469
1470
1471
1472
1473
1474
1475
1476
1477
1478
1479
1480
1481
1482
1483
1484
1485
1486
1487
1488
1489
1490
1491
1492
1493
1494
1495
1496
1497
1498
1499
1500
1501
1502
1503
1504
1505
1506
1507
1508
1509
1510
1511
1512
1513
1514
1515
1516
1517
1518
1519
1520
1521
1522
1523
1524
1525
1526
1527
1528
1529
1530
1531
1532
1533
1534
1535
1536
1537
1538
1539
1540
1541
1542
1543
1544
1545
1546
1547
1548
1549
1550
1551
1552
1553
1554
1555
1556
1557
1558
1559
1560
1561
1562
1563
1564
1565
1566
1567
1568
1569
1570
1571
1572
1573
1574
1575
1576
1577
1578
1579
1580
1581
1582
1583
1584
1585
1586
1587
1588
1589
1590
1591
1592
1593
1594
1595
1596
1597
1598
1599
1600
1601
1602
1603
1604
1605
1606
1607
1608
1609
1610
1611
1612
1613
1614
1615
1616
1617
1618
1619
1620
1621
1622
1623
1624
1625
1626
1627
1628
1629
1630
1631
1632
1633
1634
1635
1636
1637
1638
1639
1640
1641
1642
1643
1644
1645
1646
1647
1648
1649
1650
1651
1652
1653
1654
1655
1656
1657
1658
1659
1660
1661
1662
1663
1664
1665
1666
1667
1668
1669
1670
1671
1672
1673
1674
1675
1676
1677
1678
1679
1680
1681
1682
1683
1684
1685
1686
1687
1688
1689
1690
1691
1692
1693
1694
1695
1696
1697
1698
1699
1700
1701
1702
1703
1704
1705
1706
1707
1708
1709
1710
1711
1712
1713
1714
1715
1716
1717
1718
1719
1720
1721
1722
1723
1724
1725
1726
1727
1728
1729
1730
1731
1732
1733
1734
1735
1736
1737
1738
1739
1740
1741
1742
1743
1744
1745
1746
1747
1748
1749
1750
1751
1752
1753
1754
1755
1756
1757
1758
1759
1760
1761
1762
1763
1764
1765
1766
1767
1768
1769
1770
1771
1772
1773
1774
1775
1776
1777
1778
1779
1780
1781
1782
1783
1784
1785
1786
1787
1788
1789
1790
1791
1792
1793
1794
1795
1796
1797
1798
1799
1800
1801
1802
1803
1804
1805
1806
1807
1808
1809
1810
1811
1812
1813
1814
1815
1816
1817
1818
1819
1820
1821
1822
1823
1824
1825
1826
1827
1828
1829
1830
1831
1832
1833
1834
1835
1836
1837
1838
1839
1840
1841
1842
1843
1844
1845
1846
1847
1848
1849
1850
1851
1852
1853
1854
1855
1856
1857
1858
1859
1860
1861
1862
1863
1864
1865
1866
1867
1868
1869
1870
1871
1872
1873
1874
1875
1876
1877
1878
1879
1880
1881
1882
1883
1884
1885
1886
1887
1888
1889
1890
1891
1892
1893
1894
1895
1896
1897
1898
1899
1900
1901
1902
1903
1904
1905
1906
1907
1908
1909
1910
1911
1912
1913
1914
1915
1916
1917
1918
1919
1920
1921
1922
1923
1924
1925
1926
1927
1928
1929
1930
1931
1932
1933
1934
1935
1936
1937
1938
1939
1940
1941
1942
1943
1944
1945
1946
1947
1948
1949
1950
1951
1952
1953
1954
1955
1956
1957
1958
1959
1960
1961
1962
1963
1964
1965
1966
1967
1968
1969
1970
1971
1972
1973
1974
1975
1976
1977
1978
1979
1980
1981
1982
1983
1984
1985
1986
1987
1988
1989
1990
1991
1992
1993
1994
1995
1996
1997
1998
1999
2000
2001
2002
2003
2004
2005
2006
2007
2008
2009
2010
2011
2012
2013
2014
2015
2016
2017
2018
2019
2020
2021
2022
2023
2024
2025
2026
2027
2028
2029
2030
2031
2032
2033
2034
2035
2036
2037
2038
2039
2040
2041
2042
2043
2044
2045
2046
2047
2048
2049
2050
2051
2052
2053
2054
2055
2056
2057
2058
2059
2060
2061
2062
2063
2064
2065
2066
2067
2068
2069
2070
2071
2072
2073
2074
2075
2076
2077
2078
2079
2080
2081
2082
2083
2084
2085
2086
2087
2088
2089
2090
2091
2092
2093
2094
2095
2096
2097
2098
2099
2100
2101
2102
2103
2104
2105
2106
2107
2108
2109
2110
2111
2112
2113
2114
2115
2116
2117
2118
2119
2120
2121
2122
2123
2124
2125
2126
2127
2128
2129
2130
2131
2132
2133
2134
2135
2136
2137
2138
2139
2140
2141
2142
2143
2144
2145
2146
2147
2148
2149
2150
2151
2152
2153
2154
2155
2156
2157
2158
2159
2160
2161
2162
2163
2164
2165
2166
2167
2168
2169
2170
2171
2172
2173
2174
2175
2176
2177
2178
2179
2180
2181
2182
2183
2184
2185
2186
2187
2188
2189
2190
2191
2192
2193
2194
2195
2196
2197
2198
2199
2200
2201
2202
2203
2204
2205
2206
2207
2208
2209
2210
2211
2212
2213
2214
2215
2216
2217
2218
2219
2220
2221
2222
2223
2224
2225
2226
2227
2228
2229
2230
2231
2232
2233
2234
2235
2236
2237
2238
2239
2240
2241
2242
2243
2244
2245
2246
2247
2248
2249
2250
2251
2252
2253
2254
2255
2256
2257
2258
2259
2260
2261
2262
2263
2264
2265
2266
2267
2268
2269
2270
2271
2272
2273
2274
2275
2276
2277
2278
2279
2280
2281
2282
2283
2284
2285
2286
2287
2288
2289
2290
2291
2292
2293
2294
2295
2296
2297
2298
2299
2300
2301
2302
2303
2304
2305
2306
2307
2308
2309
2310
2311
2312
2313
2314
2315
2316
2317
2318
2319
2320
2321
2322
2323
2324
2325
2326
2327
2328
2329
2330
2331
2332
2333
2334
2335
2336
2337
2338
2339
2340
2341
2342
2343
2344
2345
2346
2347
2348
2349
2350
2351
2352
2353
2354
2355
2356
2357
2358
2359
2360
2361
2362
2363
2364
2365
2366
2367
2368
2369
2370
2371
2372
2373
2374
2375
2376
2377
2378
2379
2380
2381
2382
2383
2384
2385
2386
2387
2388
2389
2390
2391
2392
2393
2394
2395
2396
2397
2398
2399
2400
2401
2402
2403
2404
2405
2406
2407
2408
2409
2410
2411
2412
2413
2414
2415
2416
2417
2418
2419
2420
2421
2422
2423
2424
2425
2426
2427
2428
2429
2430
2431
2432
2433
2434
2435
2436
2437
2438
2439
2440
2441
2442
2443
2444
2445
2446
2447
2448
2449
2450
2451
2452
2453
2454
2455
2456
2457
2458
2459
2460
2461
2462
2463
2464
2465
2466
2467
2468
2469
2470
2471
2472
2473
2474
2475
2476
2477
2478
2479
2480
2481
2482
2483
2484
2485
2486
2487
2488
2489
2490
2491
2492
2493
2494
2495
2496
2497
2498
2499
2500
2501
2502
2503
2504
2505
2506
2507
2508
2509
2510
2511
2512
2513
2514
2515
2516
2517
2518
2519
2520
2521
2522
2523
2524
2525
2526
2527
2528
2529
2530
2531
2532
2533
2534
2535
2536
2537
2538
2539
2540
2541
2542
2543
2544
2545
2546
2547
2548
2549
2550
2551
2552
2553
2554
2555
2556
2557
2558
2559
2560
2561
2562
2563
2564
2565
2566
2567
256
```

4.4.2. Programación del código (Void setup)

Esta sección del IDE de Arduino fue para definir de qué forma trabajaran los pines de la placa de Arduino, se puede elegir que trabaje como: pin de entrada o INPUT (ingreso de información a la placa de Arduino) o pin de salida u OUTPUT (salida de información de la placa Arduino al sistema de riego) como se muestra en la Figura 45. Esta sección solo se ejecuta una sola vez después de enviar el código de programación a la placa de Arduino Mega 2560 y ESP 32 DEVKIT DEVKIT V1; además se introduce de cómo puede inicializar el actuador (fuente de 12 voltios, electroválvula y bomba), para este caso se puso un código de seguridad que se inicia en estado apagado.



```
5.0_RIEGOS_AQUAGREEN$
229 void setup()
230 {
231   Serial.begin(9600);
232   Blynk.begin(auth);
233   //caudalQ
234   pinMode(buttonPin, INPUT);
235   flowMilliLitres = 0;
236   flowRate = 0.0;
237   attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(buttonPin), showFlow, RISING);
238   timerQ.setInterval(1000L, showFlow);
239   // fuente 12v
240   pinMode(fuente, OUTPUT);
241   digitalWrite(fuente, HIGH);

```

Librería inválida encontrada en C:\Program Files

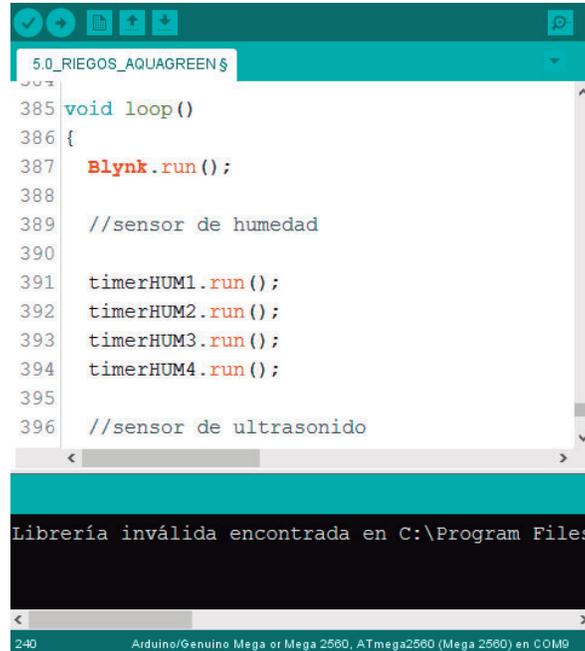
240 Arduino/Genuino Mega or Mega 2560, ATmega2560 (Mega 2560) en COM9

Figura 45: IDE de Arduino, void setup.

4.4.3. Ejecución repetitiva (Void loop)

Según Torrente Artero (2013), la función void loop se ejecuta luego del void setup, de forma repetitiva hasta que la placa de Arduino es desconectada de la fuente de alimentación o se presiona el botón RESET. Esta función ejecuta el código de programación de todos los sensores y actuadores programados correctamente desde un inicio, cumpliendo la función que se le asignó. El IDE de Arduino lo leerá desde la primera fila hasta la última y la lectura será constante formando un bucle infinito.

Cuando se trabaja con la plataforma de Blynk el void loop no debe estar cargado de códigos de programación, solo se coloca un código que termine con la inicial “.run” como se presenta en la Figura 46.



