

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ORIHUELA

**Master Universitario Oficial en Automatización y Telecontrol
para la gestión de Recursos Hídricos y Energéticos**



**Diseño, prototipo y validación de un
dispositivo para la determinación en tiempo
real del consumo de agua de plantas en
maceta. Aplicación a Vistis vinífera variedad
Bobal.**

TRABAJO FIN DE MASTER

AUTOR:

Leandro Ruiz Peñalver

DIRECTOR/ES:

José Miguel Molina Martínez

Antonio Ruiz Canales

Septiembre 2014

Índice de contenidos

| | |
|---|-----------|
| INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS..... | 9 |
| 1.1. CONTEXTO DEL TRABAJO | 11 |
| 1.2. ANTECEDENTES AGRONÓMICOS | 13 |
| 1.3. LOS LISÍMETROS | 14 |
| 1.3.1 Clasificación de los lisímetros | 15 |
| 1.3.2 Lisímetros de pesada..... | 16 |
| 1.4. OBJETIVOS DEL TRABAJO | 17 |
| 1.5. FASES DEL TRABAJO..... | 17 |
| MATERIALES Y MÉTODOS | 19 |
| 2.1. DESCRIPCIÓN DEL DISPOSITIVO | 21 |
| 2.2. DISEÑO MECÁNICO | 23 |
| 2.3. ADQUISICIÓN DE DATOS Y CONTROL | 27 |
| 2.3.1 Células de carga | 27 |
| 2.3.2 Datalogger y multiplexor | 28 |
| 2.3.3 Control de las electroválvulas..... | 30 |
| 2.3.4 Cuadro eléctrico | 31 |
| 2.4. DETERMINACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO | 32 |
| 2.5. ESTACIÓN DE LISIMETRÍA EPSO. PARCELA DE ENSAYO | 32 |
| 2.6. ESTUDIO ECONÓMICO..... | 35 |
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 39 |
| 3.1. CALIBRACIÓN DEL EQUIPO | 43 |
| 3.2. BALANCE HÍDRICO | 44 |
| 3.3. VIABILIDAD ECONÓMICA DEL EQUIPO | 46 |
| CONCLUSIONES | 49 |
| 4.1. CONCLUSIONES | 51 |
| 4.2. PRODUCCIÓN CIENTÍFICA | 51 |
| 4.2.1 Comunicaciones a congresos..... | 51 |
| 4.2.2 Artículos..... | 53 |
| 4.2.3 Patentes..... | 53 |
| 4.2.4 Proyectos fin de carrera dirigidos | 53 |
| BIBLIOGRAFÍA | 55 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| FIGURA 1-1 - LISÍMETRO DE PESADA. | 15 |
| FIGURA 1-2 - SECCIÓN DE UN LISÍMETRO DE PESADA SUBTERRÁNEO. | 16 |
| FIGURA 2-1. VISTA DEL DISPOSITIVO PARA MEDIR EL PESO DEL CULTIVO | 22 |
| FIGURA 2-2. DETALLE DEL SISTEMA DE MEDICIÓN DEL AGUA DE DRENAJE | 23 |
| FIGURA 2-3. DISEÑO CON UNA SOLA CÉLULA DE CARGA | 23 |
| FIGURA 2-4, MODELO CON UNA SOLA CÉLULA DE CARGA | 24 |
| FIGURA 2-5, MODELO GEOMÉTRICO 90 GRADOS | 25 |
| FIGURA 2-6. MODELO GEOMÉTRICO 30 GRADOS Y FUERZAS APLICADAS..... | 25 |
| FIGURA 2-7. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS | 26 |
| FIGURA 2-8. ESTRUCTURA E INSTALACIÓN DEL DISPOSITIVO DE MEDIDA. A LA IZQUIERDA SE MUESTRA LA INSTALACIÓN DE UN DISPOSITIVO. EN EL CENTRO EL MODELO 3D. A LA DERECHA EL DETALLE DE UN DEPÓSITO DE DRENAJE Y SU CÉLULA DE CARGA..... | 27 |
| FIGURA 2-9 - MODELO VETEK 108TA..... | 28 |
| FIGURA 2-10 - DATALOGGER CR1000. | 29 |
| FIGURA 2-11 - PANTALLA INICIO SOFTWARE LOGGNET..... | 30 |
| FIGURA 2-12 - MULTIPLEXOR AM16/32 PARA EL CR1000. | 30 |
| FIGURA 2-13 – CIRCUITO PARA EL CONTROL DE LAS ELECTROVÁLVULAS..... | 31 |
| FIGURA 2-14 – CUADRO ELÉCTRICO Y CONEXIONADO INTERIOR..... | 31 |
| FIGURA 2-15 – ARQUITECTURA UTILIZADA PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS EN TODA LA ESTACIÓN DE LISIMETRÍA. | 34 |
| FIGURA 3-1 – GRAFICA CALIBRACIÓN CÉLULAS. VARIACIÓN DE LA CARGA ESTIMADA PARA TODAS LAS CÉLULAS DE CARGA UTILIZANDO EL MÉTODO DE CALIBRACIÓN DE 6 PUNTOS. | 43 |
| FIGURA 3-2 – VARIACIÓN EN EL PESO ESTIMADO CON EL LISÍMETRO RESPECTO A LOS PESOS CALIBRADOS (MÉTODO DE CALIBRACIÓN DE 6 PUNTOS). LA LÍNEA DISCONTINUA REPRESENTA LA LÍNEA 1:1. | 44 |
| FIGURA 3-3 – VARIACIÓN DE PESO DE MACETA Y DRENAJE DURANTE LOS DÍAS 2 Y 3 DE JULIO EN LISÍMETRO CON ESPALDERA A 90° E INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS DEL PRIMER RIEGO; ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO. | |
| FIGURA 3-4 – VARIACIÓN DE PESO DE MACETA Y DRENAJE DURANTE LOS DÍAS 2 Y 3 DE JULIO EN LISÍMETRO CON ESPALDERA A 30° | 46 |
| FIGURA 3-5 – DIAGRAMA DE TORNADO..... | 48 |

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| TABLA 1. ESCENARIO ECONÓMICO DE PARTIDA | 36 |
| TABLA 2. VARIABLES DE RIESGO: VARIACIONES PROPUESTAS. | 36 |
| TABLA 3. DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD ASIGNADA A LAS VARIABLES DE RIESGO | 46 |
| TABLA 4. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE MONTECARLO (5.000 ITERACIONES). | 47 |
| TABLA 5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL VAN A LAS VARIACIONES DE LAS VARIABLES DE RIESGO. | 48 |



RESUMEN

Actualmente la escasez de recursos hídricos en ciertas zonas del litoral mediterráneo y concretamente en el sureste de España, hacen que optimizar la eficiencia en el uso del agua de riego sea una cuestión vital a la hora de contrarrestar los altos costes que ésta posee y contribuir a una agricultura que sea sostenible con el medio ambiente y eficiente energéticamente.

Para conocer, en tiempo real, los requerimientos hídricos de cada planta que permitan optimizar el manejo de riego y aportar la cantidad de agua que requiere cada planta, es necesario disponer de dispositivos que puedan medir con exactitud las entradas y salidas al sistema. Estos requerimientos hídricos, en la actualidad se intentan conocer mediante el empleo de sensores de suelo, estaciones agroclimáticas y lisímetros que requieren una gran obra civil. Los sensores de humedad del suelo empleados para establecer balances hídricos y gestionar el riego suelen ser bastante inexactos (exploran tan sólo una pequeña zona del suelo), la mayoría no están calibrados para el suelo en el que deben trabajar, dan muchísimos fallos de instalación debido a que los suelos tienen piedras, cavidades, etc., y acaban dando medidas que, aunque aproximadas, no reflejan la realidad. Las estaciones agroclimáticas determinan la evapotranspiración del cultivo de referencia. Sin embargo, para saber los consumos de agua requieren conocer unos coeficientes de cultivo, que son específicos para cada variedad, patrón, suelo, clima, etc., por lo que, a pesar de proporcionar una orientación, tampoco proporcionan datos reales del consumo de agua de cada planta. Existen lisímetros que dan valores más exactos del consumo hídrico de los cultivos, pero debido al gran coste de los mismos y complejidad de manejo e instalación, se limita su empleo a centros de investigación, los cuales a partir de los datos obtenidos y en condiciones muy concretas intentan extrapolarlos para que puedan servir de guía a los agricultores. Se hace por tanto necesario disponer de un dispositivo de bajo coste, menos voluminoso, que no requiera obra civil y que proporcione los valores reales de consumo de los cultivos, que esté al alcance de los agricultores y que éstos puedan utilizar directamente en sus fincas (con sus condiciones específicas) para conocer la necesidades de agua en tiempo real.

Con el objeto de dar solución a la problemática descrita, se ha diseñado, desarrollado y validado un sistema integral de bajo coste que no requiere de obra civil y que permite cuantificar el consumo hídrico de plantas cultivadas en maceta, a diferentes escalas temporales (minutos, horas, días, etc.), mediante la determinación de un balance hídrico, incluidas plantas arbóreas con disposición en espaldera con regulación de la inclinación,

El desarrollo del dispositivo permitió constituir la estación de lisimetría de la Escuela Politécnica Superior de Orihuela (EPSO). Actualmente alberga un cultivo de *Vitis vinífera* var. Bobal, donde se están realizando ensayos sobre consumos de agua para diferentes inclinaciones de la espaldera.

Introducción y Objetivos

En este capítulo se muestra la necesidad del desarrollo, su integración en un proyecto de investigación concedido por el MINECO, y se exponen los antecedentes más relevantes en la línea de investigación y desarrollo.



1.1. Contexto del trabajo

El presente Trabajo Fin de Master forma parte de un Proyecto de Investigación a nivel nacional que engloba a numerosas universidades y organismos a nivel internacional y que además se encuentra financiado por el MINECO (Ministerio de Economía y Competitividad). Dicho proyecto se titula “Balances de agua y carbono en vid: Efectos de la variedad, las condiciones edafoclimáticas y las técnicas de cultivo.”

La finalidad del citado proyecto es la generación de nuevos conocimientos en torno a los balances de agua y carbono en planta entera y en vid, y a la variación de estos balances en función de la variedad, las condiciones edafoclimáticas, incluida la disponibilidad de agua en suelo y otras técnicas de cultivo.

El proyecto de investigación está subdividido en cinco partes, de las que se forman cinco equipos de trabajo:

Paquete de trabajo 1.

- “Estimación de agua y depósitos de carbono en la vid en la hoja y el nivel de toda la planta.”
- Responsable: Dr. JM Escalona
- Centros de ejecución: la UIB, el IRTA / URV, IVIA, la UPNA.

Paquete de trabajo 2.

- “Desarrollo de un modelo de predicción y evaluación de indicadores para evaluar el balance de agua y carbono y la eficiencia en el uso del agua.”
- Responsable: Dr. Hipólito Medrano
- Centros de ejecución: Universidad de las Islas Baleares - IMEDEA (CSIC-UIB), UPN, IRTA, IVIA.

Paquete de trabajo 3.

- “El estudio detallado del crecimiento de la raíz y de la respiración, los componentes de flujo de agua a través del continuo suelo-vid-atmósfera y su relación con el agua y el balance de carbono.

- Responsable: Dr. Felicidad de Herralde (IRTA)
- Centros de ejecución: IRTA, URV, EGFV, UIB, IMEDEA (CSIC-UIB)

Paquete de trabajo 4.

- “Evaluación del efecto de ciertas prácticas agrícolas en el equilibrio de agua y de carbono y la calidad de la producción y el cultivo.”
- Responsable: Dr. Diego Intrigliolo.
- Centros Ejecutivos: IVIA, la UPNA, URV, el IRTA, UIB-IMEDEA.

Paquete de trabajo 5.

- “El crecimiento vegetativo, rendimiento y calidad del fruto de variación viñedos comerciales a lo largo de un gradiente edafo-climáticas. Validación de los indicadores de equilibrio de carbono y agua.”
- Responsable: Dr. L. Gonzaga Santesteban (UPNA).
- Centros de ejecución: UPNA, IRTA y la URV.

Este trabajo fin de master se integra en el Paquete nº 4 “Evaluación del efecto de ciertas prácticas agrícolas en el equilibrio de agua y de carbono y la calidad de la producción y el cultivo.” Trabajando con el IVIA (Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias) del que forman parte en el presente proyecto:

- La UMH (Universidad Miguel Hernández de Orihuela), encargada de los ensayos agronómicos y supervisión con la tecnología desarrollada.
- La UPV (Universidad Politécnica de Valencia), con los ensayos en campo y la dirección.
- La UPCT (Universidad Politécnica de Cartagena) que realiza el desarrollo tecnológico y evaluación de los equipos.

1.2. Antecedentes agronómicos

Entre todos los recursos naturales e insumos que se emplean en la agricultura, el agua es probablemente el factor más determinante en la productividad de los cultivos (Matson et al. 1997). En la agricultura mediterránea, donde el clima es semiárido, la disponibilidad de agua en el suelo es además la principal limitación para la práctica de una agricultura económicamente sostenible. En este contexto, el manejo del riego es el principal determinante de la calidad y cantidad de las cosechas obtenidas. Además, un mal manejo del riego puede tener también graves repercusiones medio-ambientales y socio-económicas.

