



Diseño de una red de sensores móvil para el estudio de modelos de infiltración del agua en suelos agrícolas

Trabajo de Fin de Máster

-

Máster en Software de Sistemas Distribuidos y Empotrados

-

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sistemas Informáticos (UPM)

Autor: Maximo Loizu Cisquilla

Tutor: Bernardo Tabuenca Archilla

Co-tutor: Carlos Gilarranz Casado



Resumen

Este trabajo consiste en el diseño, montaje y análisis de una red de sensores móvil que facilite la realización de estudios sobre la infiltración del agua en los distintos tipos de suelos agrícolas, concretamente para el sistema de riego por goteo (localizado). Para ello es necesario que la red de sensores ocupe un volumen significativo respecto al volumen que ocupan las raíces de los cultivos típicos para este sistema de riego (cultivos hortícolas y frutícolas principalmente). Los sensores utilizados son sondas de temperatura DS18B20 (después de haber descartado el uso de sensores de humedad del suelo YL-69/HL-69). Se ha validado la utilidad de los sensores de temperatura para la detección del avance del bulbo húmedo, mediante distintas pruebas (utilizando 3 tipos de suelo distintos y variando la temperatura del agua). El caudal del emisor utilizado en los distintos experimentos es de 2.4L/h. Finalmente se ha elaborado un prototipo de 'pica': un tubo de PVC de 1m de longitud, 3mm de grosor y unos 3cm de diámetro interno, en el que van insertados los sensores de temperatura, a 25cm de distancia cada uno. La pica posee una caja protectora en la parte superior, en la que se encuentra el microcontrolador (ESP32-WROOM) y toda la circuitería. Este prototipo sirve de precedente para el diseño una red de sensores práctica y precisa para la medición del avance del agua en riego localizado.

Palabras clave

Riego localizado, Bulbo húmedo, IoT, Automatización, Agricultura.



Abstract

The present work consists of the design, installation and analysis of a sensor network, in order to facilitate the study of the wet bulb in drip irrigation systems, for the large variability of soils used in agriculture. To achieve this, the system (the sensor network) must cover enough space, according the crop characteristics (root depth and diameter). The sensors used for this experiment are DS18B20 temperature sensors (soil moisture sensor YL-69/HL-69 was also used but it was discarded after concluding they aren't reliable for detecting water flow). The microcontroller used is ESP32-WROOM. Four experiments (changing water temperature and soil type) were performed in order to validate the utility of sensors DS18B20 for water flow detection. The emitter discharge rate used for the experiments was 2.4 L/h. Finally a sensor network prototype was built, which consist of a 1 meter PVC pipe (3mm thickness and 3cm of interior diameter), where all temperature sensors are embedded, each one separated 25cm from the others (placing then 4 sensors per pipe). At the top of the pipe there is a protective box which contains the microcontroler ESP32 and all the circuitry. This prototype can serve as a precedent for the design of a practical and accurate sensor network for water flow detection in drip irrigation systems.

keywords

Drip irrigation, Wet bulb, IoT, Automation, Agriculture.



Resumen	2
Palabras clave	2
Abstract.....	3
keywords.....	3
1. Introducción.....	6
1.1 Contexto.....	6
1.2 Motivación	10
1.3 Trabajo relacionado / trabajo anterior	11
1.4 Definición del problema a resolver y objetivo	12
2. Herramientas y/o tecnologías implementadas	14
2.1 Arquitectura.....	14
2.1.1 Sensor de humedad del suelo (YL-69/HL-69).....	16
2.1.2 Sonda de temperatura DS18B20	17
2.1.3 Sensor de temperatura y humedad ambiental (DHT-22)	18
2.1.4 Microcontrolador ESP32-WROOM DevKit.....	19
2.1.5 Arduino IDE	20
2.1.6 XAMPP y phpMyAdmin.....	20
2.1.6 Fritzing	21
2.2 Base de datos.....	22
2.2.1 Estructura de la tabla.....	22
2.2.2 Configuración de la base de datos.....	23
2.3 Instalación.....	24
2.3.1 Diagrama de conexión de los sensores con el ESP32	24
2.3.2 Programación de los microcontroladores	25



2.3.3 Conexión ESP32 – Servidor vía Wi-Fi	28
2.3.4 Montaje del prototipo de pica	30
3. Evaluación	33
3.1 Resultados y análisis	33
3.2 Planificación y costes del proyecto	49
4. Discusión y conclusiones.....	50
4.1 Síntesis. Sumario de contribuciones	50
4.2 Limitaciones y dificultades encontradas.....	50
4.3 Impactos éticos, sociales y ambientales	51
4.4 Implicaciones, prospectiva y cómo extender el trabajo	51
4.5. Objetivos de desarrollo sostenible	52
5. Agradecimientos	53
Referencias	54
Anejo I: Análisis de laboratorio de la tierra franco-arenosa	56
Anejo II: Enlaces código GitHub.....	57
Anejo II: Enlaces contenido audiovisual	58
Índice de Figuras	59
Índice de Tablas	62

1. Introducción

1.1 Contexto

En 2016 el gasto de agua por parte del sector agrícola representó aproximadamente el 70% del total a nivel global (H. Ritchie & M. Roser, 2017). El enorme consumo de agua que esto supone está llevando al agotamiento de muchísimos acuíferos, ríos y lagos. Un ejemplo claro de esto es el “mar blanco” de Almería, una vasta extensión de invernaderos para la producción intensiva de hortalizas, en los que la principal fuente de agua son los acuíferos de la zona, que acabarán por agotarse pronto si no se actúa debidamente (Ecologistas en Acción - Almería, 2014). Este tipo de problemas, comunes actualmente en muchísimas zonas del mundo, se deben fundamentalmente a la combinación de tres factores: la intensidad de producción, la disponibilidad de agua y la eficiencia en el uso de esta.

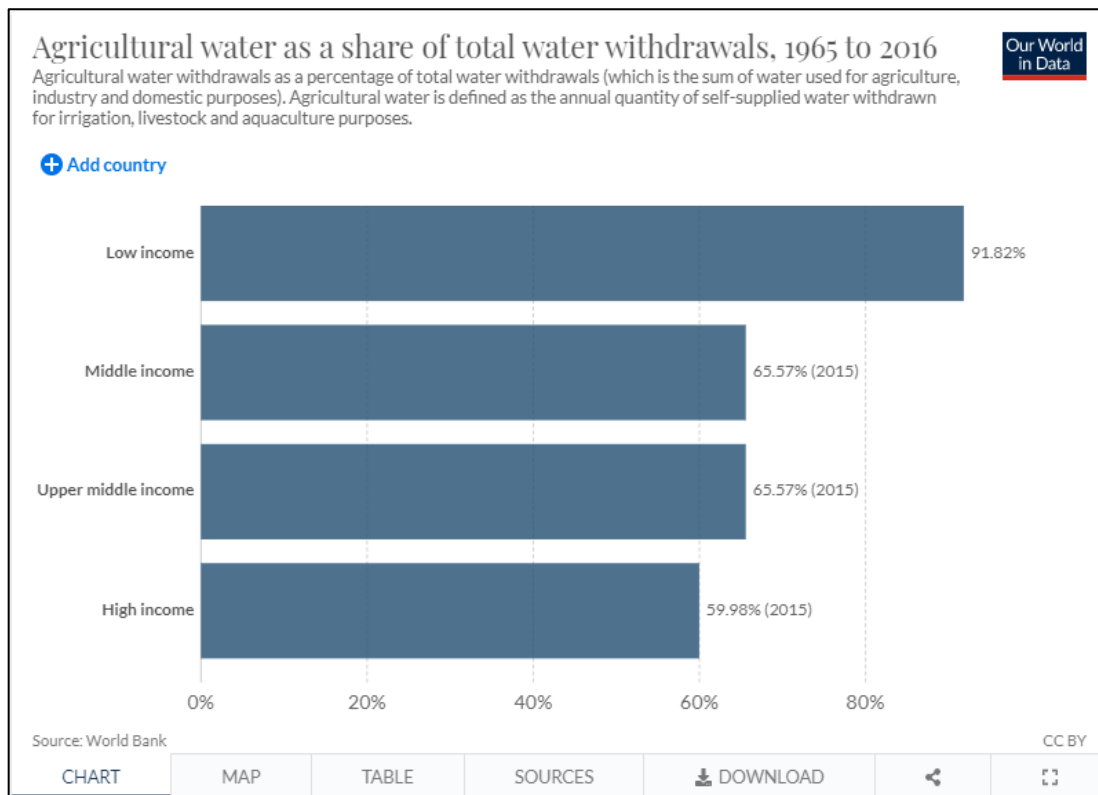


Figura 1. Consumo de agua por parte de la agricultura respecto al gasto total, según el nivel de ingresos del país.
 (Fuente: <https://ourworldindata.org/water-use-stress#irrigation>)

En la figura 1 se puede observar el consumo de agua estimado por parte de la agricultura (en 2015), diferenciando 4 grupos: países con ingresos bajos, ingresos medios, ingresos medio-altos e ingresos altos. Los valores asociados a cada grupo reflejan el porcentaje de agua utilizado para la agricultura (irrigación de cultivos, ganadería y acuicultura) respecto al total de agua sustraída de acuíferos, ríos y lagos (es decir que no se contabiliza el uso de agua de lluvia ni tampoco el agua desalinizada, sea cual sea su finalidad). El consumo total de agua incluye la agricultura, la industria y el hogar (consumo doméstico).

Como bien indican Richie, H. & Roser, M. en su estudio (*Water Use and Stress, 2015*), estas estimaciones son una aproximación y en muchos casos no reflejan la realidad (sobre todo en países pequeños, así como en países áridos y semi-áridos). Sin embargo, estos datos sí nos dan una idea aproximada de cual es el peso del sector agrícola en el consumo de agua.

En España, el consumo de agua por parte del sector agrícola fue de aproximadamente el 68% en 2012 (AQUASTAT – FAO, 2012).