```
5.0_RIEGOS_AQUAGREEN $
385 void loop()
386 {
387   Blynk.run();
388
389   //sensor de humedad
390
391   timerHUM1.run();
392   timerHUM2.run();
393   timerHUM3.run();
394   timerHUM4.run();
395
396   //sensor de ultrasonido
```

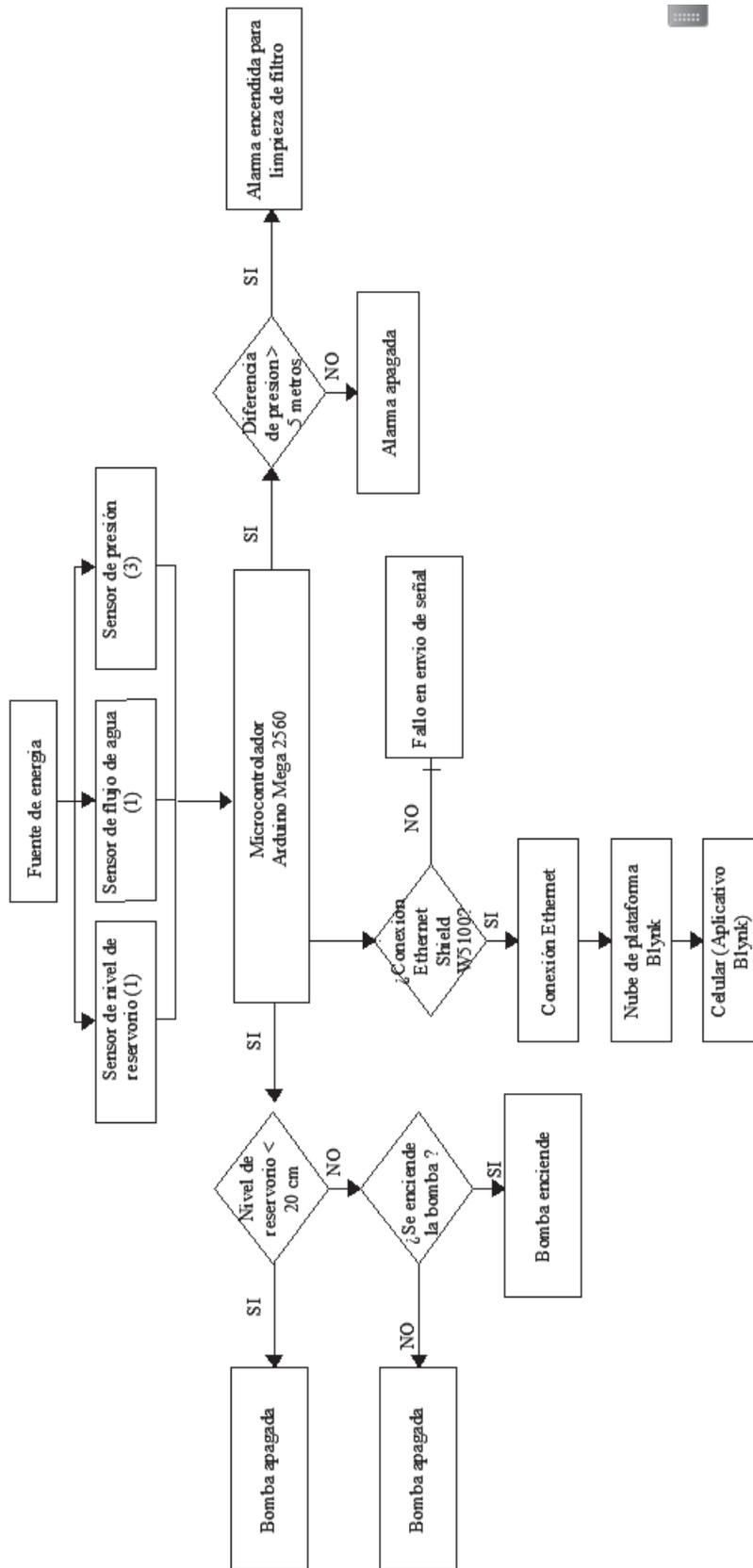
Librería inválida encontrada en C:\Program Files

240 Arduino/Genuino Mega or Mega 2560, ATmega2560 (Mega 2560) en COM9

Figura 46: IDE de Arduino, void loop.

4.4.4. Diagrama de flujo

Se elaboró un diagrama de flujo para la comprensión de la ejecución de la programación, en la Figura 47, se presenta el diagrama de flujo del código de programación del controlador elaborado para el sistema de riego por goteo subterráneo, se definió las variables, también la función de entrada o salida del actuador o sensor (OUTPUT o INPUT), se estableció la conexión con el puerto serial, los comandos de encendido y apagado de la bomba, electroválvulas y fuente de alimentación, finalmente la lectura de los sensores se mostraron en el monitor serie y en el aplicativo.



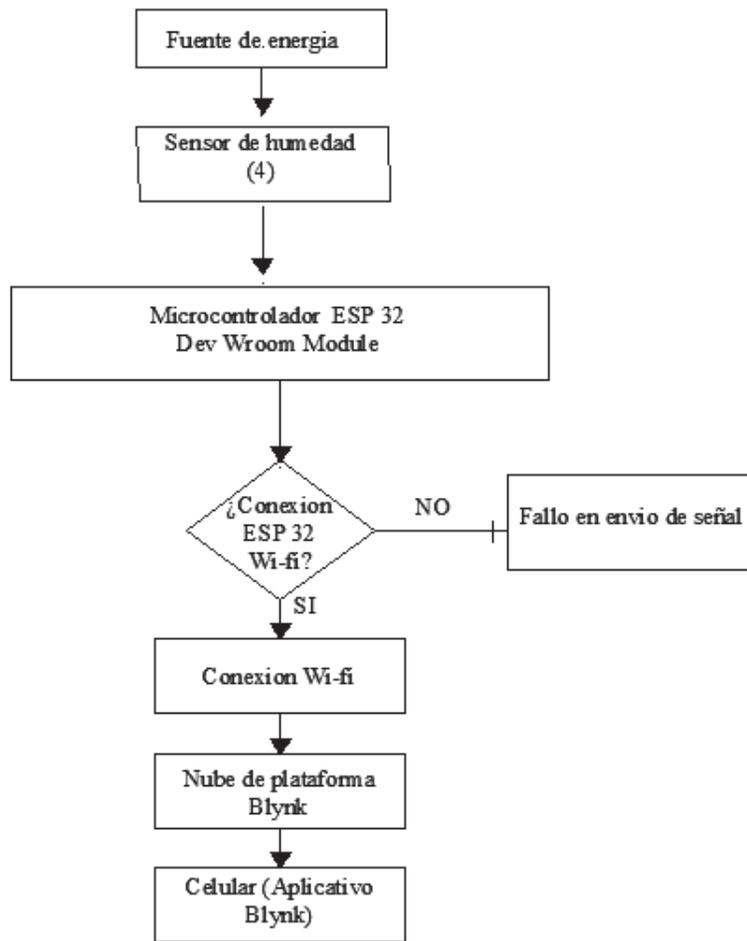


Figura 47: Diagrama de flujo del proceso de automatización

4.5. APLICATIVO

La plataforma de Blynk brinda un diseño amigable para la elaboración del aplicativo, a continuación se presentara las múltiples pestañas o menús creados para el control, monitoreo y almacenamiento de datos del sistema de riego.

4.5.1. Visualización inicial

El aplicativo Blynk permite la creación de varios proyectos en su interfaz, para este caso se creó el proyecto “GrootSmart” como se presenta en la Figura 48, para usar la aplicación se seleccionó el proyecto vinculado con el sistema de riego a través de un red de internet, el usuario obtendrá información del sistema de riego permitiendo su control, monitoreo, programación y visualizar datos almacenados.



Figura 48: Entorno inicial del aplicativo

La elaboración del aplicativo se realizó con la plataforma de Blynk que permitió arrastrar los widget que presentan distintas funciones como: pulsadores, diagrama de barras, temporizadores, leds virtuales, etc. Para el funcionamiento del widget este tiene que ir acompañado con el código de programación de la plataforma de Blynk en el IDE de Arduino, para obtener la lectura de los sensores, control de actuadores y almacenamiento de información en el aplicativo de celular.

4.5.2. Menú de encendido y apagado de bomba y fuente de 12v

Se diseñó la interfaz para el control del encendido y apagado de la bomba, manteniendo las botoneras básicas de un tablero de bomba: el normalmente abierto (NO) y el normalmente cerrado (NC), además se incluyó el encendido y apagado de la fuente de 12 voltios, esto debido que la fuente se encontraba conectada las 24 horas y para minimizar su funcionamiento se creó ese botón, disminuyendo el tiempo de encendido hasta una hora como máximo, reduciendo el costo de energía eléctrica consumida, convirtiéndolo en un sistemas eficiente frente a otras tecnologías. En la Figura 49, se presenta la interfaz del control de bombas y fuente de 12 voltios.



Figura 49: Menú para el control de la bomba y fuente de 12v

4.5.2. Menú de electroválvulas

Se diseñó la interfaz para tener independencia en el riego en las 12 parcelas demostrativas, porque el proyecto requiere de un tiempo de riego variado en cada uno de los tratamientos. En la Figura 50, se presenta un botón para cada parcela de riego. En el aplicativo se podrá observar si la válvula se encuentre apagada, marca “*off*” y si la válvula se encuentre encendida, esta marca “*on*”.



Figura 50: Menú para el control de las electroválvulas

4.5.3. Menú de nivel de agua en tanque

En la Figura 52, se presenta una gráfica de un tanque con agua que conforme se va usando el agua el nivel de este descende, también se presenta tres parámetros: el primero es el nivel de agua en centímetros con respecto a la base. El segundo muestra el volumen en litros existentes en el tanque y el tercero muestra el espacio de vacío que existe en el tanque.

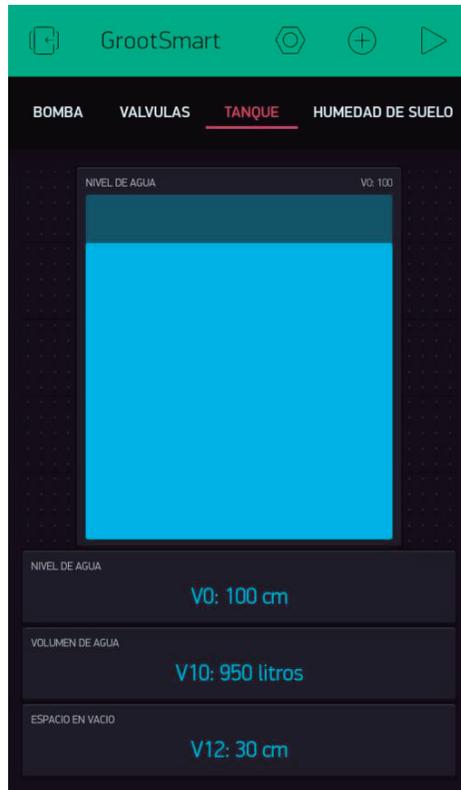


Figura 51: Menú para el monitoreo del nivel del agua

4.5.4. Menú de humedad de suelo

Los datos de humedad de suelo fueron obtenidos por el sensor de humedad GS1 Decagon y se pueden leer en el menú del aplicativo como se presenta en la Figura 52. Los datos de los cuatro sensores GS1 instalados en las parcelas demostrativas: T1-R1, T2-R1, T3-R1, T4-R1, respectivamente, se presenta en cada widget del aplicativo.



Figura 52: Menú para el monitoreo del sensor de humedad de suelo

4.5.5. Menú de presiones

En la Figura 53, se presenta los datos de tres sensores de presión en metros y bares para monitorear las presiones de trabajo en el sistema; además, se conoció el tiempo en que se debe realizar la limpieza de los filtros, esto activo el encendido de un led y enviando un mensaje de alerta al celular, notificando que los filtros se encuentran sucios.



Figura 53: Menú para el monitoreo de presiones

4.5.6. Menú de caudal

Este aplicativo leyó el caudal consumido en tiempo real, y ayudo a descartar fugaz de agua. El de agua era contaste en las 12 parcelas debido a que contaron con el mismo número de goteo y líneas de riego, si el caudal aumenta numéricamente al consumo promedio esto indico que existe una fuga de agua en el sistema, en este caso el caudal promedio de la investigación fue de 5.5 lt/s. En la Figura 54, se presenta la interfaz del sensor de caudal instalador en la caseta de riego, este valor puede ser visto en litros por minutos (Lt/min) o litros por segundo (Lt/s).

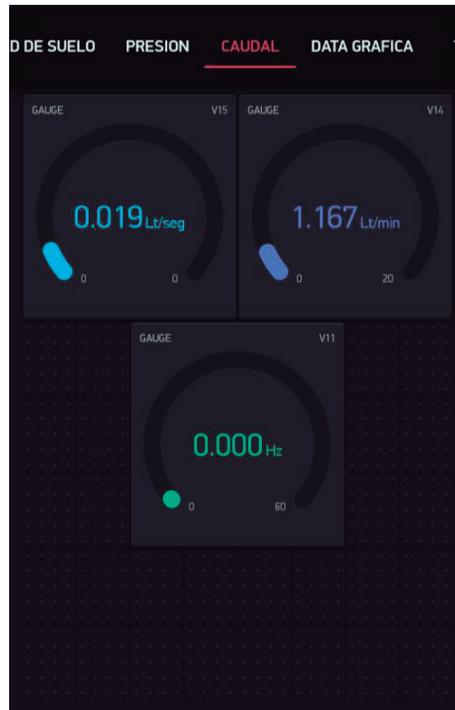


Figura 54: Menú para el control de las electroválvulas

4.5.7. Menú de almacenamiento de información

En la Figura 55 y 56, se presenta tres graficas: presión vs tiempos, caudal vs tiempo y humedad volumétrica vs tiempo, respectivamente. En la primera grafica se presentan las tres presiones monitoreadas en el sistema de riego presurizado: presión antes de filtro, presión después de filtro y al final del sistema. Los sensores de presión instalados leyeron el incremento y descenso de presión en la tubería de agua y se almacena para descartar posibles fugas o fallas en algún turno de riego. En el segundo grafico se ve la relación del caudal (lt/s) y el consumo del agua en el tiempo. Según se presenta en la Figura 58, existen picos que llegan hasta los 12 lt/seg, esto es porque las unidades experimentales se encuentran vacías hasta llenar las líneas de goteros y se presurice hasta obtener un caudal constante. Además, se presenta en la gráfica un riego de cuatro turnos que inicio a las 7:00 am y culminó a las 7:47 am, esto va de acuerdo con los tratamientos de la investigación donde los tiempos de riego eran variables de acuerdo a la hora del día.



Figura 55: Menú de almacenamiento de información de presiones y caudales.

En la Figura 59, se presenta la gráfica humedad volumétrica del suelo vs tiempo en un intervalo de siete días, la gráfica corresponde al tratamiento T3 (riego una vez al día), se presenta la variación de la humedad del suelo a la largo del día, mostrando una mayor humedad de suelo a las 7am , debido que fue la hora de inicio del riego y en el transcurso del día este disminuye por factores como la evapotranspiración de la planta, la evaporación del agua por la presencia del sol e incremento de la temperatura.

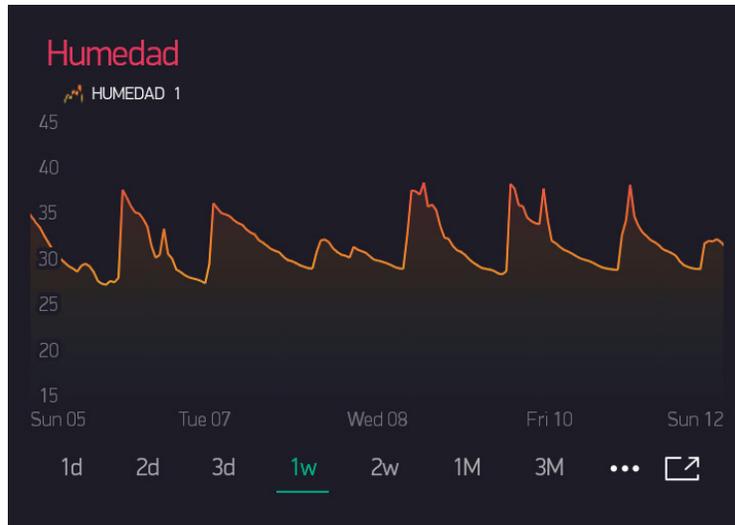


Figura 56: Menú de almacenamiento de información de humedad volumétrica de suelo

Según (Mahzabin et al., 2016), este sistema permite controlar la humedad volumétrica del suelo para que se mantenga a capacidad de campo, evitando que ocurra estrés hídrico.

4.5.8. Menú de programación de encendido y apagado

El riego para los tratamientos de la investigación fueron programados, es decir que en la pestaña que se presenta en la Figura 57, se programó los tiempos de riego y en qué momento del día debía encenderse el sistema de forma automática sin estar en contacto con el aplicativo, este solo requiere los tiempos de encendido, apagado y seleccionar que tratamiento, se debe considerar la programación de la bomba y la fuente de alimentación de la válvula para que funcione el sistema. Además, se presenta cuatro distintos colores en Figura 57, cada color correspondía a cada tratamiento donde: rojo (T2), amarillo (T1), verde (T3) y azul (T4). Esta programación permitió un ahorro en el tiempo de mano de obra, en donde 2 horas son considerados del tiempo de ida y regreso de mi hogar a la UNALM, a lo largo de los 4 meses suman 240 horas, además el tiempo de esperar en campo regando los cuatro tratamientos que equivale a 38 horas a lo largo de la investigación, esto sin considerar el tiempo en que uno debe permanecer cercano a campo para aplicar los tratamientos intermitentes, los días feriados y fines de semana, problema que se vio resuelto con la automatización en donde se programó los tiempos de acuerdo a la evapotranspiración y esto se realizó desde cualquier lugar.

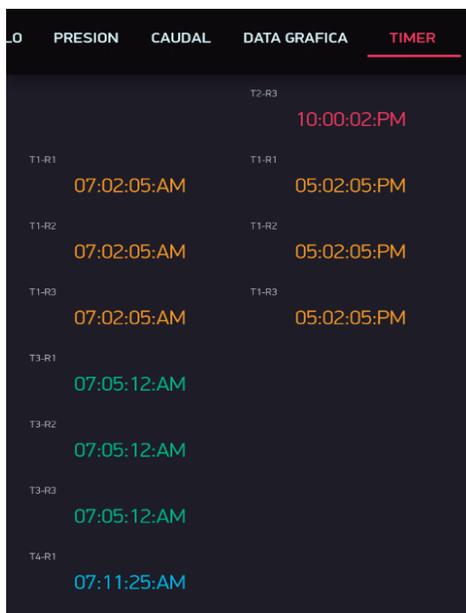


Figura 57: Menú de programación de riego.

Según C. Padilla, Acevedo, Dionicio, & Alva. (2019), el aplicativo de la plataforma Blynk puede moldearse de acuerdo al proyecto de interés, estableciendo una conexión vía internet, logrando visualizar la información y el control del sistema domótica. De acuerdo a lo mencionado, la plataforma de Blynk brinda una excelente conexión vía internet, además se adicionaron los sensores y actuadores de interés para un sistema de riego por goteo subterráneo sin ninguna limitación como menciona tal autor.

4.6. FRECUENCIA DE RIEGO

La frecuencia de riego que se consideró para el proyecto se presenta en la Cuadro 13. La lámina diaria para el tratamiento 1 (T1) se fracciona en dos, aplicando el riego en la mañana y en la tarde, el tratamiento 2 (T2) se fracciona en tres, aplicando el riego en la mañana tarde y noche, el tratamiento 3 (T3) se aplicó la lámina diaria en la mañana y finalmente el tratamiento 4 (T4) donde se acumuló la lámina diaria y se repuso cada 3 días. En la Figura 58, se presenta el riego para el tratamiento 2. La aplicación de la frecuencia de riego se apoyó con la automatización del sistema de riego por goteo subterráneo, esto ayudó al mejor control del sistema logrando reducir los tiempos de apertura de válvulas y aplicando la dosis de riego semejante en todos los tratamientos.

Cuadro 13: Descripción del momento de riego aplicado

Tratamiento	Descripción
T1	Frecuencia de riego intermitente 2 veces al día
T2	Frecuencia de riego intermitente 3 veces al día
T3	Frecuencia de riego 1 vez al día
T4	Frecuencia de riego cada 3 días

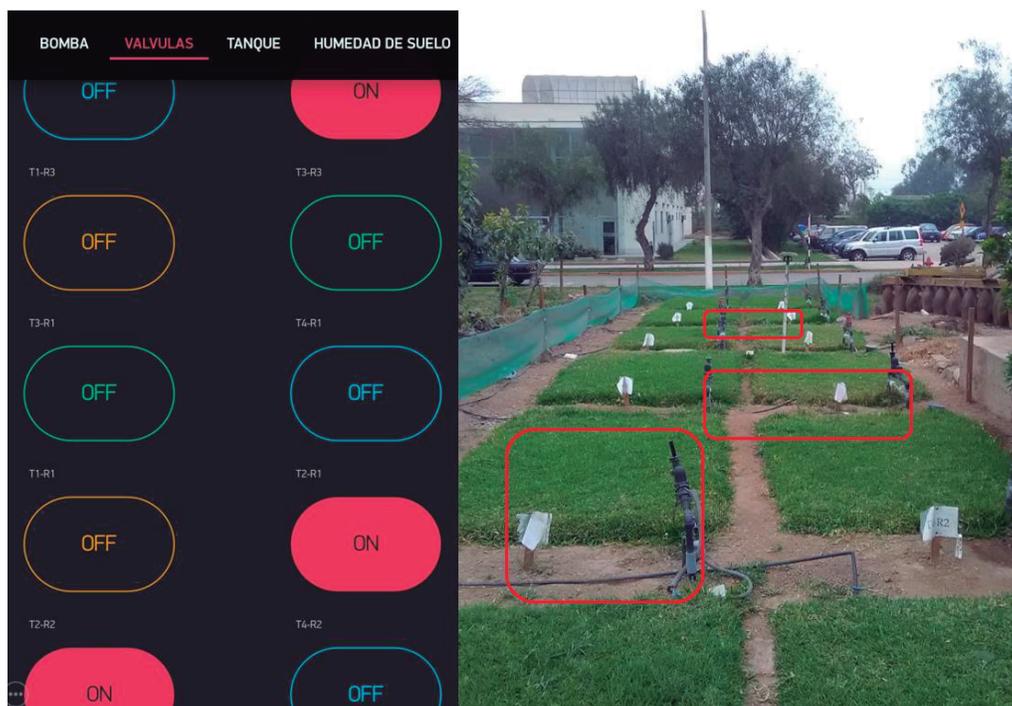


Figura 58: Riego del tratamiento T2 (T2-R1, T2-R2 y T2-R3).

4.7. ANÁLISIS DE AGUA

Según iagua (2019), los parámetros de calidad de agua para uso de riego en especies cespitosas o hortalizas se presenta en la Figura 59, Además, muestra los rangos permisibles y parámetros de interés.

Problema potencial	Unidades	Grado de restricción del uso		
		Ninguno	Ligero o moderado	Alto
SALINIDAD				
Afecta a la disponibilidad de agua para los cultivos.				
Conductividad del agua (CEa)	dS/m	< 0.7	0.7 – 3	> 3.0
Total sólidos disueltos (TSD)	mg/l	< 450	450 - 2000	> 2000
INFILTRACION				
Se reduce la velocidad de infiltración del agua en el suelo. Se evalúa con CEa y RAS				
	RAS (meq/l)	Conductividad del agua de riego, CE _a (dS/m)		
	0 – 3	> 0.7	0.7 – 0.2	< 0.2
	3 – 6	> 1.2	1.2 – 0.3	< 0.3
Relación de Adsorción de sodio (RAS)	6 – 12	> 1.9	1.9 – 0.5	< 0.5
	12 – 20	> 2.9	2.9 – 1.3	< 1.3
	20 – 40	> 5.0	5.0 – 2.9	< 2.9
TOXICIDAD DE IONES ESPECIFICOS				
Afecta a cultivos sensibles.				
<u>Sodio, Na⁺</u>				
Riego por superficie	RAS	< 3	3 – 9	> 9
Riego por aspersión	meq/l	< 3	> 3	
<u>Cloro, Cl⁻</u>				
Riego por superficie	meq/l	< 4	4 - 10	> 10
Riego por aspersión	meq/l	< 3	> 3	
<u>Boro, B</u>	mg/l	< 0.7	0.7 - 3	> 3
VARIOS				
Afecta a cultivos sensibles.				
<u>Nitratos NO₃-N</u>	mg/l	< 5	5 – 30	> 30
<u>Bicarbonatos HCO₃⁻</u>	me/l	< 1.5	1.5 – 8.5	> 8.5
Sólo daños en hojas, cuando se riega por aspersión.				
<u>pH</u>			Amplitud normal 6.5 – 8.4	

Figura 59: Restricciones en el uso del agua para riego.

Fuente: (iagua, 2019)

Según los datos obtenidos se presentan en el Cuadro 14, el parámetro de la conductividad eléctrica fue 0.732 ms/cm, la clasificación para el agua que corresponde es C2, que presenta una salinidad moderada. El pH obtenido fue de 7.59, clasificándola como ligeramente neutra. Finalmente, el oxígeno disuelto obtuvo 2.65 mg/L, es decir, no existe la mayoría organismos o especies sensibles.

Cuadro 14: Análisis de parámetros del agua

Parámetro	Valor	Unidad
Conductividad Eléctrica	0.732	ms/cm
PH	7.78	...
Oxígeno Disuelto	2.55 - 2.75	mg/L
Temperatura	22.4	°C

Según Ramírez & Hernández (2016), La mayoría de especies cespitosas son susceptibles al estrés salino mayor de 4 dS/m, influyendo a las características morfo fisiológicas, crecimiento, desarrollo de la plantas formadoras de césped, el estado fenológico, duración del estrés y la condición visual. Sin embargo, esto no se apreció, debido a que el agua no supera de ese límite de conductividad eléctrica.

4.8. ANÁLISIS DE SUELO

Se tomaron muestras de suelo en cuatro unidades experimentales (T1-R2, T2-R2, T3-R3, T4-R2), y se obtuvieron los siguientes valores de pH: 9.59, 8.43, 9.11 y 9.63 que corresponden a un suelo ligeramente alcalino, y los valores de conductividad eléctrica fueron los siguientes: 1.6, 1, 1.4 y 2 ds/m que corresponde a un suelo ligeramente salino. En el cuadro 15, se puede visualizar los datos obtenidos por cada unidad experimental.

Cuadro 15: Análisis de parámetros del suelo.

Tratamiento	CE(ds/m)	PH
T1-R2	1.6	9.59
T2-R2	1	8.43
T3-R3	1.4	9.11
T4-R2	2	9.63

Según Monge 2016, para que el césped *stenotaphrum secundatum* se encuentre en buenas, el suelo debe contar con un pH de 6 a 8.5 y salinidad menor a 15 ds/cm, para el caso de la investigación el suelo cumple con los siguientes parámetros. Zulueta (2019) recomienda que para la instalación de especies cespitosas, lo ideal es que sea un suelo franco o franco – arenosos – arcilloso, debido a que la textura asegura una correcta porosidad para una buena aireación, circulación de agua y una buena capacidad de retención de humedad del suelo. Además, existe un rango de nutrientes adecuados que

debe tener como mínimo: Fosforo (10-35mg/l), Potasio (10-35mg/l) y Magnesio (10-35mg/l). También, se considera un suelo nutrido cuando posee alto contenido de materia orgánica.

4.9. CLIMA

Los datos de clima fueron obtenidos de la estación automática Climate Minder durante los meses de marzo a junio, los datos promedio se presentan en el Cuadro 16. En el periodo de investigación se tuvo una temperatura máxima de 32°C en el mes de marzo y una temperatura mínima de 17°C para el mes de junio. La velocidad de viento promedio para marzo fue 3 m/s. La humedad relativa para el mes de junio fue de 97%. Finalmente, la evapotranspiración máxima en todo el periodo fue en el mes de marzo con 5 mm/día.

Cuadro 16: Datos climáticos durante la investigación

Mes	T máx (°C)	T min (°C)	T prom (°C)	HR (%)	Vel. Viento (m/s)	Eto (mm/día)
Marzo	32.0	23.0	27.5	95.0	3.0	2.91
Abril	29.0	20.0	24.5	88.0	2.0	2.71
Mayo	29.0	18.0	23.5	99.0	1.0	1.53
Junio	23.0	17.0	20.0	97.0	1.0	1.06

FUENTE: Datos tomados de la estación Climate Minder

4.10. EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA (ETO)

Los datos de evapotranspiración fueron obtenidas con la estación automatiza Climate Minder de forma diaria, desde el 07 de marzo hasta el 29 de junio del 2019. El máximo valor fue capturado en el mes de abril con un valor de 4.4 mm/día, en esa semana se obtuvieron valores altos de la evapotranspiración esto porque se presentó un inesperado clima soleado. La figura 60, presenta los datos de la evapotranspiración de referencia para los meses de marzo, abril, mayo y junio, con valores promedios de 2.91, 2.71, 1.53 y 1.06 mm/día como se presenta en la Cuadro 17. Los datos decrecieron por la estación de otoño.

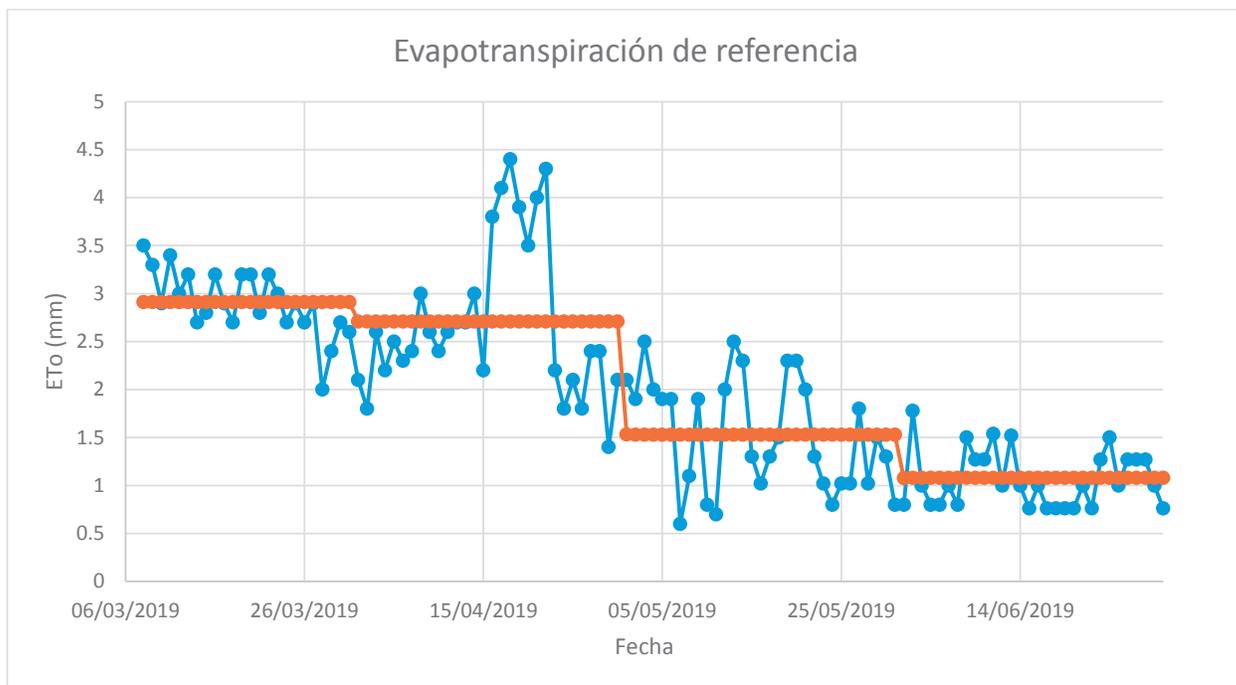


Figura 60: Evapotranspiración mensual (marzo, abril, mayo y junio).

FUENTE: Datos obtenido de la estación automática Climate Minder.

Cuadro 17: Promedio mensual de la evapotranspiración de referencia.

Evapotranspiración de referencia						
	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Total	Promedio
ETo acumulada (mm)	69.9	81.3	47.5	31.9	230.6	..
ETo promedio (mm)	2.91	2.71	1.53	1.06	..	2.05

FUENTE: Datos tomados de la estación Climate Minder

4.11. LAMINA DE RIEGO

La lámina de riego se calculó en base a los valores de la evapotranspiración (ETo) de la estación automática Climate Minder para los cuatro meses que comprendió la investigación. Según Ascencios et al. (2019) para la temporada de verano y otoño se debe aplicar un factor de corrección de 0.8 a la lámina aplicada. Por tal razón la lámina aplicada fue de 0.8 para los meses de marzo, abril, mayo y junio. La lámina de riego fue igual para todo el tratamiento, solo se diferenció en los siguientes momentos de riego: T1 – riego

intermitente 2 veces al día, T2 – riego intermitente 3 veces al día – T3 – riego de una vez al día y T4 – riego cada 3 días.

4.12. EVALUACIÓN CUANTITATIVA

4.12.1. Humedad de suelo

En las unidades experimentales la humedad volumétrica del suelo se obtuvo con los sensores GS1 Decagon Device, y se obtuvo la información datalogger EM-50 y el ESP32 respectivamente, el primero almacena la información leída por los sensores GS1 y se descargó a través del software Datatrak 3 y ECH20 Utility. Los softwares permitieron visualizar los datos y configuración del intervalo de tiempo de captura de la lectura de humedad de suelo, y el segundo fue un dispositivo implementado y programado para enviar la información del sensor vía Wifi al aplicativo GrootSmart, visualizando la humedad de suelo en tiempo real y la información fue almacenada.

A partir de las gráficas generadas por el sensor de humedad GS1 se obtuvo la capacidad de campo de 28% de contenido volumétrico y el punto de marchitez que fue 14% del contenido volumétrico. En la Figura 61, se presenta la curva de humedad de suelo del tratamiento (T4), el eje del lado derecho muestra los valores del contenido volumétrico y el eje izquierdo muestra la lámina de lavado que se le aplicó en la investigación en los meses de: marzo, abril, mayo y junio del 2019. En la Figura 60, se visualiza la disminución del valor de la humedad volumétrica y como se incrementa en un intervalo de tiempo, debido a que se acumuló la lámina aplicada por tres días y luego se aplicó el riego. Además, se puede ver un incremento abrupto de la humedad volumétrica, esto se debió a la aplicación de un riego pesado de 40mm, 30mm y 14 mm para el lavado del suelo en las fechas de 19/05/19, 29/05/19 y el 30/05/16 respectivamente. Este tratamiento presentó un descenso mayor del contenido de humedad del suelo, debido a la reposición de lámina cada 3 días llegando a un valor mínimo de 22.37% de contenido de humedad, esto representó 40.21 % de la humedad disponible. Finalmente, en la gráfica se presenta la disminución del espaciamiento entre humedad máxima y humedad mínima, debido a la disminución de la evapotranspiración en los meses de mayo y junio.

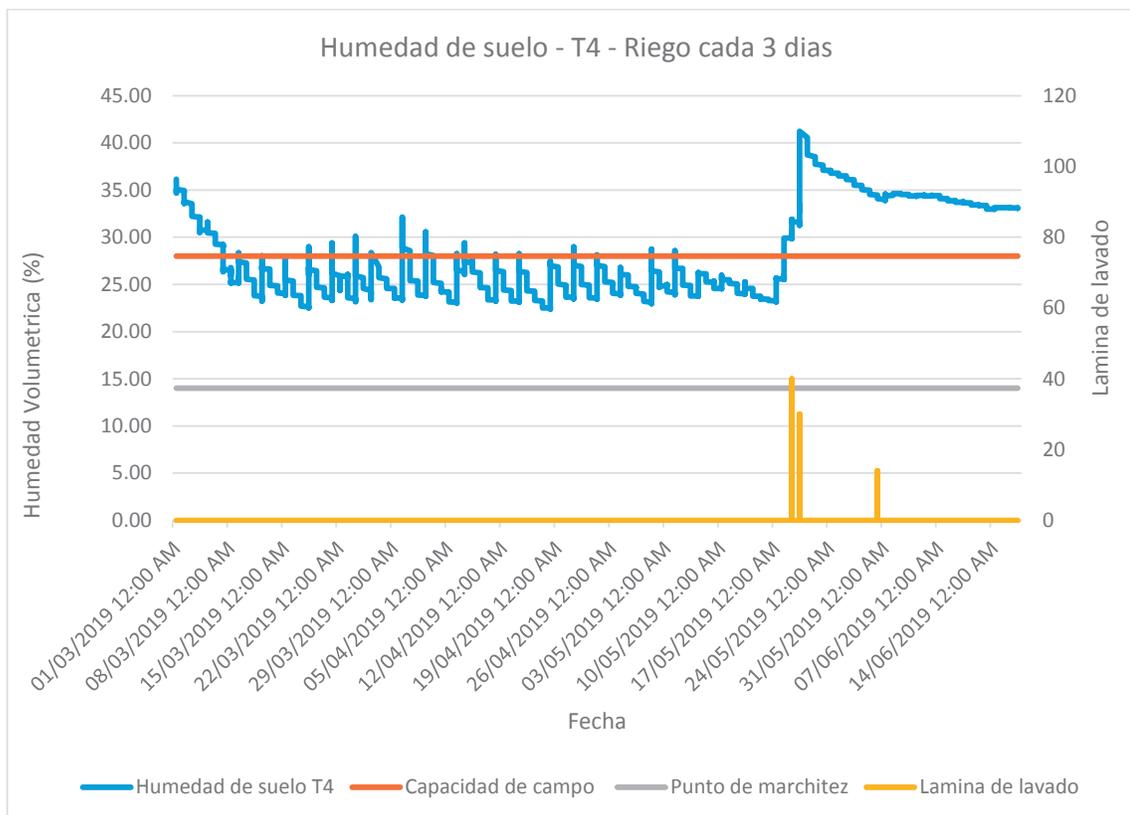


Figura 61: Contenido de humedad del suelo para el tratamiento T4.

En la Figura 62 se presenta la curva de humedad de suelo del tratamiento 2, obtenida en la investigación en los siguientes meses: marzo, abril, mayo y junio. En el eje derecho muestra los valores del contenido volumétrico y el eje izquierdo muestra la lámina de lavado. Además, se puede ver un incremento abrupto de la humedad volumétrica, esto se debió a la aplicación de un riego pesado de 40mm, 30mm y 14 mm para el lavado del suelo en las fechas de 19/05/19, 29/05/19 y el 30/05/16 respectivamente. El tratamiento estuvo al margen de la capacidad de campo y no conto con un descenso de la humedad como fue el caso del tratamiento 4, debido a que la lámina diaria de riego se fracciono en tres partes y se aplicó en la mañana, tarde y noche, en consecuencia la humedad estuvo cercano a capacidad de campo trabajando por encima del 28 % de la humedad volumétrica. Finalmente, la humedad de suelo se mantuvo constante, generando condiciones óptimas y trabajando con el 100% de la humedad disponible.

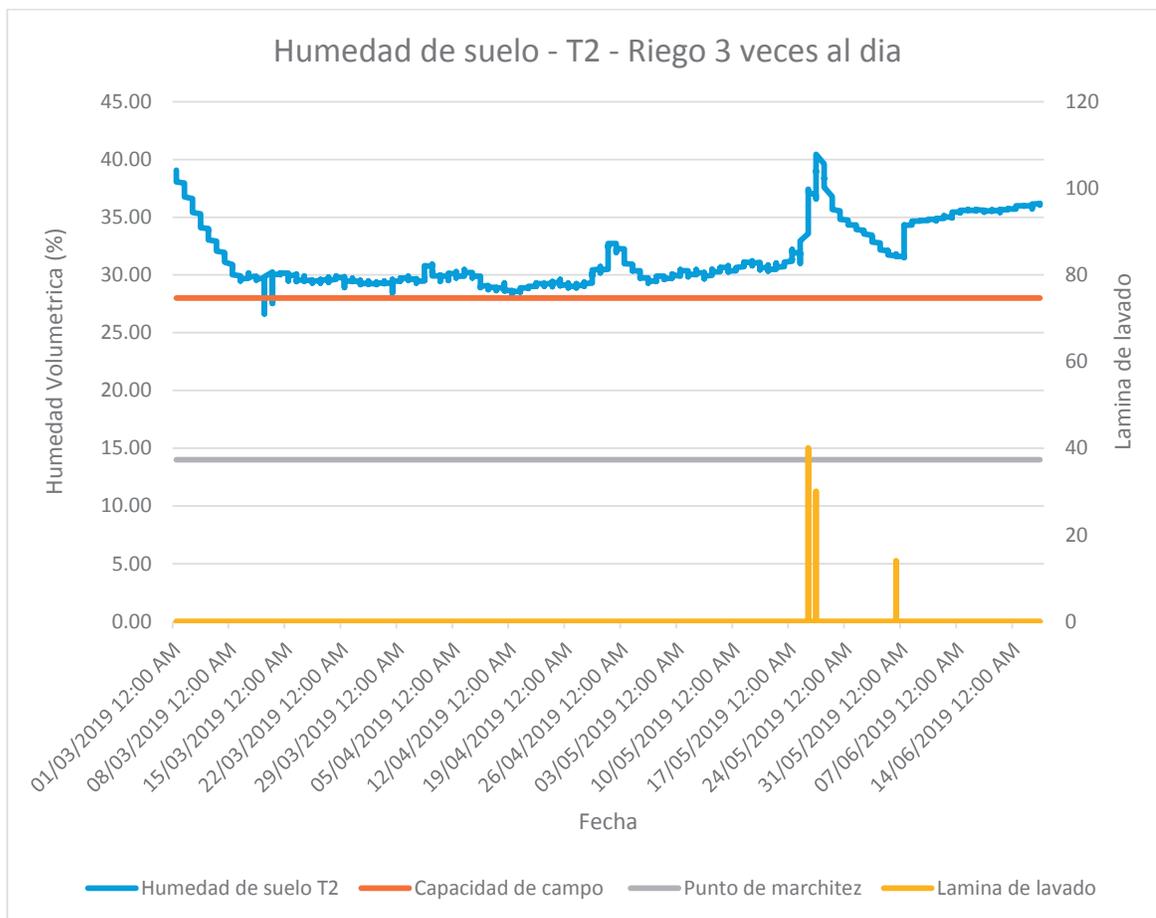


Figura 62: Contenido de humedad de suelo para el tratamiento T2

Se presentó la gráfica del tratamiento 4 (riego cada 3 días) y el tratamiento 2 (riego intermitente de 3 veces al día), porque fueron los tratamientos extremos. Las gráficas restantes del tratamiento 1 y del tratamiento 3 se pueden visualizar en el Anexo 2. Además, los porcentajes de humedades disponibles obtenidas en el tratamiento 1 y tratamiento 3 fueron de 35.7 % y 28.5 % respectivamente.

Según Cifuentes, 2016, al inicio de la experimentación de las doce unidades experimentales se empleó maquinaria pesada para la preparación de suelo, esto explica la variación en el suelo. Sin embargo se encontró materiales extraños en el momento de la instalación de los sensores de humedad de suelo.

4.12.2. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), indica la calidad y salud del césped, para cuantificarlo se tomaron datos en nueve puntos de cada unidad experimental

cada 15 días antes de la poda. Según Monje (2016), cuando se realiza la poda la hoja sufre un corte que lo daña y en consecuencia afecta a su vigor, más si el corte es bajo. Por esta razón la toma del NDVI fue antes de cada corte quincenal.