El primer paso para gestionar correctamente el agua pasa por la determinación de las necesidades hídricas de los cultivos. Con tal fin se hace necesario disponer de técnicas que permitan cuantificar tanto las entradas de agua (precipitación y riego) como las salidas (transpiración, evaporación y drenaje) para calcular el balance hídrico. En la actualidad, este balance se determina de forma aproximada mediante el empleo de sensores de suelo, estaciones agroclimáticas y lisímetros (Allen et al., 1998). Los sensores de humedad del suelo empleados para establecer balances hídricos y gestionar el riego suelen ser bastante inexactos, ya que exploran tan sólo una pequeña zona del suelo, la mayoría no están calibrados para el suelo en el que deben trabajar, dan muchísimos fallos de instalación debido a la falta de uniformidad del suelo ya tiene piedras, cavidades, etc. Por lo tanto, acaban dando medidas que, aunque aproximadas, no reflejan la realidad. Por otra parte, las estaciones agroclimáticas determinan la evapotranspiración del cultivo de referencia. Sin embargo, para saber los consumos de agua requieren conocer unos coeficientes de cultivo, que son específicos para cada variedad, patrón, suelo, clima, etc., por lo que, a pesar de proporcionar una orientación, tampoco proporcionan datos reales del consumo de agua de cada planta. Los lisímetros proporcionan valores más exactos del consumo hídrico de los cultivos, ya que son considerados como el método estándar para la medida directa de la evapotranspiración (ET) (Payero and Irmak, 2008). Estos dispositivos se han utilizado de forma individual o en estaciones en el ámbito agronómico para estudiar las variaciones de peso experimentadas por una porción de parcela de un determinado cultivo. Un lisímetro, en su definición más general es una instalación empleada en agronomía que mide el volumen de todas las aguas entrantes y salientes de un recipiente que contiene una masa aislada de suelo (Payero and Irmak, 2008). Así pues, se pueden distinguir varios tipos de lisímetros según su funcionamiento y uso, como los lisímetros volumétricos, lisímetros de relleno y lisímetros de pesada, entre otros, siendo estos últimos los únicos que miden la ET directamente como balance de masas.

Por otra parte, cabe tener en cuenta que la productividad y el consumo de agua de las plantaciones dependen en gran medida de la cantidad de radiación solar que intercepta el dosel vegetal. En cultivos con un grado de cobertura vegetal del suelo inferior al 100%, la luz capturada por la vegetación depende tanto del desarrollo vegetativo como del sistema de conducción y del diseño de

las plantaciones. Por otro lado, la respuesta fisiológica de las plantas, en particular la estomática, se ve influenciada también por las condiciones ambientales, repercutiendo de forma directa en el intercambio gaseoso. A escala temporal diaria, el nivel de fotosíntesis, la transpiración y, por lo tanto, la eficiencia en el uso del agua, no solo son función del nivel de radiación interceptada sino también del momento del día en el que dicho nivel se alcanza. Por ejemplo, (Corelli, 2003) demostró en manzano que la fotosíntesis de todo el árbol era menor por la tarde que por la mañana, a pesar de que los niveles de radiación interceptada en esos momentos eran iguales. Esto es debido a que, en general, en las horas centrales del día y durante la tarde, la temperatura y el déficit de presión de vapor del aire son mayores que por la mañana, lo que tiene un efecto directo sobre la tasa de evaporación de agua en las hojas. Así pues, al contrario de lo que ocurre con cultivos bajos y tupidos como en el caso del césped, alrededor de la copa de los viñedos y frutales es menos probable que se formen espesas capas límites de aire que puedan reducir el agua transpirada por las hojas (Jarvis, P., 1985).

Para el caso de viñedos en espaldera y los huertos de frutales en palmeta, mayoritariamente plantados en dirección de las filas norte-sur, existe la posibilidad de modificar fácilmente el nivel de radiación interceptada por las plantas a lo largo del día, aumentándolo o disminuyéndolo en función del grado de inclinación de la vegetación con respecto a la dirección de la radiación incidente. En los ambientes mediterráneos, caracterizados por veranos secos y despejados, buena parte de la radiación incidente es de forma directa lo cual justifica la adopción de estas prácticas.

La hipótesis de partida es que en aquellas plantaciones de vid y frutales en palmeta con orientación de las filas norte-sur, la inclinación de la vegetación hacia el oeste puede incrementar la eficiencia en el uso del agua ya que se reduce la radiación interceptada por la planta en las primeras hora de la tarde, cuando la demanda evaporativa es mayor que a primeras horas de la mañana. Con el fin de poder comprobar esta hipótesis en cultivos con espaldera (e.g. vid) se hace necesario disponer de un sistema preciso de medida de todas las variables que influyen sobre el balance hídrico y que además permita variar la disposición de la vegetación inclinándola en función de las necesidades de los ensayos.

1.3. Los lisímetros

El término "lisímetro" deriva de las palabras griegas "lysis" (disolver) y "metron" (medir). Este vocablo se puede aplicar a todo dispositivo utilizado para determinar la velocidad, cantidad y composición del agua que percola en un medio poroso. De este modo, hay muchas definiciones de lisímetro que se refieren a "instrumentos o dispositivos que contienen suelo y reciben lluvia natural o riego y se encuentran provistos de un sistema para recibir y medir la

Introducción y objetivos

solución de percolación". El agua percolada se considera un componente importante del ciclo hidrológico, que se produce en la recarga del agua subterránea y en la descarga de agua hacia los cauces naturales. Otra definición dada de los lisímetros es: "unos recipientes grandes llenos de suelo o encerrando una masa de suelo, ubicados en el campo para representar sus condiciones naturales, de superficie desnuda o con cubierta vegetal (cultivos o césped), utilizados para determinar la evapotranspiración de un cultivo en crecimiento, o una cubierta vegetal de referencia, o para determinar la evaporación en suelos desnudos.

La lisimetría en su forma más sencilla, incluye la medida volumétrica de todas las aguas que entran y salen de un recipiente que contiene una masa aislada de suelo, cuya superficie puede estar desnuda o con diferentes tipos de cubierta vegetal.

1.3.1 Clasificación de los lisímetros

Principalmente existen dos criterios para clasificar los lisímetros.

- El primero de ellos se basa en la forma de determinar el contenido de agua en el suelo, y con arreglo a él los lisímetros se agrupan en dos grandes categorías: los lisímetros o evapotranspirómetros no pesantes, también conocidos como volumétricos, de drenaje o de compensación, y los lisímetros de pesada (Figura 1-1)



Figura 1-1 - Lisímetro de pesada.

- El segundo criterio se basa en el método utilizado para aislar la masa de suelo, y de acuerdo con él los lisímetros se agrupan en tres grandes tipos: lisímetros monolíticos (con el suelo sin perturbar), lisímetros de relleno o perturbados y lisímetros tipo Ebermayer (caso intermedio).

1.3.2 Lisímetros de pesada

Un lisímetro de pesada está compuesto básicamente por un gran recipiente relleno de suelo sobre una báscula. Todo ello está instalado en una arqueta subterránea que lo contiene y permite el acceso al interior para su calibración y mantenimiento. Está relleno del mismo suelo que se retiró al hacer la excavación, manteniéndose la secuencia de horizontes edáficos así como la profundidad de los mismos.

La parte superior del lisímetro está situada a ras de tierra, de manera que se intenta reproducir un cultivo normal. Los alrededores del lisímetro están sembrados con el mismo cultivo instalado en éste. El recipiente está situado sobre un sistema de balanzas y un contrapeso, que contrarresta la carga muerta del suelo y el recipiente.

Los lisímetros de pesada normalmente están compuestos por un recipiente de grandes dimensiones relleno de suelo que reposa sobre una báscula. Todo el conjunto se halla instalado en una arqueta subterránea que permite el acceso a su interior para su mantenimiento y calibración. El suelo del lisímetro se halla a ras de tierra, por lo que a simple vista, resulta imperceptible distinguirlo del resto del cultivo que lo rodea, ya que está cubierta por dicho cultivo. Muchos de estos lisímetros se utilizan para el análisis de la evapotranspiración del cultivo en diferentes condiciones (Liu et al., 2010; Zhang et al., 2007, 2008). Son numerosas las limitaciones que tienen este tipo de lisímetros derivados de su gran tamaño y peso: complejidad de la obra para su instalación, alto coste, espacio ocupado, mantenimiento, falta de automatización, limitación en su manejo, etc. Esto limita su empleo a centros de investigación, los cuales, a partir de los datos obtenidos y en condiciones muy concretas, intentan extrapolarlos para que puedan servir de guía a los agricultores.

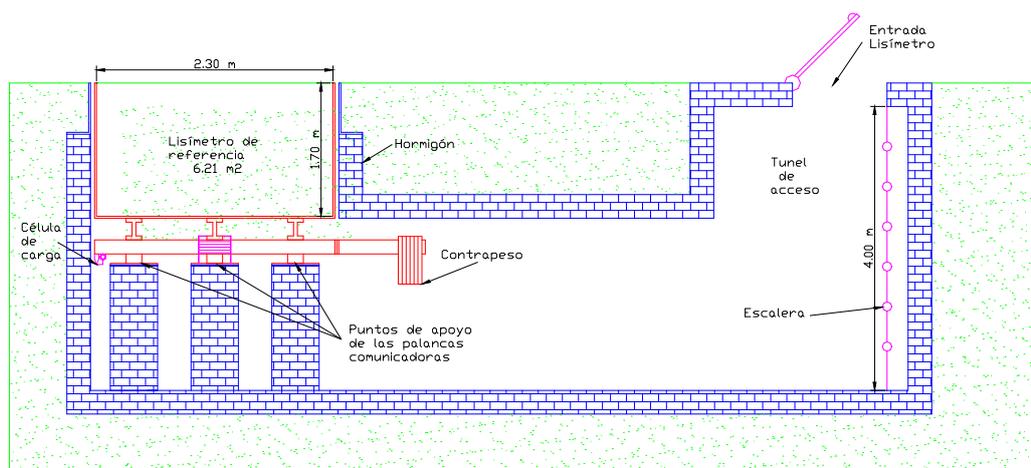


Figura 1-2 - Sección de un lisímetro de pesada subterráneo.

1.4. Objetivos del trabajo

Con la finalidad de establecer las bases para la determinación de la influencia de la inclinación de la espaldera, sobre el consumo hídrico y la respuesta vegetativa de la viña variedad Bobal, cultivada en maceta, se plantea como objetivo general desarrollar un dispositivo que permita determinar con exactitud y, en tiempo real, el valor de la evapotranspiración y de todos los componentes que intervienen en la ecuación del balance hídrico.

Para cumplir con este objetivo se propone la utilización de un lisímetro que solucione los inconvenientes de los tradicionales y permita la posibilidad de regular la inclinación de la planta. Esto implica que (i) sea de bajo coste, (ii) menos voluminoso, (iii) no requiera obra civil y (iv) pueda ser utilizado por los agricultores en sus fincas (con sus condiciones específicas).

Existen algunos lisímetros exteriores que cumplen con algunas de estas características (Beeson Jr., 2011; Tripler et al., 2012; Wenting et al., 2013), sin embargo, en algunos casos su estructura no es lo suficientemente robusta ni estable y la forma de pesada puede inducir a errores ante agentes externos meteorológicos como ráfagas de viento (Howell et al., 1995). En otros casos, no se proporcionan dispositivos automáticos de medida del drenaje. Existe, por tanto, margen de mejora en este tipo de lisímetros en factores como su estructura y diseño del Sistema electrónico de automatización de medidas.

Además, en este trabajo se evalúa si la explotación comercial del lisímetro propuesto es económicamente viable. Para ello se ha utilizado la metodología denominada "Simulación de Monte Carlo" (Dagpunar, 2007), capaz de proporcionar soluciones aproximadas a problemas matemáticos mediante la utilización de muestreos de números pseudoaleatorios por ordenador.

1.5. Fases del trabajo

El objetivo del proyecto ha sido abordado de acuerdo con el plan de trabajo que se ha elaborado apoyándose en el establecimiento de los siguientes objetivos parciales.

- Validar un modelo de lisímetro de pesada para viña en maceta, efectuar las medidas de variaciones de peso para llevar a cabo el balance hídrico y compararlas con los volúmenes de agua de riego aplicada.
- Distinguir y medir los procesos de evaporación y drenaje en el lisímetro de pesada para cultivo en maceta.
- Efectuar el balance hídrico mediante la ecuación de conservación de la masa, determinando:

- 1º, el valor de las entradas de agua (lluvia y riego) a escala de maceta;
 - 2º, la variación de la lámina de agua (stock) del suelo entre cada dos fechas en que se realice el balance hídrico;
 - 3º, el valor de las salidas de agua (drenaje y evapotranspiración).
- Evaluar la viabilidad económica del dispositivo desarrollado para su explotación comercial.



Materiales y Métodos

Este capítulo describe el material utilizado para llevar a cabo el trabajo, y la metodología seguida para el diseño, desarrollo y montaje de los dispositivos; así como, su instalación y validación en la parcela de ensayo de la EPSO-UMH.