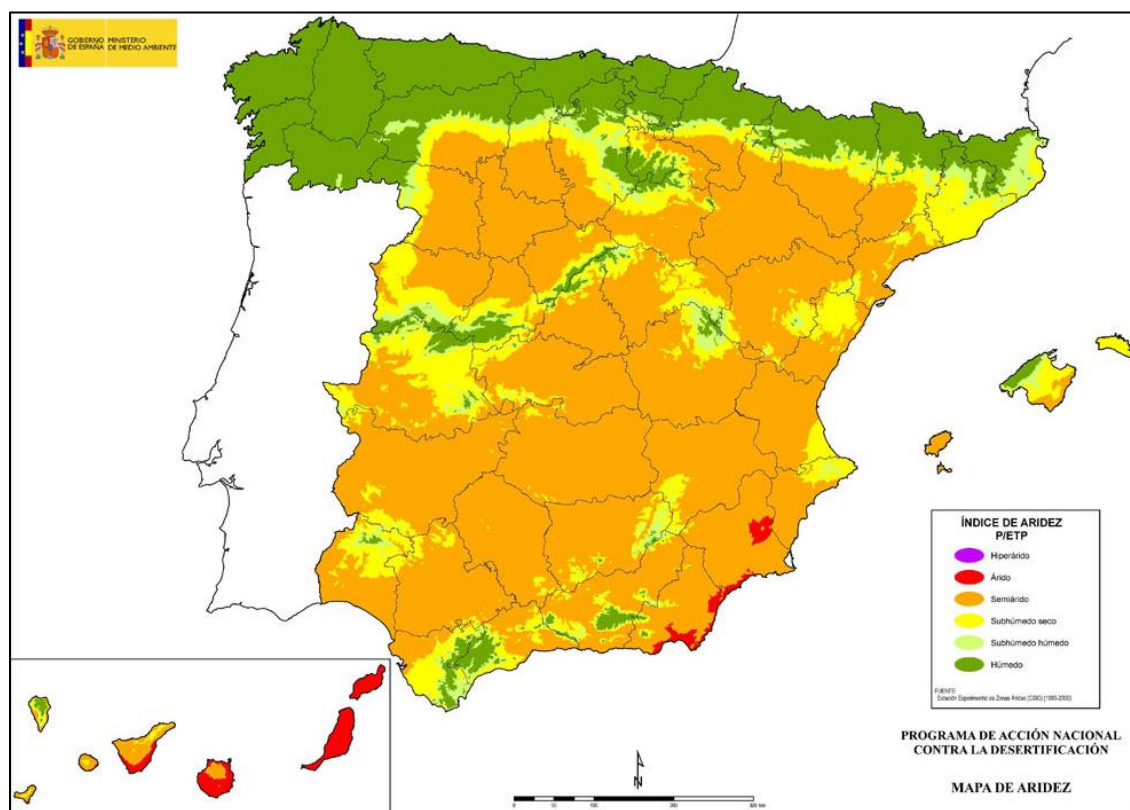


Figura 2. Mapa de aridez de España (Fuente: MAPAMA, 2017)

Para lograr un nivel de producción sostenible es necesario encontrar el equilibrio entre esos tres factores y, puesto que la disponibilidad del agua depende de la capacidad de recuperación de los

embalses, ríos, acuíferos etc., la intensidad de producción debe ir en acorde con el agua de la que disponemos y de la eficiencia del riego. Mientras la desalinización del agua de mar no sea un proceso eficiente (y por tanto viable) para abastecer (al menos) el consumo doméstico de agua, parece que la única solución pasa por ajustar la intensidad de producción agrícola en las zonas más críticas, al mismo tiempo que se optimizan los sistemas de riego.

Si bien es cierto que hoy en día se han alcanzado niveles de eficiencia del riego de hasta un 90-95% (con el riego localizado y subterráneo), la realidad es que todavía existen muchísimas explotaciones agrícolas que riegan los cultivos con técnicas tradicionales (riego superficial / por gravedad, en sus distintas variantes) cuya eficiencia no supera el 60% (Arviza, 1996). En España, por ejemplo, la superficie regada con técnicas tradicionales representaba, en 2017, un 24.82% del total de la superficie en regadío (MAPAMA, 2017). Por ello es necesario fomentar y facilitar la implementación de sistemas de riego modernos (aspersión y riego localizado, principalmente), siempre que las condiciones socioeconómicas lo permitan.

De entre los sistemas modernos, el riego localizado es el que mayor peso tiene, dado que ofrece una eficiencia de hasta 90%, frente a un 75% del riego por aspersión y un 45-50% del riego por gravedad (Arviza, 1996). A excepción de algunos cultivos, el riego localizado suele ser la solución óptima, tanto en términos económicos, como en consumo de agua y productividad.



Figura 3. Riego por inundación (Fuente: <https://agronomaster.com>)



Figura 5. Riego por goteo (Fuente: <http://www.todoagro.com.ar>)



Figura 4. Riego por aspersión (Fuente: <https://www.oxital.com>)

Si bien el riego localizado es el sistema óptimo en términos de eficiencia de aplicación del agua (agua consumida por la planta frente agua suministrada), es necesario realizar un buen diseño de la instalación para alcanzar niveles de eficiencia próximos al 90%. El comportamiento del agua en un suelo y el cultivo a implantar son los dos factores principales a la hora de diseñar una instalación de riego (de cualquier tipo). Existen muchos tipos de suelo pero de manera general se definen tres grandes tipos: arenosos, francos y arcillosos. Según la proporción de arcilla, limo y arena que contiene el suelo, se le asigna una clase textural u otra:

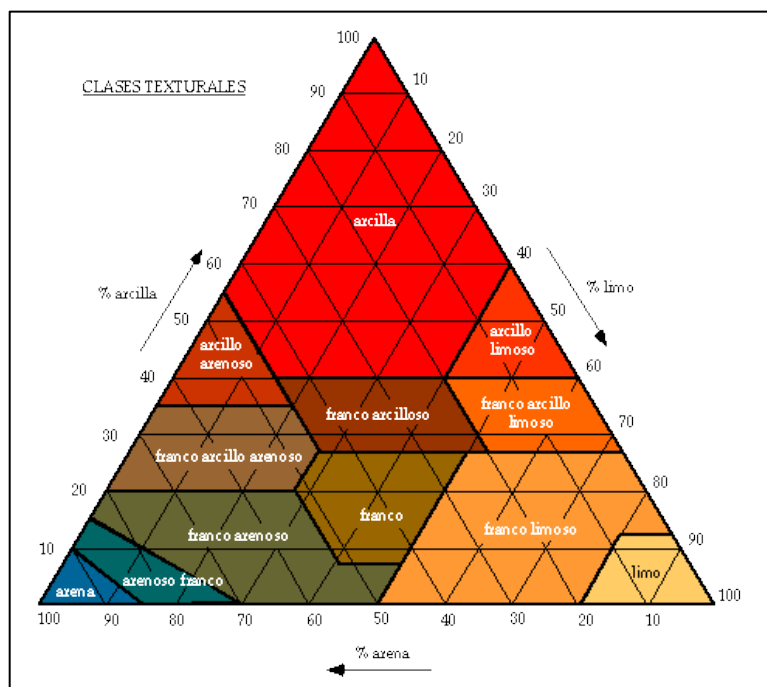


Figura 6. Triángulo de texturas (Fuente: <http://www.edafologia.ugr.es>)

El agua se infiltra de maneras muy distintas para cada tipo de suelo. En la siguiente figura se puede ver ilustrado cómo se expande, de manera general, el mismo volumen de agua según el tipo de suelo:

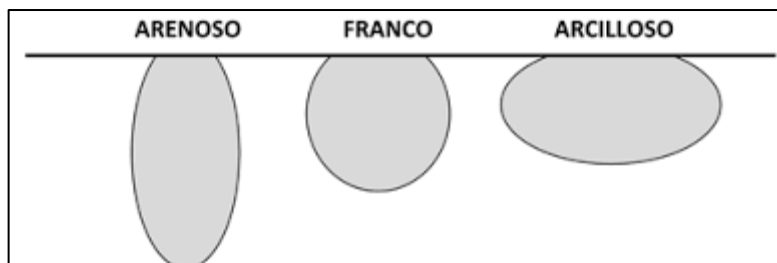


Figura 7. Forma del bulbo húmedo formado por un gotero según el tipo de suelo.

Obviamente la realidad es mucho más compleja debido a la enorme cantidad de tipos de suelo que existen y a la heterogeneidad de los mismos. Normalmente los suelos están organizados por capas bien definidas (estratos). Cada estrato tiene características que le distinguen de los demás, tanto a nivel físico (porosidad, densidad) como a nivel químico (concentración de sales y materia orgánica). Aun así, no existe tampoco una homogeneidad absoluta en un mismo estrato por lo que es prácticamente imposible tener un modelo exacto de como el agua se infiltra en un suelo. Sin embargo se pueden obtener modelos que aproximen el comportamiento medio del agua en una parcela agrícola, de manera que se obtienen diseños de instalaciones de riego válidos.

1.2 Motivación

Actualmente los ingenieros agrícolas tienen dos opciones para aproximar el comportamiento del agua en el suelo estudiado: realizar una prueba de campo en la que se mide manualmente el avance del agua con distintos tipos de gotero (con distintos caudales) de manera que se obtiene un modelo muy preciso (modelo empírico), o bien pueden basarse en modelos numéricos o analíticos, que pueden dar resultados imprecisos (puesto que por lo general no tienen el mismo grado de fiabilidad según el tipo de suelo y precisan de datos que son a veces difíciles de obtener). Si bien la primera solución ofrece buenos resultados, resulta complicada de llevar a cabo y supone un gasto significativo de dinero. Por otra parte, la segunda solución es más viable económicamente pero no existe la certeza de obtener un modelo preciso. Esto lleva a veces a utilizar métodos antiguos como las fórmulas de Karmelli, Peri y Todes (1985), que permiten un cálculo rápido y cómodo, pero muy impreciso (dado que no tienen en cuenta el tiempo de riego).

Textura arenosa	$D_m = 0.30 + 0.12q$
Textura franca	$D_m = 0.70 + 0.11q$
Textura arcillosa	$D_m = 1.20 + 0.10q$

Tabla 1. Fórmulas de Karmelli, Peri y Todes (1985).

D_m : diámetro mojado, en metros; q : caudal, en L/h.

Por lo general, los proyectos en los que se tiene que llevar a cabo el diseño de una instalación de riego por goteo apuestan por realizar una prueba de campo ya que es el método más fiable si bien implica unos gastos muy superiores a la utilización de un modelo numérico.

1.3 Trabajo relacionado / trabajo anterior

S.M Ismail, T.K Zin El-Abedin & M.A Wassif (*Wetting Pattern Simulation of Surface and Subsurface Drip Irrigation Systems I-Model Development*, 2006)⁶ propusieron un modelo para la infiltración del agua con riego localizado, elaborado numéricamente y que resultó ser bastante preciso y sobretodo rápido de implementar, si bien no se probó más que con suelos de textura ligera (S.M Ismail, T.K Zin El-Abedin & M.A Wassif, 2006). En este estudio se validó el modelo midiendo el avance del agua mediante sondas de dispersión de neutrones (*neutron scattering probe*), que permiten medir el contenido de agua en el suelo. Los resultados fueron buenos si bien los autores apuntan a una subestimación para los primeros 10-15cm de suelo, atribuyendola a la presencia de raíces y otras sustancias orgánicas que podrían alterar las lecturas.

Existen muchos otros modelos numéricos, pero actualmente el más utilizado y aceptado es Hydrus-2D (J.J. Simunek, M. Šejna & M. Th. Van Genuchten, 1998). Sin embargo, ha habido muy pocos experimentos que validen las predicciones de este modelo (T. Skaggs & T. J. Trout, 2004) y los propios autores del software no aseguran su fiabilidad puesto que no ha sido probada en la enorme casuística que existe en la agricultura (J.J. Simunek, M. Šejna & M. Th. Van Genuchten, 1998). La utilización de modelos numéricos como Hydrus-2D exige validarlos primero frente al caso en el que nos encontremos (textura del suelo, estratos, concentración de sales, materia orgánica...). Un ejemplo claro es el estudio realizado por J.R. Cañas, A. Z. Sierra, R. R. Requena & M. M. Pérez (2020) "Study of the wet bulb in drip irrigation in stratified soils using HYDRUS". En dicho estudio se evalúa la precisión con la que realiza las predicciones el software Hydrus-2D, para un caso muy concreto: suelos "enarenados", técnica utilizada en los invernaderos de Almería, que consiste en añadir diferentes capas sobre el suelo original (una capa de tierra fina, una capa de materia orgánica y una capa de arena). La medición del avance del agua se realizó utilizando sensores TE5 Decagon, a distinta profundidad y distancia horizontal respecto del gotero.

Como señalan Bakhtiar Karimi et al. (2020): "Since the analytical and numerical models in many cases require considerable computing power and a higher level of skill in their usage, it is impossible to use them for operating and design purposes". En su estudio proponen un modelo de red neuronal (ANN – Artificial Neural Network) para la generación de modelos empíricos (mediante regresiones no lineales), con el que han obtenido muy buenos resultados. En el experimento realizado, el avance del agua se midió marcando la forma del bulbo húmedo en las paredes del contenedor donde se llevo a cabo la prueba (siendo transparente una de las paredes).