Las Figuras 63, 64, 65, 66, 67 y 68, muestran las distintas calidades de césped con sus respectivos valores de NDVI, este valor se obtuvo con el instrumento de medición de NDVI Green Seeker, donde se obtuvo nueve valores de NDVI de la imagen mostrada, para luego obtener un valor promedio de NDVI entre los nueve valores y contar con un dato de NDVI promedio para la imagen. La Figura 63, presenta un suelo desnudo con un valor de NDVI promedio es 0.18. La Figura 64, presenta un suelo desnudo poco poblado de césped dando un valor de NDVI promedio de 0.41. La Figura 65 se observa una cobertura vegetal que no presenta suelo desnudo, sin embargo, cuenta con un 60% de materia seca amarillenta y 40% césped donde el valor de NDVI promedio es 0.5. La Figura 66, presenta una cobertura vegetal aceptable, donde las hojas amarillentas ocupan un 25% de la cobertura y el 75% es césped, para un valor de NDVI promedio de 0.63. La Figura 67, presenta una mejora en la calidad de césped con respecto a las demás Figuras mencionadas anteriormente, donde la cobertura verde abarca un 95% de la imagen y brinda una buena calidad y color a simple inspección visual. Finalmente, la Figura 68, llegó a un valor de NDVI promedio de 0.8, el mejor resultado de NDVI obtenido en el césped de la Universidad Nacional Agraria La Molina, las características del césped en el momento de la captura de la foto fue que el césped contaba con un tamaño de hoja de aproximadamente 12 centímetros.

Según Mayorga Arias et al. (2019), los valores del NDVI son sensibles a la cubierta vegetal y guarda una relación con la cantidad de vegetación. Además, los índices son usados para mejorar la discriminación del suelo y la vegetación. Se comprueba lo mencionado anteriormente, los valores de NDVI fueron mejorando conforme existía mayor cobertura de césped con un color verdoso y un mayor tamaño de hojas, reduciendo el área de la paja amarilla y suelo desnudo.



0.18	0.18	0.17
0.16	0.18	0.17
0.16	0.15	0.18

Figura 63: Cobertura con valor de NDVI 0.18



0.34	0.41	0.40
0.45	0.41	0.38
0.41	0.39	0.38

Figura 64: Cobertura con valor de NDVI 0.41



0.47	0.51	0.48
0.41	0.47	0.51
0.45	0.45	0.18

Figura 65: Cobertura con valor de NDVI 0.50



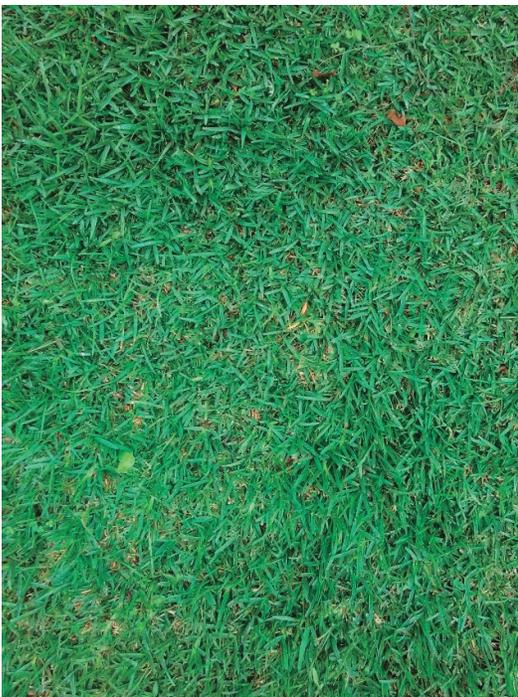
0.61	0.6	0.62
0.65	0.63	0.59
0.64	0.65	0.66

Figura 66: Cobertura con valor de NDVI 0.63.



0.72	0.73	0.75
0.75	0.75	0.75
0.73	0.74	0.74

Figura 67: Cobertura con valor de NDVI 0.74



0.78	0.80	0.82
0.79	0.82	0.80
0.76	0.78	0.78

Figura 68: Cobertura con valor de NDVI 0.80

Basándose en las Figuras anteriormente mencionadas se elaboró el Cuadro 18, con rangos que determina si es césped cuenta con una calidad: bueno, regular o mala.

Cuadro 18: Descripción del momento de riego aplicado

Calificación	Valor	Descripción
Bueno	[0.60 - 1.00]	Cobertura homogénea de color verde, sin coloración amarillenta
Regular	[0.50 - 0.59]	Cobertura poco homogénea de color verde, con poca presencia de hojas amarillentas sin suelo desnudo
Malo	[0 - 0.49]	Cobertura con áreas amarillentas y suelo desnudo

La Figura 69, presenta la gráfica de los valores de NDVI para los cuatro tratamientos y como fue cambiando con el transcurso de la investigación, los valores se contrastan con el Cuadro 18, donde muestra algunos valores tomados de NDVI en un rango de 0 a 1. El valor de NDVI promedio es 0.60 para el mes de marzo y abril, sin embargo va disminuyendo con el pasar de los meses, esto se debe a que no se regaba correctamente debido a que los cuatro sensor de humedad de suelo inicialmente no se instalaron correctamente, este sensor se encontró en una zona no critica cercano al gotero donde dio un valor de humedad de suelo. Se trabajó con este valor desde el mes de marzo hasta quincena de mayo, en esta fecha se corrigió la instalación de los sensores y reubicándolos a la zona crítica donde inicialmente debió haber permanecido instalado. Se presenta que el tratamiento T2 (frecuencia de riego: 3 veces al día) y T1 (frecuencia de riego: 2 veces al día) obtuvieron una mejor calidad y salud en comparación con los demás tratamientos T3 (frecuencia de riego: 1 vez al día) y T4 (frecuencia de riego: cada 3 días). Este último tratamiento mostro una disminución de su vigor, calidad y salud, comprobando que a mayor frecuencia de riego para un clima soleado y caluroso como se dio en el mes de marzo, abril e inicios de mayo su calidad disminuye.

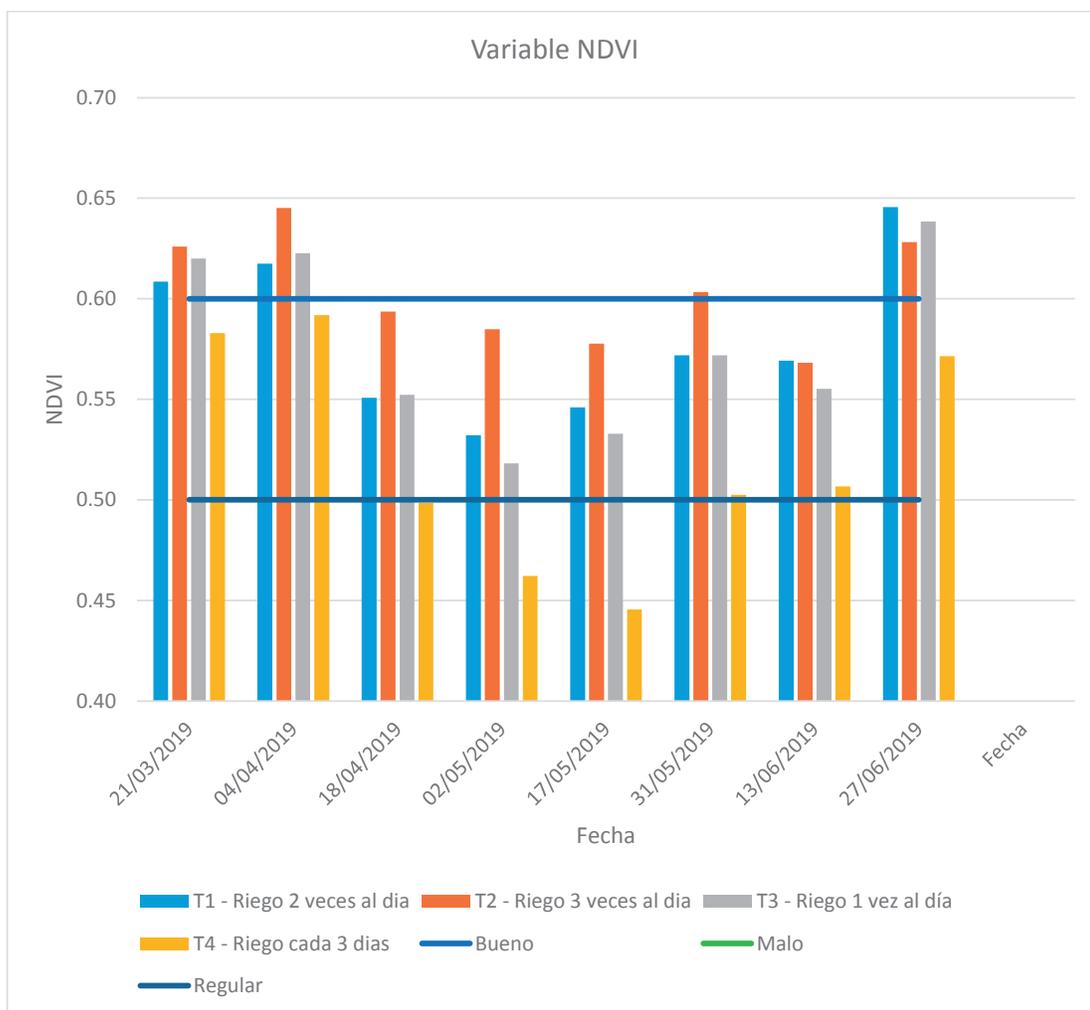


Figura 69: Dato quincenal del valor del NDVI en césped

Primera parte

Cuadro 19: Análisis de varianza del NDVI en la primera toma de datos

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
NDVI 21/03/2019	12	0.36	0.11	4.41

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	3.2E-03	3	1.1E-03	1.47	0.2938
TRATAMIENTO	3.2E-03	3	1.1E-03	1.47	0.2938
Error	0.01	8	7.3E-04		
Total	0.01	11			

El Cuadro 20, presenta el análisis de varianza, y resultando que no existe diferencia significativa entre los tratamientos, debido a que el p-valor no es menor que el 0.05.

Prueba de tukey

Cuadro 20: Prueba de Tukey del NDVI en la primera toma de datos.

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=0.07040			
Error: 0.0007 gl: 8			
TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.
T4	0.58	3	0.02 A
T1	0.61	3	0.02 A
T3	0.62	3	0.02 A
T2	0.62	3	0.02 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

En el Cuadro 19 y Cuadro 20, se presenta el procedimiento que se realizó para las nueve muestras de césped realizados en el mes de: marzo, abril, mayo y junio, el resultado estadístico obtenido se presenta en el Cuadro 20, donde se presentará que no hubo significancia hasta el quinto muestreo (17/05/19), para más detalle del resultado estadístico consultar el Anexo 1.

Cuadro 21: Tabla resume del análisis estadístico, variable NDVI

Fecha	Tratamiento	Descripción
Primer muestreo (21/03/19)	T1 (2 veces al día)	No existe significancia, se acepta la hipótesis nula
	T2 (3 veces al día)	
	T3 (1 vez al día)	
	T4 (cada 3 días)	
Segundo muestreo (04/04/19)	T1 (2 veces al día)	No existe significancia, se acepta la hipótesis nula
	T2 (3 veces al día)	
	T3 (1 vez al día)	
	T4 (cada 3 días)	
Tercer muestreo (18/04/19)	T1 (2 veces al día)	No existe significancia, se acepta la hipótesis nula
	T2 (3 veces al día)	
	T3 (1 vez al día)	
	T4 (cada 3 días)	
Cuarto muestreo (02/05/19)	T1 (2 veces al día)	No existe significancia, se acepta la hipótesis nula
	T2 (3 veces al día)	
	T3 (1 vez al día)	
	T4 (cada 3 días)	
	T1 (2 veces al día)	

Quinto muestreo (17/05/19)	T2 (3 veces al día) T3 (1 vez al día) T4 (cada 3 días)	Existe significancia, se rechaza la hipótesis nula
Sexto muestreo (31/05/19)	T1 (2 veces al día) T2 (3 veces al día) T3 (1 vez al día) T4 (cada 3 días)	No existe significancia, se acepta la hipótesis nula
Séptimo muestreo (13/06/19)	T1 (2 veces al día) T2 (3 veces al día) T3 (1 vez al día) T4 (cada 3 días)	No existe significancia, se acepta la hipótesis nula
Octavo muestreo (27/06/19)	T1 (2 veces al día) T2 (3 veces al día) T3 (1 vez al día) T4 (cada 3 días)	No existe significancia, se acepta la hipótesis nula

4.12.3. Coeficiente de Uniformidad (CU)

En la investigación se tomaron datos en nueve fechas para el cálculo de coeficiente de uniformidad (CU) con el TDR 350, los datos iniciales para la obtención del CU fueron tomados el 07/03/19 y los últimos valores el 28/06/19. En el Cuadro 22, se presenta los valores de CU para cada tratamiento. En la Figura 70, se presenta los datos de humedad del suelo con el TDR 350, para conocer la uniformidad de la humedad en el suelo y calcular el coeficiente de uniformidad para cada tratamiento. Además se presenta que no existe diferencia significativa entre los tratamientos T1 (frecuencia de riego: 2 veces al día), T2 (frecuencia de riego: 3 veces al día), T3 (frecuencia de riego: 1 vez al día), y T4 (frecuencia de riego: cada 3 días). Desde un inicio el coeficiente de uniformidad (CU) era alto con un valor máximo de 82.6% para la primera muestra, conforme pasaron los meses fue disminuyendo el valor de CU para todos los tratamientos, esto fue ocasionado por la incorrecta instalación de los sensores de humedad de suelo, debido a que se regaba con menor cantidad de agua y el bulbo húmedo no traslapo, reduciendo su humedad con forme pasaba el tiempo. El 20 de mayo se realizó una corrección en la instalación de los sensores de humedad de suelo, además se dio un riego pesado para recuperar la humedad del suelo y llegue a su valor de CU óptimo que corresponde para un riego por goteo.

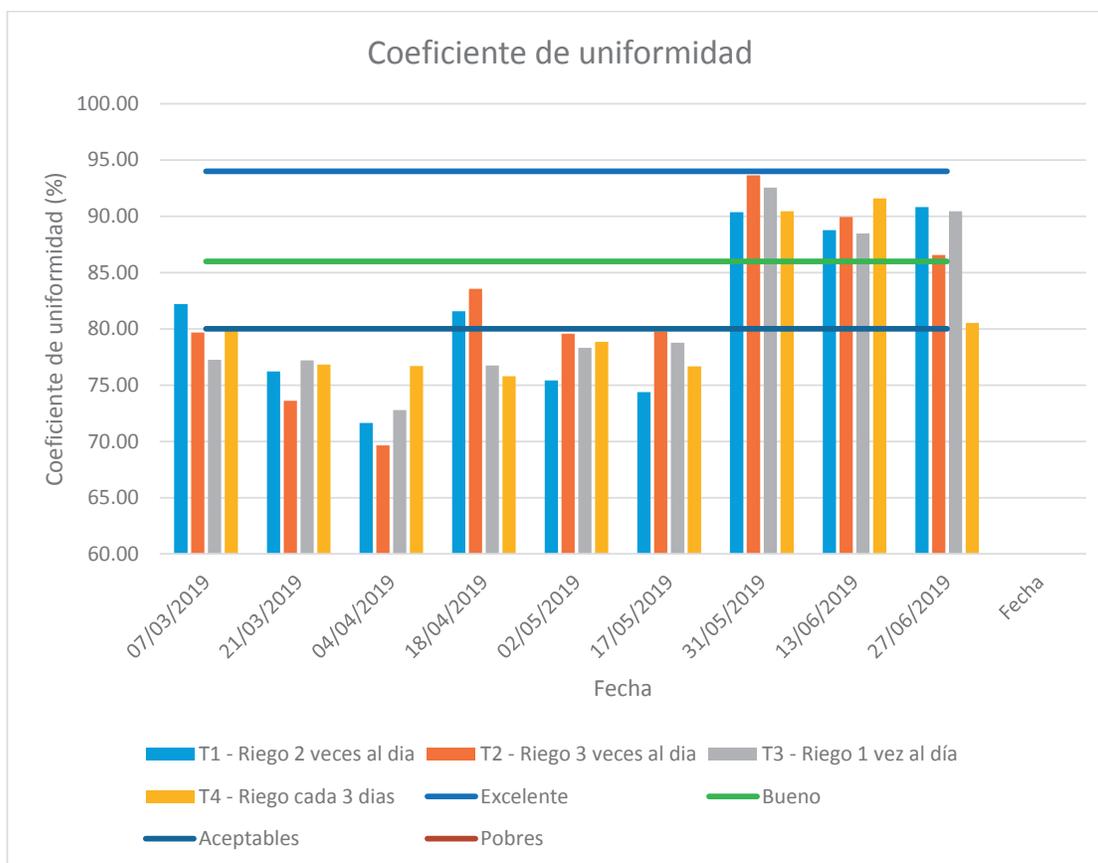


Figura 70: Calculo de humedad de suelo con TDR 350.

Cuadro 22: Resumen de los nueve valores de CU para cada tratamiento

Coeficiente de Uniformidad	1ra poda	2da poda	3ra poda	4ta poda	5ta poda	6ta poda	7ma poda	8va poda	9na poda
	07 mar. 2019	21 mar. 2019	04 abr. 2019	18 abr. 2019	02 may. 2019	17 may. 2019	31 may. 2019	14 jun. 2019	28 jun. 2019
T1-R1	0.84	0.77	0.68	0.82	0.71	0.74	0.93	0.88	0.89
T1-R2	0.81	0.77	0.70	0.85	0.74	0.75	0.86	0.86	0.90
T1-R3	0.82	0.74	0.77	0.78	0.81	0.74	0.93	0.92	0.94
T2-R1	0.81	0.70	0.66	0.84	0.82	0.80	0.93	0.90	0.93
T2-R2	0.78	0.76	0.72	0.85	0.79	0.81	0.96	0.93	0.76
T2-R3	0.80	0.75	0.71	0.82	0.78	0.78	0.92	0.87	0.91
T3-R1	0.77	0.76	0.73	0.82	0.81	0.71	0.93	0.85	0.88
T3-R2	0.72	0.81	0.67	0.80	0.77	0.89	0.94	0.94	0.92
T3-R3	0.82	0.74	0.79	0.68	0.77	0.77	0.90	0.86	0.91
T4-R1	0.80	0.81	0.80	0.75	0.86	0.77	0.91	0.92	0.70
T4-R2	0.86	0.80	0.79	0.78	0.85	0.84	0.90	0.92	0.81
T4-R3	0.74	0.69	0.71	0.74	0.66	0.69	0.90	0.91	0.91

Según Pizarro (1996) el método para realizar el cálculo de coeficiente de uniformidad es dividir el caudal medio por el 25% de los emisores que reciben menos caudal entre el caudal medio de los emisores evaluados. De acuerdo a lo mencionado, se realizó el mismo procedimiento considerando la humedad de suelo medida con el TDR 350 en reemplazo del caudal.

Según Lobo, Ramírez, & Díaz (2011), para interpretar correctamente los valores del coeficiente de uniformidad en suelos con topografía llanas, se clasifica con los siguientes valores: son excelentes cuando son mayores al 94%, buenos de 86% a 94%, aceptables de 80% a 86% y pobres, menores del 80%. De acuerdo a lo mencionado anteriormente se obtuvo un buen coeficiente de uniformidad a partir de la fecha 31/05/19, esto debido al riego pesado que se aplicó para la recuperación del césped por motivo de una mala instalación de los sensores de humedad de suelo.

La Cuadro 23 y la Cuadro 24, muestra el análisis estadístico del coeficiente de uniformidad tomada en la fecha 07/03/19 y en el Anexo 1 se presenta el análisis de varianza del coeficiente de uniformidad de las nueve fechas para cada tratamiento.

Cuadro 23: Análisis de varianza de coeficiente de uniformidad en la fecha 07/03/19

Análisis de la varianza					
Variable	N	R ²	R ² Aj	CV	
CU 07/03/2019	12	0.25	0.00	5.08	

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)						
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	
Modelo	4.3E-03	3	1.4E-03	0.87	0.4949	
Tratamiento	4.3E-03	3	1.4E-03	0.87	0.4949	
Error	0.01	8	1.6E-03			
Total	0.02	11				

En el Cuadro 24, se presenta que no existe diferencia significativa en los tratamiento para la muestra de la fecha 07/03/19, puesto que p-valor es mayor que el 5%.

Cuadro 24: Prueba de Tukey del coeficiente de uniformidad para la fecha 07/03/19

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=0.10594				
Error: 0.0016 gl: 8				
Tratamiento	Medias	n	E.E.	
T3	0.77	3	0.02	A
T2	0.80	3	0.02	A
T4	0.80	3	0.02	A
T1	0.82	3	0.02	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

En el Cuadro 23 y Cuadro 24 se presentó el procedimiento que se realizó para las nueve muestras de césped realizados en el mes de: marzo, abril, mayo y junio, el resultado estadístico obtenido se presenta en el Cuadro 25, donde se presenta que no hubo significancia de los tratamiento hasta el quinto muestreo (17/05/19), para más detalle del resultado estadístico consultar el Anexo 1.

Cuadro 25: Resumen del análisis estadísticos para las nueve muestras de peso fresco

Fecha	Tratamiento	Descripción
Primer muestreo (07/03/19)	T1 (2 veces al día)	No existe significancia, se acepta la hipótesis nula
	T2 (3 veces al día)	
	T3 (1 vez al día)	
	T4 (cada 3 días)	
Segundo muestreo (21/03/19)	T1 (2 veces al día)	No existe significancia, se acepta la hipótesis nula
	T2 (3 veces al día)	
	T3 (1 vez al día)	
	T4 (cada 3 días)	
Tercero muestreo (04/04/19)	T1 (2 veces al día)	No existe significancia, se acepta la hipótesis nula
	T2 (3 veces al día)	
	T3 (1 vez al día)	
	T4 (cada 3 días)	
Cuarto muestreo (18/04/19)	T1 (2 veces al día)	No existe significancia, se acepta la hipótesis nula
	T2 (3 veces al día)	
	T3 (1 vez al día)	
	T4 (cada 3 días)	
Quinto muestreo (02/05/19)	T1 (2 veces al día)	Existe significancia, se rechaza la hipótesis nula
	T2 (3 veces al día)	
	T3 (1 vez al día)	
	T4 (cada 3 días)	
Sexto muestreo (17/05/19)	T1 (2 veces al día)	No existe significancia, se acepta la hipótesis nula
	T2 (3 veces al día)	
	T3 (1 vez al día)	
	T4 (cada 3 días)	
Séptimo muestreo (31/05/19)	T1 (2 veces al día)	No existe significancia, se acepta la hipótesis nula
	T2 (3 veces al día)	
	T3 (1 vez al día)	
	T4 (cada 3 días)	
Octavo muestreo (13/06/19)	T1 (2 veces al día)	No existe significancia, se acepta la hipótesis nula
	T2 (3 veces al día)	
	T3 (1 vez al día)	
	T4 (cada 3 días)	

Noveno muestreo (27/06/19)	T1 (2 veces al día)	No existe significancia, se acepta la hipótesis nula
	T2 (3 veces al día)	
	T3 (1 vez al día)	
	T4 (cada 3 días)	

4.12.4 Peso fresco de hojas

Se tomaron ocho datos de peso fresco de hojas después de cada poda, siendo la primera fecha 07/03/19 y la última el 28/06/19, para la fecha 13/06/19 no se realizó la poda como corresponde debido a que el tamaño de la hoja era de una longitud corta. En la Figura 71, se presenta las unidades experimentales después de la poda. La Cuadro 26 presenta los valores de peso fresco en las nueve podas realizadas.



Figura 71: Unidades experimentales después de la poda.

En la Figura 75, se presenta una gráfica con los valores en gramos de la poda para cada tratamiento. Además, hubo una mayor producción de materia fresca en el mes de marzo, esto se vio afectado por el clima soleado que se presentó en ese mes como se presenta en el Figura 72. Sin embargo, en los meses abril, mayo y junio el crecimiento fue descendiendo debido a las condiciones climáticas y a la reducción de la cantidad de agua

aplicada por una incorrecta instalación del sensor de humedad de suelo. El tratamiento T2 (frecuencia de riego intermitente: 3 veces al día) no presentó un mayor crecimiento en el césped en comparación a los demás tratamientos pese a que la frecuencia de riego aplicada estuvo en la capacidad de campo en los primeros meses de marzo, abril y mayo. No existió diferencia entre los tratamientos intermitentes T1 (frecuencia de riego: 2 veces al día) y T2 (frecuencia de riego: 3 veces al día), el T1 presentó mayores valores en la primera, segunda, quinta, sexta y séptima poda mientras que T2 presentó mayores valores en la tercera y cuarta, se puede decir que no existió diferencia significativa del peso fresco de hoja entre los tratamientos intermitentes. Por otro lado, el tratamiento T3 (frecuencia de riego: 1 vez por día) obtuvo los mayores valores de peso fresco de hoja en comparación con los demás tratamientos. Finalmente, el tratamiento T4 (frecuencia de riego: cada 3 días) obtuvo los valores bajos, debido a la humedad de este tratamiento llegaba a descender hasta un valor máximo de 40.21% de la humedad disponible en un tiempo de 3 días. El peso máximo obtenido fue del tratamiento T3 con 42.4 gr de materia fresca en la 2da poda, mientras que el mínimo peso fue del tratamiento T4 con 3.6 gr en la sexta poda. Por otra parte, los resultados obtenidos guardo concordancia con los valores de Jáuregui (2017), donde menciona que para los meses de verano existe un mayor crecimiento del área foliar.

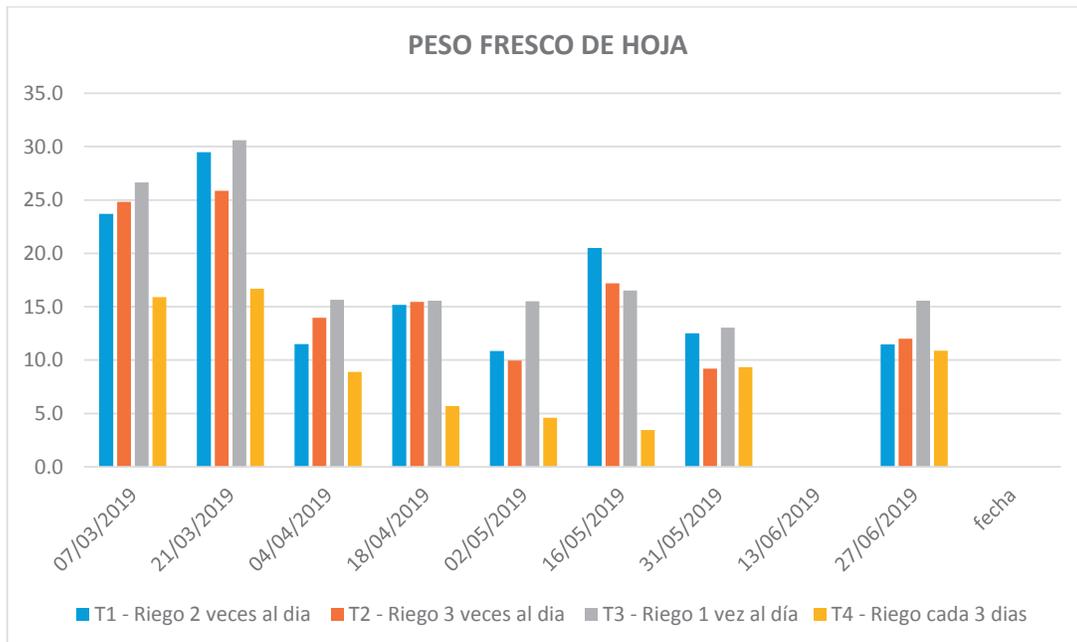


Figura 72: Peso fresco de hoja.

Cuadro 26: Resumen de las nueve mediciones de peso fresco de hoja en gramos

	1ra poda	2da poda	3ra poda	4ta poda	5ta poda	6ta poda	7ma poda	8va poda	9na poda
Peso Fresco	07 mar. 2019	21 mar. 2019	04 abr. 2019	18 abr. 2019	02 may. 2019	17 may. 2019	31 may. 2019	14 jun. 2019	14 jun. 2019
T1-R1	25.8	18.3	8.9	17.53	18.1	12.3	14	0	11.75
T1-R2	15.27	19.8	9.4	7.58	4.2	10.59	8.1	0	8.02
T1-R3	30.01	50.3	16.2	20.39	10.3	38.58	15.4	0	14.64
T2-R1	25.49	18.9	9.5	5.03	5.6	9.25	4.7	0	11.95
T2-R2	13.01	19.3	10.2	17.29	12.6	12.91	8.3	0	10.15
T2-R3	24.12	32.4	22.2	24	11.7	29.41	14.6	0	13.94
T3-R1	23.22	30.6	14.7	10.51	19.5	8.43	11.9	0	13.99
T3-R2	30.04	55.7	22.1	20.6	18.6	24.27	21.2	0	22.7
T3-R3	39.97	42.6	16.6	23.11	12.4	16.83	6	0	10.01
T4-R1	20.59	28.5	10.2	9.07	7	5.88	13.6	0	10.16
T4-R2	11.22	4.9	7.6	2.32	2.2	1.01	2.8	0	4.46
T4-R3							11.6	0	18.06

Según Monje (2016), cuando la altura de césped es menor, tiende a dañar la calidad del césped. Por esta razón no se realizó la poda el 14 de junio para que pueda recuperar su altura y calidad

El cuadro 27, muestra el análisis estadístico del peso fresco para la primera poda y en el Anexo 1 se presenta el análisis de varianza del peso fresco de hojas de las podas realizadas en nueve fechas.

Cuadro 27: Análisis de varianza del peso fresco de hoja en la primera poda

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
peso fresco 07/03/2019	12	0.48	0.28	30.69

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	361.57	3	120.52	2.44	0.1390
TRATAMIENTO	361.57	3	120.52	2.44	0.1390
Error	394.77	8	49.35		
Total	756.34	11			

En el Cuadro 28, se presenta que no existe diferencia significativa en los tratamiento para la muestra de la fecha 07/03/19, puesto que p-valor es mayor que el 5%.

Cuadro 28: Prueba de Tukey del peso fresco de hoja de la primera poda

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=18.36750

Error: 49.3461 gl: 8

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.
T4	15.91	3	4.06 A
T2	20.87	3	4.06 A
T1	23.69	3	4.06 A
T3	31.08	3	4.06 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

En el Cuadro 27 y Cuadro 28, se presenta el procedimiento que se realizó para las nueve muestras de césped realizados en el mes de: marzo, abril, mayo y junio. El resultado estadístico obtenido se presenta en el Cuadro 29, donde se presenta que no hubo significancia, para más detalle del resultado estadístico consultar el Anexo 1.

Cuadro 29: Resumen del análisis estadístico para las nueve muestras de peso fresco

Fecha	Tratamiento	Descripción
Primer muestreo (07/03/19)	T1 (2 veces al día)	No existe significancia, se acepta la hipótesis nula
	T2 (3 veces al día)	
	T3 (1 vez al día)	
	T4 (cada 3 días)	
Segundo muestreo (21/03/19)	T1 (2 veces al día)	No existe significancia, se acepta la hipótesis nula
	T2 (3 veces al día)	
	T3 (1 vez al día)	
	T4 (cada 3 días)	
Tercero muestreo (04/04/19)	T1 (2 veces al día)	No existe significancia, se acepta la hipótesis nula
	T2 (3 veces al día)	
	T3 (1 vez al día)	
	T4 (cada 3 días)	
Cuarto muestreo (18/04/19)	T1 (2 veces al día)	No existe significancia, se acepta la hipótesis nula
	T2 (3 veces al día)	
	T3 (1 vez al día)	
	T4 (cada 3 días)	
Quinto muestreo (02/05/19)	T1 (2 veces al día)	No existe significancia, se acepta la hipótesis nula
	T2 (3 veces al día)	
	T3 (1 vez al día)	
	T4 (cada 3 días)	
Sexto muestreo (17/05/19)	T1 (2 veces al día)	No existe significancia, se acepta la hipótesis nula
	T2 (3 veces al día)	
	T3 (1 vez al día)	
	T4 (cada 3 días)	
Séptimo muestreo (31/05/19)	T1 (2 veces al día)	No existe significancia, se acepta la hipótesis nula
	T2 (3 veces al día)	

	T3 (1 vez al día)	
	T4 (cada 3 días)	
	T1 (2 veces al día)	
Octavo muestreo (13/06/19)	T2 (3 veces al día)	-----
	T3 (1 vez al día)	
	T4 (cada 3 días)	
	T1 (2 veces al día)	
Noveno muestreo (27/06/19)	T2 (3 veces al día)	No existe significancia, se acepta la hipótesis nula
	T3 (1 vez al día)	
	T4 (cada 3 días)	

4.12.5. Peso seco de hojas

Se tomaron nueve datos de peso seco de hojas después de haber estado en el horno a 105°C durante 24 horas, los datos de registro van desde la primera fecha 07/03/19 y la última el 28/06/19. En la Figura 73, se presenta las muestras de césped frescas antes de introducirlas al horno. La Cuadro 29 presenta los valores de peso fresco en las nueve podas realizadas.



Figura 73: Muestras de césped antes de introducirlas al horno durante 24 horas.

En la Figura 77, se presenta los valores de peso seco en los cuatro tratamientos, el tratamiento T3 (frecuencia de riego: 1 vez al día) presento mayores valores de reserva de agua en la hoja, esto se debió a que contaba con mayor disponibilidad de agua que todos los tratamientos como se presenta en la Figura 74 del Anexo 2. Además no hubo grandes diferencias en los tratamientos intermitentes T1 (frecuencia de riego: 2 veces al día) y T2 (frecuencia de riego: 3 veces al día). Finalmente, el tratamiento T3 (frecuencia de riego: 1 vez al día) se diferenció con respecto al tratamiento T4 (frecuencia de riego: cada 3 días), donde los valores máximos lo obtuvo T3 y los valores mínimos fueron de T4. El peso seco máximo fue registrado en T3 en la segunda poda con 13.2 g, mientras que el menor valor fue obtenido por T4 en la quinta poda con 1.6 g.

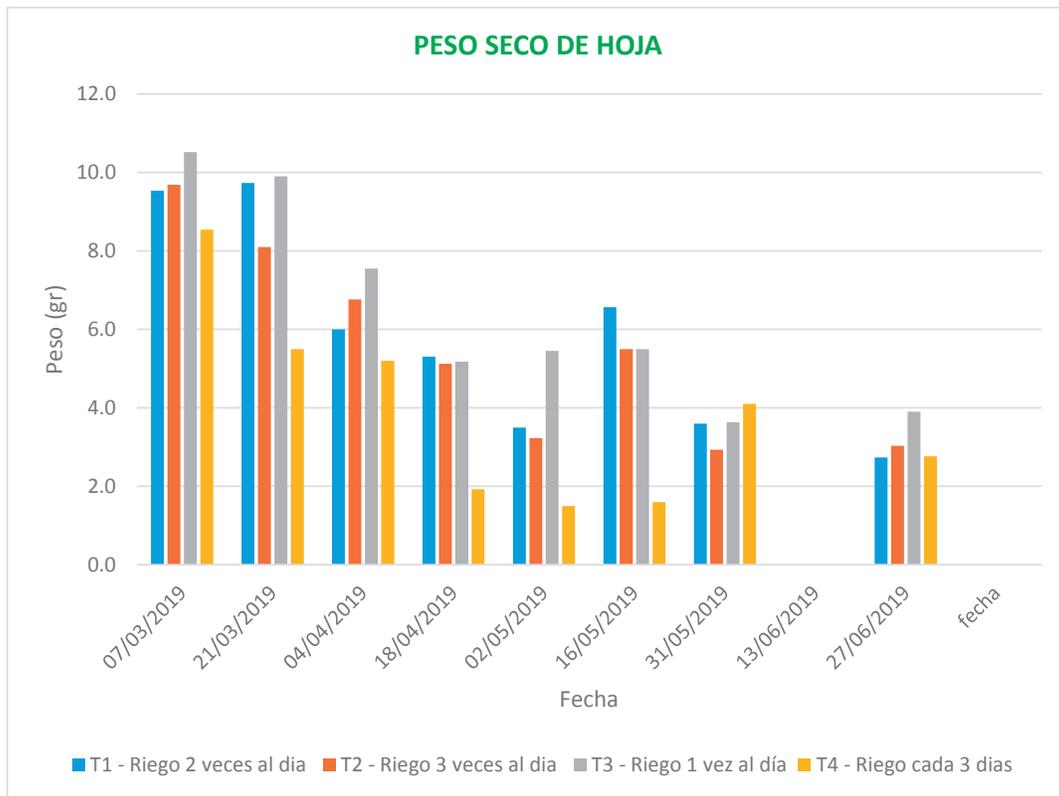


Figura 74: Peso fresco de hoja.

Cuadro 30: Resumen de las nueve mediciones de peso seco de hoja en gramos.

Peso Seco de Hoja	1ra	2da	3ra	4ta	5ta	6ta	7ma	8va	9na
	poda	poda	poda	poda	poda	poda	poda	poda	poda
	07	21	04	18	02	17	31	14	27
	mar.	mar.	abr.	abr.	may.	may.	may.	jun.	jun.
	2019	2019	2019	2019	2019	2019	2019	2019	2019
T1-R1	10.68	5.4	4.8	5.38	5	3.4	3.5	-	2.8
T1-R2	6.93	6.7	5.5	2.82	1.8	3.7	2.3	-	1.9
T1-R3	11	17.1	7.7	7.73	3.7	12.6	5	-	3.5
T2-R1	10.02	6.2	5.8	1.32	1.9	3.1	1.5	-	3.2
T2-R2	6.35	6.1	5.5	5.65	3.9	3.9	2.2	-	2.4
T2-R3	9.35	10	9	8.4	3.9	9.5	5.1	-	3.5
T3-R1	9.1	9.9	7.5	3.63	7.3	3.4	4.7	-	3.5
T3-R2	11.94	16.7	9.7	6.72	6.3	6.8	4.3	-	5.7
T3-R3	13.4	14.2	7.6	8.46	4.6	6.3	1.9	-	2.5
T4-R1	11.68	9.2	5.4	2.83	2	2.6	7.7	-	2.8
T4-R2	5.4	1.8	5	1.02	1	0.6	0.9	-	1.1
T4-R3							3.7	-	4.4

El Cuadro 31 muestra el análisis estadístico del peso seco para la primera poda y en el Anexo 1 se presenta el análisis de varianza del peso seco de hojas de las podas realizadas en nueve fechas.

Cuadro 31: Análisis de varianza del peso fresco de hoja en la primera poda

Análisis de la varianza					
Variable	N	R ²	R ² Aj	CV	
peso seco 08/03/2019	12	0.27	0.00	25.47	
Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	17.09	3	5.70	0.97	0.4545
TRATAMIENTO	17.09	3	5.70	0.97	0.4545
Error	47.16	8	5.90		
Total	64.26	11			