2.1. Descripción del dispositivo

El dispositivo desarrollado está formado por una plataforma (1) que colocada de forma horizontal sobre una estructura soporte (2), la cual se ancla sobre el suelo gracias a la ayuda de unos soportes regulables en altura (3) que garantizan la horizontalidad de la plataforma (1).

La plataforma (1) sirve de soporte al recipiente contenedor del cultivo (4) sobre el que se coloca la maceta (5). Esta plataforma (1) también soporta la estructura de forma porticada (6) que sirve como marco de la espaldera o palmeta (7) para los cultivos existentes en la maceta.

La plataforma (1) está sustentada sobre la estructura soporte (2) mediante sensores (8) que permiten medir y registrar el peso de todo el sistema situado por encima de la misma.

El sistema contenedor de la maceta (4 y 5) está aislado térmicamente de la radiación solar sobre las paredes de la maceta de cultivo. También dispone de un sistema de cierre en su parte superior para impedir la evaporación de la humedad contenida en la maceta, como por ejemplo una película de material plástico. La parte inferior del sistema contenedor (4) es capaz de recoger toda el agua drenada y su evacuación es regulada mediante una electroválvula (9) controlada por el sistema electrónico alojado en un cuadro eléctrico (10).

En la parte inferior de la plataforma se dispone de un recipiente de paredes opacas y de forma esférica (11) que recoge el drenaje del agua de riego evacuada a través de la electroválvula del sistema contenedor (9). El peso de este recipiente está controlado por un sensor (12) que mide y registra su valor. En la parte inferior del recipiente (11) se dispone de una electroválvula (13) que permite su vaciado y que está controlada por el sistema electrónico (10).

El sistema electrónico (10) deberá ser capaz de leer y transmitir el valor de todos los sensores, permitiendo registrar en periodos de tiempo regulados la cantidad de agua de riego (17), el peso del cultivo (8) y el peso del agua de riego drenada (12). También deberá actuar sobre las electroválvulas que permiten regular los caudales de riego (18), el agua de drenaje de la maceta (9) y el agua evacuada por el recipiente inferior (13).

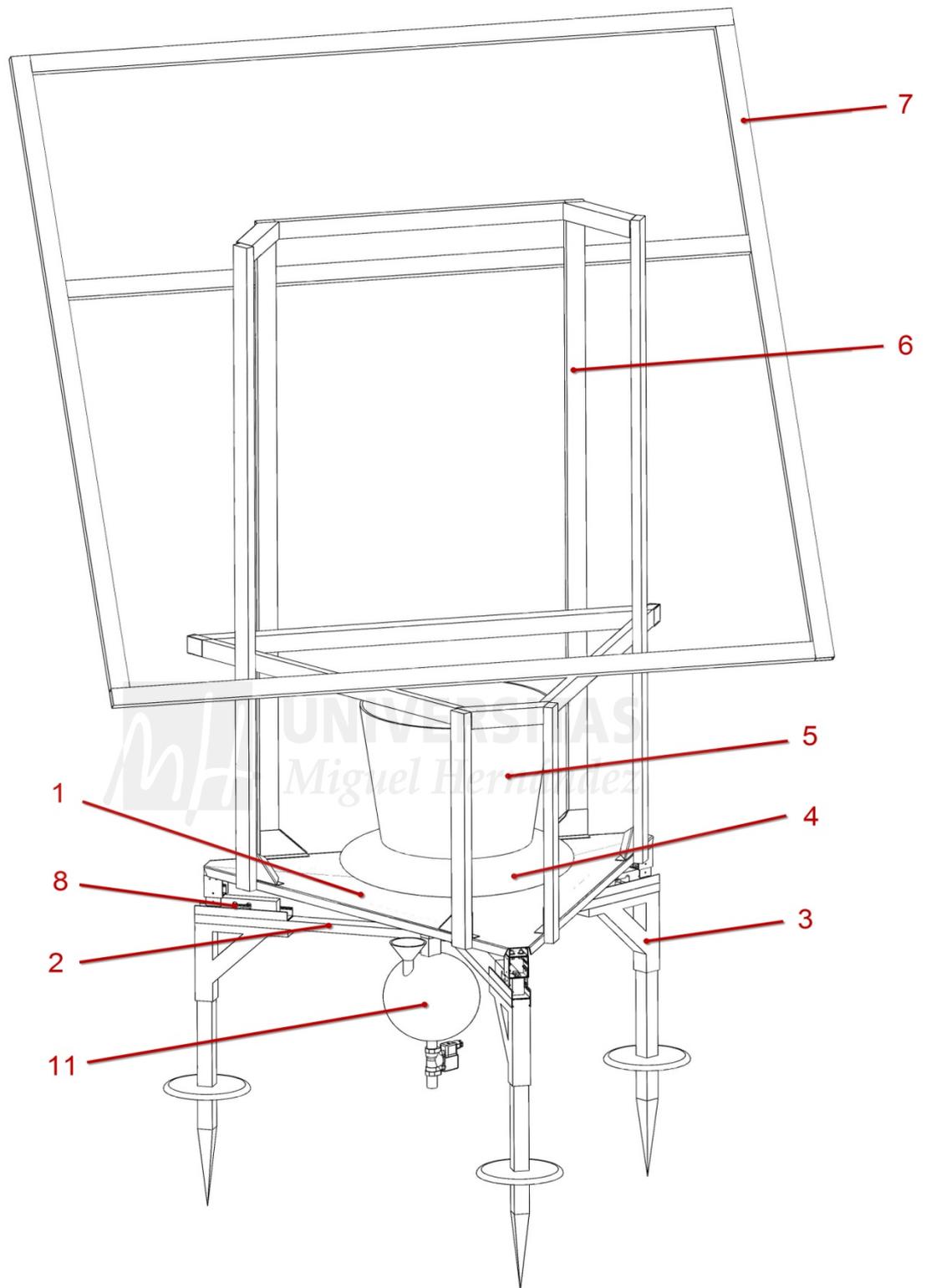


Figura 2-1. Vista del dispositivo para medir el peso del cultivo

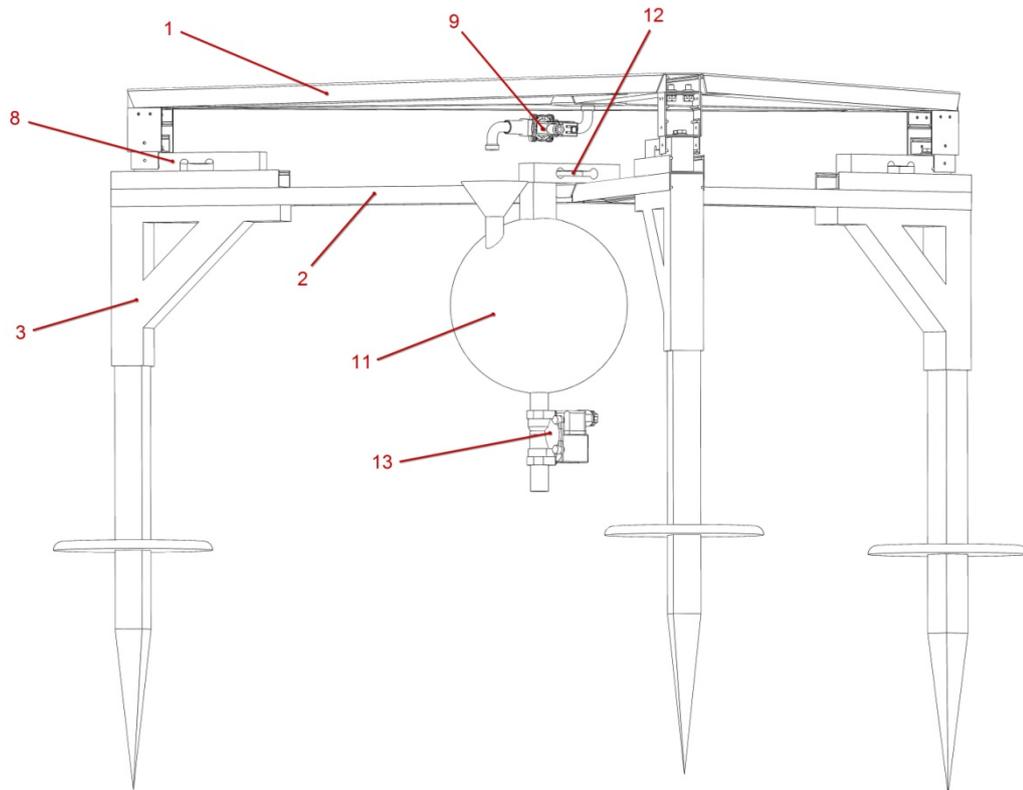


Figura 2-2. Detalle del sistema de medición del agua de drenaje

2.2. Diseño mecánico

Antes de llegar al equipo descrito, se realizaron diversos prototipos. El primero consistió en un soporte de forma cuadrada que descansaba sobre una célula de carga situada en el centro.

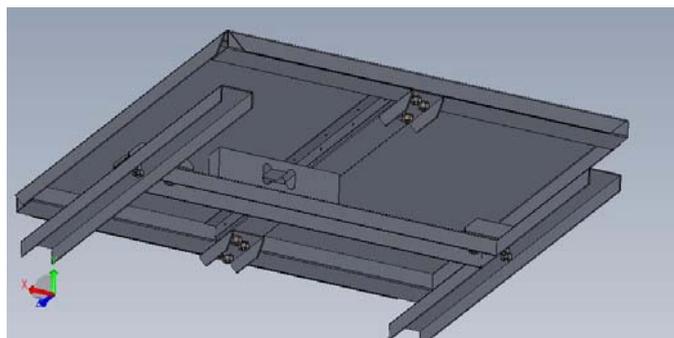


Figura 2-3. Diseño con una sola célula de carga



Figura 2-4, Modelo con una sola célula de carga

El inconveniente de este diseño era que el objeto a pesar debía estar situado en el centro geométrico del soporte, de lo contrario la medida resultaba errónea y la estabilidad de la estructura se veía comprometida. Posteriormente se realizó un segundo prototipo con dos células de carga enfrentadas entre sí. Con ello se aumentaba el rango de peso admisible hasta 60 kg (2 x 30 kg), pero presentaba la misma problemática que el anterior: carecía de equilibrio y por tanto, era inestable.

Finalmente se desarrolló el dispositivo definido en el apartado anterior. Esta estructura se ancla sobre el suelo gracias a la ayuda de unos soportes de acero regulables en altura que garantizan la horizontalidad de la plataforma. Además, se implementa una estructura vertical formada por perfiles de aluminio para soportar una espaldera de 1,2 x 1 m, capaz de ser colocada en diferentes ángulos de hasta 30° respecto del eje vertical. El diseño de toda la estructura se realizó con SolidWorks.

Las cargas de viento utilizadas fueron las recomendadas por el Código Técnico de la Edificación (CTE) y las cargas verticales fueron determinadas por el peso máximo de la maceta.



 UNIVERSITAS
Miguel Hernández

Figura 2-5, Modelo geométrico 90 grados

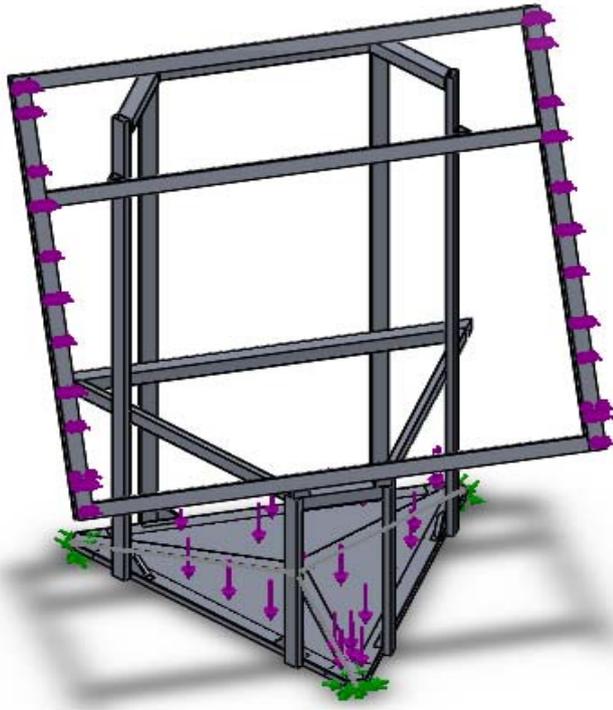


Figura 2-6. Modelo geométrico 30 grados y fuerzas aplicadas

En el posterior análisis y cálculo de tensiones y deformaciones por elementos finitos se empleó SolidWorks Simulation, para ello se modelizó para un material de aluminio extruido con un límite elástico de $1.45 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ con elementos tipo solido, isotrópico y lineal, resultando una malla con 52.756 elementos cuadráticos de alto orden.