De manera similar, J. A. Gil-Marín (2001) apunta que: "La dificultad matemática introducida por el flujo de dos o tres dimensiones y la estratificación del suelo, hacen que los modelos existentes sean muy complejos, aun estableciendo una serie de restricciones [...]". En su trabajo realiza una prueba de campo *in situ* para determinar las características hidráulicas y edafológicas de un suelo, donde mide de forma manual la profundidad y el diámetro del bulbo humedo, obteniendo

(mediante regresiones no lineales), modelos que ofrecen buenas predicciones sobre el comportamiento del agua en el suelo estudiado.

Tanto en la validación de modelos numéricos como en la elaboración de modelos empíricos es necesario medir el avance del agua de manera precisa, en distintos instantes del experimento.

Martínez, R. (2020), en su TFG en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sistemas Informáticos (UPM), propone un sistema de medición basado en una red de sensores de temperatura, siendo práctico y poco costoso. En dicho estudio se valida, bajo ciertas condiciones (variando la temperatura del agua), la utilidad de las sondas de temperatura para detectar el avance del agua en el suelo sometido a riego por goteo. Por otro lado, se descartan los sensores de humedad debido a la facilidad con la que se corroen al entrar en contacto con el agua frecuentemente.

1.4 Definición del problema a resolver y objetivo

La falta de experimentos que validen modelos numéricos como Hydrus2D hace poco atractivo su uso. Por otro lado, la realización de pruebas de campo es un proceso que lleva tiempo y cuesta dinero, por lo que tampoco suele ser una opción atractiva. Es evidente que existe la necesidad de implementar un sistema de medición del avance del agua en el suelo que sea práctico y preciso.

El objetivo de este trabajo es, en primer lugar, confirmar la utilidad de los sensores de temperatura, sometiéndolos a una mayor variabilidad en las condiciones del experimento (temperatura del agua, caudal y textura del suelo). En segundo lugar, se pretende evaluar si los sensores de humedad del suelo (que miden la conductividad eléctrica del mismo) tienen alguna utilidad para la detección del avance del agua.

Adicionalmente, este estudio pretende complementarse con el TFG (Trabajo de Fin de Grado) presentado en 2018 por el autor, en el que se muestra el desarrollo de una primera versión de un software que automatiza el diseño de instalaciones de riego localizado. Como se ha mencionado anteriormente, el diseño de instalaciones de riego depende en gran parte del comportamiento del agua en el suelo objeto de estudio. Es por ello que, actualmente, el software depende de una prueba de campo para obtener el modelo de infiltración del agua en el suelo, lo que complica su uso.

El objetivo final (a largo plazo) es elaborar una red de sensores móvil capaz de detectar con precisión el avance del agua (para sistemas de riego por goteo), de manera que tanto las pruebas



de campo como la validación de modelos numéricos puedan llevarse a cabo con menor impedimento económico y/o técnico.

2. Herramientas y/o tecnologías implementadas

2.1 Arquitectura

Para llevar a cabo este trabajo se han utilizado diversas tecnologías:

- Sensor de humedad del suelo.
- Sonda de temperatura DS18B20.
- Sensor de temperatura y humedad ambiental DHT22.
- Microcontrolador ESP32-WROOM DevKit (con módulo Wi-Fi integrado).
- Arduino IDE.
- XAMPP Control Panel.
- phpMyAdmin.
- Fritzing.

Los sensores de humedad del suelo y las sondas de temperatura son los elementos que medirán el avance del agua. El microcontrolador (en este caso un ESP32-WROOM) es el que recibirá la información recogida por los sensores y la enviará a la base de datos. La base de datos es de tipo MySQL y se ha creado utilizando la herramienta phpMyAdmin (interfaz gráfico de gestión de bases de datos). Para lograr comunicar el microcontrolador con la base de datos, se ha levantado un servidor Apache y un servidor MySQL (utilizando la herramienta XAMPP), con el fin de procesar las peticiones HTTP realizadas por el microcontrolador e insertar la información recibida en la base de datos.

Arduino IDE es el framework con el que se han programado los microcontroladores, en lenguaje C. Fritzing es la herramienta que se ha usado para elaborar el esquema del circuito electrónico implementado, que se verá más adelante.

El sistema implementado se puede ver ilustrado en la siguiente figura:

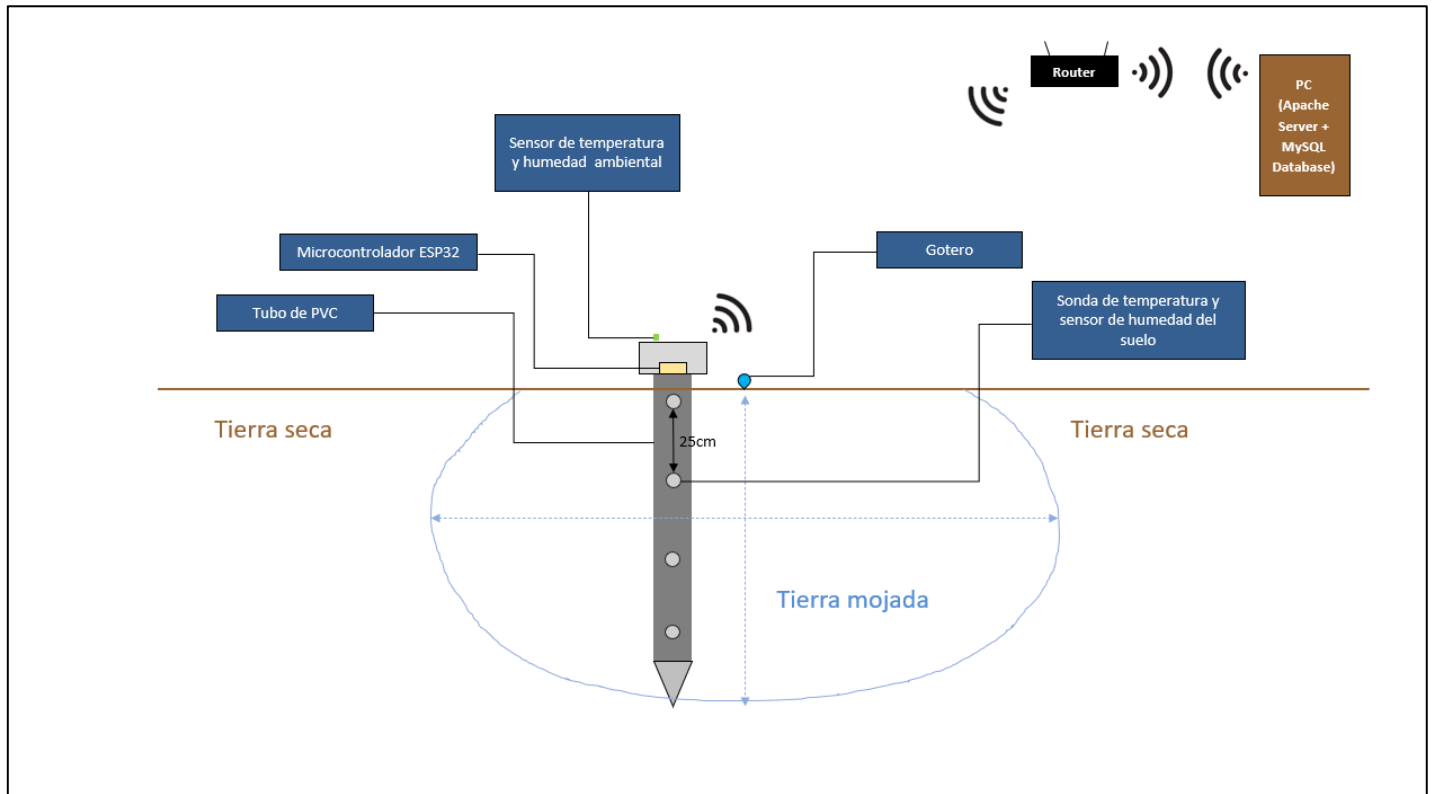


Figura 8. Esquema del sistema implementado (red de sensores encapsulada en tubo de PVC (pica), conectada vía Wi-Fi a un servidor local).

La pica (elemento principal del sistema) mide aproximadamente 1 metro y está hecha de PVC (de 3mm de grosor). Por el interior del tubo va todo el cableado y cada sensor sale a una profundidad diferente (a 25cm cada sensor). Inicialmente la idea era utilizar las sondas de temperatura junto a los sensores de humedad, disponiéndolos por pares en cada uno de los niveles de la piqueta. Sin embargo, como se verá más adelante, los sensores de humedad del suelo no ofrecen muy buenos resultados por lo que se han descartado.

2.1.1 Sensor de humedad del suelo (YL-69/HL-69)

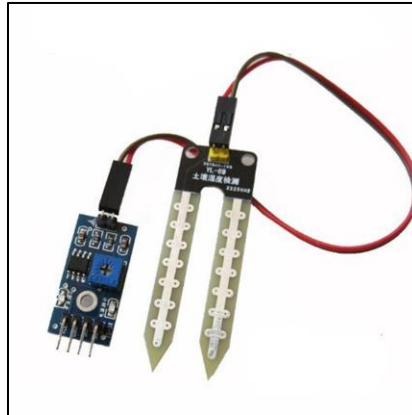


Figura 9. Sensor de humedad del suelo YL69/HL-69

Este sensor mide la conductividad eléctrica del suelo, lo que está directamente relacionado con el contenido de agua en el mismo. La placa PCB tiene una salida analógica y otra digital, aunque se observó que la salida digital no funciona correctamente después de realizar varias pruebas en los distintos pines.

La conexión se ha realizado en modo analógico, donde se reciben valores entre 0 y 4095, siendo 0 un 100% de humedad y 4095 un 0%. El sensor opera con voltajes de entre 3.3V y 5V. Estos sensores no tienen una durabilidad muy elevada: al someterlos a varias pruebas (sumergiéndolos en agua de manera intermitente) se observó que el metal se corroe rápidamente (figura 10).



Figura 10. Sensor de humedad corroído

2.1.2 Sonda de temperatura DS18B20



Figura 11. Sonda de temperatura DS18B20

Este sensor mide la temperatura y es sumergible en agua, siendo otra manera de detectar el avance del agua (puesto que, al entrar en contacto con esta, la temperatura varía notablemente). La señal de salida del sensor es digital y utiliza el protocolo 1-Wire para comunicarse con el microcontrolador, pudiendo conectar varios sensores en serie (bus de sensores) al mismo pin. Cada sensor posee un identificador único que se utiliza en tiempo de ejecución para determinar de cuál de los sensores se trata. Para la conexión del sensor es necesaria una resistencia de 4.7k Ω .