En el Cuadro 32, se presenta que no existe diferencia significativa en los tratamiento para la muestra de la fecha 07/03/19, puesto que p-valor es mayor que el 5%.

Cuadro 32: Prueba de Tukey del peso fresco de hoja de la primera poda

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=6.34869

Error: 5.8955 gl: 8

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.	
T4	8.54	3	1.40	A
T2	8.57	3	1.40	A
T1	9.54	3	1.40	A
T3	11.48	3	1.40	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

En el Cuadro 30 y Cuadro 31 se presenta el procedimiento que se realizó para las nueve muestras de césped realizados en el mes de: marzo, abril, mayo y junio del 2019. El resultado estadístico obtenido se presenta en el Cuadro 32, donde se presenta que hubo significancia solo en la quinta poda, para más detalle del resultado estadístico consultar el Anexo 1.

Cuadro 33: Resumen del análisis estadístico para las nueve muestras de seco fresco

Fecha	Tratamiento	Descripción
Primer muestreo (08/03/19)	T1 (2 veces al día)	No existe significancia, se acepta la hipótesis nula
	T2 (3 veces al día)	
	T3 (1 vez al día)	
	T4 (cada 3 días)	
Segundo muestreo (22/03/19)	T1 (2 veces al día)	No existe significancia, se acepta la hipótesis nula
	T2 (3 veces al día)	
	T3 (1 vez al día)	
	T4 (cada 3 días)	
Tercero muestreo (05/04/19)	T1 (2 veces al día)	No existe significancia, se acepta la hipótesis nula
	T2 (3 veces al día)	
	T3 (1 vez al día)	
	T4 (cada 3 días)	
Cuarto muestreo (19/04/19)	T1 (2 veces al día)	No existe significancia, se acepta la hipótesis nula
	T2 (3 veces al día)	
	T3 (1 vez al día)	
	T4 (cada 3 días)	
Quinto muestreo (03/05/19)	T1 (2 veces al día)	Existe significancia, se rechaza la hipótesis nula
	T2 (3 veces al día)	
	T3 (1 vez al día)	
	T4 (cada 3 días)	
Sexto muestreo (18/05/19)	T1 (2 veces al día)	No existe significancia, se acepta la hipótesis nula
	T2 (3 veces al día)	
	T3 (1 vez al día)	
	T4 (cada 3 días)	
Séptimo muestreo (01/06/19)	T1 (2 veces al día)	No existe significancia, se acepta la hipótesis nula
	T2 (3 veces al día)	
	T3 (1 vez al día)	
	T4 (cada 3 días)	
Octavo muestreo (14/06/19)	T1 (2 veces al día)	No existe significancia, se acepta la hipótesis nula
	T2 (3 veces al día)	
	T3 (1 vez al día)	
	T4 (cada 3 días)	
Noveno muestreo (28/06/19)	T1 (2 veces al día)	No existe significancia, se acepta la hipótesis nula
	T2 (3 veces al día)	
	T3 (1 vez al día)	
	T4 (cada 3 días)	

4.12.6. Crecimiento de hoja

Se realizó ocho medidas del crecimiento de la hoja de césped de forma quincenal, se obtuvo la altura de la hoja previo a cada poda, la primera poda se realizó el 07/03/19 y la última poda fue el hasta la 28/03/19. El Cuadro 33 presenta el resumen del crecimiento de la hoja que fueron obtenidas en ocho fechas en los 4 meses que duró la investigación. En la Figura 75, no existe diferencia significativa entre los tratamientos T1 (frecuencia de riego: 2 veces al día), T2 (frecuencia de riego: 3 veces al día) y T3 (frecuencia de riego: 1 vez al día). Sin embargo, El tratamiento T4 (frecuencia de riego: 1 vez cada 3 días) se diferenció, porque presentó menor crecimiento de tamaño de hoja, el cual fue beneficioso para que el periodo entre podas se alargue. El tratamiento T4 pudo verse afectado por la disponibilidad de la humedad en el suelo, debido a que fue el tratamiento donde la frecuencia de riego aplicada fue en un intervalo de 3 días, por lo tanto la humedad descendió hasta un valor máximo de 40.21% de la humedad disponible. Finalmente, en el Cuadro 33 se visualiza que el tratamiento T1 presentó valores bajos de crecimiento de hoja después del T4 y el tratamiento T3 y T2 presentaron un mayor crecimiento de la altura de hoja.

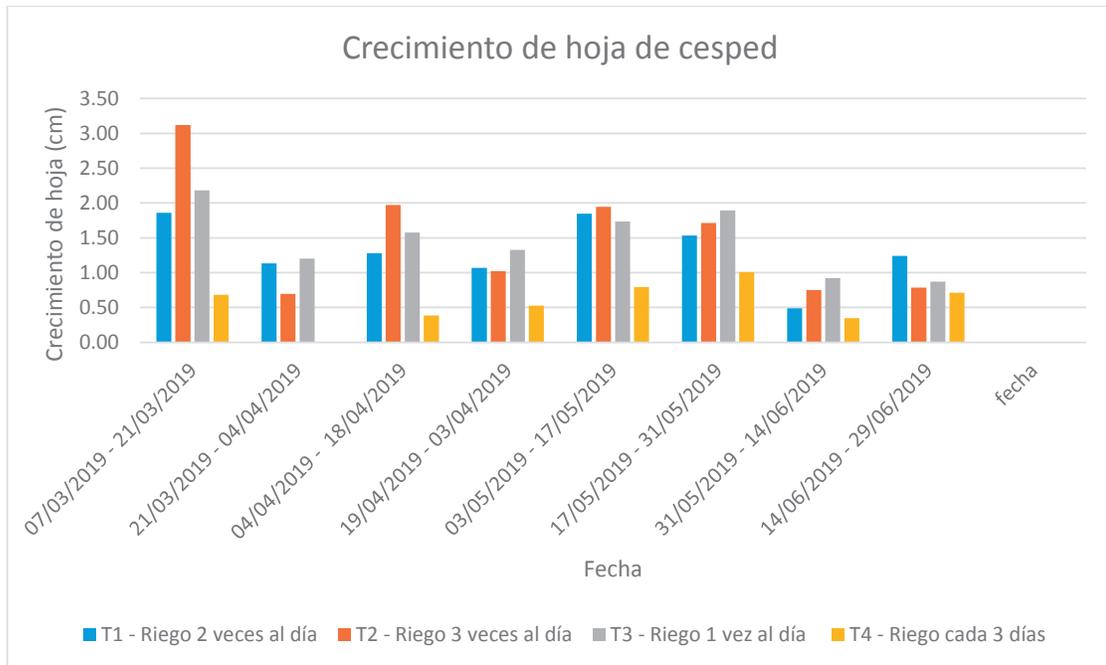


Figura 75: Crecimiento de hoja.

Cuadro 34: Resumen de las ocho mediciones de altura de hoja en centímetros

Periodo de Crecimiento (*)	1ra poda	2da poda	3ra poda	4ta poda	5ta poda	6ta poda	7ma poda	8va poda
	07mar. -21mar.	21mar. -04abr.	04abr. -18abr.	19abr. -03may.	03may. -17may.	17may. -31may.	31may. -14jun.	14jun. -29jun.
T1-R1	1.65	0.63	0.93	0.70	2.17	2.03	0.13	1.95
T1-R2	1.09	1.10	1.03	0.88	2.08	1.00	0.63	0.52
T1-R3	2.83	1.67	1.87	1.62	1.28	1.57	0.70	1.25
T2-R1	2.57	0.67	0.90	0.93	2.00	1.22	0.70	0.02
T2-R2	3.43	0.88	2.52	1.57	2.27	2.05	1.22	0.25
T2-R3	3.36	0.53	2.50	0.57	1.57	1.87	0.33	2.10
T3-R1	1.39	0.62	1.23	0.75	1.57	1.37	0.65	1.17
T3-R2	3.36	2.05	1.92	2.12	2.32	1.93	1.50	0.20
T3-R3	1.79	0.93	1.58	1.12	1.32	2.38	0.62	1.25
T4-R1	0.23	0.00	0.25	0.48	0.95	0.98	0.35	0.03
T4-R2	1.14	0.00	0.52	0.57	0.63	1.03	0.15	0.72
T4-R3							0.53	1.38

(*) Datos obtenidos del año 2019

El Cuadro 35, muestra el análisis estadístico del crecimiento de la hoja en el primer intervalo de tiempo del 07/03/19 hasta el 21/03/19 y en el Anexo 1 se presenta el análisis de varianza del crecimiento de la hoja por cada tratamiento realizadas en las ocho fechas.

Cuadro 35: Análisis de varianza del crecimiento de la hoja en el primer intervalo

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Crecimiento de Hoja	07/0.. 12	0.66	0.54	38.76

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	9.10	3	3.03	5.26	0.0270
TRATAMIENTO	9.10	3	3.03	5.26	0.0270
Error	4.62	8	0.58		
Total	13.72	11			

En el Cuadro 36, no existe diferencia significativa en los tratamiento para la muestra de la fecha 07/03/19, puesto que p-valor es mayor que el 5%.

Cuadro 36: Prueba de Tukey del crecimiento de la hoja en el primer intervalo

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=1.98630

Error: 0.5771 gl: 8

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.		
T4	0.68	3	0.44	A	
T1	1.86	3	0.44	A	B
T3	2.18	3	0.44	A	B
T2	3.12	3	0.44		B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

En el Cuadro 35 y Cuadro 36 se presenta el procedimiento que se realizó para las nueve muestras de tamaño de césped realizado en el mes de: marzo, abril, mayo y junio del 2019. El resultado estadístico obtenido se presenta en el Cuadro 36, donde se presenta que hubo significancia solo en la primera, segunda, tercera y quinta poda, para más detalle del resultado estadístico consultar el Anexo 1.

Cuadro 37: Resumen del análisis estadístico para las nueve muestras de crecimiento

Fecha	Tratamiento	Descripción
Primer muestreo (07/03/19)	T1 (2 veces al día)	Existe significancia, se rechaza la hipótesis nula
	T2 (3 veces al día)	
	T3 (1 vez al día)	
	T4 (cada 3 días)	
Segundo muestreo (21/03/19)	T1 (2 veces al día)	Existe significancia, se rechaza la hipótesis nula
	T2 (3 veces al día)	
	T3 (1 vez al día)	
	T4 (cada 3 días)	
Tercero muestreo (04/04/19)	T1 (2 veces al día)	Existe significancia, se rechaza la hipótesis nula
	T2 (3 veces al día)	
	T3 (1 vez al día)	
	T4 (cada 3 días)	
Cuarto muestreo (18/04/19)	T1 (2 veces al día)	No existe significancia, se acepta la hipótesis nula
	T2 (3 veces al día)	
	T3 (1 vez al día)	
	T4 (cada 3 días)	
Quinto muestreo (02/05/19)	T1 (2 veces al día)	Existe significancia, se rechaza la hipótesis nula
	T2 (3 veces al día)	
	T3 (1 vez al día)	
	T4 (cada 3 días)	
Sexto muestreo (17/05/19)	T1 (2 veces al día)	No existe significancia, se acepta la hipótesis nula
	T2 (3 veces al día)	
	T3 (1 vez al día)	
	T4 (cada 3 días)	

Séptimo muestreo (31/05/19)	T1 (2 veces al día)	No existe significancia, se acepta la hipótesis nula
	T2 (3 veces al día)	
	T3 (1 vez al día)	
	T4 (cada 3 días)	
Octavo muestreo (13/06/19)	T1 (2 veces al día)	No existe significancia, se acepta la hipótesis nula
	T2 (3 veces al día)	
	T3 (1 vez al día)	
	T4 (cada 3 días)	
Noveno muestreo (27/06/19)	T1 (2 veces al día)	No existe significancia, se acepta la hipótesis nula
	T2 (3 veces al día)	
	T3 (1 vez al día)	
	T4 (cada 3 días)	

4.12.7. Profundidad de raíces

Se obtuvo cuatro muestras de suelo con un cilindro muestreador, para analizar la profundidad de raíces, las cuatro muestras fueron extraídas el 05/04/19 y como se presenta en la Figura 76, 77, 78 y 79, las raíces fueron de contextura delgada y frágiles, al momento de retirar los gránulos de suelo, estas se quebraron. Por esa razón no se continuó con la extracción de la muestra de raíces.



Figura 76: Profundidad de Raíces T1-R1.



Figura 77: Profundidad de Raíces T2-R3.



Figura 78: Profundidad de Raíces T3-R2.



Figura 79: Profundidad de Raíces T4-R2.

4.13. EVALUACIÓN CUALITATIVA

La evaluación cualitativa se realizó de forma visual de los factores: color, cobertura y uniformidad. Para corroborar los datos cualitativos y obtener una correlación de los datos.

4.13.1. Color

El color del césped fue evaluado cada 15 días desde el 07/03/19 hasta el 29/06/19. El análisis se realizó de forma visual y con la tabla Munsell, se asignó a tres colores que representan el color del césped en su estado bueno, intermedio y bajo como se presenta en el Cuadro 37. Además, se presentan posteriormente fotografías de los cuatro tratamientos y repeticiones que corresponden al 03 de mayo del presente año, considerando esta fecha debido a que reducía el efecto de calor y se iniciaba un cambio de temporada. Se realizó la inspección visual y se obtuvo que el tratamiento (T1) y (T2) obtienen mayor puntuación en color y el tratamiento que presentó un color no aceptable visualmente fue el tratamiento (T4), es decir, una frecuencia de riego mayor en temporada de verano ocasiona una reducción perjudicial de la humedad del suelo, además, fue en esta época donde la planta requiere mayor disponibilidad hídrica en el suelo. En la Figura 80, 81, 82 y 83, se presenta los tratamientos con sus tres repeticiones. Las mejores características fueron del tratamiento T1 y T2.

Cuadro 38: Resumen de las ocho medidas visuales de color.

Color	1ra	2da	3ra	4ta	5ta	6ta	7ma	8va	9na
	poda								
	07 mar. 2019	21 mar. 2019	04 abr. 2019	18 abr. 2019	02 may. 2019	17 may. 2019	31 may. 2019	14 jun. 2019	14 jun. 2019
T1-R1	3	3	2	2	3	3	3	3	3
T1-R2	3	3	2	3	2	3	3	3	3
T1-R3	3	3	3	3	2	3	3	3	3
T2-R1	3	3	2	3	2	3	3	3	3
T2-R2	3	3	3	3	3	2	3	3	3
T2-R3	3	3	3	3	2	3	3	3	3
T3-R1	3	3	3	3	2	3	2	3	3
T3-R2	3	3	3	3	3	3	3	3	3
T3-R3	3	3	3	2	2	3	3	3	3
T4-R1	3	3	3	2	2	2	2	3	3
T4-R2	3	3	2	2	2	2	2	3	3
T4-R3	3	3	2	2	2	3	2	2	3



Figura 80: Color - Tratamiento T1 – Riego 2 veces al día. Mayo

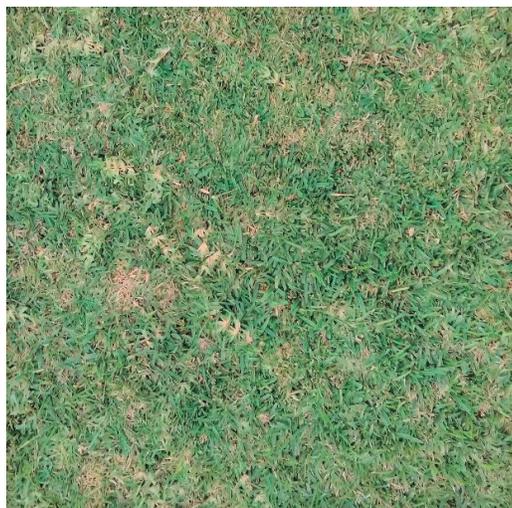
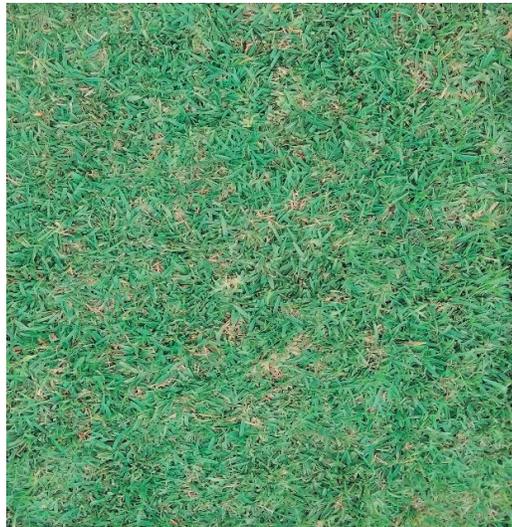


Figura 81: Color - Tratamiento T2 – Riego 3 veces al día.

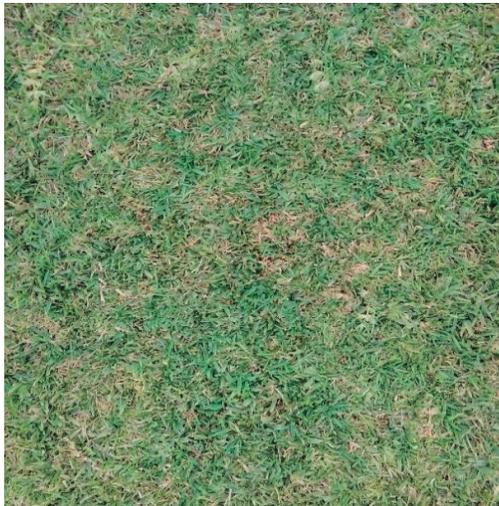


Figura 82: Color - Tratamiento T3 – Riego 1 vez al día.



Figura 83: Color - Tratamiento T4 – Riego cada 3 días.

4.13.2. Cobertura

El valor de cobertura verde fue obtenido con el software Fiji and ImageJ, versión 1.49k, donde se insertó una fotografía de la zona central de cada tratamiento con dimensiones de 0.80 metros de ancho por 0.80 metros de largo para analizar la cobertura del césped como muestra el Cuadro 39.

Cuadro 39: Resumen de las ocho medidas de cobertura verde del césped.

Cobertura	1ra	2da	3ra	4ta	5ta	6ta	7ma	8va	9na
	poda								
	07	21	04	18	02	17	31	14	27
	mar.	mar.	abr.	abr.	may.	may.	may.	jun.	jun.
	2019	2019	2019	2019	2019	2019	2019	2019	2019
T1-R1	99.76	99.70	97.59	97.71	98.08	99.41	97.91	96.52	96.34
T1-R2	99.68	99.27	90.17	99.25	87.55	77.92	83.59	85.24	92.27
T1-R3	99.71	99.62	82.14	99.42	79.21	76.32	88.40	93.51	97.65
T2-R1	99.78	99.53	90.31	99.30	81.53	82.30	84.44	90.17	97.76
T2-R2	98.70	99.58	94.47	98.32	98.42	97.06	96.21	97.66	99.63
T2-R3	99.77	98.75	91.80	95.57	91.40	90.06	91.75	95.36	98.80
T3-R1	98.98	98.67	74.54	99.88	83.76	84.91	87.38	87.74	96.69
T3-R2	99.87	99.67	99.42	99.20	92.20	95.86	95.27	96.49	93.99
T3-R3	99.14	99.55	93.64	99.72	90.73	74.73	91.63	97.30	97.28
T4-R1	99.72	99.41	84.65	94.88	71.25	74.33	83.48	83.65	84.79
T4-R2	99.68	97.88	84.48	92.82	70.06	70.23	63.05	74.42	83.63
T4-R3	99.84	99.14	98.44	98.61	90.93	82.43	88.24	93.77	93.90

Según el Cuadro 39 el tratamiento T2 presento buenos valores de cobertura, siguiéndole el tratamiento T1. En las Figuras 84, 85, 86 y 87, se presenta imágenes extraídas del software Fiji and Image J, donde el contorno de amarillo es el área discriminada por presencia de césped. En las figuras 84 y 85, corresponden al T1 y T2 donde el área con borde de color amarillo fue menor en comparación a los demás tratamientos, esto quiere decir que cuenta con poca área desnuda o seca y tiene buena aceptación de la cobertura, mientras que el área con una cobertura menor fue del tratamiento T4, esto se puede corroborar con las figura 86 y 87, donde cuenta con mayor área con contornos de color amarillo, esto significa que el área cuenta zonas decoloradas y amarillentas, estas repercuten en la inspección visual, tornándose no agradables.

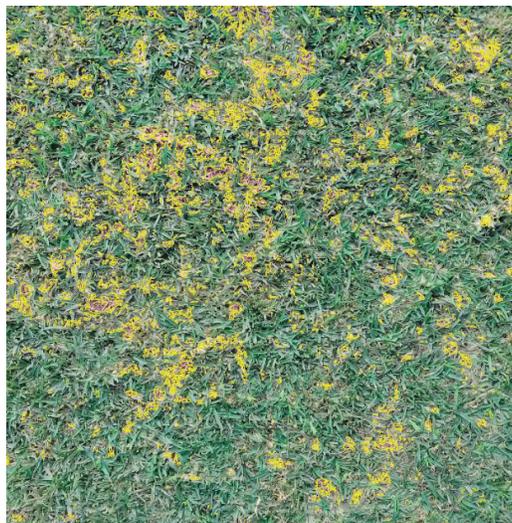


Figura 84: Cobertura verde - Tratamiento T1 – Riego 2 veces al día. 13 junio



Figura 85: Cobertura verde - Tratamiento T2 – Riego 3 veces al día.



Figura 86: Cobertura verde - Tratamiento T3 – Riego 1 vez al día.

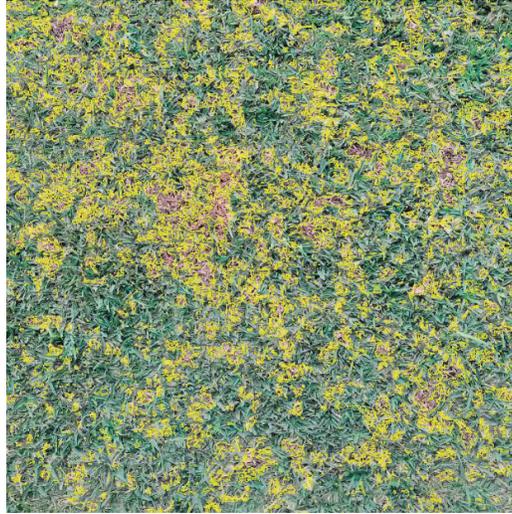


Figura 87: Cobertura verde - Tratamiento T4 – Riego cada 3 días.

4.13.3. Uniformidad

El valor de uniformidad de riego se obtuvo de forma visual y se agregó una calificación con respecto a la uniformidad de todo el césped, considerando áreas peladas, áreas con crecimiento disparate y zonas amarillentas. En la Cuadro 39 se presenta los valores de uniformidad de cada tratamiento desde el 07/03/19 hasta el 29/06/19.

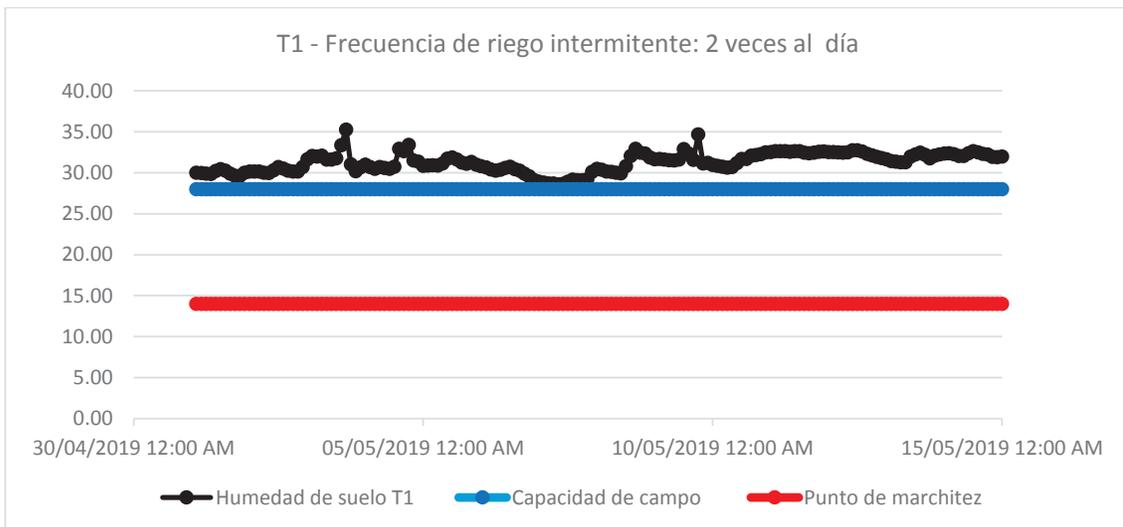
El tratamiento T1, T2 y T3, presentaron los mejores valores de uniformidad de césped, sin embargo, el tratamiento T4 presento un bajo valor de uniformidad para los primeros meses de la evaluación, esto se debió al bajo valor de humedad disponible en el suelo, repercutiendo en la uniformidad, color y cobertura.

Cuadro 40: Resumen de las ocho medidas de cobertura verde del césped.

	1ra poda	2da poda	3ra poda	4ta poda	5ta poda	6ta poda	7ma poda	8va poda	9na poda
Uniformidad	07 mar. 2019	21 mar. 2019	04 abr. 2019	18 abr. 2019	02 may. 2019	17 may. 2019	31 may. 2019	14 jun. 2019	14 jun. 2019
T1-R1	3	3	3	2	2	2	3	3	3
T1-R2	3	3	2	2	2	2	2	3	3
T1-R3	3	3	2	2	2	2	2	3	3
T2-R1	3	3	2	2	2	2	2	2	3
T2-R2	3	3	2	2	3	3	3	3	3
T2-R3	3	3	2	2	2	2	2	3	3
T3-R1	2	3	2	2	2	2	2	3	3
T3-R2	3	3	3	3	3	3	3	3	3
T3-R3	3	3	2	2	2	2	2	3	3
T4-R1	3	2	2	2	2	2	2	2	2
T4-R2	3	2	2	2	2	2	2	2	2
T4-R3	3	3	3	2	2	2	2	2	2

En la siguientes graficas se agruparon los valores cualitativos y cuantitativos para interpretar los resultados de la calidad visual. El Cuadro 41, 42, 43 y 44, presenta el resumen de datos de las variables cualitativas y cuantitativas resúmenes de cada tratamiento.

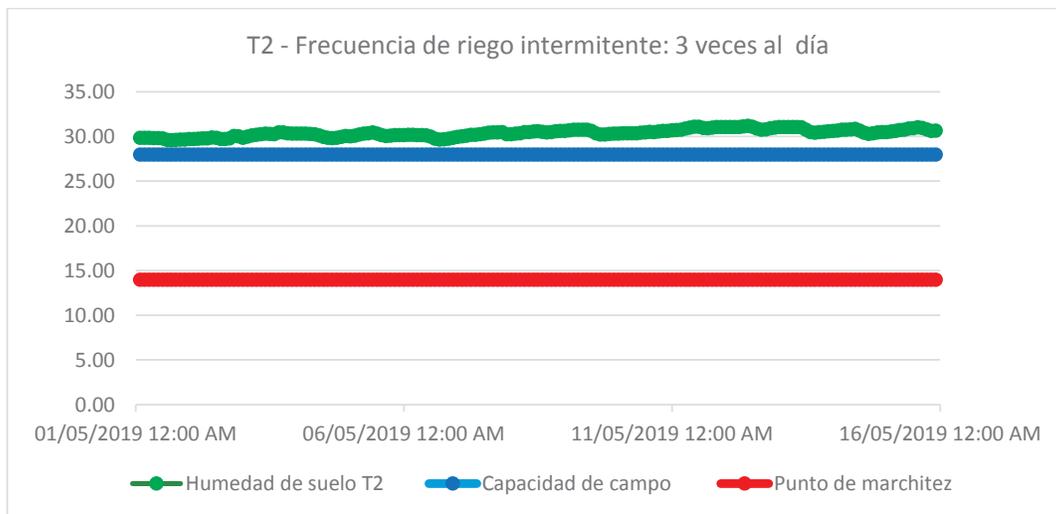
31/05/19 – T1 – Riego intermitente 2 veces al día



Cuadro 41: Cuadro resumen de variables cualitativas y cuantitativas del tratamiento 1

T1 - Riego 2 veces al día	
NDVI	0.57
Crecimiento de hoja (cm)	1.84
CU (%)	74.37
Peso fresco (gr)	10.87
Peso seco (gr)	3.50
Cobertura (%)	89.97
Color	3.00
Uniformidad	3.00

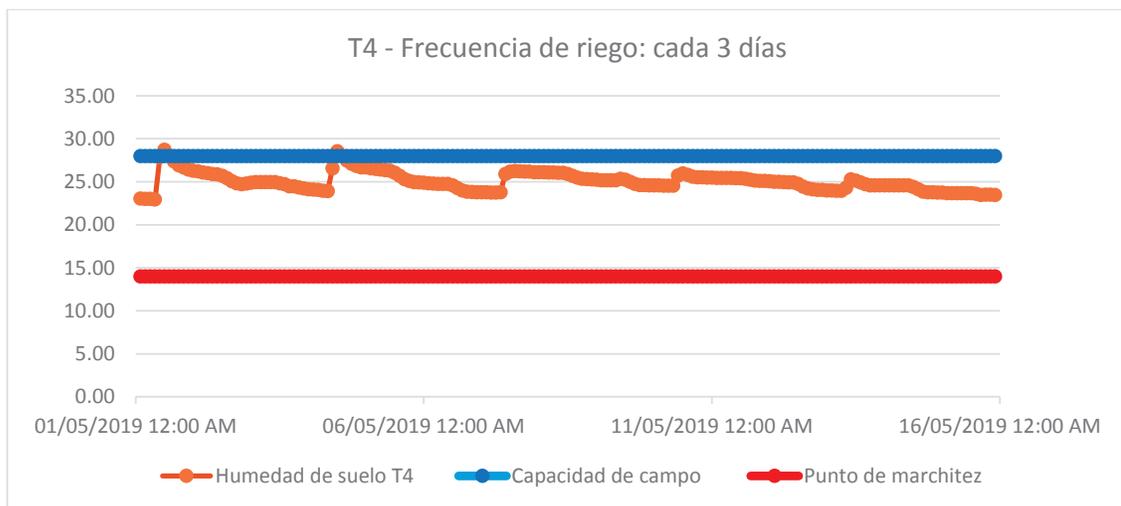
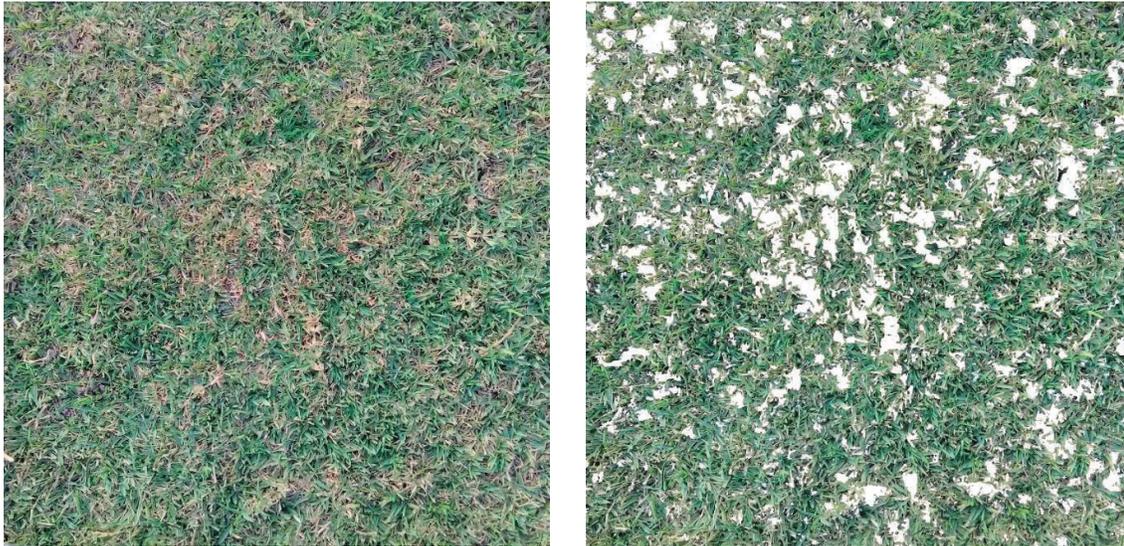
31/05/19 – T2 – Riego intermitente 3 veces al día



Cuadro 42: Cuadro resumen de variables cualitativas y cuantitativas del tratamiento 2

T2 - Riego 3 veces al día	
NDVI	0.60
Crecimiento de hoja (cm)	1.94
CU (%)	79.76
Peso fresco (gr)	9.97
Peso seco (gr)	3.23
Cobertura (%)	90.80
Color	3.00
Uniformidad	3.00

31/05/19 – T4 – Riego cada 3 días



Cuadro 44: Cuadro resumen de variables cualitativas y cuantitativas del tratamiento 4

T4 - Riego cada 3 días	
NDVI	0.50
Crecimiento de hoja (cm)	0.79
CU (%)	76.66
Peso fresco (gr)	4.60
Peso seco (gr)	1.50
Cobertura (%)	78.25
Color	2.00
Uniformidad	2.00

5. CONCLUSIONES

- ❖ La automatización y telecontrol del sistema vía internet facilitó el control para las distintas frecuencias de riego adecuándose a los horarios diurnos y nocturnos.
- ❖ La programación se realizó con el entorno de desarrollo integrado de Arduino, usando el lenguaje C++, se vincularon los códigos de programación de los sensores, actuadores y seguridad del sistema, adicionando códigos para la conexión vía internet y el aplicativo móvil con la plataforma Blynk. Se implementaron sensores y actuadores en campo y fueron unidos a dos microcontroladores: Arduino Mega 2560 y ESP 32 DEVKIT DEVKIT V1, la cantidad de pines para la conexión fueron suficientes y brindaron un medio de comunicación que se adaptó a la red alámbrica e inalámbrica. El sistema automatizado vía internet a través del aplicativo “GrootSmart” permitió programar el encendido y apagado de las electroválvulas y electrobomba para las distintas frecuencias de riego intermitente, diario y cada 3 días. El monitoreo en tiempo real, brinda información del funcionamiento del sistema, además del almacenamiento de información para visualizar su comportamiento y detectar fallas del sistema desde cualquier lugar y momento, siendo necesaria la conexión a internet.
- ❖ En base al análisis cuantitativo y cualitativo de la calidad del césped los tratamientos intermitentes propiciaron un mayor valor de NDVI y crecimiento de hoja, diferenciándose significativamente de los otros tratamientos. Se seleccionó el tratamiento T2 (frecuencia de riego: 3 veces al día) como la mejor opción para el césped americano por la buena calidad visual obteniendo mejores valores cuantitativos y cualitativos como por ejemplo: cobertura de 90.8%, color y uniformidad con clasificación buena, presentó un NDVI bueno de 0.6 y el valor de la humedad disponible se mantuvo al 100% de la humedad útil, es decir a valores de capacidad de campo. El tratamiento T1 (frecuencia de riego: 2 veces al día) presentó una aceptable calidad visual del césped obteniendo (cobertura de 89.9%, color y uniformidad con clasificación buena), presentó un NDVI regular de 0.58 y el valor de la humedad volumétrica del suelo se mantuvo cercano a la capacidad de campo.

5. RECOMENDACIONES

- Para un futuro trabajo de investigación se recomienda implementar un controlador de riego y un aplicativo conectado al sistema de riego mediante señal GSM y radiofrecuencia, e implementarlo en un área mayor como el huerto agrícola.
- Implementar y vincular al sistema de riego una estación automática con la plataforma de Arduino, el cual cumplirá la función de brindar el dato de evapotranspiración y genere un riego automático y de forma directa.
- El datalogger debe ser colocado en algún lugar seguro y con ventilación, debido que la caja se encuentra se mantiene en constante humedad ocasionando fallo del circuito eléctrico.
- Elaborar un controlador de presiones para activar el retrolavado de forma automatizada, esto puede ser programando un tiempo de retrolavado o por diferencia de presiones.
- Investigar el rendimiento de un producto agrícola trabajando con la humedad por debajo de capacidad de campo, manteniéndola a capacidad de campo y por encima de capacidad de campo.
- Es necesario la lectura del manual para el control y mantenimiento del sistema automatizado vía internet, para su conservación.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdelraouf Ramadan, E., Bakry Ahmed, B., & Moamen Hamed, T. (2013). Effect of pulse drip irrigation and mulching systems on yield, quality traits and irrigation water use efficiency of soybean under sandy soil conditions. *Journal Agricultural Sciences*, 04(05), 249–261. <https://doi.org/10.4236/as.2013.45036>
- Allen, G., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. FAO (Vol. 56). <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.05.042>
- Anaya-Isaza, A., Peluffo-Ordoñez, D., Ivan-Rios, J., Castro-Silva, J., Carvajal Ruiz, D., & Espinosa Llanos, L. (2016). Sistema de Riego Basado En La Internet De Las Cosas (IoT).
- Arduino. (2018). Arduino. Retrieved August 27, 2019, from <https://www.arduino.cc/>
- Ascencios, D., Montalvo, N., Meza, K., & Cifuentes, A. (2019). Irrigation coefficients of turfgrass (*Stenotaphrum secundatum*) in arid conditions, under water stress using subsurface drip irrigation. *Scientia Agropecuaria*, 10(2), 207–216. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2019.02.06>
- Betancourt, D., Gómez, G., & Rodríguez, J. (2016). La internet de las cosas. *Revista Investigación y Ciencia*, (339), 50–55.
- Blynk. (2019). Blynk IoT platform. Retrieved August 28, 2019, from <https://blynk.io/>
- Buesa Pueyo, I. (2013). *Determinación del estado hídrico del suelo mediante sensores FDR en vid cv. moscatel de alejandría regada por goteo*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Carvalho, R. L. da S., & Delgado, A. R. S. (2017). Estimativas Da Evapotranspiração De Referência Do Município De Ariquemes (Ro) Utilizando Os Métodos Penman-Monteith-Fao E Hargreaves-Samani. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, 10(6), 1038–1048. <https://doi.org/10.7127/rbai.v10n600497>

- Castro C., N. D., Chamorro F., L. E., & Viteri M., C. A. (2016). Una red de sensores inalámbricos para la automatización y control del riego localizado. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 33(2), 106. <https://doi.org/10.22267/rcia.163302.57>
- Caturegli, L., Corniglia, M., Gaetani, M., Grossi, N., Magni, S., Migliazzi, M., ... Voltterrani, M. (2016). Unmanned aerial vehicle to estimate nitrogen status of turfgrasses. *Journal PLoS ONE*, 11(6), 1–13. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0158268>
- Chaitanya, K. S., Ilayarajaa, K. T., Karthikeyan, & Teja Reddy, K. M. (2017). Android based iot for agriculture automation. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, 117(21 Special Issue), 169–176. Retrieved from <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85044389824&partnerID=40&md5=d3093599ee4d48b168ed17fa5ba0b958>
- Cifuentes Meza, A. T. C. (2016). *Requerimiento de agua para el césped americano empleando riego por goteo subterráneo, durante el otoño en la UNALM*. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Cote, C. M., Bristow, K. L., Charlesworth, P. B., Cook, F. J., & Thorburn, P. J. (2003). Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation. *Journal Irrigation Science*, 22(3–4), 143–156. <https://doi.org/10.1007/s00271-003-0080-8>
- Damian Farrow, Joseph Baker, and C. M. (2015). *Sistema electronico de monitoreo y control para el movimiento de volúmenes de agua en un laboratorio de aguas de bajo costo usando una interfaz web y un servidor embebido usando el shield ethernet basado en el CI WI5100 de wiznet*. Universidad Católica De Manizales Facultad De Ingeniería. <https://doi.org/10.1145/3132847.3132886>