Figura 2-7. Modelo de elementos finitos

Para recoger el agua percolada de la maceta, el lisímetro incorpora en su parte inferior un recipiente de plástico resistente que la envuelve. Este recipiente dispone en su parte más baja de un conducto que atraviesa la plataforma y que termina en un recipiente esférico de PVC. Este recipiente está suspendido de otra célula de carga. Dicha célula se encarga de medir el peso del recipiente y del agua que contiene. Una vez se llena el recipiente, dos electroválvulas (una conectada a la entrada y otra a la salida) se encargan del control de apertura y cierre de dicho depósito para vaciarlo de modo que no se pierda agua de drenaje en este proceso.



Figura 2-8. Estructura e instalación del dispositivo de medida. A la izquierda se muestra la instalación de un dispositivo. En el centro el modelo 3D. A la derecha el detalle de un depósito de drenaje y su célula de carga.

El cableado de las cuatro células de carga y de las dos electroválvulas se recoge en una caja estanca que puede albergar el sistema de adquisición y control (para lisímetros individuales) o bien el interconexión necesario para la adquisición remota (en grupos de lisímetros o estaciones de lisimetría).

2.3. Adquisición de datos y control

2.3.1 Células de carga

Una célula de carga es un transductor que se utiliza para convertir una fuerza en una señal eléctrica. Esta conversión es indirecta y se realiza en dos etapas. Mediante un dispositivo mecánico, la fuerza que se desea medir deforma varias galgas extensiométricas y a su vez, estas convierten la deformación en una variación de una resistencia eléctrica.

Cada lisímetro disponía de cuatro células de carga con galgas extensiométricas compensadas en temperatura (configuración puente completo de Wheatstone) modelo VETEK 108TA with IP66 protection; tres de 30 kg para pesar la maceta y una de 10 kg para el drenaje. Estas células cumplen con la regulación internacional OIML R60 C3 que permite hasta 5000 divisiones para escalas clase III (Metrology, 2000) con una sensibilidad nominal de $2 \text{ mV} \cdot \text{V}^{-1} \pm 10\%$. Estas características garantizan una precisión en peso de 6 g. para las células de 30 kg y de 2 g para la de 10 kg. alcanzándose valores mayores de precisión en la realidad.



Figura 2-9 - Modelo Vetek 108TA

Atendiendo a las especificaciones técnicas del fabricante, los colores de los cables indican:

- Cable Rojo: Alimentación Positiva.
- Cable Negro: Alimentación Negativa.
- Cable Verde: Salida Positiva.
- Cable Blanco: Salida Negativa.

La recta de calibración de cada célula de carga viene dada por la siguiente ecuación:

$$P = S * V + B_z$$

Dónde:

"**P**" es el peso resultante de la medición de la célula (Valor en Voltios).

"**S**" es la Sensibilidad de Salida (Output Sensitivity). Relaciona el voltaje de salida con la tensión de alimentación a la célula (mV/V). Los valores suelen estar próximos a 2 mV/V.

"**V**" Tensión de salida de la célula. Es el valor en voltios resultante de la variación resistiva del puente de Wheatstone que compone la célula de carga. A más presión o más peso, mayor tensión de salida de la célula.

2.3.2 Registrador de datos (datalogger) y multiplexor

La adquisición de datos se llevó a cabo mediante un datalogger de la marca Campbell Sci., modelo CR1000, cuyas características principales son las siguientes:

Materiales y Métodos

- Posee 2Mb de memoria standard, 4Mb opcionales y posibilidad de ampliación un módulo adicional de memoria Compact Flash.
- CPU interna de 32-bit.
- Ocho canales diferenciales de entrada analógicas, dos canales contadores de pulsos y ocho puertos digitales I/O de control, complementado con puerto CS I/O y RS232 y opcionalmente Ethernet, RS485.
- Capacidad de ampliación con multiplexores, interfaces SDI-12 ó periféricos SMD.
- El datalogger se puede alimentar por cualquier fuente de 12Vdc. El rango permitido es de 9.6 a 16 voltios.

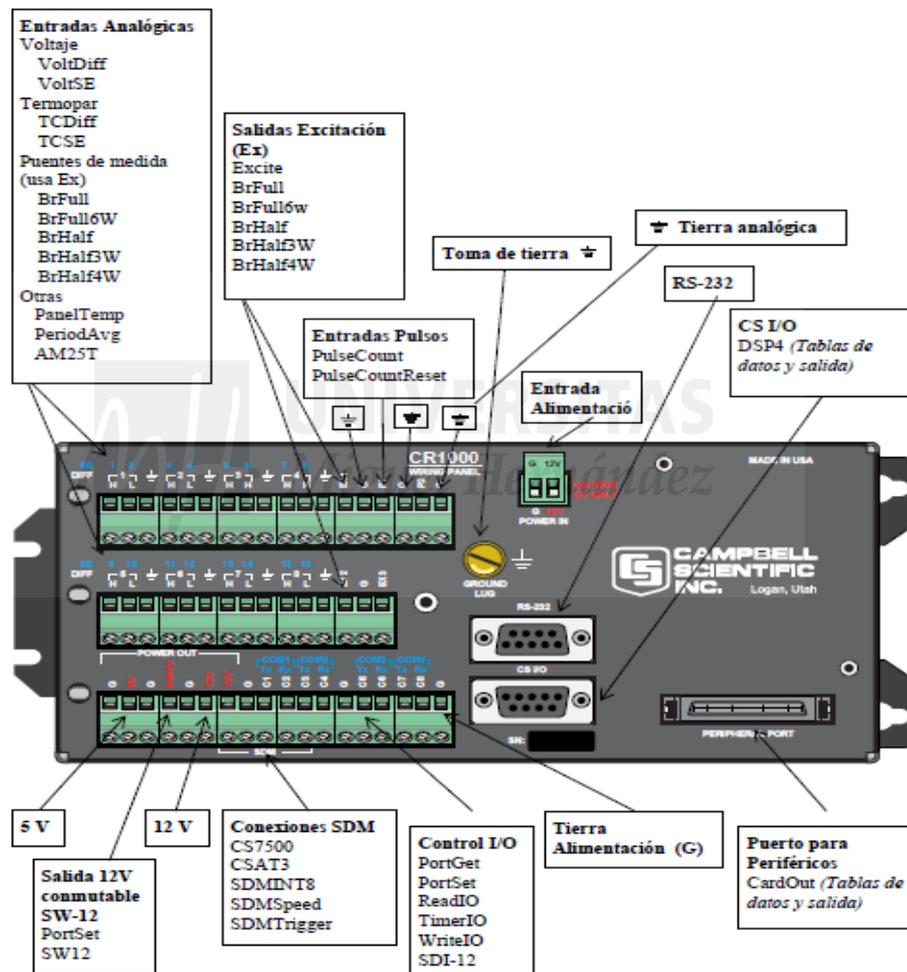


Figura 2-10 - Datalogger CR1000.

Para la programación del CR1000 se utilizó el software LoggerNet , que actúa como un conjunto de programas que permiten conectar, programar, configurar y recuperar los datos almacenados en el registrador de datos



Figura 2-11 - Pantalla inicio software Loggernet.

Dado que el datalogger no dispone de suficientes canales para conectar las cuatro células de carga, se utilizó un multiplexor de relés AM16/32 de la misma casa, Campbell Scientific, que permite aumentar el número de sensores a muestrear en “4x16” de esta forma se pueden muestrear 16 canales de entrada con cuatro líneas por elemento. Se ubica entre los sensores y el datalogger. Usa relés, y de forma manual con un switch, se pueden configurar dieciséis grupos de cuatro líneas o treinta y dos grupos de dos líneas multiplexables de forma secuencial.



Figura 2-12 - Multiplexor AM16/32 para el CR1000.

2.3.3 Control de las electroválvulas

Para el control del vaciado del depósito de drenaje, se utilizaron dos electroválvulas. Una electroválvula normalmente abierta a la entrada y otra normalmente cerrada a la salida, ambas con solenoides de 230V.

Debido al elevado consumo de las electroválvulas no fue posible conectarlas directamente al datalogger, por lo que se tuvo que realizar y montar un circuito electrónico de control mediante transistores de potencia y relés.

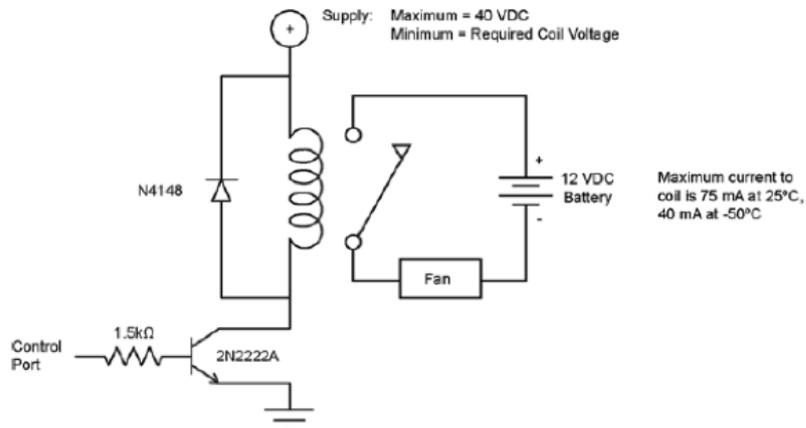


Figura 2-13 – Circuito para el control de las electroválvulas.

2.3.4 Cuadro eléctrico

Todos los elementos de adquisición de datos y control se colocaron dentro de un cuadro eléctrico de 60 x 40 x 25 cm, con un grado de protección IP67, donde se llevaron a cabo todas las conexiones.

La alimentación de entrada al cuadro eléctrico se realizó mediante corriente alterna monofásica de 230V. Para la alimentación del datalogger y el multiplexor se utilizó un transformador de tensión 230/12 V y 1^a.



Figura 2-14 – Cuadro eléctrico y conexionado interior.

2.4. Determinación del balance hídrico

Para poder realizar el balance hídrico y determinar la cantidad de agua consumida por una planta en un periodo de tiempo por evapotranspiración es necesario medir, en tiempo real, las entradas y salidas de agua en el sistema.

Las variaciones de peso del conjunto constituido por la maceta y la planta se miden mediante tres células de carga sobre las que reposa una base triangular que soporta al conjunto. Dichas variaciones de peso son debidas a la entrada de agua mediante el riego, mientras que las salidas son debidas a las pérdidas por drenaje y al consumo de agua de la planta por evapotranspiración, o solo por transpiración, si se coloca un plástico o cubierta impermeable en la superficie de la maceta.

Las pérdidas de agua debidas al drenaje de la maceta se miden mediante una célula de carga que sustenta un depósito colocado en la parte inferior que recoge todo el agua que no es capaz de almacenar la maceta tras el riego, mientras que la cantidad de agua aportada durante el riego se mide con otra célula de carga que sustenta un depósito que recoge el agua de riego. Conocidas estas tres medidas, se puede obtener la cantidad de agua evapotranspirada/transpirada por la planta como la diferencia entre el agua aportada por el riego y el agua drenada junto con la variación de agua almacenada en la maceta en el intervalo de tiempo considerado.

Para vaciar el depósito de drenaje cuando se ha llenado, sin alterar las medidas, se colocan dos electroválvulas: una normalmente abierta en la entrada y otra normalmente cerrada en la salida. De esta manera, mientras se produce el vaciado del depósito, se cierra la válvula de entrada de agua al depósito y se abre la de salida. La electroválvula que se coloca en el depósito de riego es normalmente cerrada y se abrirá una vez se ha terminado de aportar el agua al depósito para poder cuantificar la cantidad de agua aportada en cada intervalo de tiempo mediante la variación de peso del depósito proporcionado por la célula de carga que lo sustenta.

Los datos se recogen mediante equipos electrónicos de adquisición de datos y control, programados con algoritmos que permiten el almacenamiento de los datos en el tiempo previsto, el cálculo de la evapotranspiración/transpiración y el control de las electroválvulas.

2.5. Estación de lisimetría EPSO. Parcela de ensayo

El trabajo para la validación del prototipo del lisímetro fue realizado en una de las parcelas experimentales de la Escuela Politécnica Superior de Orihuela

Materiales y Métodos

(EPSO) perteneciente a la Universidad Miguel Hernández. Dicha parcela cuenta con una superficie de 396 m² y orientación Norte-Sur. La parcela incluye un total de 8 filas con 12 macetas de 50 litros de capacidad cada una, de la variedad Bobal (*Vitis Vinifera* L. cv Bobal) sobre patrón 110-R orientadas noroeste-suroeste.

Las dos filas de los extremos este y oeste y las dos centrales tienen la función de ejercer como barrera para evitar el efecto borde, por lo que no disponen de lisímetros. Éstos se sitúan en las cuatro filas situadas en las posiciones segunda, tercera, sexta y séptima a lo largo del eje este-oeste. De las 12 macetas existentes en cada una de estas filas, las 4 centrales descansan sobre un lisímetro cada una, quedando las 8 restantes repartidas cuatro a cuatro realizando la función de guarda. Por tanto, existen un total de 16 lisímetros en la parcela.