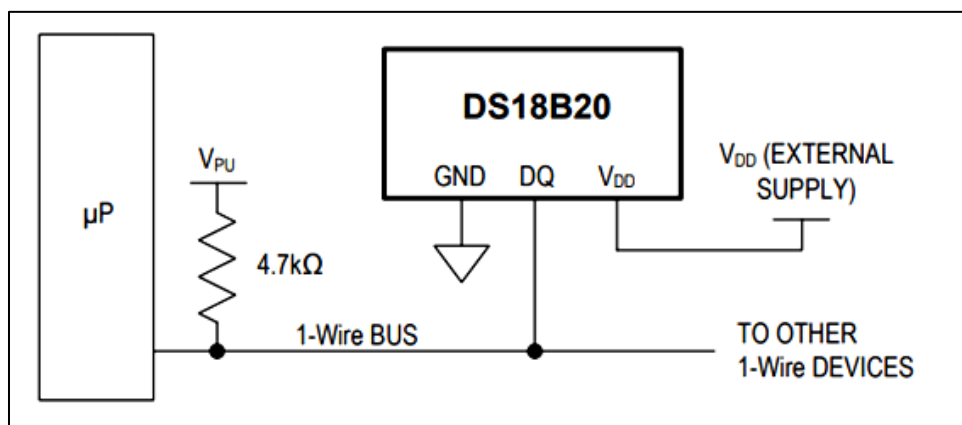


Figura 12. Esquema electrónico de la conexión del bus de sensores DS18B20 mediante el protocolo 1-Wire.
(Fuente: <https://components101.com/sensors/ds18b20-temperature-sensor>)

2.1.3 Sensor de temperatura y humedad ambiental (DHT-22)

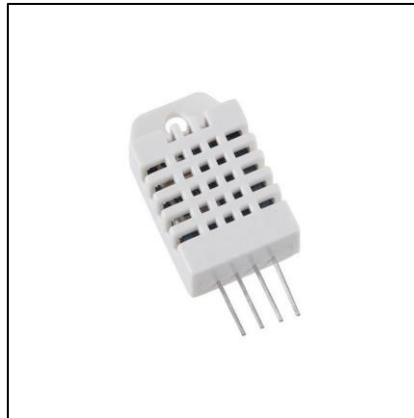


Figura 13. Sensor DHT-22

Este sensor mide la temperatura y humedad ambiental, lo que permite tener controladas las dos variables ambientales que más impacto tienen en la infiltración del agua en el suelo en sistemas de riego por goteo. Al igual que el sensor de humedad del suelo (y a diferencia del sensor DS18B20) este sensor no puede conectarse en serie, aunque solo habrá un sensor DHT-22 por microcontrolador.

Model	DHT22
Power supply	3.3-6V DC
Output signal	digital signal via single-bus
Sensing element	Polymer capacitor
Operating range	humidity 0-100%RH; temperature -40~80Celsius
Accuracy	humidity +-2%RH(Max +-5%RH); temperature <+-0.5Celsius
Resolution or sensitivity	humidity 0.1%RH; temperature 0.1Celsius
Repeatability	humidity +-1%RH; temperature +-0.2Celsius
Humidity hysteresis	+0.3%RH
Long-term Stability	+0.5%RH/year
Sensing period	Average: 2s
Interchangeability	fully interchangeable
Dimensions	small size 14*18*5.5mm; big size 22*28*5mm

Figura 14. Características del sensor DHT-22 (Fuente: <https://datasheetspdf.com/pdf/792211/Aosong/DHT22/1>)

2.1.4 Microcontrolador ESP32-WROOM DevKit

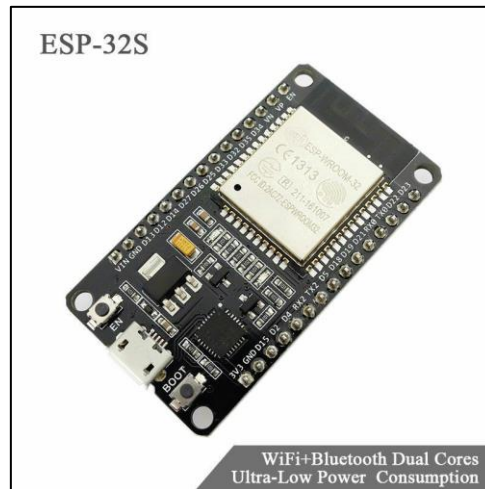


Figura 15. Microcontrolador Esp32-WROOM Devkit

Este microcontrolador lleva integrado un módulo Wi-Fi (y Bluetooth) de bajo consumo, de manera que puede comunicarse con un dispositivo de la red interna para transmitir datos. Posee pines con convertidor analógico-digital (ADC) y digital-analógico (DAC). Tiene una salida de alimentación a 3.3V.

En el sistema implementado, cada ESP32 tendrá conectado 4 sensores de humedad del suelo, 4 sondas de temperatura DS18B20 y un sensor de temperatura y humedad ambiental.

Inicialmente, cada microcontrolador iba a tener conectados 5 sensores de cada tipo. Sin embargo, el ESP32-WROOM DevKit inutiliza la mayor parte de los pines que están conectados al ADC cuando se hace uso del módulo Wi-Fi (Espressif Systems, 2016). Esto implica que solamente quedan 4 pines disponibles para conectar sensores analógicos (como los sensores de humedad del suelo).

2.1.5 Arduino IDE

El software de Arduino permite la programación de microcontroladores, incluyendo el ESP32-WROOM DevKit. Con este IDE se han programado los microcontroladores y se han testeado los sensores a través del monitor serial que ofrece el software.

Arduino IDE incorpora un sistema de gestión de librerías con el que se ha descargado todo el paquete de herramientas necesario para implementar el código (por ejemplo la librería para activar el módulo Wi-Fi y conectarse a una red).

2.1.6 XAMPP y phpMyAdmin

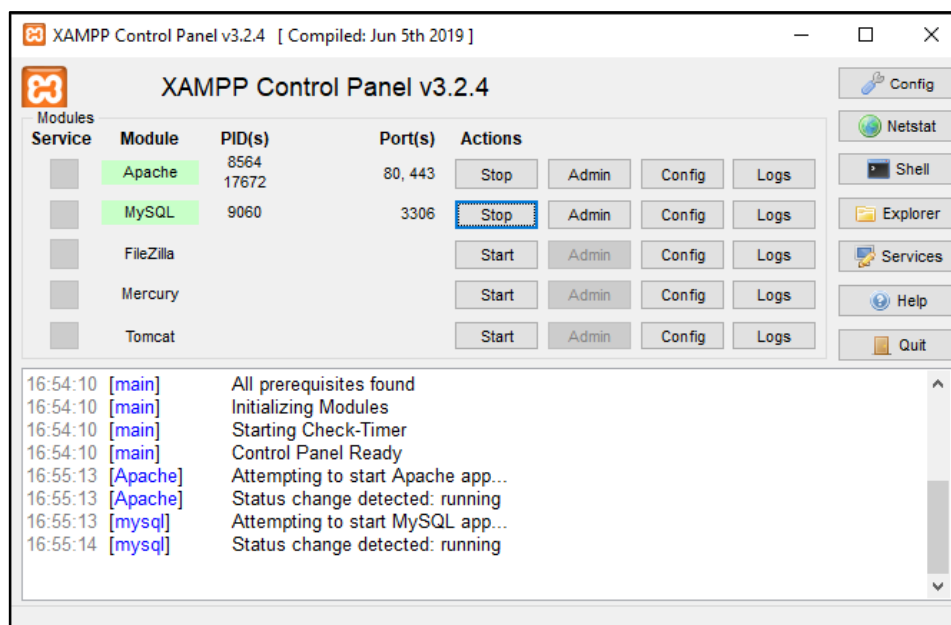


Figura 16. Interfaz del programa XAMPP.

XAMPP es una herramienta de software libre, con la que se ha levantado un servidor Apache y un servidor MySQL para recibir y almacenar la información recogida por los sensores. El servidor Apache es el que recibe la información vía http (en el puerto 80), enviada en origen por el microcontrolador (a través de la red Wi-Fi). El servidor MySQL es el que se comunica con la base de datos (para leer o escribir).

La base de datos se ha creado utilizando la herramienta phpMyAdmin para facilitar el proceso y para tener un interfaz en el que visualizar y exportar los datos cómodamente.

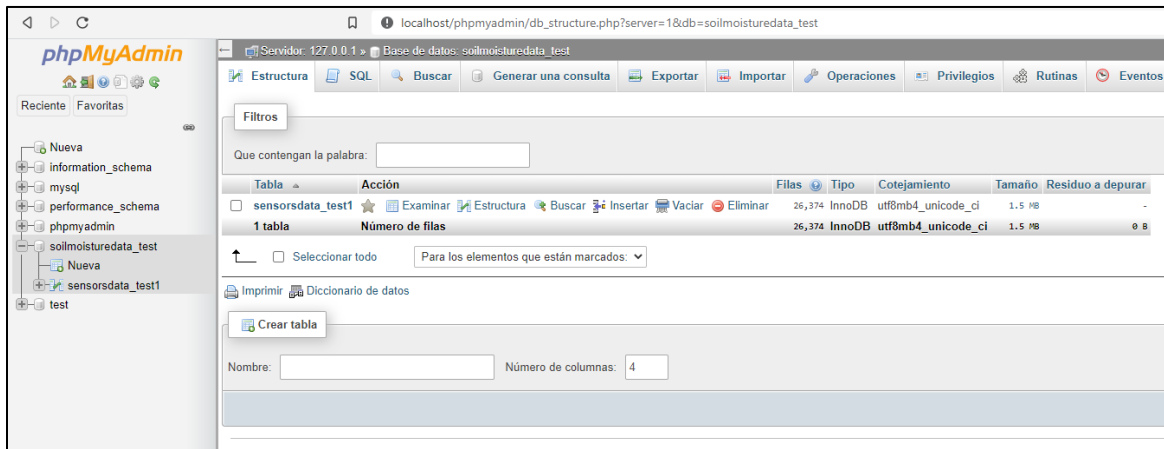


Figura 17. Interfaz de gestión phpMyAdmin.

Como se puede observar en la figura 17, tanto la aplicación phpMyAdmin como el servidor MySQL están corriendo en local (*localhost* o 127.0.0.1). A través de este interfaz se pueden visualizar los datos de la tabla (*sensorsdata_test1*) así como exportarlos.

2.1.6 Fritzing

Fritzing es un software que permite diseñar circuitos electrónicos de manera rápida y sencilla, utilizado principalmente para prototipado. Esta herramienta se ha utilizado para elaborar los esquemas que describen los circuitos electrónicos implementados para llevar a cabo este trabajo. Para poder representar ciertos componentes (como el ESP32 o la sonda de temperatura) fue necesario descargar los módulos específicos.

2.2 Base de datos

2.2.1 Estructura de la tabla

Para simplificar el envío de datos, todos los microcontroladores subirán la información a una misma tabla. Dicha tabla tiene la siguiente estructura:

sensor_type	sensor_id	board_id	time_s	value
0	3	1	0	22.19
0	3	1	2	22.19
0	3	1	4	22.19
0	3	1	6	22.19
0	3	1	8	22.19

Tabla 2. Estructura de la tabla (sensorsdata_test1) creada en la base de datos.

A continuación se describen las variables:

- ➔ **sensor_type:** es de tipo *Booleano*. El valor "0" indica que se trata de un sensor de temperatura mientras que el valor "1" indica que se trata de un sensor de humedad.
- ➔ **sensor_id:** es de tipo *Entero*. El valor de esta variable corresponde con el identificador del sensor en cuestión (cogiendo valores entre 1 y 20).
- ➔ **board_id:** es de tipo *Entero*. Su valor corresponde con el identificador del microcontrolador del que procede la información (cogiendo valores entre 1 y 10).
- ➔ **time_s:** es de tipo *Entero*. Su valor indica el tiempo (en segundos) en que se realizó la lectura respecto al inicio de la ejecución.
- ➔ **value:** es de tipo *Decimal*. Su valor corresponde con la lectura del sensor en cuestión (siendo °C la unidad para los sensores de temperatura y % para los de humedad).