- Decagon Devices. (2015). GS1: Soil moisture sensor. Retrieved from http://publications.decagon.com/Manuals/14640_GS1_Web.pdf
- Dewanto, E., & Yoseph, J. (2018). Tandon Air Otomatis Dengan Sistem Monitoring Melalui Android Berbasis Arduino Uno. *Autocracy*. <https://doi.org/10.21009/autocracy.05.1.2>
- DGIAR. (2015). *Manual de calculo de eficiencia para sistemas de riego*.

- Eisenberg, B., Nemcova, E., Poblet, R., & Stokman, A. (2014). Estrategia de Infraestructura Ecológica de Lima (LEIS). Retrieved November 21, 2019, from https://issuu.com/ilpe/docs/leis_-_esp_20141117_copy
- electrontools. (2016). Sensor de ultrasonido US-100 - Electrónica analógica y digital. Retrieved September 9, 2019, from <https://www.electrontools.com/Home/WP/2016/03/09/sensor-ultrasonido-us-100/>
- Escobar, C. D., & Farfán, K. J. (2018). *Diseño de un sistema de riego para la implementación de cultivos automatizados en el recinto playa seca del Cantón El Triunfo*. Universidad de Guayaquil.
- Feldhake, C. M., Danielson, R. E., & Butler, J. D. (1983). Turfgrass Evapotranspiration. I. Factors Influencing Rate in Urban Environments. *Agronomy Journal*, 75(5), 824. <https://doi.org/10.2134/agronj1983.00021962007500050022x>
- Fernandez de Córdova Á, C. P., & Humberto, V. V. D. (2018). *Diseño e Implementación de un Sistema SCADA para el Control de Riego Mediante un Dispositivo Móvil*. Universidad de Azuay.
- Fuentes Martínez, V. (2014). *Introducción a la plataforma Arduino y al sensor ultrasónico HC-SR04*. Universidad Carlos III de Madrid.
- García Moreno, F., Bedoya Fierro, J., & López Martínez, G. (2013). Modelo a escala de un sistema de riego automatizado, alimentado con energía solar fotovoltaica: nueva perspectiva para el desarrollo agroindustrial colombiano. *Tecnura*, 17(2), 33–47. <https://doi.org/10.14483/22487638.7221>
- González Teruel, J. D. (2017). *Universidad politécnica de cartagena*.
- Govaerts, B., & Verhulst, N. (2010). The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) GreenSeeker TM Handheld Sensor: Toward Integrated Evaluation of Crop Management. Part B: User Guide. *Cimmyt*. Retrieved from <http://repository.cimmyt.org/xmlui/handle/10883/551>
- Guijarro-Rodríguez, A. A., Lorenzo, ;, Torres, J. C., Preciado-Maila, D. K., Nagib, B., & Manzur, Z. (2018). Sistema de riego automatizado con arduino. *ESPACIOS*, 39, 27. <https://doi.org/10.1023/A:1025882914527>

- Herrero Herranz, J. C., & Sánchez Allende, J. (2015). Una mirada al mundo arduino. *Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente*.
- iagua. (2019). Interpretación de un análisis de agua para riego | iAguá. Retrieved November 4, 2019, from <https://www.iagua.es/blogs/miguel-angel-monge-redondo/interpretacion-analisis-agua-riego>
- Lalnunthari, J., & Thanga, H. H. (2018). Dependence of hall effect flow sensor frequency on the attached inlet and outlet pipe size. *2017 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Asia, ICCE-Asia 2017, 2018-Janua*, 56–60. <https://doi.org/10.1109/ICCE-ASIA.2017.8307842>
- Largaespada, K., & Henríquez, C. (2015). Distribución Espacial De La Humedad Y Su Relación Con La Textura En Un Suelo. *Revista Agronomía Costarricense*, 39(3), 137–147.
- Leon, M., & Lema, R. (2019). *Director* : Universidad de Cuenca.
- Loboa, J., Ramírez, S., & Diaz, J. (2011). Evaluacion del coeficiente de uniformidad en cuatro emisores de riego usando filtracion gruesa de flujo ascendente en capas. *Escuela de Ingeniera de Antioquia*, 12.
- Lucero-Vega, G., Troyo-Diéguez, E., Murillo-Amador, B., Nieto-Garibay, A., Ruíz-Espinoza, F. H., Beltrán-Morañes, F. A., & Zamora-Salgado, S. (2017). Diseño de un sistema de riego subterráneo para abatir la evaporación en suelo desnudo comparado con dos métodos convencionales. *Revista Agrociencia*, 51(5), 487–505.
- Luis, L. (2017). Reducir ruido en sensores en Arduino con muestreo múltiple. Retrieved November 12, 2019, from <https://www.luisllamas.es/reducir-ruido-sensores-arduino-muestreo-multiple/>
- Mahzabin, A., Taziz, C. A., Amina, M. H., Gloria, M., & Zishan, M. S. R. (2016). Design and Implementation of an Automatic Irrigation System. *Iarjset*, 3(10), 159–162. <https://doi.org/10.17148/iarjset.2016.31030>
- Martin, E. C., & Muñoz, C. (2017). *Métodos para Medir la Humedad del Suelo para la Programación del Riego*. College of Agriculture, University of Arizona.
- Martínez B., L., & Astorga P., M. (2003). Manual de cultivo de olivo.

- Marylin Mamani, Marco Villalobos, R. H. (2017). Sistema web de bajo costo para monitorear y controlar un invernadero agrícola. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 25(4), 599–618. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052017000400599>
- Mayor, C. A., Charry, E., Muñoz, R. R., Beltrán, J. R., Rodríguez, E. C., Integráveis, L. D. S., ... Lsi-usp, U. D. S. P. (2014). Compensación y calibración de transmisores de presión piezorresistivos de alto desempeño de forma simultánea. *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, 35(3), 16–32. <https://doi.org/10.1234/rielac.v35i3.247>
- Mayorga Arias, D., Pazos Roldan, M. V. H., & Uvidia Vélez, M. (2019). Uso Del Índice Normalizado De Vegetación Para La Elaboración De Planos De Cultivo. *Revista Opuntia Brava*, 11(2), 261–265. <https://doi.org/10.35195/ob.v11i2.760>
- Mendonça, J. C., De Sousa, E. F., Bernardo, S., Sugawara, M. T., Peçanha, A. L., & Gottardo, R. D. (2007). Determination of the crop coefficient (Kc) for common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in Campos dos Goytacazes, RJ. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 11(5), 471–475. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662007000500004>
- Mendoza Padilla, J. E., & Marín Mendoza, M. A. (2018). Sistema de Monitoreo y Control de Variables del Entorno Doméstico Orientado a IoT. *Revista Gestion, Competitividad de Innovacion*, 52–66.
- MINAM. (2016). Superficie de área verde urbana por habitante | SINIA | Sistema Nacional de Información Ambiental. Retrieved October 31, 2019, from <https://sinia.minam.gob.pe/indicadores/superficie-area-verde-urbana-habitante>
- MML, M. M. D. E., Alcaldesa, L. A., Lima, M. D. E., Concejo, E. L., Lima, M. D. E., & Generales, D. (2014). Ordenanza N°1852-MML-2014-APCV.
- Monje Jiménez, R. J. (2006). *Manejo de céspedes con bajo consumo de agua*. (J. A. C. de A. y Pesca, Ed.), *Animal Genetics* (Vol. 39). Viceconsejería. Servicio de Publicaciones y Divulgación.
- Monje, R. (2016). *Grama Basta (Stenotaphrum Secundatum) en parque y jardines*. (J. A. C. de A. y Pesca, Ed.). Viceconsejería. Servicio de Publicaciones y Divulgación.

- Monk, S. (2012). *30 Proyectos con Arduino*. (E. Estribor, Ed.).
- Naylamp mechatronics. (2017a). Módulo Relay, 4 canales 5VDC. Retrieved August 14, 2019, from <https://naylampmechatronics.com/drivers/152-modulo-relay-4-canales-5vdc.html>
- Naylamp mechatronics. (2017b). Naylamp mechatronics. Retrieved August 28, 2019, from https://naylampmechatronics.com/espressif-esp/384-placa-de-desarrollo-para-esp32-nodemcu-32.html?search_query=esp+32+&results=503
- Naylamp mechatronics. (2017c). Sensor de flujo de agua 1" FS400A - Naylamp Mechatronics - Perú. Retrieved August 14, 2019, from https://naylampmechatronics.com/sensores-liquido/233-sensor-de-flujo-de-agua-1-fs400a.html?search_query=sensor+de+presion&results=153
- Naylamp mechatronics. (2017d). Sensor de presión HK3025 5.0MPa - Naylamp Mechatronics - Perú. Retrieved August 14, 2019, from https://naylampmechatronics.com/sensores-liquido/387-sensor-de-presion-hk3025-5mpa.html?search_query=sensor+de+presion&results=153
- Naylamp mechatronics. (2017e). Sensor Ultrasonido HC-SR04 - Naylamp Mechatronics - Perú. Retrieved August 14, 2019, from https://naylampmechatronics.com/sensores-proximidad/10-sensor-ultrasonido-hc-sr04.html?search_query=ultrasonido&results=18
- Naylamp mechatronics. (2017f). Válvula solenoide 1/2" 12V DC - Naylamp Mechatronics - Perú. Retrieved August 14, 2019, from https://naylampmechatronics.com/valvulas/314-valvula-solenoide-12-12v.html?search_query=valvula+solenoide&results=23
- Naylamp Mechatronics. (2017). Shield Ethernet W5100 - Naylamp Mechatronics - Perú. Retrieved September 2, 2019, from <https://naylampmechatronics.com/arduino-shields/12-shield-ethernet-w5100.html>
- Padilla, C., Acevedo, P., Dionicio, D., & Alva, J. (2019). Sistema de alarma doméstica a escala controlado por un aplicativo móvil Scale domestic alarm system controlled by a mobile application.

- Padilla, F. M., de Souza, R., Peña-Fleitas, M. T., Grasso, R., Gallardo, M., & Thompson, R. B. (2019). Influence of time of day on measurement with chlorophyll meters and canopy reflectance sensors of different crop N status. *Journal Precision Agriculture*. <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09641-1>
- Padilla Soldevilla, J. G. (2016). *Coeficiente de cultivo para el césped americano utilizando lisímetro de drenaje, durante la estacion de otoño- UNALM*. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Palma, Y., Palma, G., Molina, B., & Santana, L. (2013). Diseño e instalación de un sistema de riego por aspersión en el área de clones del cultivo de cacao (Theobroma cacao L.), en la ESPAM - MFL. *Revista Tecnológica ESPOL-RTE*, 28(Septiembre), 91. Retrieved from [http://repositorio.espam.edu.ec/bitstream/42000/28/1/Sabando Lucas Leonardo Alejandro-Molina Aquino Richard Robinson.pdf](http://repositorio.espam.edu.ec/bitstream/42000/28/1/Sabando%20Lucas%20Leonardo%20Alejandro-Molina%20Aquino%20Richard%20Robinson.pdf)
- Pérez Bladimir, Koo José, Garcia Fernando, C. J. (2014). Automatización, monitoreo y control remoto de un sistema de riego agrícola con código abierto. *Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology*. <https://doi.org/10.13140/2.1.1680.3207>
- Peters, R. T., & Ph, D. (2013). Practical use of soil moisture sensors for irrigation scheduling. *Washington State University Extention Fact Sheet*.
- Phogat, V., Skewes, M. A., Mahadevan, M., & Cox, J. W. (2013). Evaluation of soil plant system response to pulsed drip irrigation of an almond tree under sustained stress conditions. *Journal Agricultural Water Management*, 118, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.11.015>
- Pizarro, F. (1996). Pizarro- Riego Localizados de Alta Frecuencia.pdf.
- Quinones, H., Ruelle, P., & Nemeth, I. (2003). Comparison of three calibration procedures for tdr soil moisture sensors. *Journal Irrigation and Drainage*, 52(3), 203–217. <https://doi.org/10.1002/ird.95>
- Quiroga, alberto, Fernández, R., & Álvarez, C. (2018). *Análisis y evaluación de propiedades físico hídrica de los suelos* (EEA INTA A).

- RainBird. (2017). ClimateMinder Monitoreo profesional | Pájaro de lluvia. Retrieved August 25, 2019, from <https://www.rainbird.com/products/climate minder-professional-monitoring>
- Ramírez, W., & Hernández, L. (2016). Tolerancia a la salinidad en especies cespitosas Tolerancia a la salinidad en especies cespitosas. *Pastos y Forrajes*, 39(4), 235–245.
- Rawlins, S. L. (2010). Principles of Managing High Frequency Irrigation1. *Soil Science Society of America Journal*, 37(4), 626.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1973.03615995003700040041x>
- Rodríguez García, M. R., & Puig Estrada, O. (2012). Comportamiento hidráulico de los sistemas de riego por goteo superficial y sub superficial Hydraulic behavior of the superficial and sub superficial drip irrigation system. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuaria*, 3(537), 23–28.
- Ruiz Gutiérrez, J. M. (2015). *Arduino Ethernet Shield*. Retrieved from <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoEthernetShield>
- Salazar, J., & Silvestre, S. (2011). *Internet de las cosas* (Versión de). České vysoké učení technické v Praze Fakulta elektrotechnická.
- SALEPLAS, S. L. (2017). Riego Subterráneo. Retrieved from www.saleplas.es
- Sánchez Gutiérrez, R. A., Servin Palestina, M., GutiérrezBañuelos, H., & Serna Pérez, A. (2017). Eficiencia en el uso del agua de variedades de alfalfa (*Medicago sativa* L.) con sistema de riego subsuperficial. *Revista Mexicana De Ciencias Pecuarias*, 8(4), 429–435. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v8i4.4255>
- Serna, E. (2018). *Desarrollo e innovación en ingeniería*. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Edgar_Serna_M/publication/331385353_Desarrollo_e_innovacion_en_ingenieria_ed_2/links/5c76e4ce92851c69504663b5/Desarrollo-e-innovacion-en-ingenieria-ed-2.pdf#page=379
- Simon Mori, G. A. (2018). *Implementación, control y monitoreo de un sistema de riego por goteo subterráneo con microcontroladores*. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Soberón, V. S. (2014). *Islas de calor urbanas en la ciudad de Lima utilizando imágenes*

- satelitales*. Retrieved from
<http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/2405/P40-S62-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Susha Lekshmi, S. U., Singh, D. N., & Shojaei Baghini, M. (2014). A critical review of soil moisture measurement. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 54, 92–105.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.04.007>
- TecnologiesSpectrum. (2014). FieldScout TDR 350 Soil Moisture Meter with Case | Spectrum Technologies. Retrieved August 25, 2019, from
<https://www.specmeters.com/soil-and-water/soil-moisture/fieldscout-tdr-meters/fieldscout-tdr-350-soil-moisture-meter-with-case/>
- Torrente Artero, Ó. (2013a). ARDUINO - Curso práctico de formación. In S. A. Alfaomega Grupo Editor (Ed.) (Primera, pp. 7,61-65,129). México.
- Torrente Artero, Ó. (2013b). *Arduino Curso practico de formación*. (Alfaomega, Ed.) (Primera ed).
- Trimble. (2014). *Hoja de datos del sensor de cultivos de mano GreenSeeker*. Retrieved from www.trimble.com/agriculture
- Vega E., A. M., Santamaría P., F., & Rivas T., E. (2014). Internet de los objetos empleando arduino para la gestión eléctrica domiciliaria. *Revista EAN*, (77), 24.
<https://doi.org/10.21158/01208160.n77.2014.813>
- Wherley, B., Dukes, M. D., Cathey, S., Miller, G., & Sinclair, T. (2015). Consumptive water use and crop coefficients for warm-season turfgrass species in the Southeastern United States. *Journal Agricultural Water Management*, 156, 10–18.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.03.020>
- Zotarelli, L., Dukes, M. D., & Morgan, K. T. (2013). Interpretación del contenido de la humedad del suelo para determinar capacidad de campo y evitar riego excesivo en suelos arenosos utilizando sensores de humedad. *Institute of Food and Agricultural Sciences (IFAS)*.
- Zulueta, C. (2019). Tipos de suelo en el césped. Cuales son apropiados. - Zulueta

Corporación. Retrieved November 4, 2019, from <https://www.zulueta.com/como-preparar-el-suelo-perfecto-para-el-cesped-1/>

7. ANEXOS

ANEXO 1: Análisis estadístico

a) Análisis estadístico - NDVI

Los datos obtenidos en campo se procesaron y analizaron estadísticamente como se presenta en el Cuadro 45.

Cuadro 45: Resumen de los valores de NDVI de la investigación

RESUMEN DEL NDVI								
TRATAM IENTO	FECHAS (*)							
	1ra muestra 21 Mar.	2da muestra 04 Abr.	3ra muestra 18 Abr.	4ta muestra 02 May.	5ta muestra 17 May.	6ta muestra 31 May.	7ma muestra 13 Jun.	8va muestra 27 Jun.
T1-R1	0.65	0.67	0.61	0.6	0.62	0.60	0.60	0.67
T1-R2	0.59	0.58	0.53	0.49	0.51	0.54	0.54	0.62
T1-R3	0.59	0.61	0.52	0.51	0.51	0.58	0.57	0.64
T2-R1	0.61	0.61	0.55	0.54	0.54	0.53	0.51	0.56
T2-R2	0.64	0.68	0.64	0.65	0.61	0.68	0.61	0.68
T2-R3	0.62	0.64	0.59	0.57	0.58	0.6	0.58	0.64
T3-R1	0.6	0.6	0.5	0.46	0.48	0.51	0.53	0.62
T3-R2	0.66	0.67	0.64	0.62	0.62	0.67	0.61	0.70
T3-R3	0.61	0.6	0.52	0.47	0.5	0.53	0.52	0.60
T4-R1	0.59	0.59	0.51	0.47	0.46	0.49	0.51	0.55
T4-R2	0.56	0.57	0.47	0.44	0.44	0.49	0.48	0.55
T4-R3	0.6	0.62	0.52	0.48	0.44	0.53	0.53	0.62

(*) Datos obtenidos del año 2019

Segunda muestra (04/04/19)

Cuadro 46: Análisis de varianza del NDVI en el segundo muestreo

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
NDVI 04/04/2019	12	0.25	0.00	6.03

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	3.8E-03	3	1.3E-03	0.90	0.4803
TRATAMIENTO	3.8E-03	3	1.3E-03	0.90	0.4803
Error	0.01	8	1.4E-03		
Total	0.02	11			

Prueba de Tukey al 5% de significancia

Cuadro 47: Prueba de Tukey del NDVI en el segundo muestreo

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=0.09783

Error: 0.0014 gl: 8

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.	
T4	0.59	3	0.02	A
T1	0.62	3	0.02	A
T3	0.62	3	0.02	A
T2	0.64	3	0.02	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Tercera muestra (18/04/19)

Cuadro 48: Análisis de varianza del NDVI en el tercer muestreo

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
NDVI 18/04/2019	12	0.38	0.14	9.49

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.01	3	4.4E-03	1.61	0.2611
TRATAMIENTO	0.01	3	4.4E-03	1.61	0.2611
Error	0.02	8	2.7E-03		
Total	0.04	11			

Prueba de Tukey al 5% de significancia

Cuadro 49: Prueba de Tukey del NDVI en el tercer muestreo

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=0.13649

Error: 0.0027 gl: 8

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.	
T4	0.50	3	0.03	A
T1	0.55	3	0.03	A
T3	0.55	3	0.03	A
T2	0.59	3	0.03	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Cuarta muestra (02/05/19)

Cuadro 50: Análisis de varianza del NDVI en el cuarto muestreo

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
NDVI 02/05/2019	12	0.43	0.22	11.72

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.02	3	0.01	2.05	0.1859
TRATAMIENTO	0.02	3	0.01	2.05	0.1859
Error	0.03	8	3.8E-03		
Total	0.05	11			

Prueba de Tukey al 5% de significancia

Cuadro 51: Prueba de Tukey del NDVI en el cuarto muestreo

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=0.16083

Error: 0.0038 gl: 8

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.
T4	0.46	3	0.04 A
T3	0.52	3	0.04 A
T1	0.53	3	0.04 A
T2	0.59	3	0.04 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Quinta muestra (17/05/19)

Cuadro 52: Análisis de varianza del NDVI en el quinto muestreo

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
NDVI 17/05/2019	12	0.63	0.49	9.54

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.04	3	0.01	4.59	0.0377
TRATAMIENTO	0.04	3	0.01	4.59	0.0377
Error	0.02	8	2.6E-03		
Total	0.06	11			

Prueba de Tukey al 5% de significancia

Cuadro 53: Prueba de Tukey del NDVI en el quinto muestreo

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=0.13204

Error: 0.0025 gl: 8

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.
T4	0.44	3	0.03 A
T3	0.54	3	0.03 A B
T1	0.56	3	0.03 A B
T2	0.58	3	0.03 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Sexta muestra (31/05/19)

Cuadro 54: Análisis de varianza del NDVI en el sexto muestreo

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
NDVI 31/05/2019	12	0.35	0.11	10.78

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.02	3	0.01	1.45	0.2982
TRATAMIENTO	0.02	3	0.01	1.45	0.2982
Error	0.03	8	3.7E-03		
Total	0.05	11			

Prueba de Tukey al 5% de significancia

Cuadro 55: Prueba de Tukey del NDVI en el sexto muestreo

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=0.15851
Error: 0.0037 gl: 8

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.	
T4	0.50	3	0.04	A
T3	0.57	3	0.04	A
T1	0.57	3	0.04	A
T2	0.60	3	0.04	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Séptima muestra (31/05/19)

Cuadro 56: Análisis de varianza del NDVI en el sexto muestreo

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
NDVI 31/05/2019	12	0.35	0.11	10.78

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.02	3	0.01	1.45	0.2982
TRATAMIENTO	0.02	3	0.01	1.45	0.2982
Error	0.03	8	3.7E-03		
Total	0.05	11			

Prueba de Tukey al 5% de significancia

Cuadro 57: Prueba de Tukey del NDVI en el sexto muestreo

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=0.15851
Error: 0.0037 gl: 8

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.	
T4	0.50	3	0.04	A
T3	0.57	3	0.04	A
T1	0.57	3	0.04	A
T2	0.60	3	0.04	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Octava muestra (31/05/19)

Cuadro 58: Análisis de varianza del NDVI en el sexto muestreo

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
NDVI 15/06/2019	12	0.37	0.13	7.40

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.01	3	2.6E-03	1.55	0.2744
TRATAMIENTO	0.01	3	2.6E-03	1.55	0.2744
Error	0.01	8	1.7E-03		
Total	0.02	11			

Prueba de Tukey al 5% de significancia

Cuadro 59: Prueba de Tukey del NDVI en el sexto muestreo

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=0.10621

Error: 0.0016 gl: 8

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.	
T4	0.51	3	0.02	A
T3	0.55	3	0.02	A
T2	0.57	3	0.02	A
T1	0.57	3	0.02	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Novena muestra (31/05/19)

Cuadro 60: Análisis de varianza del NDVI en el sexto muestreo

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
NDVI 27/06/2019	12	0.35	0.11	7.56

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.01	3	3.2E-03	1.44	0.3021
TRATAMIENTO	0.01	3	3.2E-03	1.44	0.3021
Error	0.02	8	2.2E-03		
Total	0.03	11			

Prueba de Tukey al 5% de significancia

Cuadro 61: Prueba de Tukey del NDVI en el sexto muestreo

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=0.12264

Error: 0.0022 gl: 8

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.	
T4	0.57	3	0.03	A
T2	0.63	3	0.03	A
T3	0.64	3	0.03	A
T1	0.64	3	0.03	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

ANÁLISIS ESTADÍSTICO - COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD

Los datos obtenidos en campo se procesaron y analizaron como se presenta.

Segunda muestra (21/03/19)

Cuadro 62: Análisis de varianza del coeficiente de uniformidad en la fecha 21/03/19.

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
CU 21/03/2019	12	0.13	0.00	5.54

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	2.0E-03	3	6.8E-04	0.38	0.7678
Tratamiento	2.0E-03	3	6.8E-04	0.38	0.7678
Error	0.01	8	1.8E-03		
Total	0.02	11			

Prueba de Tukey al 5% de significancia

Cuadro 63: Prueba de Tukey del coeficiente de uniformidad para la fecha 21/03/19.