Para el proceso de instalación de los lisímetros se procedió en primer lugar al montaje y anclaje al suelo de la base y a la colocación de las macetas en su respectivo lisímetro. Una vez que las cepas de las macetas de vid comenzaron a brotar, con el consiguiente aumento de tamaño de la planta, se procedió a la instalación de las espalderas reclinables, quedando dos filas a 90° y otras dos a 30° de inclinación. Desde primavera de 2012 hasta la actualidad los lisímetros han estado funcionando ininterrumpidamente sin presentar anomalías dignas de mención.

La Figura 2-15 muestra la arquitectura utilizada para la estación de 16 lisímetros. Cada registrador de datos adquiere señales de 4 lisímetros (4 células de por lisímetro) a través del multiplexor, y controla las electroválvulas de drenaje mediante 4 salidas digitales (una por lisímetro) conectadas a una tarjeta de relés (cada depósito de drenaje disponía de una NA y otra NC el vaciado controladas por la misma señal).

Los puentes de las células de carga se alimentaron a 2.5 V (salida analógica VX1 de CR1000). Puesto que las células de carga se multiplexaron, para la adquisición se utilizó una sola entrada analógica del CR1000 configurada en modo diferencial con una resolución de 0.67 μ V. Esta resolución es suficiente para la precisión proporcionada por las células de carga (1 μ V) calculada según la ecuación:

$$\begin{aligned} \text{Exactitud} &= \frac{\text{Sensibilidad célula de carga} \cdot \text{Tensión alimentación}}{\text{Número de divisiones}} \\ &= \frac{2 \text{ mV} \cdot \text{V}^{-1} \cdot 2,5 \text{ V}}{5000} = 1 \mu\text{V} \end{aligned}$$

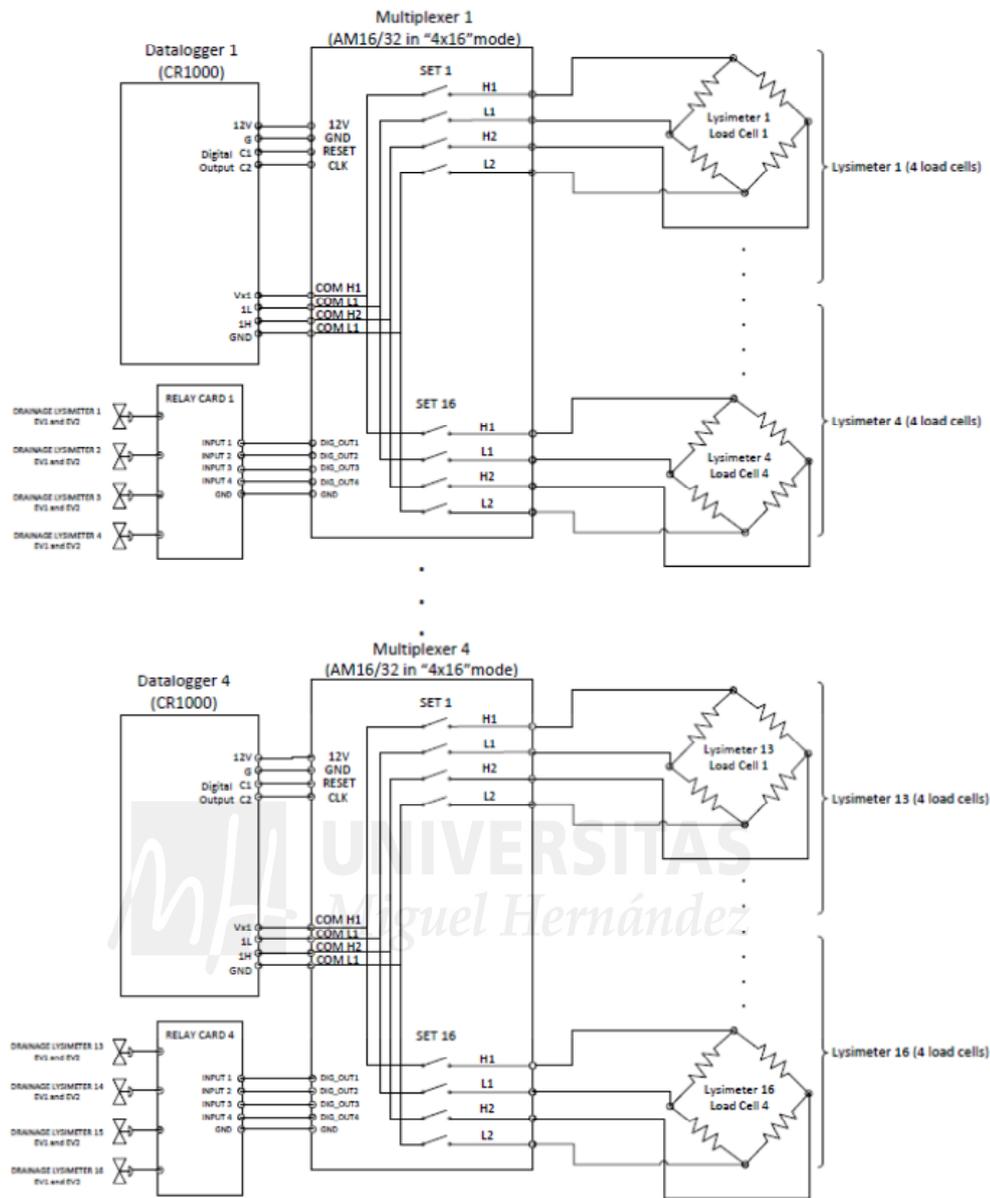


Figura 2-15 – Arquitectura utilizada para la adquisición de datos en toda la estación de lisimetría.

El equipo se programó para efectuar lecturas del peso de todos los lisímetros cada dos segundo (30 lecturas por minuto), que se promediaron para generar registros cada minuto. Los depósitos de drenaje se vaciaban automáticamente al alcanzar un peso de 4 kg. Los datos registrados se descargaban a un ordenador personal dos veces por semana.

Para conseguir la máxima precisión en las medidas y compensar las caídas de tensión en el cableado y el sistema de multiplexado, las células de carga se calibraron en campo una vez realizada la instalación. Para cada célula de carga se obtuvo la recta de regresión lineal a partir de 6 puntos como se describe en (Misra et al., 2011) incrementando y disminuyendo los pesos en todo el rango

de medidas de 20 kg (rango de carga prevista para el total de plataforma, maceta y espaldera, dejando un margen de seguridad). Este método fue comprobado como el más exacto entre los estudiados (Misra et al., 2011).

Para comprobar la influencia de las variaciones de la tensión de alimentación se realizaron medidas en campo en las células con diferentes pesos calibrados con una balanza Mettler Toledo ICS425D-35LA con una precisión de 0.1 g. Las señales de las células de carga ($mV \cdot V^{-1}$) fueron tomadas en intervalos de 1 min. durante un periodo de 1 h. y se utilizó un multímetro digital de precisión Transmille 8081 (exactitud de 4 ppm) Los pares de valores t-peso con y sin tensión de compensación no tuvieron diferencias significativas ($P > 0,045$) (Snedecor and Cochran, 1989). Por lo tanto no fueron utilizadas excitaciones de compensación.

Como se demuestra en (Martin et al., 2001; Misra et al., 2011) las variaciones de temperatura no tienen una influencia significativa en las medidas realizadas en largos periodos de tiempo. Asimismo según (Misra et al., 2011; Payero and Irmak, 2008) los errores debidos a la histéresis tampoco son significativos, por lo que tampoco se han considerado.

2.6. Estudio económico

Para la evaluación de la viabilidad económica del proyecto de inversión de la estación de lisimetría se planteó un escenario temporal de 15 años (2014-2028) como se muestra en las variables y valores de partida que se recogen en la Tabla 1, considerando como variables de riesgo de dimensión temporal las señaladas con (*). Esta información procede de la evaluación de los costes del proyecto en su etapa de desarrollo, previa a su comercialización industrial.

En este sentido, en la fase de diseño experimental, la inversión en equipo ascendió a la cantidad total de 310.445,60 euros, si bien las características técnicas del proyecto permiten prever su financiación subvencionada por organismos públicos en torno al 60%, por lo que a efectos de su evaluación económica se consideró como inversión bruta de capital el 40% de la inversión total reseñada, que asciende a la cifra de 124.178,40 euros, y que junto a la inversión inicial en fondo de maniobra estimada en 5.000 euros, permite determinar como primer flujo de caja neto del proyecto la cantidad de 129.178,40 euros, considerándose adicionalmente el mantenimiento de un capital circulante neto mínimo del 10% de las ventas generadas en cada ejercicio.

Respecto a los ingresos estimados, para su cuantificación se consideró la puesta en servicio de una planta completa, compuesta por 16 lisímetros a un precio unitario de venta de 6.955,55 euros/unidad.

Tabla 1. Escenario económico de partida

| Conceptos | Valores Iniciales (12/31/2013) |
|---|-----------------------------------|
| Ingresos estimados ^(*) | 111.288,80 |
| Coste de materiales ^(*) | € |
| Coste de personal ^(*) | 72,73%(1) |
| Otros costes ^(*) | 6,54%(1) |
| Inversión en equipo ^(*) | 0,72%(1) |
| Valor residual inversión en equipo | 124.178,40 € |
| Vida útil estimada del equipo | nula |
| Capital circulante (inversión inicial) | 15 años |
| Capital circulante (tasa sobre ventas) | 5.000 € |
| Tipo gravamen impuesto sobre sociedades | 10% |
| | 25% |
| Coste de capital de mercado | 4% |

(1) costes estimados sobre cifra de ingresos.

Tabla 2. Variables de riesgo: variaciones propuestas.

| Variables | Variables de riesgo |
|-----------------------------------|------------------------|
| Tasa de crecimiento de las ventas | 3,88% |
| Coste de materiales | 3,88% |
| Coste de personal | 1,09% |
| Otros costes | 3,88% |
| Inversión en equipo | ±50% inversión inicial |
| Capital circulante neto | 10% ingresos |

En cuanto al pago de impuestos, se tuvo en cuenta que la unidad económica que desarrollará el proyecto se puede calificar a efectos fiscales como empresa de reducida dimensión al tener una facturación inferior a 10.000.000 de euros, premisa que permite inferir un tipo de gravamen del 25% para una cifra de beneficios de hasta 300.000 euros, tasa que fue considerada para la inferencia de los flujos netos de efectivo futuros.

La evaluación del proyecto se llevó a cabo inicialmente mediante la obtención del valor actual neto del proyecto (VAN) y la tasa de rendimiento interno (TIR). En este sentido, el VAN determina el valor presente de los flujos de efectivo generados por un proyecto para un determinado horizonte temporal, considerándose viable el proyecto en la medida en que el VAN tome valores positivos, mientras que la TIR (TIR) o tasa de descuento que hace nulo el VAN debe ser superior al coste de capital inicialmente seleccionado para el cálculo del VAN.

Materiales y Métodos

Para el cálculo del VAN se tomó como tasa de descuento la correspondiente al coste de oportunidad de la inversión realizada, para lo cual se seleccionó el tipo oficial de interés del dinero publicado por el Banco de España, que en 2013, último ejercicio más reciente respecto de la fecha del estudio, fue del 4% anual.

La Tabla 2 explicita la variación estimada de las variables de riesgo utilizadas en el análisis de sensibilidad del modelo propuesto. La justificación de las variaciones propuestas para cada una de las variables de riesgo es la siguiente:

- *Costes del proyecto (materiales y otros):* De acuerdo con el índice de precios industriales facilitado por el Instituto Nacional de Estadística para el periodo 2010-2013 (año base 2010), se consideraron las variaciones anuales del citado índice, resultando un valor medio del 3,88% anual, que se tomó como variación de las variables que afectan a los costes del proyecto.
- *Coste de personal:* Considerando los valores brutos del coste de los salarios en España publicado por el Instituto Nacional de Estadística para el periodo 2008-2012 (año base 2008), se determinó el índice medio de variación, equivalente al 1,09% anual, tasa que se tuvo en cuenta para la proyección temporal de los costes laborales del proyecto.
- *Ingresos estimados:* Se propuso como tasa de incremento de los ingresos estimados la correspondiente al coste de los materiales consumidos, al objeto de asegurar una rentabilidad sobre cifra de ventas en torno al 10% después de impuestos.
- *Inversión en equipo:* se corresponde con la inversión no subvencionada del proyecto por importe de 124.178,40 euros, equivalente al 40% de la inversión total determinada al finalizar la fase de desarrollo, cuyo montante ascendió a 310.445,60 euros.
- *Inversión en capital circulante:* Para el desenvolvimiento normal del proyecto se planteó un saldo neto del fondo de maniobra del 10% de la cifra de anual de ingresos, a cuyos efectos se determinó la variación de dicha partida para cada ejercicio con el fin de asegurar la consecución dicho hito.

A partir de los flujos netos de caja generados por el proyecto (no se incluyen debido a su extensión) se determinó el VAN y la TIR. No obstante, para objetivizar el valor del VAN se aplicó la metodología denominada *Simulación de Montecarlo*, procediendo que permite analizar qué sucederá con los flujos netos de caja futuros generados por un proyecto de inversión cuando sus variables de riesgo se someten a una distribución de probabilidad de acuerdo a la información disponible de cada una de ellas.