2.2.2 Configuración de la base de datos

La finalidad de esta base de datos es únicamente la de recibir información de los sensores. Por esta razón sólo ha sido necesario implementar un método que inserte las lecturas en la tabla descrita previamente. Para llevar esto a cabo se ha elaborado un script en PHP (figura 18), alojado en la carpeta de configuración 'htdocs' del servidor Apache local, que se ejecutará cuando el servidor reciba una petición GET.

```
<?php
// Prepare variables for database connection
$dbname = "soilmoisturedata_test";
$username = "root";
$password = "root";
$server = "localhost";

// Connect to database
$dbconnect = new mysqli($server, $username, $password, $dbname);

// Prepare SQL statement
$sql = "INSERT INTO soilmoisturedata_test.sensorsdata_test1 (sensor_type, sensor_id, board_id, time_s, value)
VALUES ('".$_GET["sensor_type"]."', '".$_GET["sensor_id"]."', '".$_GET["board_id"]."', '".$_GET["time_s"]."', '".$_GET["value"]."')";

// Execute SQL statement
mysqli_query($dbconnect, $sql);
?>
```

Figura 18. Script php para automatizar la inserción de datos vía el servidor MySQL alojado en local.

Dado que el sistema elaborado no precisa de seguridad en el envío de la información (no son datos sensibles en ningún caso), se ha decidido utilizar el método GET para enviar dichos datos, de manera que viajan al descubierto en la petición HTTP. Una ventaja (quizás no significativa) de insertar los datos vía una petición GET es que estos van incluidos en el *header* mientras que en una petición POST van incluidos en el *body*, lo que ralentiza el procesamiento. En este caso de aplicación, el límite de 2048 caracteres para una petición GET no se alcanza en ningún momento.

Hay que añadir que el servidor solo puede ser accedido desde un dispositivo que esté conectado a la red local por lo que el sistema está relativamente protegido.

2.3 Instalación

2.3.1 Diagrama de conexión de los sensores con el ESP32

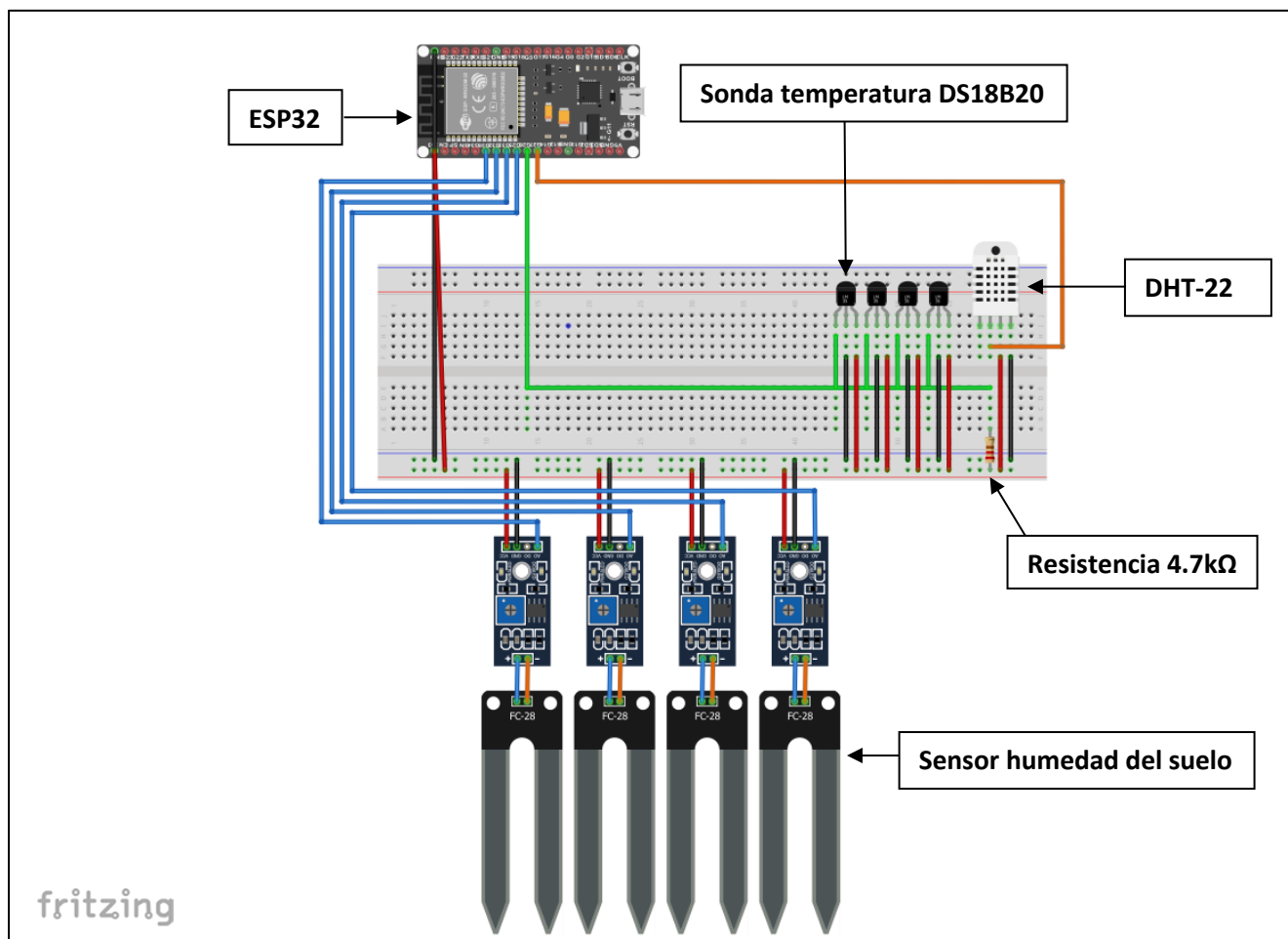


Figura 19. Esquema del circuito electrónico implementado.

En esta figura se ilustran las conexiones que conforman el circuito implementado. Como se puede ver, los sensores de temperatura están conectados en serie, a un solo pin (GPIO 26), mientras que los sensores de humedad del suelo están conectados a un pin cada uno (GPIO 32-35), los únicos cuatro pines conectados al ADC1 (el convertidor analógico-digital que funciona aún activando el módulo Wi-Fi del microcontrolador). El sensor de temperatura y humedad ambiental está conectado al pin GPIO 25.

Como se verá más adelante, este es el circuito que se implementó para realizar las primeras pruebas, descartando los sensores de humedad.

2.3.2 Programación de los microcontroladores

El código para obtener las lecturas de los sensores de humedad del suelo es bastante sencillo. A continuación se muestra el fragmento de código correspondiente para uno de los ESP32:

```
// GPIO where soil moisture sensors are connected to.  
const int humiditySensorPin1 = 32; // n°9  
const int humiditySensorPin2 = 33; // n°8  
const int humiditySensorPin3 = 34; // n°11  
const int humiditySensorPin4 = 35; // n°7
```

Figura 20. Asignación de los pines de conexión para los sensores de humedad del suelo.

```
double humidity1 = map(analogRead(humiditySensorPin0), 4095, 0, 0, 100);  
double humidity2 = map(analogRead(humiditySensorPin1), 4095, 0, 0, 100);  
double humidity3 = map(analogRead(humiditySensorPin2), 4095, 0, 0, 100);  
double humidity4 = map(analogRead(humiditySensorPin3), 4095, 0, 0, 100);
```

Figura 21. Obtención de los datos leídos por los sensores de humedad.

La lectura es de tipo analógico y se transforma el valor obtenido para convertirlo a porcentaje de humedad, utilizando la función 'map'.

Para obtener los datos de los sensores DS18B20 es necesario utilizar dos librerías específicas: OneWire y DallasTemperature. Adicionalmente, es necesario conocer los identificadores únicos de los sensores para poder asociar las lecturas.

Para conocer dichos identificadores fue necesario implementar primero un pequeño programa para extraerlos (utilizando las funciones propias de la librería *OneWire.h*).

Los identificadores obtenidos son los siguientes:

NºSensor	UniqueID (hexadecimal)	UniqueID (decimal)
1	28 D4 48 3C 0B 00 00 4A	40 212 72 60 11 00 00 74
2	28 A9 C9 1D 1A 19 01 80	40 169 192 29 26 25 01 128
3	28 18 A5 3B 0B 00 00 18	40 24 165 59 11 00 00 24
4	28 E6 2E 1F 1A 19 01 5D	40 230 46 31 26 25 01 93
5	28 0C 86 3D 14 19 01 35	40 12 134 61 20 25 01 53
6	28 67 38 3C 0B 00 00 79	40 103 56 60 11 00 00 121
7	28 F0 23 1D 1A 19 01 5F	40 240 35 29 26 25 01 95
8	28 74 EA 3B 0B 00 00 20	40 116 234 59 11 00 00 32
9	28 98 EA 3A 0B 00 00 FB	40 152 234 58 11 00 00 251
10	28 77 8E 3C 0B 00 00 F1	40 119 142 60 11 00 00 241
11	28 40 A1 3D 14 19 01 94	40 64 161 61 20 25 01 148
12	28 C6 AF 3B 0B 00 00 72	40 198 175 59 11 00 00 114
13	28 66 83 FF 19 19 01 C5	40 102 131 255 25 25 01 197
14	28 28 4D 6A 1B 19 01 0C	40 40 77 106 27 25 01 12
15	28 75 D3 02 00 00 80 F6	40 117 211 02 00 00 128 246

Tabla 3. Número de identificación único de las sondas de temperatura DS18B20.

A continuación se muestra el proceso correspondiente a la obtención de las temperaturas conociendo ya su identificador:

```
// GPIO where the DS18B20 is connected to.
const int oneWireBus = 19;

// Setup a oneWire instance to communicate with any OneWire devices.
OneWire oneWire(oneWireBus);

// Pass our oneWire reference to Dallas Temperature sensor.
DallasTemperature sensors(&oneWire);
```

Figura 22. Asignación del pin de conexión para el bus de sensores (*oneWireBus*).

```
// These are the addresses corresponding to each sensor connected to this ESP32.
// They will be used to find the index of each sensor on the bus.
uint8_t sensorN1_addr[8] = {40, 212, 72, 60, 11, 00, 00, 74};
uint8_t sensorN3_addr[8] = {40, 24, 165, 59, 11, 00, 00, 24};
uint8_t sensorN6_addr[8] = {40, 103, 56, 60, 11, 00, 00, 121};
uint8_t sensorN8_addr[8] = {40, 116, 234, 59, 11, 00, 00, 32};
uint8_t sensorN9_addr[8] = {40, 152, 234, 58, 11, 00, 00, 251};
```

Figura 23. Identificadores únicos de las sondas de temperatura, en formato decimal.

```
void setup() {
  // Start the Serial Monitor
  Serial.begin(115200);

  // Start the DS18B20 sensor
  sensors.begin();

  deviceCount = sensors.getDeviceCount();
  Serial.print("N° of devices on MCl: ");
  Serial.println(deviceCount);
  if(deviceCount > 0){
    setSensorIndexes();
    pinMode(humiditySensorPin0, INPUT);
    pinMode(humiditySensorPin1, INPUT);
    pinMode(humiditySensorPin2, INPUT);
    pinMode(humiditySensorPin3, INPUT);
    pinMode(humiditySensorPin4, INPUT);
  }
  else{
    Serial.println("There were not enough detected devices, exiting program...");
  }
}
```

Figura 24. Inicialización del programa (función 'setup').