```

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=0.10990
Error: 0.0018 gl: 8
Tratamiento Medias n E.E.
-----
T2          0.74  3 0.02 A
T1          0.76  3 0.02 A
T4          0.77  3 0.02 A
T3          0.77  3 0.02 A
-----
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)
    
```

Tercera muestra (04/04/19)

Cuadro 64: Análisis de varianza del coeficiente de uniformidad en la fecha 04/04/19

```

Análisis de la varianza
-----
Variable      N   R²   R² Aj  CV
-----
CU 04/04/2019 12 0.30  0.03  6.63

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)
-----
F.V.         SC  gl  CM      F    p-valor
-----
Modelo       0.01  3  2.6E-03  1.12  0.3961
Tratamiento  0.01  3  2.6E-03  1.12  0.3961
Error        0.02  8  2.3E-03
Total        0.03 11
    
```

Prueba de Tukey al 5% de significancia

Cuadro 65: Prueba de Tukey del coeficiente de uniformidad para la fecha 04/04/19

```

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=0.12608
Error: 0.0023 gl: 8
Tratamiento Medias n E.E.
-----
T2          0.70  3 0.03 A
T1          0.72  3 0.03 A
T3          0.73  3 0.03 A
T4          0.77  3 0.03 A
-----
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)
    
```

Cuarta muestra (18/04/19)

Cuadro 66: Análisis de varianza del coeficiente de uniformidad en la fecha 18/04/19

```

Análisis de la varianza
-----
Variable      N   R²   R² Aj  CV
-----
CU 18/04/2019 12 0.47  0.27  5.50

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)
-----
F.V.         SC  gl  CM      F    p-valor
-----
Modelo       0.01  3  4.5E-03  2.34  0.1491
Tratamiento  0.01  3  4.5E-03  2.34  0.1491
Error        0.02  8  1.9E-03
Total        0.03 11
    