En nuestro caso, al tratarse de un proyecto de investigación ex novo se dispuso de una información limitada, si bien fue posible obtener el valor más probable de las variaciones de las variables de riesgo, tal como se justificó anteriormente, habiendo determinado sus intervalos de confianza para establecer los valores máximos y mínimos y de esta forma seleccionar como

más adecuada la distribución de probabilidad triangular, basada en un conocimiento del mínimo y el máximo y un "pálpito inspirado" como el del valor modal (Hess, 2000), y que es habitualmente empleada como una descripción subjetiva de una población para la que sólo se cuenta con una cantidad limitada de datos muestrales, y especialmente en casos en que la relación entre variables es conocida pero los datos son escasos.

No obstante, para la variable relativa a la inversión en equipo, los valores máximo y mínimo se calcularon atendiendo a la estimación de los posibles porcentajes de subvención del proyecto por parte de un organismo público, los cuales oscilaban en la horquilla 40%-80% del importe total de la inversión, habiéndose considerado como más probable la tasa del 60%.



Resultados y discusión

En este capítulo se exponen y discuten los resultados más relevantes obtenidos a partir de la metodología descrita en el capítulo anterior. Se ha dividido en tres grandes apartados: calibración de los equipos, balance hídrico donde se muestra el funcionamiento y aplicabilidad de los equipos en el ámbito agronómico, y viabilidad económica para su explotación comercial.





3.1. Tensiones y deformaciones en el lisímetro

Los resultados obtenidos con el programa SolidWorks Simulation de tensiones y deformaciones han sido mayores cuando la espaldera se encuentra colocada verticalmente.

Se utiliza la tensión de Von Mises como indicador de la máxima energía de distorsión, criterio habitual en las teorías de fallo en los materiales dúctiles, su valor del orden del 75% del límite elástico en la mayor parte de la estructura, indica que se encuentra lejos de su fallo estructural. Por otra parte el valor próximo al límite elástico la zona puntual de los apoyos de las células de carga, nos indica la optimización de la estructura desde el punto de vista tensional.

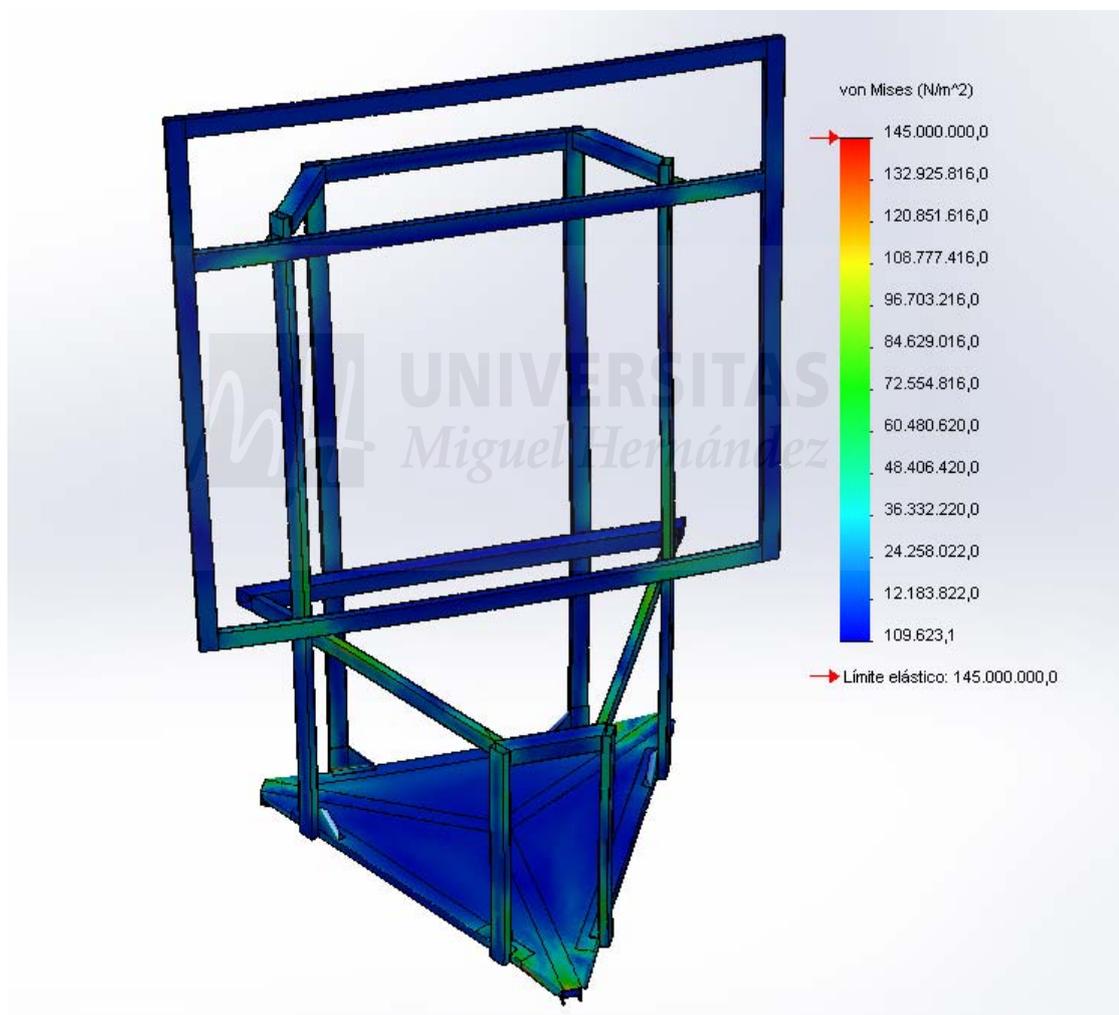


Figura 3-1. Tensiones de Von Mises

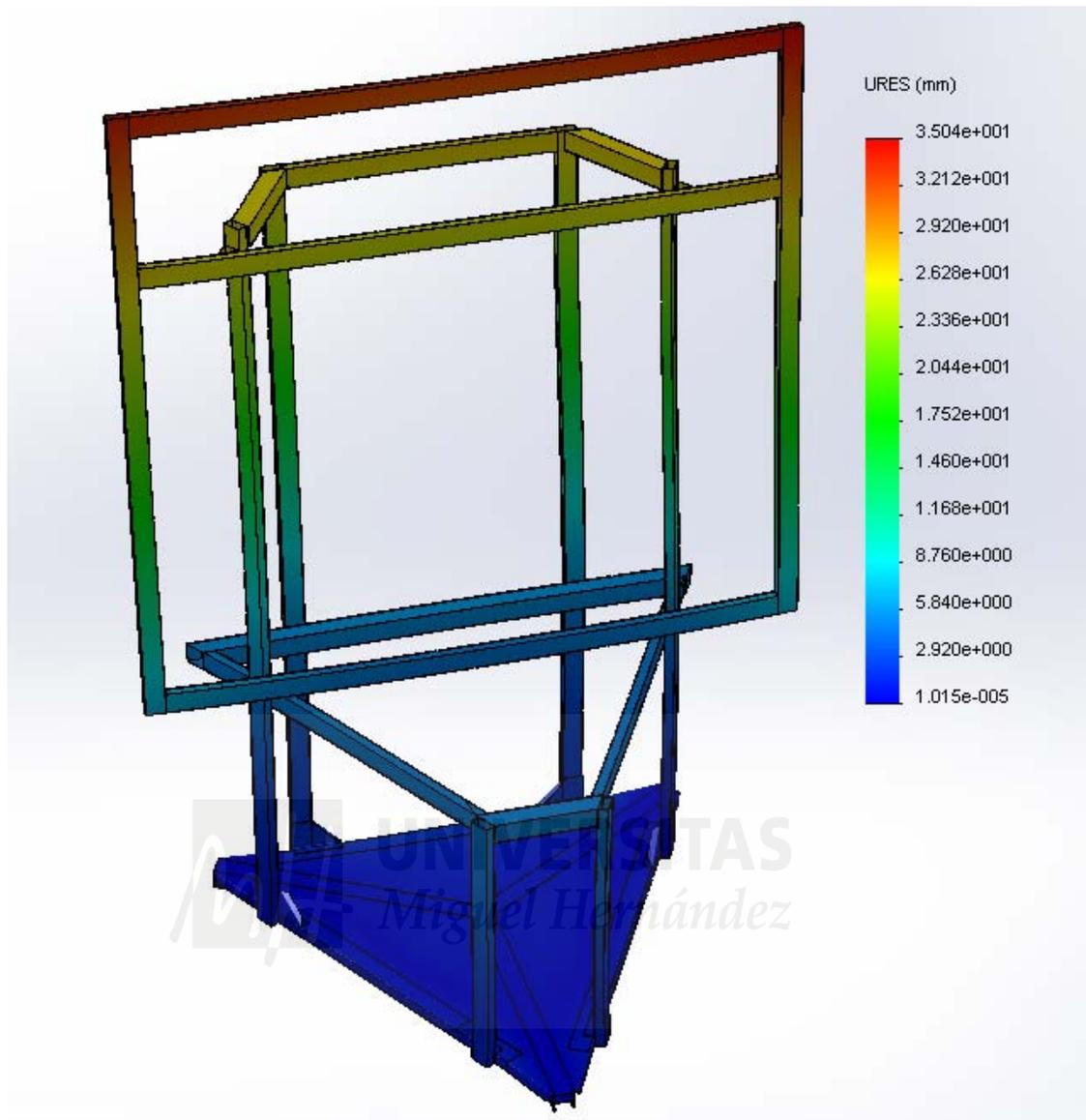


Figura 3-2. Desplazamientos

Los desplazamientos máximos se presentan, como era de esperar, en los extremos de la espaldera llegando a tomar valores de 35 mm, valores que pueden soportar las brazos de la vid los que sirve de soporte.

La validez de los cálculos de la estructura ha sido corroborada por el periodo de tiempo de dos años desde la instalación de los lisímetros, siendo el adecuado como soporte de los mismos. Adicionalmente se ha conseguido un ahorro en material estructural debido a su forma triangular.

3.2. Calibración del equipo

Los ensayos llevados a cabo en la parcela experimental permitieron realizar estudios del comportamiento agronómico de la vid en diferentes condiciones de crecimiento y riego..

Como se indicó anteriormente, se obtuvo la recta de regresión lineal de las células de carga a partir de 6 puntos como se describe en (Misra et al., 2011). Los resultados de la calibración pueden observarse en la Figura 3-3. Los errores cometidos en la medida de todas las células de carga se encuentran acotados en un rango de ± 4 g. Este error se puede considerar excelente ya que es inferior al garantizado por el fabricante de las células de carga. La Figura 3-4 ilustra la relación entre el peso calibrado usado como referencia y el peso obtenido mediante los lisímetros mediante sus correspondientes rectas de regresión. Se puede apreciar que las desviaciones son muy pequeñas respecto a la recta 1:1 que representa el comportamiento ideal (cero error). Con estos resultados se pueden calcular bastante bien las medidas de los pesos a partir de las señales adquiridas de las células de carga.

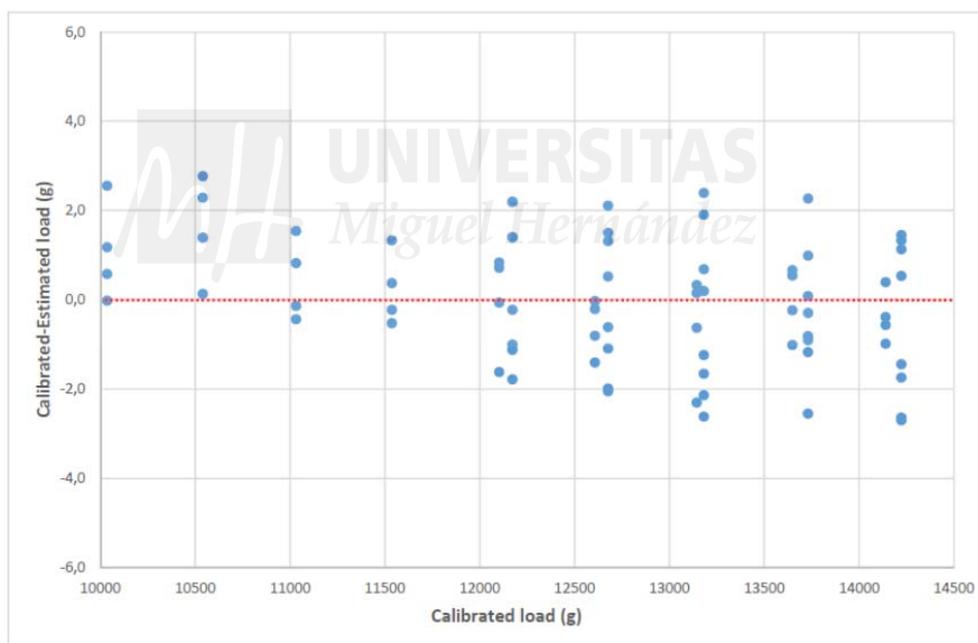


Figura 3-3 – Grafica calibración células. Variación de la carga estimada para todas las células de carga utilizando el método de calibración de 6 puntos.