Como se puede observar, el programa solo se iniciará si el microcontrolador encuentra al menos un dispositivo (sonda de temperatura) conectado. En caso de haber al menos un sensor conectado, se ejecutará la función "setSensorIndexes" que es la que asignará a cada sensor (a cada identificador) el índice del mismo en el bus de sensores (en el 1-Wire bus). De esta manera se podrá asociar cada lectura a un sensor determinado.

```
sensors.requestTemperatures();
double temperature1 = sensors.getTempCByIndex(sensorN1_index);
double temperature2 = sensors.getTempCByIndex(sensorN3_index);
double temperature3 = sensors.getTempCByIndex(sensorN6_index);
double temperature4 = sensors.getTempCByIndex(sensorN8_index);
double temperature5 = sensors.getTempCByIndex(sensorN9_index);
```

Figura 25. Obtención de las lecturas registradas por los sensores de temperatura, en grados Celsius.

La lectura de la temperatura para un sensor determinado exige conocer el índice del mismo en el bus de sensores. El valor obtenido puede ser en grados Celsius si utilizamos la función 'getTempCByIndex' mientras que puede ser en grados Fahrenheit si utilizamos la función 'getTempFByIndex'.

2.3.3 Conexión ESP32 – Servidor vía Wi-Fi

Para que el ESP32 sea capaz de conectarse a una red Wi-Fi, se ha utilizado la librería ‘Wifi.h’ (compatible con el ESP32) con el fin de activar y operar con el módulo Wi-Fi del microcontrolador. También se ha utilizado la librería ‘HTTPClient.h’ para poder realizar las peticiones HTTP pertinentes.

Al igual que para conectar nuestro ordenador a la red Wi-Fi, el microcontrolador necesita las credenciales de la red Wi-Fi para conectarse. También debe conocer la IP del servidor donde se encuentra la base de datos MySQL, que en este caso es un PC conectado a la misma red Wi-Fi.

```
#include <WiFi.h>
#include <HTTPClient.h>

const char* ssid = "XXXXXXXXXX";
const char* password = "XXXXXXXXXX";

const char* serverName = "http://192.168.1.102/write_data.php?";
```

Figura 26. Definición de las variables necesarias para la conexión a la red Wi-Fi y la posterior comunicación con el servidor.

Como se puede observar, el nombre del servidor incluye la IP del ordenador donde se aloja junto al archivo que se quiere ejecutar para insertar los datos.

```
String var1 = "%board_id=" + String(1);
String var2 = "%time_s=" + String(currentTime);
String var3 = "sensor_type=" + String(0); // 0 means it is a temperature sensor (1 means it's a soil moisture sensor).
String var4 = "%sensor_id=" + String(4);
String var5 = "%value=" + String(temperature1);

String httpRequestData = var1 + var2 + var3 + var4 + var5 + "";

http.begin(serverName + httpRequestData);
httpResponseCode = http.GET();
http.end();
```

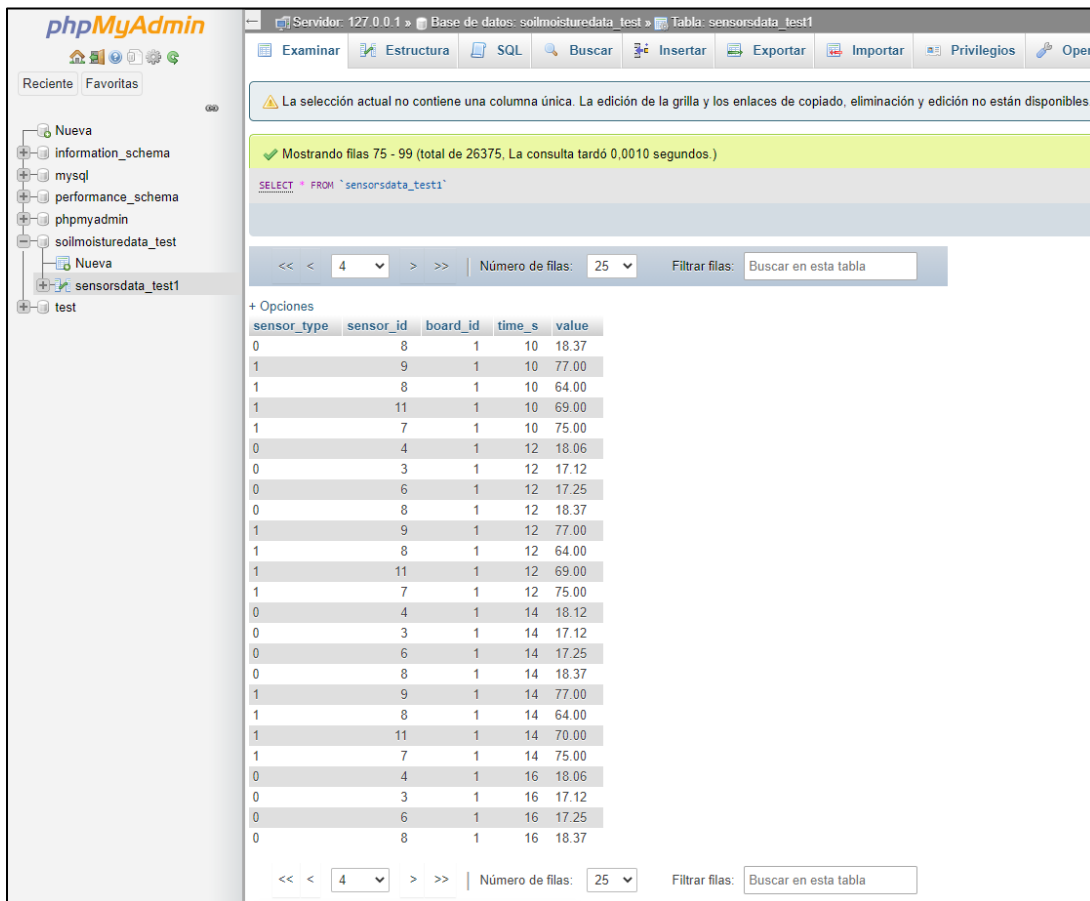
Figura 27. Construcción de la cadena de conexión para la realización de una petición GET.

En la figura 27 se puede observar como se construye una petición GET para insertar datos en la base de datos MySQL. En este ejemplo se está mandando la temperatura del sensor nº4 (en el microcontrolador nº1). Suponiendo que el tiempo de ejecución es 0s y la temperatura obtenida 25.00°C, la cadena de conexión para este caso quedaría así:

“http://192.168.1.102/write_data.php?&board_id=1&time_s=0&sensor_type=0&sensor_id=4&value=25.00”

Esto es lo que recibirá el servidor Apache, ejecutando entonces el archivo ‘write_data.php’ para insertar los datos recibidos en la petición GET. Como se ha mencionado anteriormente, dichos datos están en el header y por tanto van al descubierto (no están ni encapsulados ni encriptados).

Esta operación se realiza por cada lectura de los sensores, es decir que se envían 8 peticiones GET por un mismo microcontrolador antes de obtener las siguientes lecturas.



The screenshot shows the phpMyAdmin interface for a MySQL database. The left sidebar shows the database structure with the following items: Nueva, information_schema, mysql, performance_schema, phpmyadmin, soilmoisturedata_test, Nueva, sensorsdata_test1, and test. The main area displays the 'sensorsdata_test1' table. A message at the top indicates that the current selection does not contain a unique column. Below this, a green bar shows 'Mostrando filas 75 - 99 (total de 26375, La consulta tardó 0,0010 segundos)'. The SQL query is 'SELECT * FROM `sensorsdata_test1`'. The table has 5 columns: sensor_type, sensor_id, board_id, time_s, and value. The data is displayed in a grid with alternating row colors. The table is paginated to show 25 rows per page, and the current page is 4. A search filter is present at the bottom of the table.

sensor_type	sensor_id	board_id	time_s	value
0	8	1	10	18.37
1	9	1	10	77.00
1	8	1	10	64.00
1	11	1	10	69.00
1	7	1	10	75.00
0	4	1	12	18.06
0	3	1	12	17.12
0	6	1	12	17.25
0	8	1	12	18.37
1	9	1	12	77.00
1	8	1	12	64.00
1	11	1	12	69.00
1	7	1	12	75.00
0	4	1	14	18.12
0	3	1	14	17.12
0	6	1	14	17.25
0	8	1	14	18.37
1	9	1	14	77.00
1	8	1	14	64.00
1	11	1	14	70.00
1	7	1	14	75.00
0	4	1	16	18.06
0	3	1	16	17.12
0	6	1	16	17.25
0	8	1	16	18.37

Figura 28. Visualización de los datos recogidos por el servidor a través del interfaz phpMyAdmin.

Los datos recogidos pueden visualizarse a través del interfaz phpMyAdmin (figura 28), desde donde se exportan a formato CSV para ser analizados.

2.3.4 Montaje del prototipo de pica

Para el montaje de la pica se ha utilizado el siguiente material:

- Cutter (para cortar los tubos de PVC en dos, obteniendo tubos de 1m).
- Taladro eléctrico (para perforar los tubos en las distintas posiciones de los sensores).
- Cinta adhesiva a doble cara (para fijar los sensores en su punto de inserción).
- Caja de plástico con cierre hermético tipo Tupperware (para aislar el microcontrolador, las conexiones y el sensor DHT22 del exterior).



Figura 29. Taladro eléctrico



Figura 30. Cutter



Figura 31. Tubo de PVC perforado para la inserción de los sensores.

En la figura 31 se puede observar como quedó el tubo de PVC después de ser cortado y perforado. Seguidamente se insertaron los sensores de temperatura y se fijaron con cinta adhesiva, como puede verse en la siguiente figura:



Figura 32. Inserción de los sensores de temperatura a través del interior del tubo.

El siguiente paso fue perforar la caja de plástico por la parte inferior (en el centro), creando un orificio de diámetro algo inferior al del tubo de PVC. Esto permitió insertar el tubo de PVC en la caja quedando relativamente fijado debido a la fricción. Para facilitar la conexión de los sensores se redujo la longitud del cable. El resultado puede verse en las siguientes imágenes:

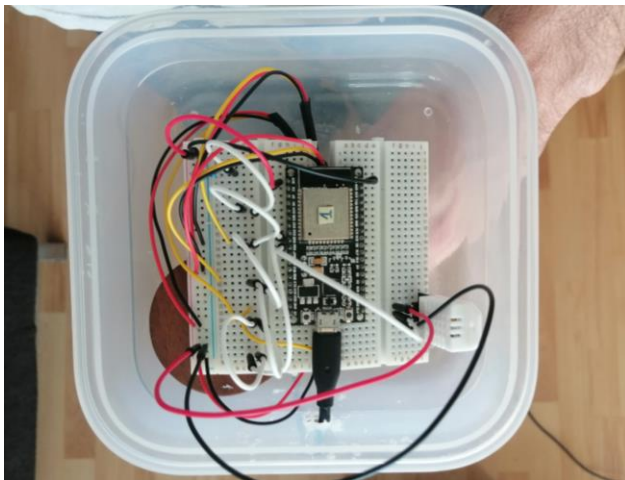


Figura 33. Vista aérea de la circuitería y la caja protectora.



Figura 34. Vista transversal de la circuitería y la caja protectora.

Como se puede observar en las figuras 33 y 34, se perforó también la caja por un lateral, para que el cable de alimentación (cable micro-USB) pueda pasar.

Por último se tapó la caja protectora para aislar toda la circuitería de la entrada de agua:



Figura 35. Vista transversal de la caja cerrada.

3. Evaluación

3.1 Resultados y análisis

Antes de realizar una prueba con distintos tipos de tierra, se han realizado 3 pruebas para determinar si los sensores de temperatura y los de humedad del suelo son válidos a la hora de detectar el avance del agua.