```

Prueba de Tukey al 5% de significancia

Cuadro 67: Prueba de Tukey del coeficiente de uniformidad para la fecha 18/04/19

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=0.11422

Error: 0.0019 gl: 8

Tratamiento	Medias	n	E.E.
T4	0.76	3	0.03 A
T3	0.77	3	0.03 A
T1	0.82	3	0.03 A
T2	0.84	3	0.03 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Quinta muestra (02/05/19)

Cuadro 68: Análisis de varianza del coeficiente de uniformidad en la fecha 02/05/19

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
CU 02/05/2019	12	0.09	0.00	8.18

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	3.3E-03	3	1.1E-03	0.27	0.8459
Tratamiento	3.3E-03	3	1.1E-03	0.27	0.8459
Error	0.03	8	4.1E-03		
Total	0.04	11			

Prueba de Tukey al 5% de significancia

Cuadro 69: Prueba de Tukey del coeficiente de uniformidad para la fecha 02/05/19

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=0.16691

Error: 0.0041 gl: 8

Tratamiento	Medias	n	E.E.
T1	0.75	3	0.04 A
T3	0.78	3	0.04 A
T4	0.79	3	0.04 A
T2	0.80	3	0.04 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Sexta muestra (17/05/19)

Cuadro 70: Análisis de varianza del coeficiente de uniformidad en la fecha 17/05/19

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
CU 17/05/2019	12	0.16	0.00	7.72

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.01	3	1.8E-03	0.49	0.6967
Tratamiento	0.01	3	1.8E-03	0.49	0.6967
Error	0.03	8	3.6E-03		
Total	0.03	11			

Prueba de Tukey al 5% de significancia

Cuadro 71: Prueba de Tukey del coeficiente de uniformidad para la fecha 17/05/19

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=0.15634
 Error: 0.0036 gl: 8

Tratamiento	Medias	n	E.E.
T1	0.74	3	0.03 A
T4	0.77	3	0.03 A
T3	0.79	3	0.03 A
T2	0.80	3	0.03 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Séptima muestra (31/05/19)

Cuadro 72: Análisis de varianza del coeficiente de uniformidad en la fecha 31/05/19

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
CU 31/05/2019	12	0.30	0.04	2.74

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	2.2E-03	3	7.2E-04	1.14	0.3912
Tratamiento	2.2E-03	3	7.2E-04	1.14	0.3912
Error	0.01	8	6.3E-04		
Total	0.01	11			

Prueba de Tukey al 5% de significancia

Cuadro 73: Prueba de Tukey del coeficiente de uniformidad para la fecha 31/05/19

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=0.06580
 Error: 0.0006 gl: 8

Tratamiento	Medias	n	E.E.
T4	0.90	3	0.01 A
T1	0.91	3	0.01 A
T3	0.92	3	0.01 A
T2	0.94	3	0.01 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Octava muestra (14/06/19)

cuadro 74: Análisis de varianza del coeficiente de uniformidad en la fecha 14/06/19.

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
CU 14/06/2019	12	0.19	0.00	3.66

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	2.1E-03	3	6.9E-04	0.64	0.6099
Tratamiento	2.1E-03	3	6.9E-04	0.64	0.6099
Error	0.01	8	1.1E-03		
Total	0.01	11			

Prueba de Tukey al 5% de significancia

Cuadro 75: Prueba de Tukey del coeficiente de uniformidad para la fecha 14/06/19.

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=0.08573

Error: 0.0011 gl: 8

Tratamiento	Medias	n	E.E.	
T3	0.88	3	0.02	A
T1	0.89	3	0.02	A
T2	0.90	3	0.02	A
T4	0.92	3	0.02	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Novena muestra (28/06/19)

Cuadro 76: Análisis de varianza del coeficiente de uniformidad en la fecha 28/06/19.

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
CU 27/06/2019	12	0.33	0.07	8.27

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.02	3	0.01	1.29	0.3416
Tratamiento	0.02	3	0.01	1.29	0.3416
Error	0.04	8	0.01		
Total	0.06	11			

Prueba de Tukey al 5% de significancia

Cuadro 77: Prueba de Tukey del coeficiente de uniformidad para la fecha 28/06/19.

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=0.18855

Error: 0.0052 gl: 8

Tratamiento	Medias	n	E.E.	
T4	0.81	3	0.04	A
T2	0.87	3	0.04	A
T3	0.90	3	0.04	A
T1	0.91	3	0.04	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

b) Análisis estadístico – peso fresco

Los datos obtenidos en campo se procesaron y analizaron estadísticamente como se presenta .

Segunda muestra (21/03/19)

Cuadro 78: Análisis de varianza del peso fresco en la segunda poda

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
peso fresco 21/03/2019	12	0.45	0.25	46.36

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1121.05	3	373.68	2.19	0.1668
TRATAMIENTO	1121.05	3	373.68	2.19	0.1668
Error	1363.86	8	170.48		
Total	2484.91	11			

Prueba de Tukey al 5% de significancia

Cuadro 79: Prueba de Tukey del peso fresco en la segunda poda

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=34.13999

Error: 170.4825 gl: 8

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.
T4	16.70	3	7.54 A
T2	23.53	3	7.54 A
T1	29.47	3	7.54 A
T3	42.97	3	7.54 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Tercera muestra (04/04/19)

Cuadro 80: Análisis de varianza del peso fresco en la tercera poda

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
peso fresco 04/04/2019	12	0.43	0.22	35.15

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	129.08	3	43.03	2.05	0.1858
TRATAMIENTO	129.08	3	43.03	2.05	0.1858
Error	168.11	8	21.01		
Total	297.19	11			

Prueba de Tukey al 5% de significancia

Cuadro 81: Prueba de Tukey del peso fresco en la tercera poda

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=11.98591

Error: 21.0133 gl: 8

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.
T4	8.90	3	2.65 A
T1	11.50	3	2.65 A
T2	13.97	3	2.65 A
T3	17.80	3	2.65 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Cuarta muestra (18/04/19)

Cuadro 82: Análisis de varianza del peso fresco en la cuarta poda

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
peso fresco 18/04/2019	12	0.41	0.18	51.18

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	265.02	3	88.34	1.83	0.2206
TRATAMIENTO	265.02	3	88.34	1.83	0.2206
Error	387.23	8	48.40		
Total	652.25	11			

Prueba de Tukey al 5% de significancia

Cuadro 83: Prueba de Tukey del peso fresco en la cuarta poda

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=18.19121

Error: 48.4034 gl: 8

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.
T4	5.70	3	4.02 A
T1	15.17	3	4.02 A
T2	15.44	3	4.02 A
T3	18.07	3	4.02 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Quinta muestra (02/05/19)

Cuadro 84: Análisis de varianza del peso fresco en la quinta poda

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
peso fresco 02/05/2019	12	0.57	0.41	43.30

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	225.97	3	75.32	3.60	0.0655
TRATAMIENTO	225.97	3	75.32	3.60	0.0655
Error	167.50	8	20.94		
Total	393.47	11			

Prueba de Tukey al 5% de significancia

Cuadro 85: Prueba de Tukey del peso fresco en la quinta poda

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=11.96426

Error: 20.9375 gl: 8

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.
T4	4.60	3	2.64 A
T2	9.97	3	2.64 A B
T1	10.87	3	2.64 A B
T3	16.83	3	2.64 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Sexta muestra (16/05/19)

Cuadro 86: Análisis de varianza del peso fresco en la sexta poda

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
peso fresco 16/05/2019	12	0.37	0.14	71.98

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	508.01	3	169.34	1.57	0.2698
TRATAMIENTO	508.01	3	169.34	1.57	0.2698
Error	860.49	8	107.56		
Total	1368.50	11			

Prueba de Tukey al 5% de significancia

Cuadro 87: Prueba de Tukey del peso fresco en la sexta poda

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=27.11760

Error: 107.5612 gl: 8

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.
T4	3.45	3	5.99 A
T3	16.51	3	5.99 A
T2	17.19	3	5.99 A
T1	20.49	3	5.99 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Séptima muestra (31/05/19)

Cuadro 88: Análisis de varianza del peso fresco en la séptima poda

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
peso fresco 31/05/2019	12	0.12	0.00	52.12

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	37.20	3	12.40	0.38	0.7728
TRATAMIENTO	37.20	3	12.40	0.38	0.7728
Error	263.71	8	32.96		
Total	300.92	11			

Prueba de Tukey al 5% de significancia

Cuadro 89: Prueba de Tukey del peso fresco en la séptima poda

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=15.01221

Error: 32.9642 gl: 8

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.
T2	9.20	3	3.31 A
T4	9.33	3	3.31 A
T1	12.50	3	3.31 A
T3	13.03	3	3.31 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Octava muestra (28/06/19)

Cuadro 90: Análisis de varianza del peso fresco en la novena poda

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
peso fresco 28/03/2019	12	0.16	0.00	40.72

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	39.85	3	13.28	0.51	0.6840
TRATAMIENTO	39.85	3	13.28	0.51	0.6840
Error	206.75	8	25.84		
Total	246.60	11			

Prueba de Tukey al 5% de significancia

Cuadro 91: Prueba de Tukey del peso fresco en la novena poda

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=13.29238
 Error: 25.8439 gl: 8

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.
T4	10.89	3	2.94 A
T1	11.47	3	2.94 A
T2	12.01	3	2.94 A
T3	15.57	3	2.94 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

c) Análisis estadístico – peso seco

Los datos obtenidos en campo se procesaron y analizaron estadísticamente como se presenta.

Segunda muestra (22/03/19)

Cuadro 92: Análisis de varianza del peso seco en la segunda poda

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
peso seco 22/03/2019	12	0.43	0.22	46.66

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	109.15	3	36.38	2.03	0.1879
TRATAMIENTO	109.15	3	36.38	2.03	0.1879
Error	143.17	8	17.90		
Total	252.33	11			

Prueba de Tukey al 5% de significancia

Cuadro 93: Prueba de Tukey del peso seco en la segunda poda

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=11.06139
 Error: 17.8967 gl: 8

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.
T4	5.50	3	2.44 A
T2	7.43	3	2.44 A
T1	9.73	3	2.44 A
T3	13.60	3	2.44 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Tercera muestra (05/04/19)

Cuadro 94: Análisis de varianza del peso seco en la tercera poda

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
peso seco 05/04/2019	12	0.50	0.31	21.07

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	15.36	3	5.12	2.68	0.1177
TRATAMIENTO	15.36	3	5.12	2.68	0.1177
Error	15.27	8	1.91		
Total	30.63	11			

Prueba de Tukey al 5% de significancia

Cuadro 95: Prueba de Tukey del peso seco en la tercera poda

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=3.61281

Error: 1.9092 gl: 8

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.
T4	5.20	3	0.80 A
T1	6.00	3	0.80 A
T2	6.77	3	0.80 A
T3	8.27	3	0.80 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Cuarta muestra (19/04/19)

Cuadro 96: Análisis de varianza del peso seco en la cuarta poda

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
peso seco 19/04/2019	12	0.39	0.16	54.29

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	32.13	3	10.71	1.68	0.2486
TRATAMIENTO	32.13	3	10.71	1.68	0.2486
Error	51.15	8	6.39		
Total	83.28	11			

Prueba de Tukey al 5% de significancia

Cuadro 97: Prueba de Tukey del peso seco en la cuarta poda

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=6.61132

Error: 6.3934 gl: 8

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.
T4	1.93	3	1.46 A
T2	5.12	3	1.46 A
T1	5.31	3	1.46 A
T3	6.27	3	1.46 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Quinta muestra (03/05/19)

Cuadro 98: Análisis de varianza del peso seco en la quinta poda

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
peso seco 03/05/2019	12	0.73	0.62	34.36

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	31.91	3	10.64	7.05	0.0123
TRATAMIENTO	31.91	3	10.64	7.05	0.0123
Error	12.07	8	1.51		
Total	43.98	11			

Prueba de Tukey al 5% de significancia

Cuadro 99: Prueba de Tukey del peso seco en la quinta poda

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=3.21212

Error: 1.5092 gl: 8

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.	
T4	1.50	3	0.71	A
T2	3.23	3	0.71	A B
T1	3.50	3	0.71	A B
T3	6.07	3	0.71	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Sexta muestra (17/05/19)

Cuadro 100: Análisis de varianza del peso seco en la sexta poda

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
peso seco 17/05/2019	12	0.33	0.08	69.10

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	43.02	3	14.34	1.31	0.3372
TRATAMIENTO	43.02	3	14.34	1.31	0.3372
Error	87.71	8	10.96		
Total	130.73	11			

Prueba de Tukey al 5% de significancia

Cuadro 101: Prueba de Tukey del peso seco en la sexta poda

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=8.65754

Error: 10.9633 gl: 8

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.	
T4	1.60	3	1.91	A
T3	5.50	3	1.91	A
T2	5.50	3	1.91	A
T1	6.57	3	1.91	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Séptima muestra (01/06/19)

Cuadro 102: Análisis de varianza del peso seco en la séptima poda

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
peso seco 01/06/2019	12	0.05	0.00	61.82

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	2.07	3	0.69	0.14	0.9318
TRATAMIENTO	2.07	3	0.69	0.14	0.9318
Error	38.89	8	4.86		
Total	40.97	11			

Prueba de Tukey al 5% de significancia

Cuadro 103: Prueba de Tukey del peso seco en la séptima poda

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=5.76522
 Error: 4.8617 gl: 8

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.
T2	2.93	3	1.27 A
T1	3.60	3	1.27 A
T3	3.63	3	1.27 A
T4	4.10	3	1.27 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Novena muestra (29/06/19)

Cuadro 104: Análisis de varianza del peso seco en la novena poda

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
peso seco 29/03/2019	12	0.17	0.00	40.60

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	2.67	3	0.89	0.56	0.6570
TRATAMIENTO	2.67	3	0.89	0.56	0.6570
Error	12.74	8	1.59		
Total	15.41	11			

Prueba de Tukey al 5% de significancia

Cuadro 105: Prueba de Tukey del peso seco en la novena poda

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=3.29961
 Error: 1.5925 gl: 8

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.
T1	2.73	3	0.73 A
T4	2.77	3	0.73 A
T2	3.03	3	0.73 A
T3	3.90	3	0.73 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

d) Análisis estadístico – crecimiento de hoja de césped

Los datos obtenidos en campo se procesaron y analizaron estadísticamente como se presenta.

Segunda muestra (21/03/19 - 04/04/19)

Cuadro 106: Análisis de varianza del crecimiento de la hoja en el segundo intervalo

Análisis de la varianza					
Variable	N	R ²	R ² Aj	CV	
Crecimiento de Hoja	21/0..	12	0.61	0.47	61.57

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	2.74	3	0.91	4.22	0.0460
TRATAMIENTO	2.74	3	0.91	4.22	0.0460
Error	1.74	8	0.22		
Total	4.48	11			

Prueba de Tukey al 5% de significancia

Cuadro 107: Prueba de Tukey del crecimiento de la hoja en el primer intervalo

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=1.21813
Error: 0.2170 gl: 8

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.	
T4	0.00	3	0.27	A
T2	0.69	3	0.27	A
T1	1.13	3	0.27	A
T3	1.20	3	0.27	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Tercera muestra (04/04/19 - 18/04/19)

Cuadro 108: Análisis de varianza del crecimiento de la hoja en el tercer intervalo

Análisis de la varianza					
Variable	N	R ²	R ² Aj	CV	
Crecimiento de Hoja	04/0..	12	0.62	0.48	43.23

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	4.11	3	1.37	4.32	0.0434
TRATAMIENTO	4.11	3	1.37	4.32	0.0434
Error	2.54	8	0.32		
Total	6.65	11			

Prueba de Tukey al 5% de significancia

Cuadro 109: Prueba de Tukey del crecimiento de la hoja en el primer intervalo

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=1.47211
 Error: 0.3170 gl: 8

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.		
T4	0.38	3	0.33	A	
T1	1.28	3	0.33	A	B
T3	1.58	3	0.33	A	B
T2	1.97	3	0.33		B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Cuarta muestra (18/04/19 - 03/05/19)

Cuadro 110: Análisis de varianza del crecimiento de la hoja en el cuarto intervalo

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Crecimiento de Hoja	19/0..	12	0.34	0.09 50.64

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1.01	3	0.34	1.35	0.3251
TRATAMIENTO	1.01	3	0.34	1.35	0.3251
Error	2.00	8	0.25		
Total	3.01	11			

Prueba de Tukey al 5% de significancia

Cuadro 111: Prueba de Tukey del crecimiento de la hoja en el primer intervalo

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=1.30644
 Error: 0.2497 gl: 8

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.		
T4	0.53	3	0.29	A	
T2	1.02	3	0.29	A	
T1	1.07	3	0.29	A	
T3	1.33	3	0.29	A	

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Quinta muestra (03/05/19 - 17/05/19)

Cuadro 112: Análisis de varianza del crecimiento de la hoja en el quinto intervalo

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Crecimiento de Hoja	03/0..	12	0.66	0.53 25.74

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	2.56	3	0.85	5.16	0.0283
TRATAMIENTO	2.56	3	0.85	5.16	0.0283
Error	1.32	8	0.17		
Total	3.88	11			

Prueba de Tukey al 5% de significancia

Cuadro 113: Prueba de Tukey del crecimiento de la hoja en el primer intervalo

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=1.06298

Error: 0.1653 gl: 8

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.	
T4	0.79	3	0.23	A
T3	1.74	3	0.23	A B
T1	1.84	3	0.23	A B
T2	1.95	3	0.23	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Sexta muestra (17/05/19 - 31/05/19)

Cuadro 114: Análisis de varianza del crecimiento de la hoja en el sexto intervalo

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Crecimiento de Hoja	17/0..	12	0.48	0.29 27.49

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1.32	3	0.44	2.46	0.1370
TRATAMIENTO	1.32	3	0.44	2.46	0.1370
Error	1.43	8	0.18		
Total	2.75	11			

Prueba de Tukey al 5% de significancia

Cuadro 115: Prueba de Tukey del crecimiento de la hoja en el primer intervalo

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=1.10433

Error: 0.1784 gl: 8

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.	
T4	1.01	3	0.24	A
T1	1.53	3	0.24	A
T2	1.71	3	0.24	A
T3	1.89	3	0.24	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Séptima muestra (31/05/19- 14/06/19)

Cuadro 116: Análisis de varianza del crecimiento de la hoja en el séptimo intervalo.

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Crecimiento de Hoja	31/0..	12	0.34	0.10 60.97

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.61	3	0.20	1.40	0.3132
TRATAMIENTO	0.61	3	0.20	1.40	0.3132
Error	1.16	8	0.15		
Total	1.77	11			

Prueba de Tukey al 5% de significancia

Cuadro 117: Prueba de Tukey del crecimiento de la hoja en el primer intervalo.

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=0.99762

Error: 0.1456 gl: 8

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.
T4	0.34	3	0.22 A
T1	0.49	3	0.22 A
T2	0.75	3	0.22 A
T3	0.92	3	0.22 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Octava muestra (14/06/19 - 29/06/19)

Cuadro 118: Análisis de varianza del crecimiento de la hoja en el octava intervalo.

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Crecimiento de Hoja	14/0..	12	0.09	0.00 89.83

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.50	3	0.17	0.25	0.8571
TRATAMIENTO	0.50	3	0.17	0.25	0.8571
Error	5.25	8	0.66		
Total	5.75	11			

Prueba de Tukey al 5% de significancia

Cuadro 119: Prueba de Tukey del crecimiento de la hoja en el primer intervalo.

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=2.11794

Error: 0.6561 gl: 8

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.
T4	0.71	3	0.47 A
T2	0.78	3	0.47 A
T3	0.87	3	0.47 A
T1	1.24	3	0.47 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

ANEXO 2: Graficas de la investigación

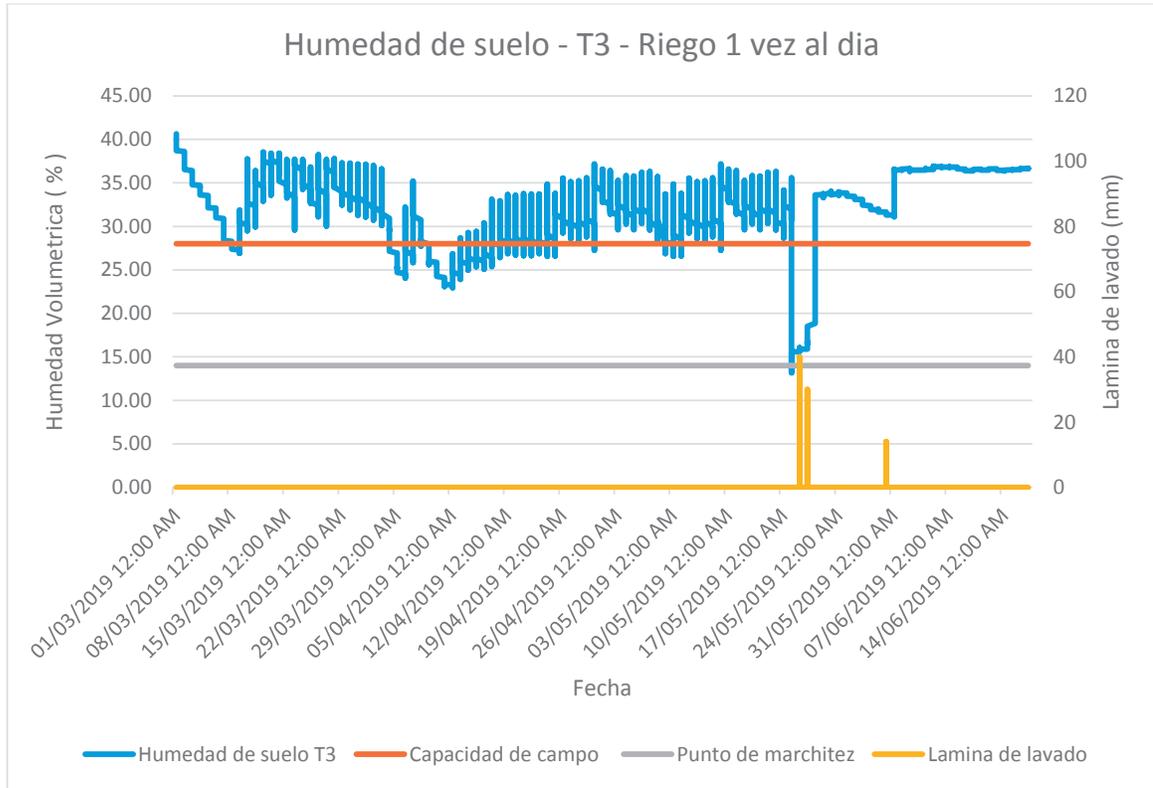


Figura 88: Curva de humedad del tratamiento T3

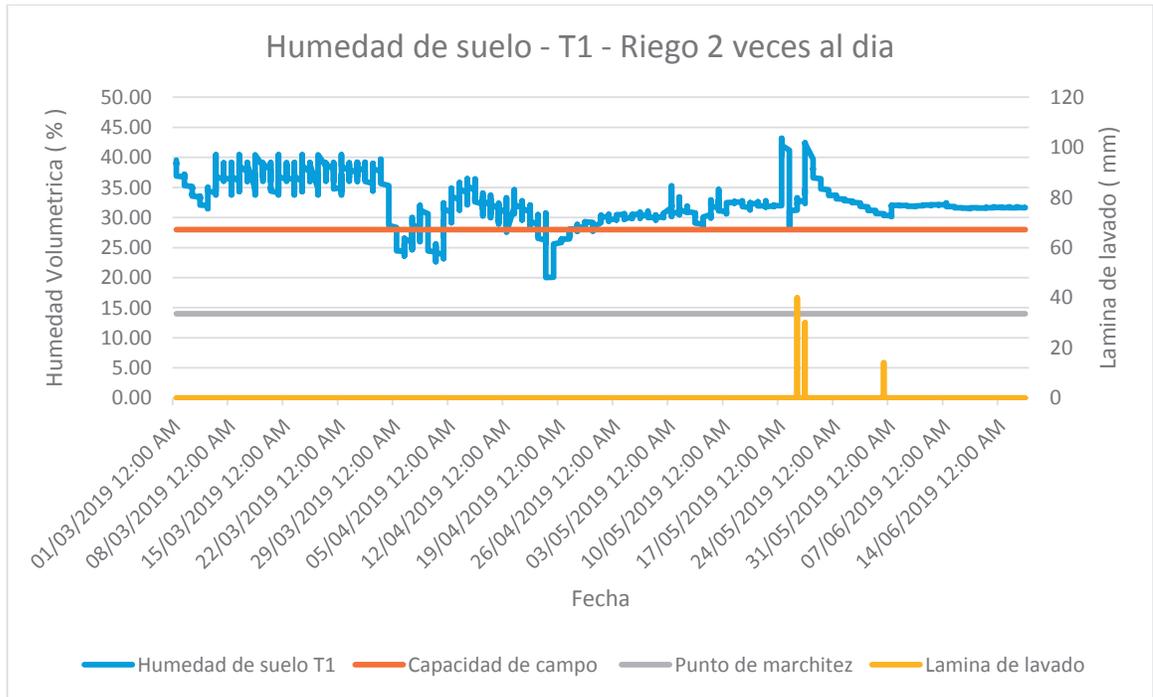


Figura 89: Curva de humedad del tratamiento T1

ANEXO 3: Código de programación para el control, monitoreo y almacenamiento de información del sistema de riego por goteo subterráneo

```
#include <SimpleTimer.h>
#define BLYNK_PRINT Serial
#include <SPI.h>
#include <Ethernet.h>
#include <BlynkSimpleEthernet.h>

char auth[] = "d4481c7cbc354911bd6ab1d16437fe0b";

//caudal

const int buttonPin = 3; //pinsensor
int addr = 0;
volatile byte pulseCount;
float flowRate;
unsigned int flowMillilitres;
float totalLitres;
float litrosmin= 0;
float litrosseg= 0;

//fuente 12v

int fuente = 48;

//bomba

int bombaprende = 45;
int bombaapaga = 44;
```

```
//valvulas

int valvula1 = 30;
int valvula2 = 31;
int valvula3 = 32;
int valvula4 = 33;
int valvula5 = 34;
int valvula6 = 35;
int valvula7 = 36;
int valvula8 = 37;
int valvula9 = 38;
int valvula10 = 39;
int valvula11 = 40;
int valvula12 = 41;

int valvula1a = 0;
int valvula2a = 0;
int valvula3a = 0;
int valvula4a = 0;
int valvula5a = 0;
int valvula6a = 0;
int valvula7a = 0;
int valvula8a = 0;
int valvula9a = 0;
int valvula10a = 0;
int valvula11a = 0;
int valvula12a = 0;

//sensor de humedad

int valorHUM1 = 0;
```

```

int valorHUM2 = 0;
int valorHUM3 = 0;
int valorHUM4 = 0;

//Sensor de presiones

int valorPRESION1 = 0;
int valorPRESION2 = 0;
int valorPRESION3 = 0;

int antesfiltro = 0;
float antesfiltro1 = 0;
int despuesfiltro = 0;
float despuesfiltro2 = 0;
int finalsisistema = 0;
float finalsisistema3 = 0;

//sensor de ultrasonido

int trigPin = 6;
int echoPin = 7;
int PingTimer; // TimerID
long duration, distance;
long volumen;

//sensor de humedad

void lerHUM1()
{
    valorHUM1 = analogRead(A8);
    int humedadvolumetrica1 = (0.3435 * valorHUM1) - 96.323;

```

```

}
void lerHUM2()
{
  valorHUM2 = analogRead(A9);

}
void lerHUM3()
{
  valorHUM3 = analogRead(A10);
  Blynk.virtualWrite(V8, valorHUM3);
}
void lerHUM4()
{
  valorHUM4 = analogRead(A11);

}

//Sensor de presiones

void lerPRES1()
{
  valorPRESION1 = analogRead(A1);
  antesfiltro = (0.1677 * valorPRESION1) - 19.961;
  antesfiltro1 = antesfiltro / 10.1974;
}

void lerPRES2()
{
  valorPRESION2 = analogRead(A2);

```

```

    despuesfiltro = (0.1691 * valorPRESION2) - 21.201;
    despuesfiltro2 = despuesfiltro / 10.1974;

}

void lerPRES3()
{
    valorPRESION3 = analogRead(A3);
    finalsisistema = (0.1746 * valorPRESION3) - 21.316;
    finalsisistema3 = finalsisistema / 10.1974;

}

//sensor de ultrasonido

void PingSensor()
{
    // Pulse
    digitalWrite(trigPin, LOW);
    delayMicroseconds(2);
    digitalWrite(trigPin, HIGH);
    delayMicroseconds(10);
    digitalWrite(trigPin, LOW);

    // End Pulse & Calculate didtance
    duration = pulseIn(echoPin, HIGH);
    distance = (duration / 2) / 29.1;
    volumen = ((3.1415 * 110 * 110 * (130 - distance)) / (4 * 1000));

    if (volumen < 300)
    {

```

```

        Blynk.notify("TANQUE VACIO");
    }
}

void showFlow()
{

    detachInterrupt(sensorInterrupt);

    float frecuencia = pulseCount;
    flowRate = frecuencia / calibrationFactor;

    litrosmin = (0.2487*frecuencia)+1.1668;
    litrosseg = (0.0042*frecuencia)+0.0192;

    pulseCount = 0;

}

void pulseCounter()
{
    pulseCount++;
}

void setup()

{
    Serial.begin(9600);
    Blynk.begin(auth);

    //caudalQ

```

```

pinMode(buttonPin, INPUT);
flowMilliLitres = 0;
flowRate = 0.0;
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(buttonPin), pulseCounter,
RISING);
timerQ.setInterval(1000L, showFlow);

// fuente 12v

pinMode(fuente, OUTPUT);
digitalWrite(fuente, HIGH);

//bomba
pinMode(bombaprende, OUTPUT);
pinMode(bombaapaga, OUTPUT);
digitalWrite(bombaprende, HIGH);
digitalWrite(bombaapaga, HIGH);

//Valvulas

pinMode(valvula1, OUTPUT);
digitalWrite(valvula1, HIGH);
pinMode(valvula2, OUTPUT);
digitalWrite(valvula2, HIGH);
pinMode(valvula3, OUTPUT);
digitalWrite(valvula3, HIGH);
pinMode(valvula4, OUTPUT);
digitalWrite(valvula4, HIGH);
pinMode(valvula5, OUTPUT);
digitalWrite(valvula5, HIGH);
pinMode(valvula6, OUTPUT);

```

```

digitalWrite(valvula6, HIGH);
pinMode(valvula7, OUTPUT);
digitalWrite(valvula7, HIGH);
pinMode(valvula8, OUTPUT);
digitalWrite(valvula8, HIGH);
pinMode(valvula9, OUTPUT);
digitalWrite(valvula9, HIGH);
pinMode(valvula10, OUTPUT);
digitalWrite(valvula10, HIGH);
pinMode(valvula11, OUTPUT);
digitalWrite(valvula11, HIGH);
pinMode(valvula12, OUTPUT);
digitalWrite(valvula12, HIGH);

//sensor de ultrasonido

pinMode(trigPin, OUTPUT);
pinMode(echoPin, INPUT);

}

//pines virtuales de valvulas

BLYNK_WRITE(V20)
{
  valvula1a = param.asInt();
  digitalWrite(valvula1, valvula1a);
}

```

```
BLYNK_WRITE(V21)
{
  valvula2a = param.asInt();
  digitalWrite(valvula2, valvula2a);
}
BLYNK_WRITE(V22)
{
  valvula3a = param.asInt();
  digitalWrite(valvula3, valvula3a);
}
BLYNK_WRITE(V23)
{
  valvula4a = param.asInt();
  digitalWrite(valvula4, valvula4a);
}
BLYNK_WRITE(V24)
{
  valvula5a = param.asInt();
  digitalWrite(valvula5, valvula5a);
}
BLYNK_WRITE(V25)
{
  valvula6a = param.asInt();
  digitalWrite(valvula6, valvula6a);
}
BLYNK_WRITE(V26)
{
  valvula7a = param.asInt();
  digitalWrite(valvula7, valvula7a);
}
BLYNK_WRITE(V27)
```