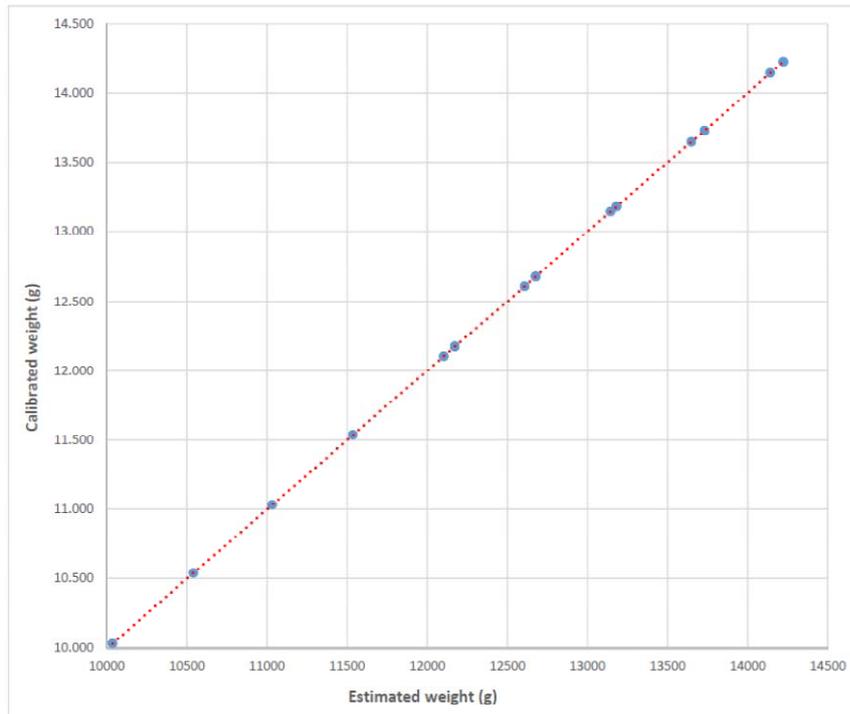


Figura 3-4 – Variación en el peso estimado con el lisímetro respecto a los pesos calibrados (método de calibración de 6 puntos). La línea discontinua representa la línea 1:1..

3.3. Balance hídrico

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y Figura 3-7 se presentan datos que ilustran el funcionamiento de los lisímetros durante los días 2 y 3 de julio de 2013. Estos datos muestran el peso de maceta (restados peso de la plataforma y espaldera) y el peso del depósito de drenaje para espaldera inclinada 90° y 30° respectivamente. El primer día se suministraron 7 riegos y el segundo 8, todos ellos con una duración de 10 minutos, repartidos entre las 8 am y las 10 pm.

Para facilitar la interpretación de los parámetros implicados en el balance hídrico del cultivo, en la Figura 3-6 se incluye el detalle interpretado del primer riego en el lisímetro 1. Este riego inicial produce un incremento brusco en el peso de la maceta, que nos permite determinar (junto con el drenaje, si lo hubiera) la cantidad de agua aportada con un error muy pequeño, ya que durante los 10 min de riego la ET producida será muy reducida.

A partir del instante en que se inicia el drenaje y mientras se siga produciendo (incremento de peso de drenaje), la pérdida de peso de la maceta se debe al efecto combinado del drenaje y la ET (por tanto la $ET = \text{Peso Maceta} - \text{Peso Drenaje}$). A partir del instante en que el drenaje cesa (no se incrementa su peso) el peso indicado en la gráfica será el umbral de peso en que la capacidad de campo está al 100%. Todo riego que suponga un incremento de peso por encima de este umbral (que puede sufrir pequeñas variaciones a lo largo del

Resultados y discusión

tiempo) implicará que se produzca drenaje, puesto que el agua aportada supera la capacidad de campo de la maceta.

Este efecto se puede observar en los sucesivos riegos de la Figura 3-5; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y Figura 3-7, en los riegos en los que no se supera la capacidad de campo, no se produce drenaje.

También se puede apreciar como el consumo de agua es menor en la vid con espaldera inclinada a 30°, aunque el estudio de los factores implicados en este comportamiento queda fuera del ámbito de este artículo.

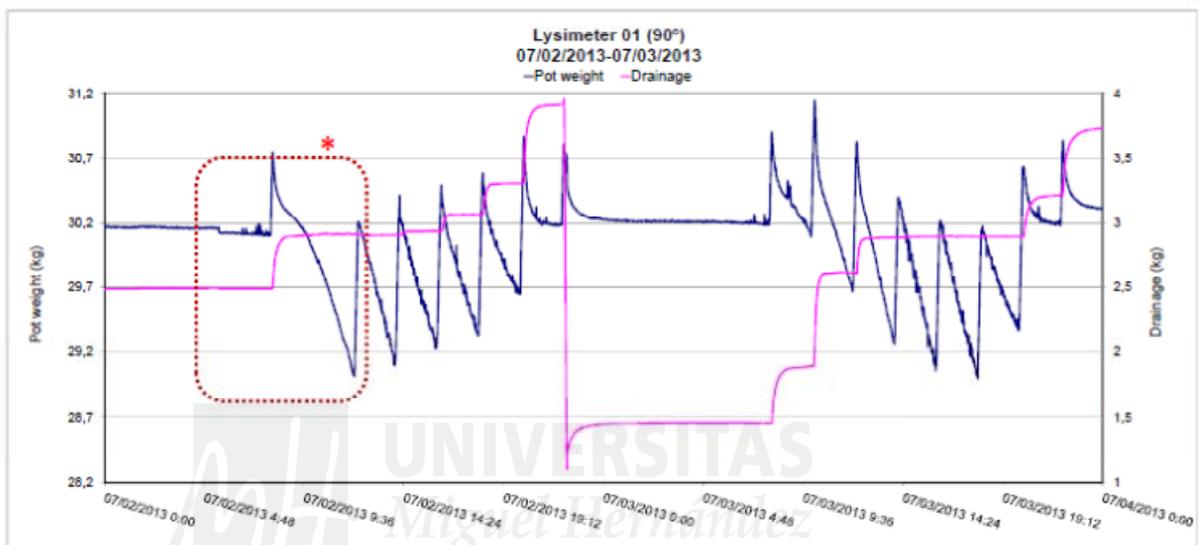


Figura 3-5. Variación de peso de maceta y drenaje durante los días 2 y 3 de julio en lisímetro con espaldera a 90°

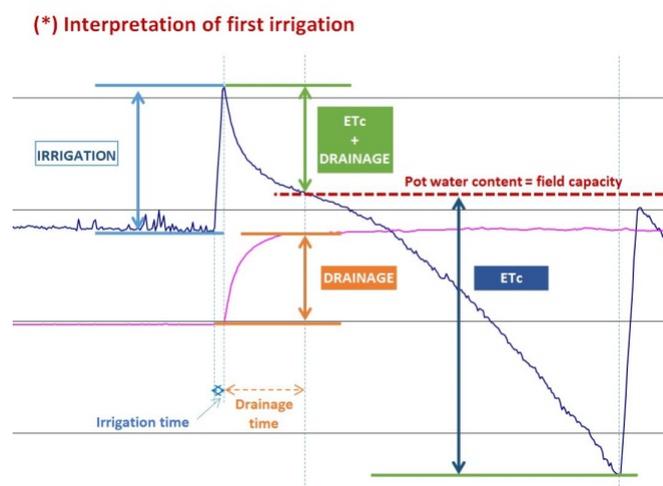


Figura 3-6. Interpretación de los datos del primer riego

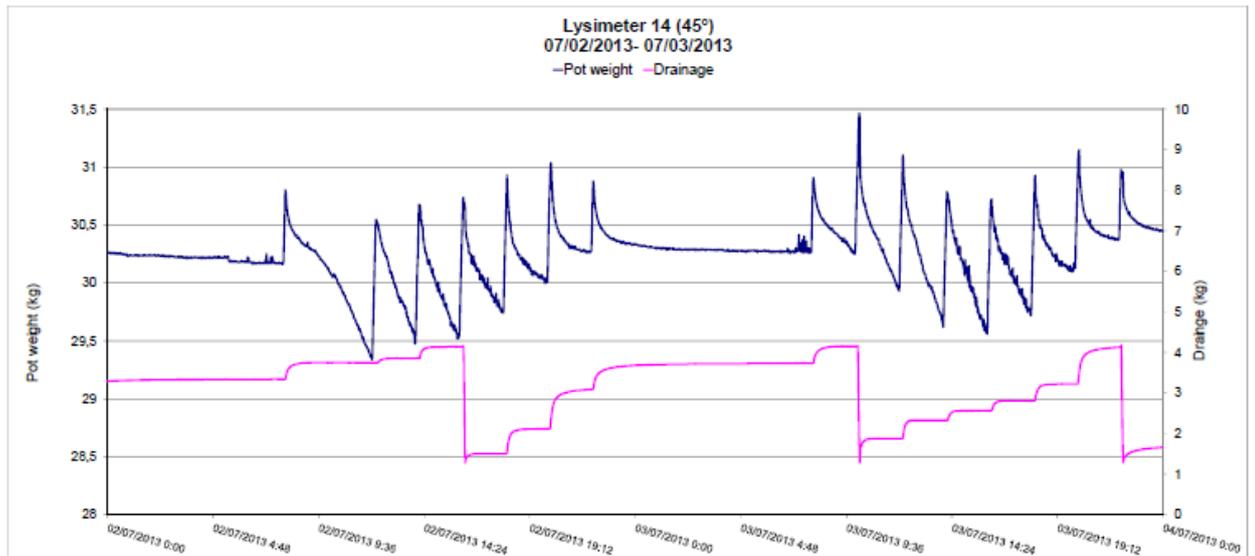


Figura 3-7 – Variación de peso de maceta y drenaje durante los días 2 y 3 de julio en lisímetro con espaldera a 30°

Puesto que el depósito de drenaje no se vacía en cada riego, sino cuando alcanza su máximo (que puede abarcar varios riegos), los cálculos de ET se realizan como incrementos relativos al peso de agua de drenaje antes del inicio de cada riego.

3.4. Viabilidad económica del equipo

Con referencia a los resultados del estudio económico, a partir de los flujos netos de efectivo del proyecto se calculó el VAN y la TIR para el escenario propuesto, variables ambas que avalan su viabilidad económica por cuanto resulta un VAN positivo de 104.322,41 euros, así como una TIR del 12,6%, muy superior al coste de capital propuesto del 4%.

A partir del resultado del VAN, se aplicó la Simulación del Montecarlo, presentando la Tabla 3 la información de cada variable de riesgo considerando su valor más probable, junto a su máximo y mínimo. La Tabla 4 recoge los resultados de la simulación para un total de 5.000 iteraciones empleando el software de “Simulación 4.0” (<http://www.ucema.edu.ar/u/jvarela/>).

Tabla 3. Distribución de probabilidad asignada a las variables de riesgo

| Variabes | Distribución probabilidad | Valor más probable | Valor máximo | Valor mínimo |
|---------------------|---------------------------|--------------------|--------------|--------------|
| Ingresos estimados | Triangular | 0,0388 | 0,0678 | 0,0099 |
| Coste de materiales | Triangular | 0,0388 | 0,0678 | 0,0099 |
| Coste de personal | Triangular | 0,0109 | 0,0217 | 0,0002 |
| Otros costes | Triangular | 0,0388 | 0,0678 | 0,0099 |
| Inversión en equipo | Triangular | 124.178,40 | 186.267,36 | 62.089,12 |

Resultados y discusión

Tabla 4. Resultados de la Simulación de Montecarlo (5.000 iteraciones).

| Variable | Máximo | Mínimo | Media | Desv. Est. | Des./Media |
|---------------------|------------|-----------|------------|------------|------------|
| VAN | 203.961,81 | 13.240,09 | 105.177,72 | 28.341,78 | 26,95% |
| Ingresos estimados | 0,0676 | 0,0103 | 0,0388 | 0,0116 | 29,76% |
| Coste de materiales | 0,0674 | 0,0105 | 0,0390 | 0,0119 | 30,48% |
| Coste de personal | 0,0216 | 0,0004 | 0,0109 | 0,0044 | 40,85% |
| Otros costes | 0,0671 | 0,0104 | 0,0388 | 0,0117 | 30,06% |
| Inversión en equipo | 185.397,36 | 63.779,14 | 123.952,47 | 25.253,60 | 20,37% |

Los resultados de la simulación muestran que el VAN alcanzó un valor medio positivo de 105.177,72 euros, con una desviación estándar de 28.341,78, lo que representa una desviación sobre su valor medio del 26,95%.

A partir de las variables mencionadas, para conocer la probabilidad de que el VAN del proyecto fuese positivo se tipificó dicha variable (VAN) respecto de la distribución Normal N (0,1) a partir de la siguiente ecuación:

$$P [VAN \geq 0] = P [z \geq -3,71] = P [z \leq 3,71] = 99,99\%$$

Siendo:

$$z = \left[\frac{VAN - \alpha(VAN)}{\sigma(VAN)} \right] = \left[\frac{0 - (105.177,72)}{28.341,78} \right] = -3,71$$

El razonamiento anterior permitió concluir que el valor del VAN del proyecto será positivo con una probabilidad del 99,99%, y por tanto, el proyecto de inversión se considera viable económicamente.