Para ello se ha instalado un microcontrolador con 4 sondas de temperatura y 4 sensores de humedad del suelo, insertados en tierra (en una maceta), de manera que quedan espaciados pero en superficie:



Figura 36. Vista aérea del montaje llevado a cabo para la realización de las tres primeras pruebas.

Como se puede observar, en el centro de la maceta hay ubicado un gotero. Este gotero tiene la particularidad de poder regular el caudal emitido, apretando (o aflojando) la rosca que tiene un su

parte superior. Los sensores están dispuestos en pares (cada sensor de temperatura tiene un sensor de humedad justo al lado), estando cada par a unos 3cm de los pares colindantes.

Prueba 1:

En la primera prueba se ha vertido un vaso de agua a temperatura ambiente (aproximadamente a 20.5°C) a los 220 segundos después de la ejecución (aproximadamente), con lo que se han obtenido las siguientes gráficas:

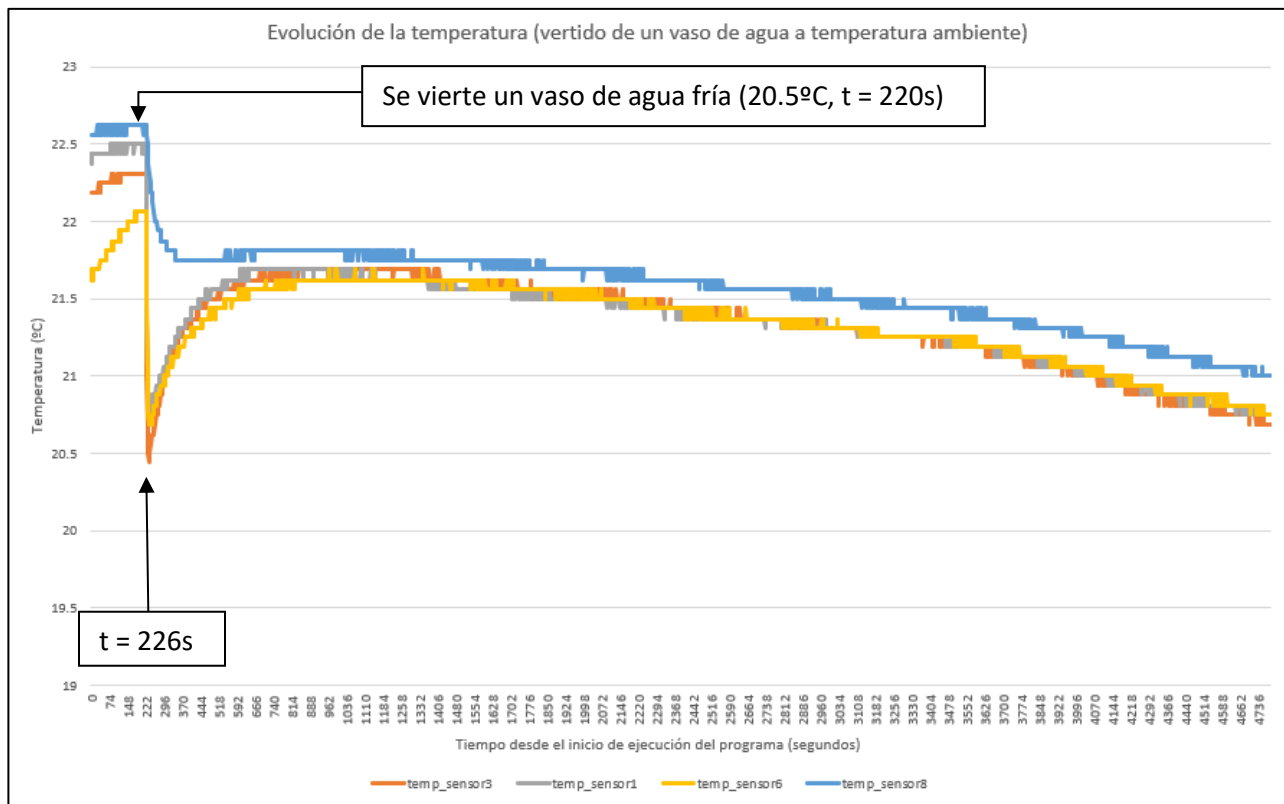


Figura 37. Evolución de la temperatura registrada por lo sensores a lo largo del primer experimento.

Como se puede observar, los resultados son bastante consistentes: si bien el sensor de temperatura nº8 registra una caída de temperatura mucho menor que los demás, los puntos de inflexión coinciden claramente (los 4 sensores de temperatura detectan una bajada drástica de la temperatura exactamente en el mismo momento, a los 226 segundos después de la ejecución).

Los mínimos locales (en el intervalo [0; 400]) de cada curva son los siguientes: 20.44 °C para el sensor nº3, 20.69 °C para el sensor nº6, 20.75 °C para el sensor nº1 y 21.75 °C para el sensor nº8.

La diferencia en el sensor de temperatura nº8 podría deberse a que el agua se vierte en el centro de la maceta, expandiéndose y acumulándose rápidamente en los extremos, perdiendo presencia en el centro (que es donde está situado el sensor nº8, al lado del gotero) y por tanto infiltrándose en menor medida.

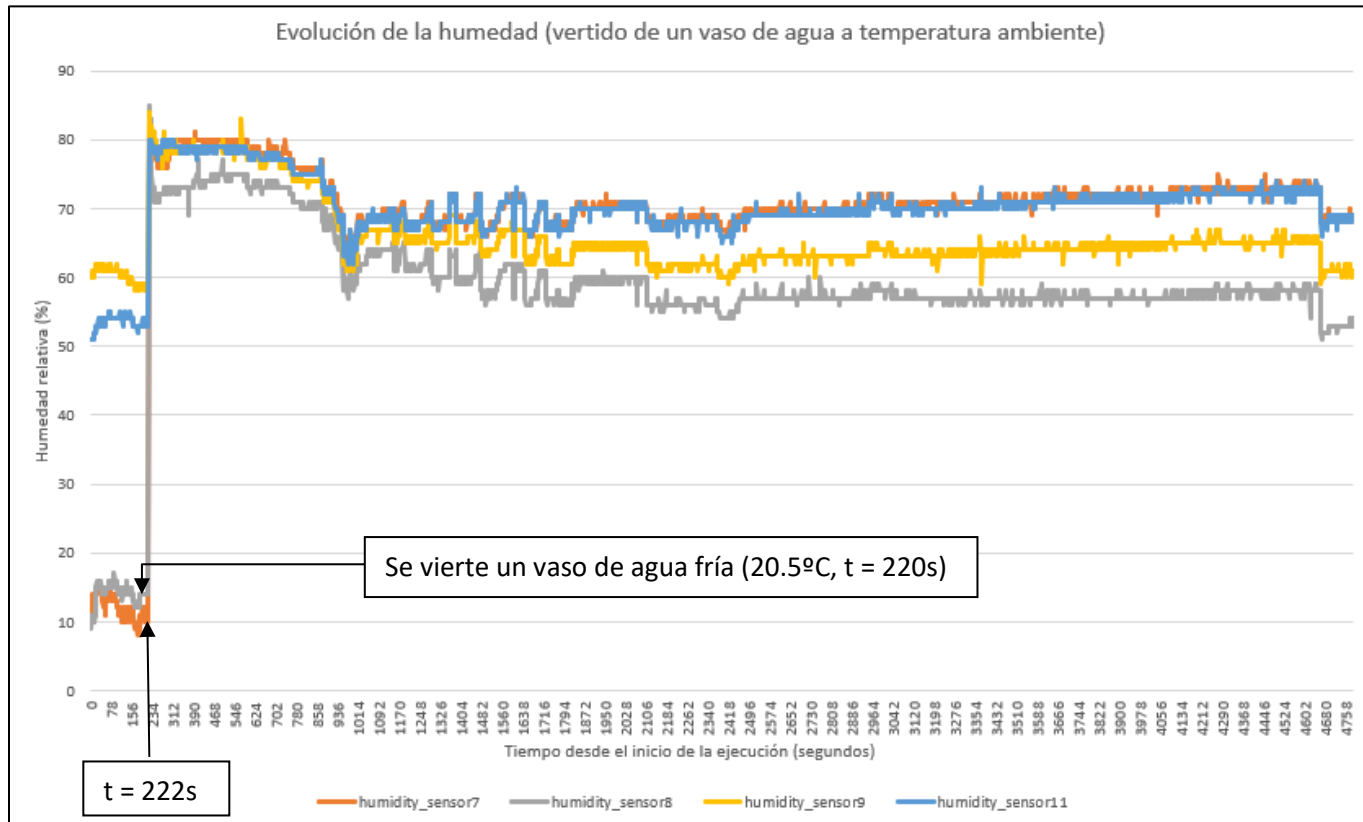


Figura 38. Evolución de la humedad registrada por lo sensores a lo largo del primer experimento.

Como se puede observar en la figura, los cuatro sensores de humedad detectan un cambio drástico en el mismo momento (exactamente a los 222 segundos después de la ejecución). Sin embargo, se puede notar una diferencia muy significativa en las condiciones iniciales de los sensores (los sensores 7 y 8 detectan alrededor de un 15% de humedad inicialmente mientras que los sensores 9 y 11 detectan alrededor de un 60% de humedad).

La enorme diferencia en las condiciones iniciales de los sensores de humedad podría deberse a una mayor concentración de sales en la zona en la que se encuentran los sensores 9 y 11, dado que los sensores de humedad son sensibles a cambios en la conductividad eléctrica y la concentración de partículas de agua en el suelo no es el único factor que interviene. Sin embargo, como se ha descrito en los resultados, todos los sensores de humedad detectan un cambio



simultáneamente, lo que parece indicar que estos sensores sí sirven para detectar el avance del agua (si bien no es así, como se demuestra en la tercera prueba).

Se podría decir que la diferencia en la velocidad de reacción entre los sensores de temperatura y los de humedad es casi despreciable (4 segundos), por lo que no parece que los sensores de humedad aporten ningún valor añadido respecto a las sondas de temperatura.