```

{
  valvula8a = param.asInt();
  digitalWrite(valvula8, valvula8a);
}
BLYNK_WRITE(V28)
{
  valvula9a = param.asInt();
  digitalWrite(valvula9, valvula9a);
}
BLYNK_WRITE(V29)
{
  valvula10a = param.asInt();
  digitalWrite(valvula10, valvula10a);
}
BLYNK_WRITE(V30)
{
  valvula11a = param.asInt();
  digitalWrite(valvula11, valvula11a);
}
BLYNK_WRITE(V31)
{
  valvula12a = param.asInt();
  digitalWrite(valvula12, valvula12a);
}

void loop ()
{
  Blynk.run ();
}

```

ANEXO 4: Manual de manejo, operación y mantenimiento del sistema de riego por goteo subterráneo automatizado

ACTIVIDAD 1: Funcionamiento del sistema de riego automatizado.

Ingreso al aplicativo

1.- Tener descargado el aplicativo Blynk en el Celular, En la Figura 90, se muestra el aplicativo Blynk. De no tener el aplicativo instalado, se puede descargar del PlayStore. Para el ingreso al aplicativo es a través de un usuario registrado. El registro es gratuito y sencillo.



Figura 90: Icono de aplicativo Blynk

2.- El aplicativo cuenta con varios tipos de proyectos elaborados, por esa razón se debe buscar el proyecto titulado “GrootSmart” como se muestra en la figura 91. Una vez encontrado se seleccionara

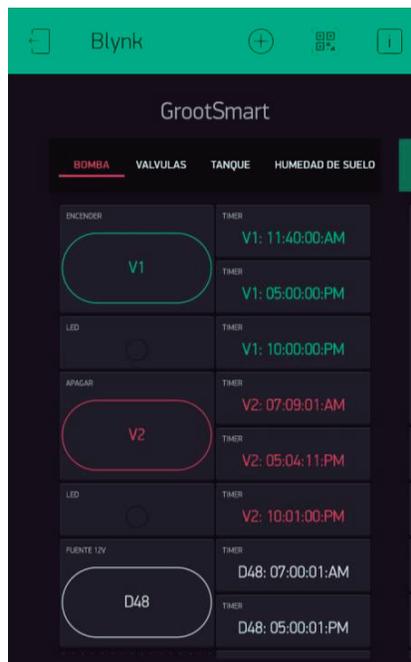


Figura 91: Ingreso del aplicativo Blynk

3.- Al ingresar al proyecto “GrootSmart “aparecerá la interfaz como se visualiza en la Figura 92.

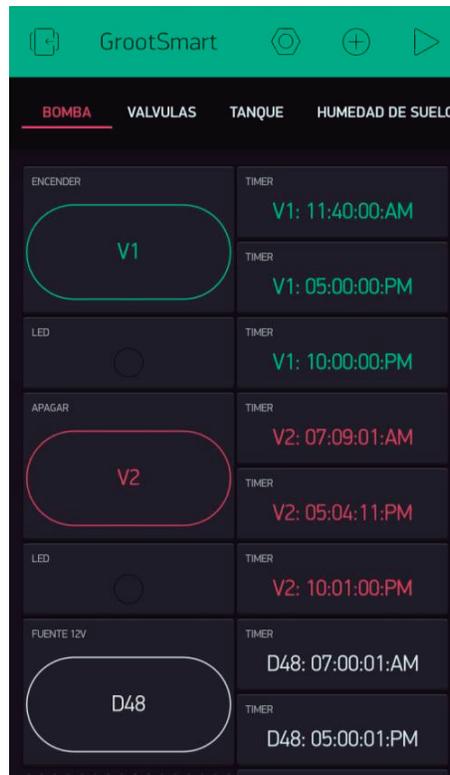


Figura 92: Interfaz del aplicativo Blynk

4.- En la parte superior del aplicativo como se muestra en la Figura 92, se muestra un botón triangular “Play” como se muestra en la Figura 93, se debe presionar para acceder a la información del sistema. Solo cuando se desea usar el sistema se debe presionar el “Play”, una vez presionado tomara una forma de un cuadrado como se muestra en la Figura 94. Es **IMPORTANTE** desconectar el sistema cuando no se usa el aplicativo, dejarlo como muestra la Figura 93, debido que hay persona que pueden agarrar el aplicativo o presionarse dentro del bolsillo y esto puede generar la des configuración del aplicativo.



Figura 93: Icono - desconexión del sistema



Figura 94: Icono - acceso al sistema

Encendido de bomba

Para un rápido acceso se elaboraron pestañas, si queremos realizar el control de la bomba solo se presiona la sección de bomba como se muestra en la Figura 95, en donde el botón verde es para el encendido de la bomba y el botón rojo es para el apagado de la bomba. El botón blanco que figura en la parte inferior es para encender la fuente de 12 voltios. La pestaña de programación se muestra a lado de cada widget de botón, en ella podemos transcribir la hora de encendido y apagado.

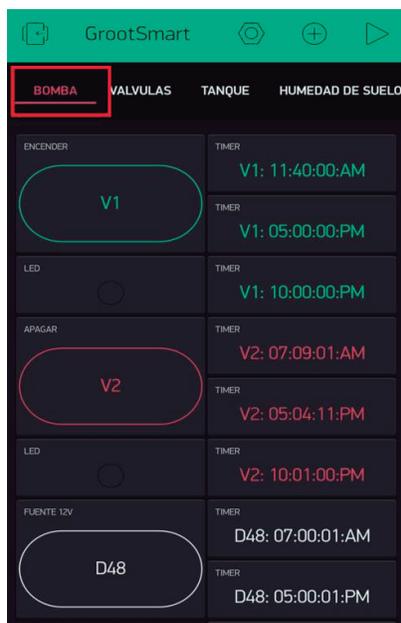


Figura 95: Interfaz de control de bomba

Encendido de válvula

Para acceder al control de las válvulas solo se presiona la pestaña de válvulas como se muestra en la Figura 96, para encender la válvula que se desee solo se debe presionar el widget en forma de botón, y al encenderse este se marca de un color y aparecerá un mensaje que dirá ON, que significa encendido como se muestra en la Figura 97.



Figura 96: Interfaz electroválvulas

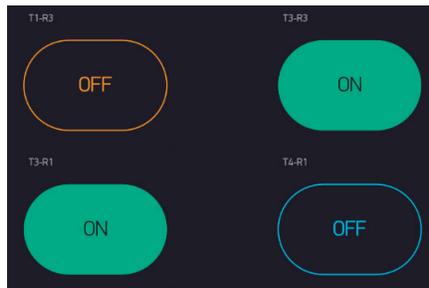


Figura 97: Interfaz de encendido y apagado de válvula

Monitoreo de sensores de presión, caudal, humedad y nivel de agua

Para visualizar los valores de presión, caudal, nivel de agua o humedad de suelos solo se debe presionar las pestañas con sus nombres y aparece como se muestra en las Figuras 98, 99, 100, 101. Este valor mostrado es en tiempo real.



Figura 98: Interfaz de humedad de suelo



Figura 99: Interfaz de monitoreo de presión



Figura 100: Interfaz de monitoreo de caudal.

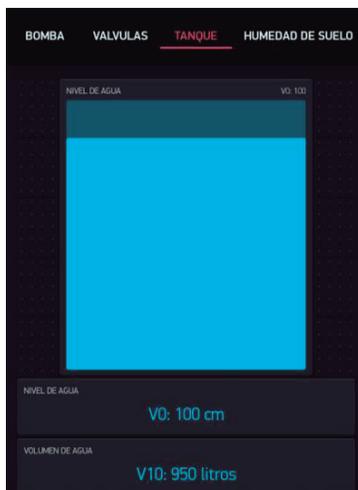


Figura 101: Interfaz del monitoreo de nivel de agua

Programación de riego

Para la programación de riego del encendido y apagado de las válvulas se debe presionar en la pestaña Timer. En la Figura 102 se muestra los tratamientos y sus respectivos widgets en donde se presionara para configurar la hora de encendido y apagado de la electroválvula de forma automática, para realizar esta función es importante dejar el icono de la parte superior como se muestra en la Figura 94, si se deja como se muestra en la Figura 93, el celular no podrá conectarse con el sistema de riego para enviarla la sentencia.

Tener en consideración programar el encendido y apagado de la bomba y fuentes de 12 voltios paralelo a la programación de las válvulas.



Figura 102: Interfaz de programación de encendido automático

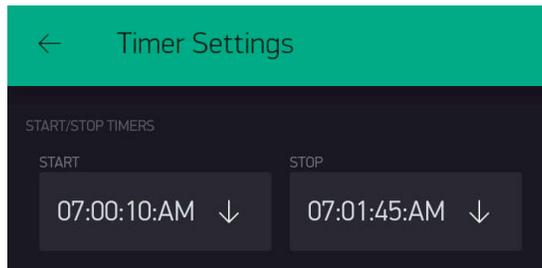


Figura 103: Acceso para modificación de programación

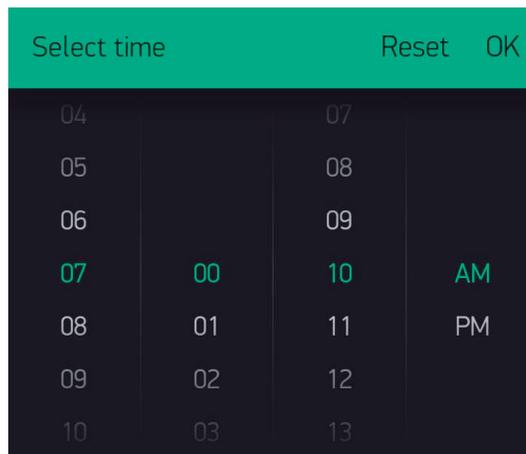


Figura 104: Programación horaria de encendido automático

ACTIVIDAD 2: Mantenimiento y calibración de los equipos de automatización.

Mantenimiento de las electroválvulas

El mantenimiento de la electroválvula dependerá de la calidad del agua y del tamaño de partículas que pasa por el filtro, se debe hacer un mantenimiento de la electroválvula cuando presente falla de cierre o tenga problemas en la apertura de forma automatizada. Se deberá de retirar la electroválvula del arco de riego y desarmar y limpiar la parte interna. Para mantenimientos preventivos se puede realizar cada 6 meses.

Mantenimiento y calibración de los sensores de presión

Los sensores metálicos como el sensor de presión utilizado tienden a oxidarse por estar en contacto con el agua. En la Figura 105, se muestra los sensores retirados después de 1 años, el óxido existente perjudican en la correcta lectura de la presión del sistema. Es recomendable antes de cada calibración retirar los sensores y realizar la limpieza interna, retirando el óxido pegado en su estructura.



Figura 105: Sensores de presión sin mantenimiento

Una vez realizado el mantenimiento se deberá calibrar con un manómetro que brinde la lectura real y con el IDE de Arduino obtener los valores en bits del sensor para relacionarlos y obtener un cura de calibración.

Mantenimiento y calibración del sensor de caudal

El sensor de caudal cuenta con una paleta interna, cuando se obstruye dejara de girar o lo hará en menor velocidad perjudicando a la lectura de información, por eso cada 4 meses se debe verificar con un contador manual si la lectura corresponde al valor real, de lo contrario se calibrara nuevamente para corregir la lectura obtenida por el sensor. Para esto se relacionara la frecuencia leída por el sensor con el caudal real, es importante mantenerlo constante.

Mantenimiento del filtro de anillas

Para realizar el mantenimiento del filtro de anillas debe existir una diferencia de presiones antes y después del sistema de filtrado. En la Figura 106, se muestra la lectura de los sensores de presión antes y después, para este ejemplo existe una diferencia de presión de 4 metros de columna de agua, esto quiere decir que el filtro está reteniendo el paso del agua debido a la suciedad almacenada en su interior



Figura 106: Lectura de diferencia de presión en aplicativo

En la Figura 107, se muestra el filtro de anillas limpio y sucio, la suciedad almacenada en su área de contacto impide el paso del agua, por esa razón se debe limpiar, para eso se debe dejar de remojar en agua con lejía por una hora como mínimo y retirar la suciedad con un cepillo de diente o escobilla.



Figura 107: Filtro de anillas antes y después de limpieza

Mantenimiento del tubo de 160 mm de diámetro y liberar gases

En un tubo cerrado con agua y expuesto al sol generar gases de vapor de agua como es el caso del tubo de 160 mm mostrado en la Figura 108, este gas puede acumularse y formar un colchón encima del nivel de agua, y la lectura que lea el sensor será del nivel más alto que en este caso es del colchón de vapor, dando un valor erróneo y el código de sentencia en donde la bomba no tiene que trabajar en seco no se ejecutaría.



Figura 108: Tubo de 160 mm y ubicación de sensor ultrasonido

ACTIVIDAD 3: Visualización de información a través de la estación meteorológica Climate Minder.

Para el acceso a la estación Climate Minder y visualizar la información se debe contar con un usuario de ingreso como se muestra en la Figura 109.

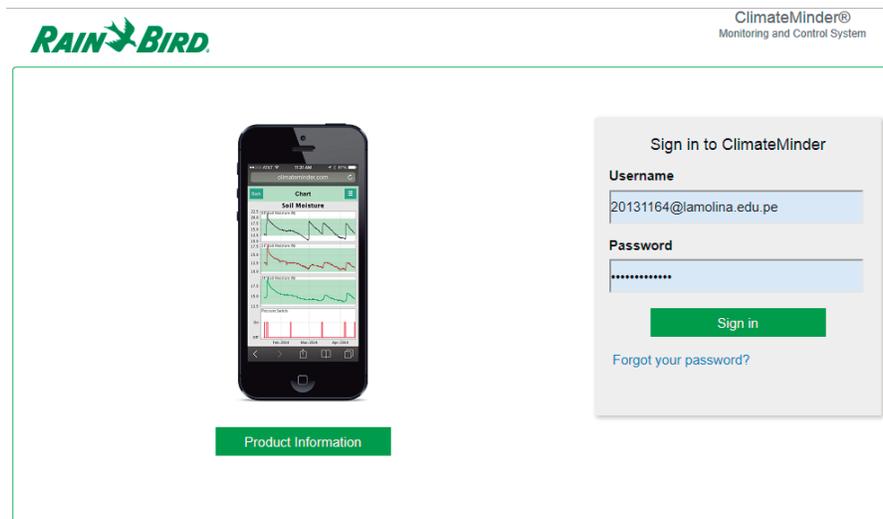


Figura 109: Interfaz de ingreso de datos de la estación automática Climate Minder

Una vez ingresado a los valores de la estación meteorológica, se debe dar click en data → Charts, esto para acceder a los valores que lee la estación automática. Como se muestra en la Figura 110.

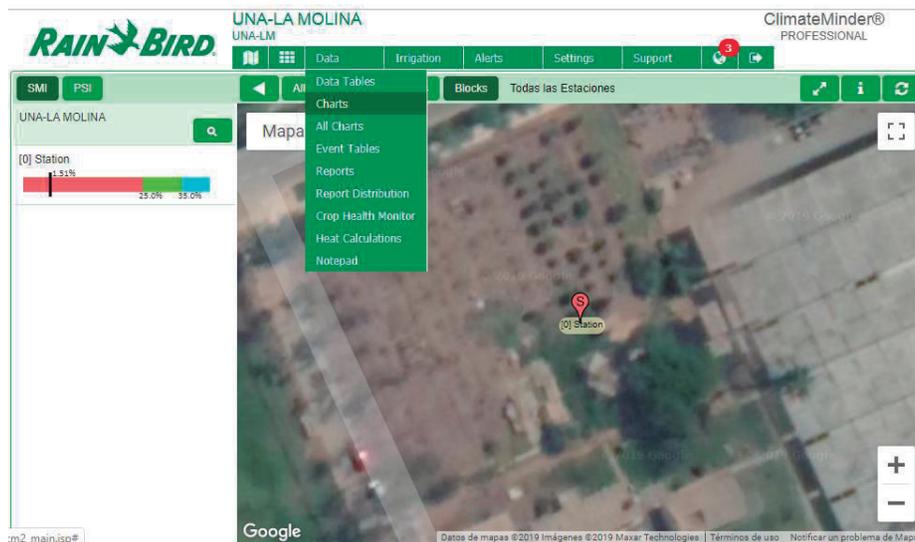


Figura 110: Interfaz de Software de estación automática Climate Minder

Luego, dar click en el valor de interés, en este caso es la Evapotranspiración diaria, además, este valor se almacena y se puede visualizar en la gráfica de la Figura 111.

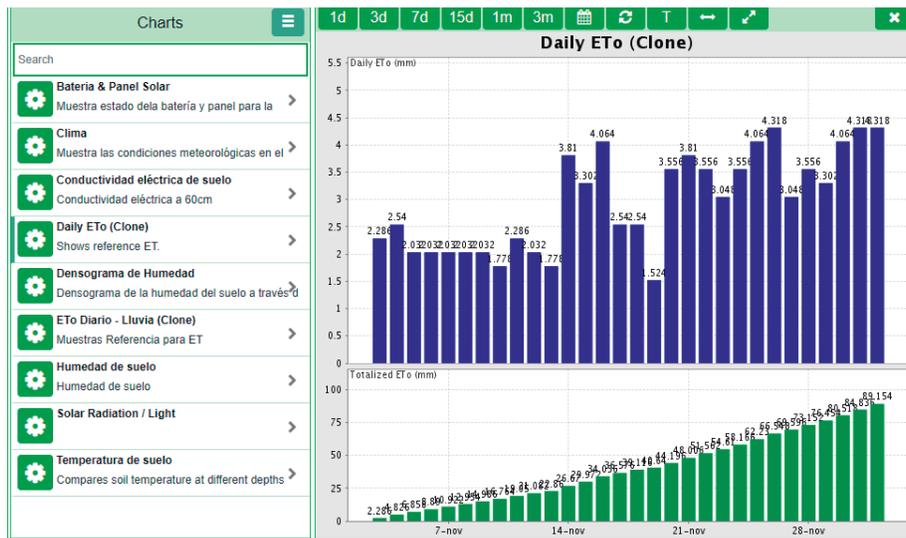


Figura 111: Lectura de evapotranspiración de la estación Climate Minder

ACTIVIDAD 4: Detección de fallas en el sistema visualizando el comportamiento de los sensores a través del aplicativo.

Para la detección de fallas, se deben visualizar la gráfica de presiones, caudales y humedad, la gráfica de presiones siempre y cuando no exista alguna fuga de agua se va a mantener como se muestra la Figura 112, de registrarse un comportamiento diferente al que presenta en la gráfica, se sugiere revisar el sistema de riego. Otro punto importante es el caudal, una vez que el sistema se llenada de agua, este mantendrá un caudal constante como se muestra en la gráfica caudal vs tiempos, de registrarse un pico de agua constante quiere decir que existe una fuga de agua que demanda mayor consumo de agua del caudal conocido. Otro valor de interés es la humedad de suelos, si no se incrementa después de haber programado el riego, esto quiere decir que no se ha encendido el sistema.

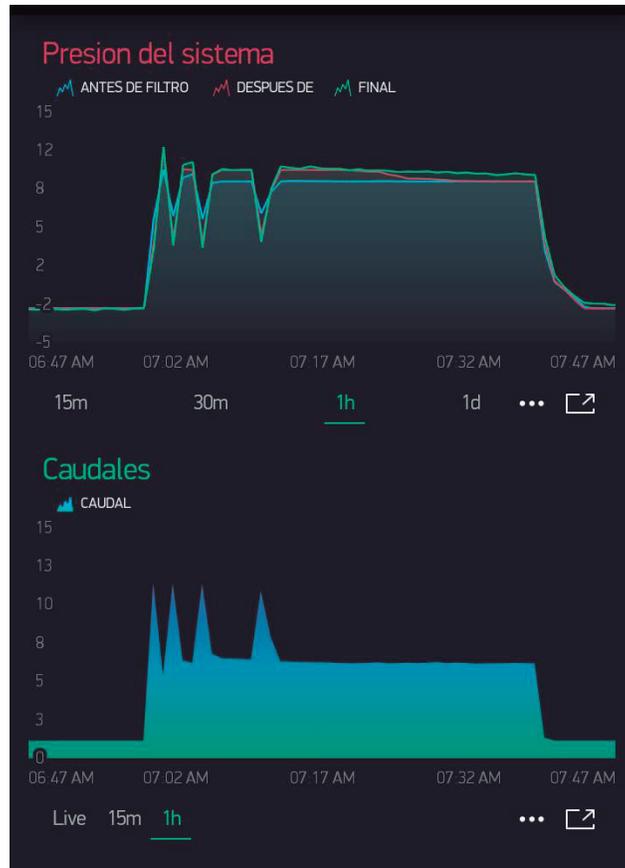


Figura 112: Comportamiento de la presión y caudal



Figura 113: comportamiento del sensor de humedad de suelo

Si el caudal es menor del que se tiene registrado, esto puede deberse a que se están obstruyendo los goteos, para ellos se debe realizar cada 30 días una purga del sistema, en la Figura 115, se muestra la suciedad almacenada dentro de la manguera, una vez que el

agua que salga sea de color claro, se procede a parar el purgado hasta otros 30 días. La labor se tiene que realizar con una buena presión, para ellos solo se encenderá uno en uno cada unidad experimental.



**Figura 115: Línea de purga -
Purga inicial**



**Figura 114: Línea de purga -
Purga final**

ANEXO 5: Presupuesto para la automatización

En el Cuadro 120, se presentan los equipos que fueron utilizados para llevar esta investigación, cada uno con su respectivo precio.

Cuadro 120: Presupuesto para la automatización

PRESUPUESTO DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN " RIEGO POR GOTEO SUBTERRÁNEO INTERMITENTE CONTROLADO VÍA INTERNET, PARA EL CÉSPED - UNALM"

	Descripción	Cantidad	P. unitario	P. total
1	Accesorios para replicar este proyecto			
1.1.	Sensores			
1.1.1.	Sensor de nivel de agua	3	S/ 12.00	S/ 36.00
1.1.2.	Sensor de presión HK3022	8	S/ 70.00	S/ 560.00
1.1.3.	Sensor de flujo d agua FS400 1 Efecto Hall	10	S/ 37.00	S/ 370.00
1.1.4.	Sensor temperatura y humedadDHT11	2	S/ 11.00	S/ 22.00
1.1.5.	Sensor de humedad GS1	4	S/ 620.00	S/ 2,480.00
1.2.	Actuadores			
1.2. 1.	Módulo Relay	8	S/ 13.00	S/ 104.00
1.2. 2.	Válvula eléctrica	14	S/ 26.00	S/ 364.00
1.2. 3.	Mini bomba de agua 2.5-6V, 80-120 lt/hr	2	S/ 12.00	S/ 24.00
1.3.	Placa Arduino			
1.3. 1	Arduino Mega 2560 R3	2	S/ 58.00	S/ 116.00
1.3. 2	Ethernet shield	2	S/ 45.00	S/ 90.00
1.3.3.	Shield Datalogger	2	S/ 35.00	S/ 70.00
1.4.	Equipos			
1.4.1	Cable Dupont 40 unid. Macho Macho	2	S/ 5.50	S/ 11.00
1.4.2	Cable Dupont 40 unid. Macho Hembra	2	S/ 5.50	S/ 11.00
1.4.3	Cable Dupont 40 unid. Hembra Hembra	1	S/ 5.50	S/ 5.50
1.4.4	Cable internet 20 metros red UTP A	2	S/ 19.00	S/ 38.00
1.4.5	Cable eléctrico #14 AWG rollo x 100m	5	S/ 97.50	S/ 487.50
1.4.6	Protoboard Blanco 830 pines	2	S/ 12.00	S/ 24.00
1.4.7	Transformador de 220 VAC a 12 VDC -1A	6	S/ 52.00	S/ 312.00
1.4.8.	Tarjeta SD 32 GB clase 10	2	S/ 70.00	S/ 140.00
1.5	Instalación existente			
1.5.1	Materiales del sistema de riego existente	1	8132.4	8132.4
1.5.2	Servicios (instalación de modulo, tablero de bomba , sembrado de césped, sistema de riego)	1	1800	1800
TOTAL				S/ 9,932.40

ANEXO 6: Graficas de la calibración de la estación meteorológica Climate Minder

Cuadro 121: Valores de evapotranspiración de tanque evaporímetro y estación Climate Minder.

	Tanque evaporímetro tipo A (mm)	Estación automática Climate Minder (mm)
29/03/2019	5.3	4.4
01/04/2019	7.9	7.4
03/04/2019	4.7	4.4
05/04/2019	5.1	4.7
08/04/2019	10	7.7
10/04/2019	8.5	5
12/04/2019	7.5	5.3
15/04/2019	7.8	7.9
17/04/2019	5.3	7.9
19/04/2019	5.4	8.3
22/04/2019	11	11.8
24/04/2019	7	4
Sumatoria	85.5	78.8
Diferencia	6.7	
*valores acumulados de 2 y 3 días		

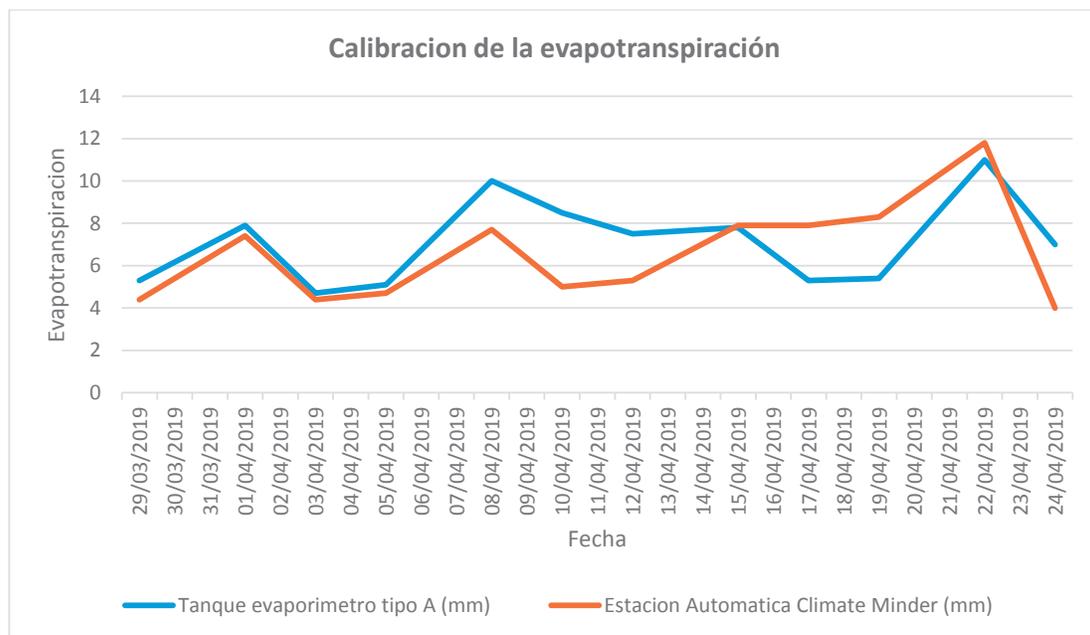


Figura 116: Evapotranspiración de tanque evaporímetro y estación automática Climate Minder

ANEXO 7: Panel fotográfico durante la investigación



Figura 117: Elaboración de controlador de riego

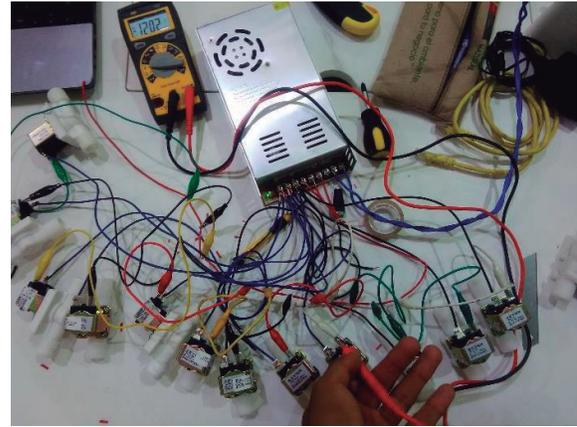


Figura 118: Prueba de electroválvulas



Figura 119: Arco de riego automatizado



Figura 120: Integración de placas en el controlador



Figura 121: Arco de riego manual



Figura 122: Arco de riego manual y automatizado



Figura 124: Calibración de sensores de humedad de suelo



Figura 123: Perfilado de las unidades de riego



Figura 125: Reparación de manguera subterránea



Figura 126: Instalación de tubería de luz para cableado eléctrico

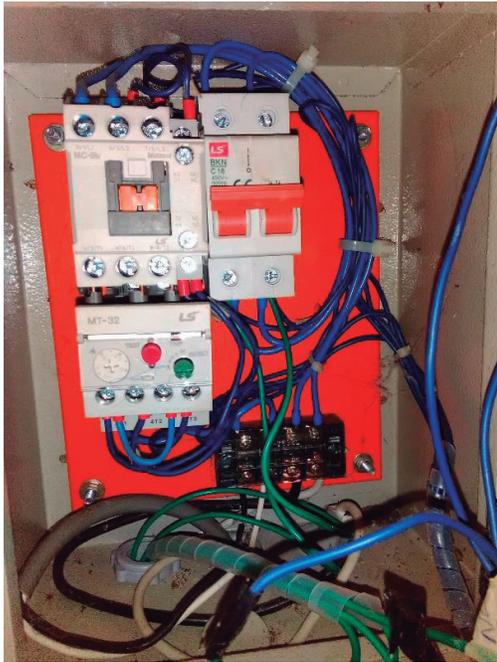


Figura 129: Conexión del módulo relé al tablero de arranque directo



Figura 128: Extracción de suelos para método gravimétrico



Figura 130: Calibración de sensores de humedad con datalogger EM -50G



Figura 127: Riego uniforme de la unidad de riego al inicio de la investigación



Figura 132: Calibración del sensor de presión



Figura 131: Pesaje de los pesos frescos de césped.



Figura 133: Zanjeado para colocar tubería de luz



Figura 135: Instalación de tubería de luz y cajas de pase



Figura 134: Tapado de zanja de tubería de luz



Figura 137: Pase de cable y distribución



Figura 136: Implementación de arco de riego automatizado

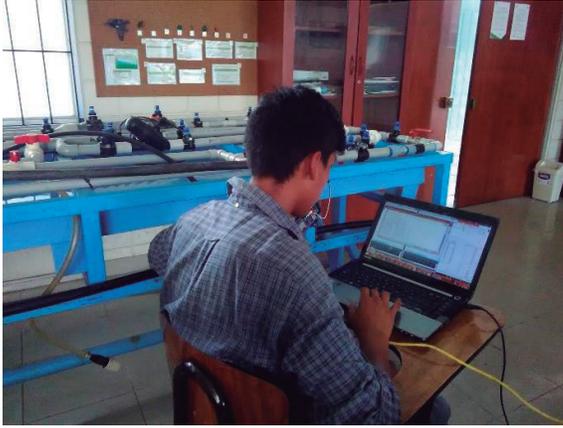


Figura 138: Calibración del sensor de caudal



Figura 139: instalación del sensor de presión



Figura 140: Instalación del sensor de caudal



Figura 141: Primera poda



Figura 143: Eliminación de la maleza



Figura 142: Instalación de sensor de humedad



Figura 145: Pesos de hoja de césped humedad



Figura 144: instalación de sensor de humedad de suelo



Figura 147: Datalogger EM-50



Figura 146: Análisis de calidad de agua