Adicionalmente se evaluó la sensibilidad de las variables incluidas en la simulación, para lo cual se construyó el denominado *diagrama de tornado* Figura 3-8 que informa sobre las variables de riesgo que tienen un mayor impacto sobre el proyecto, recogiendo para cada una de ellas el rango de variación del VAN suponiendo que produzca una variación en dicha variable manteniendo constante el resto, ayudando de esta forma a destacar aquellas variables más relevantes.

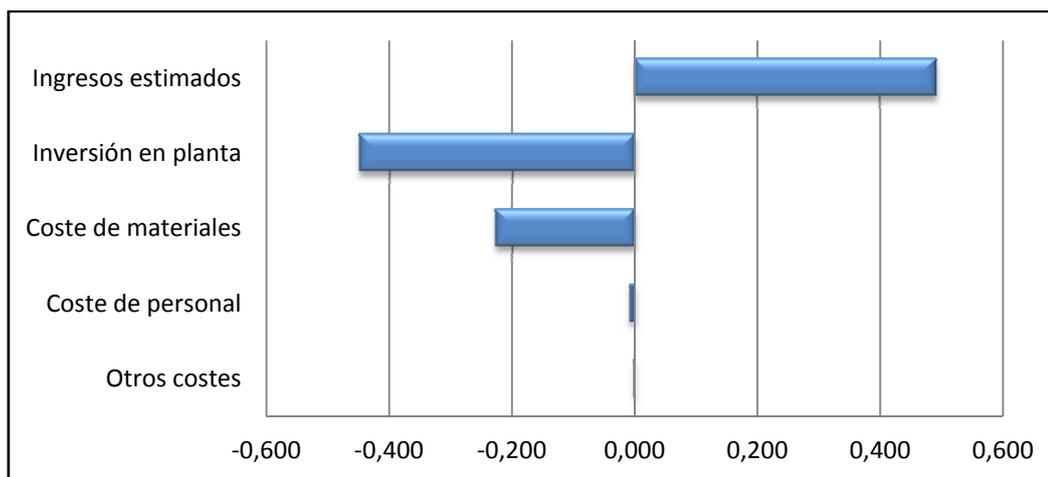


Figura 3-8 – Diagrama de tornado

En este sentido, la jerarquización de las variables de riesgo con mayor incidencia en el VAN se determinó evaluando su valor para cada una de ellas en los percentiles 10 y 90 de su distribución de probabilidad según la información generada en la simulación tal como se recoge en la Tabla 5, resultando que las variables de mayor impacto en el VAN del proyecto son los ingresos estimados y la inversión en planta.

Tabla 5. Análisis de sensibilidad del VAN a las variaciones de las variables de riesgo.

| Variables | Valores iniciales | Variaciones propuestas | VAN P 10 | VAN P 90 | Variaciones VAN | Orden |
|----------------------------|-------------------|------------------------|------------|------------|-----------------|-------|
| Ingresos estimados | 111.288,80 | 3,88% | 86.073,93 | 128.514,32 | 0,49307 | 1 |
| Coste de materiales | 72,73% | 3,88% | 115.731,94 | 89.389,34 | -0,22762 | 3 |
| Coste de personal | 6,54% | 1,09% | 104.760,06 | 103.824,39 | -0,00893 | 4 |
| Otros costes | 0,72% | 3,88% | 104.429,37 | 104.177,30 | -0,00241 | 5 |
| Inversión en equipo | 124.178,40 | 124.178,40 | 131.852,44 | 72.627,61 | -0,44918 | 2 |

Conclusiones

En este capítulo se exponen las conclusiones y logros de la realización del presente trabajo, la producción científica obtenida y los posibles trabajos futuros.



4.1. Conclusiones

El lisímetro de pesada para maceta desarrollado ha sido probado y validado en sus diferentes fases (desarrollo, instalación y funcionamiento con macetas de vid). Gracias a la precisión de las células de carga utilizadas y al sistema de control del agua percolada mediante electroválvulas, es posible registrar de manera precisa todos los datos de variaciones de peso para calcular la evapotranspiración, consumo hídrico o crecimiento de la planta. Resulta, por tanto, un instrumento muy útil para la realización de estudios científicos en numerosas especies vegetales. De hecho se ha utilizado para un estudio que aún está en curso en el que se compara el comportamiento fisiológico y la producción de un cultivo de 16 macetas de vid (*Vitis vinifera L. cv Bobal*) con espalderas rectas (90°) e inclinadas (30°).

Por otra parte, el estudio económico ha demostrado la viabilidad del proyecto de inversión para el desarrollo y explotación comercial de la estación de lisimetría. Para ello se ha considerado las convocatorias de ayudas públicas a las que nuestro grupo de investigación ha optado para el diseño y desarrollo de los prototipos y su explotación en una empresa de reducida dimensión con una facturación pequeña. El coste final del equipo comercializado permitiría su utilización en pequeñas explotaciones agrícolas para la determinación de la ET y como ayuda en una automatización más eficiente del riego.

Actualmente se están desarrollando una serie de mejoras estructurales para conseguir una estructura fácilmente desmontable para que su transporte sea menos voluminoso, y abaratando por tanto su instalación

Otra modificación en estudio es la utilización de microcontroladores tipo ARM para el registro y comunicación modbus de los datos en tiempo real, sustituyendo a los datalogger comerciales usados, obteniendo una disminución en los costes de producción del lisímetro.

4.2. Producción científica

Fruto de la investigación realizada se han obtenido la siguiente producción científica.

4.2.1 Comunicaciones a congresos

Ruiz-Peñalver et al., 2013. Developing a low cost datalogger with arduino. 17th international congress on Project management and engineering.

Ruiz-Peñalver et al., 2013. Diseño, implementación y evaluación de un lisímetro para plantas en maceta. 17th international congress on Project management and engineering.

Ruiz-Peñalver et al., 2013. Development of an electronic device using pluviometer and modbus communication. 17th international congress on Project management and engineering.

Ruiz-Peñalver et al., 2013. Sistema de automatización y telecontrol mediante microcontroladores para la gestión del riego de cultivos en maceta con lisímetros de pesada. VII Congreso Ibérico de agroingeniería y ciencias hortícolas.

Ruiz-Peñalver et al., 2013. Desarrollo de una red de comunicaciones para la gestión y control de una estación de lisimetría. VII Congreso Ibérico de agroingeniería y ciencias hortícolas.

Ruiz-Canales et al., 2013. Balance hídrico de viña (*Vitis Vinifera* L. Cv. Bobal) en maceta y riego localizado mediante lisímetro de pesada. Algunos resultados experimentales. VII Congreso Ibérico de agroingeniería y ciencias hortícolas.

Ruiz-Canales et al., 2013. Monitorización del riego por goteo en viña viña (*Vitis Vinifera* L. Cv. Bobal) en maceta mediante lisímetro de pesada. Algunos resultados experimentales. VII Congreso Ibérico de agroingeniería y ciencias hortícolas.

Ruiz-Peñalver et al., 2013. Monitorización mediante un sistema SCADA de una estación de lisimetría y agroclimática. XXXI Congreso nacional de riegos .

Guerrero-Arroniz et al., 2014. Determinación del consumo de agua mediante contadores y pluviómetros conectados en red. I Symposium nacional de ingeniería hortícola. La agromótica en horticultura.

Guerrero-Arroniz et al., 2014. Estación de lisimetría de la E.P.S.O. para la investigación del consumo de agua de plantas en maceta. I Symposium nacional de ingeniería hortícola. La agromótica en horticultura.

Rosillo et al., 2014. Software para el control automático del riego por lisimetría de pesada. I Symposium nacional de ingeniería hortícola. La agromótica en horticultura.

Rosillo et al., 2014. Uso de colas para la optimización de la adquisición de señales agroclimáticas bajo plataforma LabVIEW. I Symposium nacional de ingeniería hortícola. La agromótica en horticultura.

Conclusiones

4.2.2 Artículos

Vera-Repullo et al., 2014. Software for the automatic control of irrigation using weighing-drainage lysimeters. Agricultural Water Management.

Ruiz-Peñalver et al., 2014. Development of an innovative low cost weighing lysimeter for potted plants: application in lysimetric stations. Agricultural Water Management.

Jiménez-Buendía et al., 2014. Determination of water balance by means of a network of water meters and rain gauges. Agricultural Water Management.

4.2.3 Patentes

Título: Sistema integral de bajo coste para la cuantificación del balance hídrico de plantas cultivadas en maceta

Autores de la invención:

1. Leandro Ruiz Peñalver
2. José Miguel Molina Martínez
3. Daniel García Fernández-Pacheco
4. Diego S. Intrigliolo Molina

Empresa interesada en la explotación: TeleNatura EBT S.L.

4.2.4 Proyectos fin de carrera dirigidos

Título: Diseño y evaluación de un sistema de instrumentación de bajo coste para medidas con galgas extensiométricas

Alumno: Diego Guerrero Arróniz

Directores: Leandro Ruiz Peñalver y Manuel Jiménez Buendía

Bibliografía

En este capítulo se incluyen todas las referencias bibliográficas que aparecen a lo largo del trabajo.





Bibliografía

Referencias Bibliográficas

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements, FAO Irrigation and Drainage Papers. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy.

Beeson Jr., R.C., 2011. Weighing lysimeter systems for quantifying water use and studies of controlled water stress for crops grown in low bulk density substrates. *Agric. Water Manag.* 98, 967–976. doi:10.1016/j.agwat.2011.01.005

Corelli, G., 2003. Apples: Botany, production and uses., in: *Light Relations*. Presented at the CAB International, Ferree, D.C., and I.J. Warrington, Wallington, Oxford, UK., pp. 195–256.

Dagpunar, J.S., 2007. Simulation and Monte Carlo: With applications in finance and MCMC. John Wiley & Sons.

Hess, C., 2000. Presented at the 8th Int. Conf. on Information Processing and the Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems, pp. 515–520.

Howell, T.A., Schneider, A.D., Dusek, D.A., Marek, T.H., Steiner, J.L., 1995. Calibration and scale performance of Bushland weighting lysimeters. *Trans. ASAE* 38(4), 1019–1024.

Jarvis, P., 1985. COUPLING OF TRANSPIRATION TO THE ATMOSPHERE IN HORTICULTURAL CROPS: THE OMEGA FACTOR., in: *Acta Hort. (ISHS)* 171. Presented at the I International Symposium on Water Relations in Fruit Crops, pp. 187–206.

Liu, S., Bai, J., Jia, Z., Jia, L., Zhou, H., Lu, L., 2010. Estimation of evapotranspiration in the Mu Us Sandland of China. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 14, 573–584. doi:10.5194/hess-14-573-2010

Martin, E.C., de Oliveira, A.S., Folta, A.D., Pegelow, E.J., Slack, D.C., 2001. Development and Testing of a Small Weighable Lysimeter System to Assess Water Use by Shallow-Rooted Crops. *Trans. ASAE* 44, 71–78. doi:10.13031/2013.2309

Matson, P.A., Parton, W.J., Power, A.G., Swift, M.J., 1997. Agricultural Intensification and Ecosystem Properties. *Science* 277, 504–509. doi:10.1126/science.277.5325.504

Metrology, I.O. of L., 2000. Metrological Regulation for Load Cells. International Organization of Legal Metrology.

Misra, R.K., Padhi, J., Payero, J.O., 2011. A calibration procedure for load cells to improve accuracy of mini-lysimeters in monitoring evapotranspiration. *J. Hydrol.* 406, 113–118. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.06.009

Payero, J.O., Irmak, S., 2008. Construction, installation, and performance of two repacked weighing lysimeters. *Irrig. Sci.* 26, 191–202. doi:10.1007/s00271-007-0085-9

Snedecor, G.W., Cochran, W.G., 1989. *Statistical Methods.* Iowa State University Press.

Tripler, E., Shani, U., Ben-Gal, A., Mualem, Y., 2012. Apparent steady state conditions in high resolution weighing-drainage lysimeters containing date palms grown under different salinities. *Agric. Water Manag.* 107, 66–73. doi:10.1016/j.agwat.2012.01.010

Wenting, H., Chao, Z., Junjie, G., Qiao, J., Pute, W., 2013. A SCM Programmed Suspension Weighing Lysimeter for Evapotranspiration Measurement of Pot planted Crops, in: American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting 2013. Kansas City, Missouri, USA, pp. 4503–4510.

Zhang, X., Hu, L., Bian, X., Zhao, B., Chai, F., Sun, X., 2007. The most economical irrigation amount and evapotranspiration of the turfgrasses in Beijing City, China. *Agric. Water Manag.* 89, 98–104. doi:10.1016/j.agwat.2006.11.006

Zhang, Z.-S., Liu, L.-C., Li, X.-R., Zhang, J.-G., He, M.-Z., Tan, H.-J., 2008. Evaporation properties of a revegetated area of the Tengger Desert, North China. *J. Arid Environ.* 72, 964–973. doi:10.1016/j.jaridenv.2007.11.010