Prueba 2:

En la segunda prueba se ha vertido un vaso de agua caliente a los 242 segundos después de la ejecución (aproximadamente), con lo que se han obtenido las siguientes gráficas:

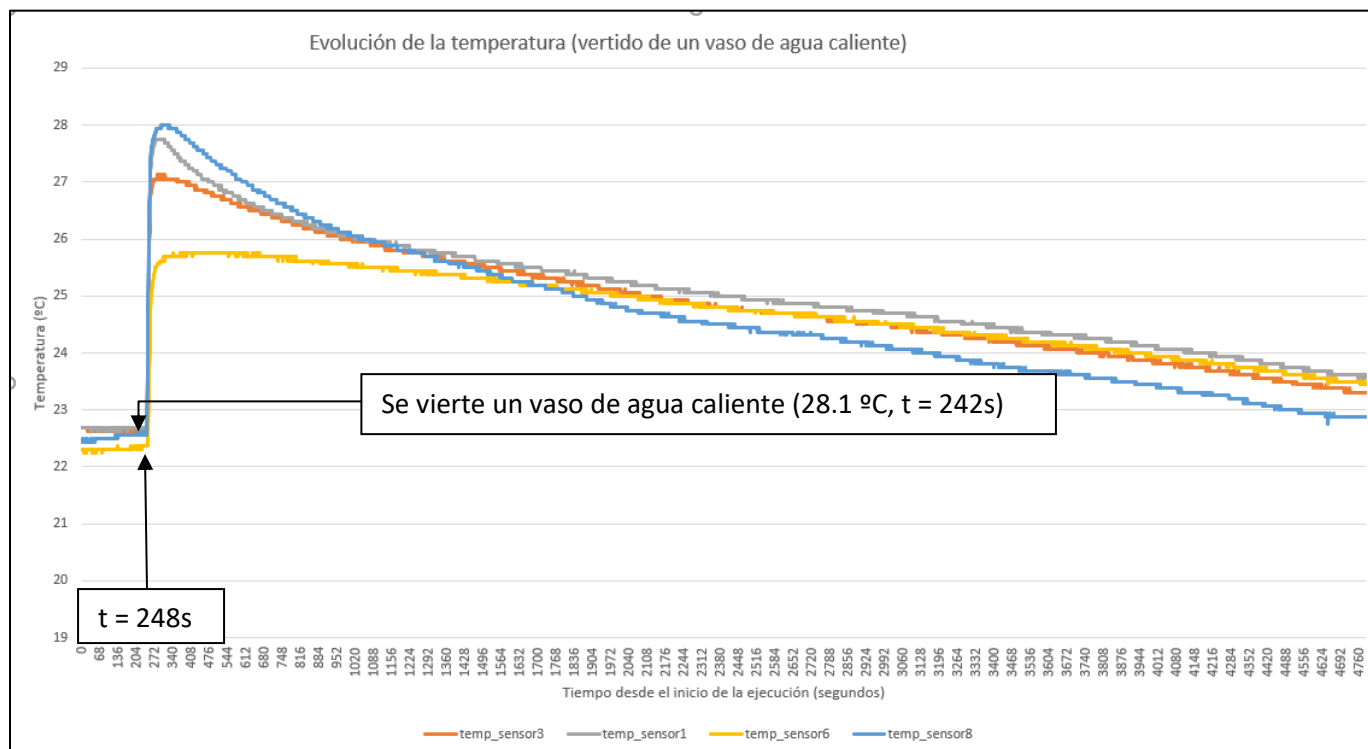


Figura 39. Evolución de la temperatura registrada por lo sensores a lo largo del segundo experimento.

Como se puede observar, los cuatro sensores de temperatura detectan un cambio drástico simultáneamente (exactamente a los 248 segundos después del inicio de la ejecución). El sensor más alejado es el que registra una menor subida de temperatura (sensor nº6), mientras que el sensor más próximo al centro de la maceta registra la mayor subida de temperatura (sensor nº8).

Los máximos de cada curva son los siguientes: 25.75 °C para el sensor nº6, 27.13 °C para el sensor nº3, 27.75 °C para el sensor nº1 y 28 °C para el sensor nº 8.

El pico más alto de temperatura registrado corresponde al sensor más cercano al centro de la maceta, mientras que el pico más bajo corresponde al sensor más alejado. Esto se debe claramente a que el agua se enfría rápidamente al entrar en contacto con la tierra y el aire, por lo que los sensores más lejanos reciben el agua más fría (la diferencia entre el sensor central y el más alejado es de 2.25 °C).

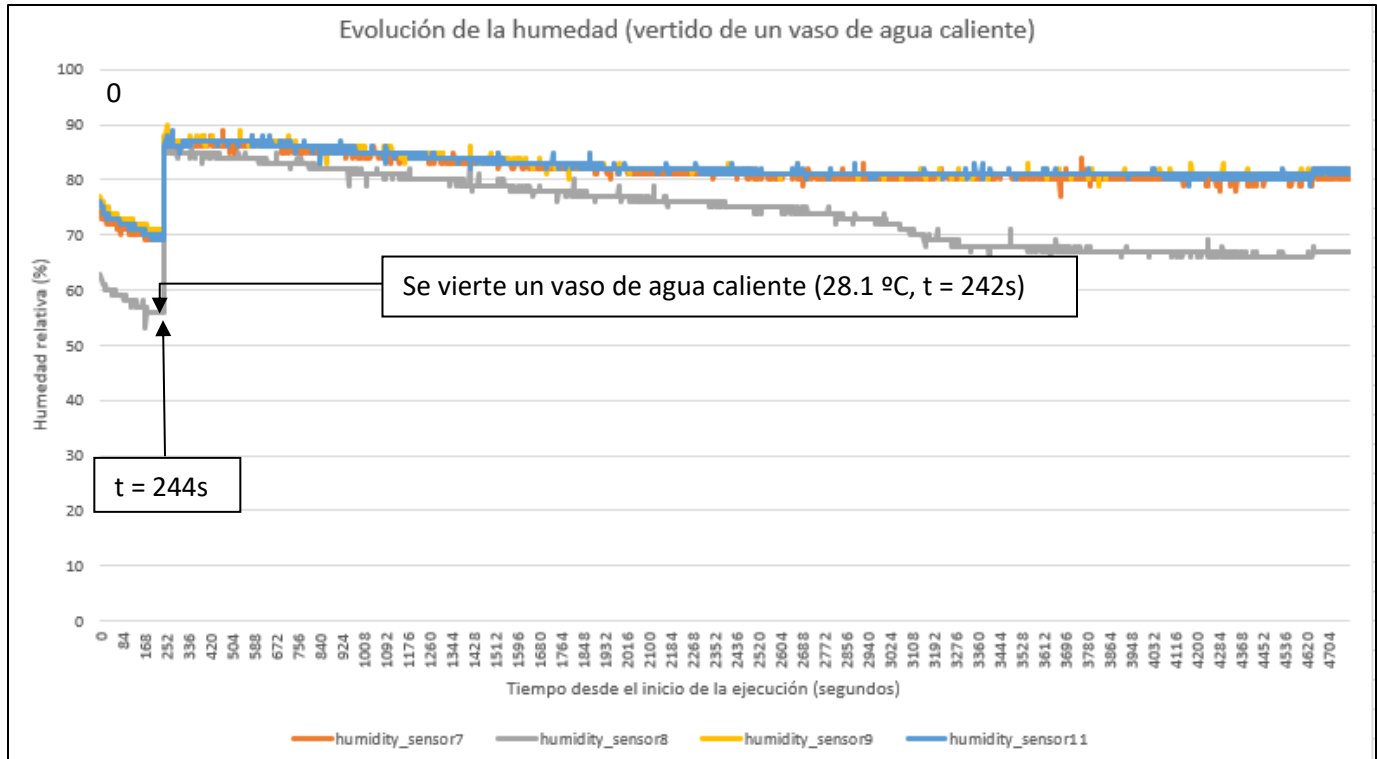


Figura 40. Evolución de la humedad registrada por lo sensores a lo largo del segundo experimento.

Como se puede observar, los cuatro sensores de humedad detectan un cambio drástico simultáneamente (a los 244 segundos después del inicio de la ejecución). En esta prueba la diferencia en las condiciones iniciales es menos significativa que en la prueba anterior. Sin embargo, sigue siendo una diferencia notable comparado con los sensores de temperatura (el sensor de humedad nº8 registra una humedad inicial de aproximadamente 55% mientras que los otros 3 sensores registran un 70%). Esta diferencia podría deberse de nuevo a una menor concentración de sales en la zona del sensor nº8.

Prueba 3:

En la tercera prueba, se ha puesto en marcha el riego por goteo, habiendo medido previamente el caudal del gotero mediante una probeta de 100mL y un cronómetro. El resultado fue el siguiente:

Volumen aprox (mL)	Tiempo (s)	Caudal (L/h)
100	152	2.37

Tabla 4. Resultados de la prueba para la determinación del caudal el gotero utilizado.

El riego por goteo se ha activado a los 450 segundos después de la ejecución, aproximadamente, obteniendo entonces la siguiente gráfica:

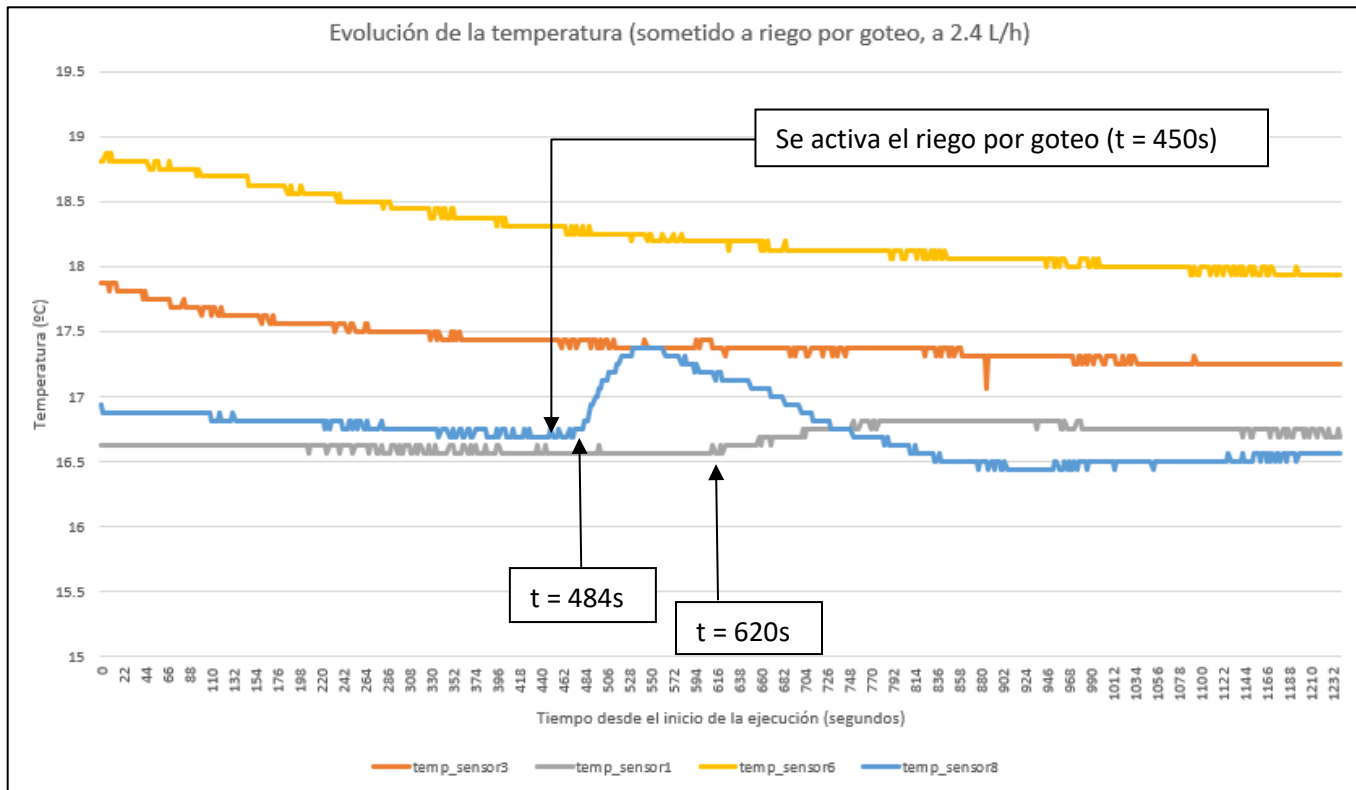


Figura 41. Evolución de la temperatura registrada por lo sensores a lo largo del tercer experimento.

Como se puede observar, los dos únicos sensores que detectan un cambio apreciable en la temperatura son los dos más cercanos al gotero (sensor nº8 a los 484 segundos y el sensor nº1 a los 620 segundos, aproximadamente).

El pico de temperatura del sensor nº8 es de 17.37 °C mientras que el pico del sensor nº1 es de 16.81 °C.

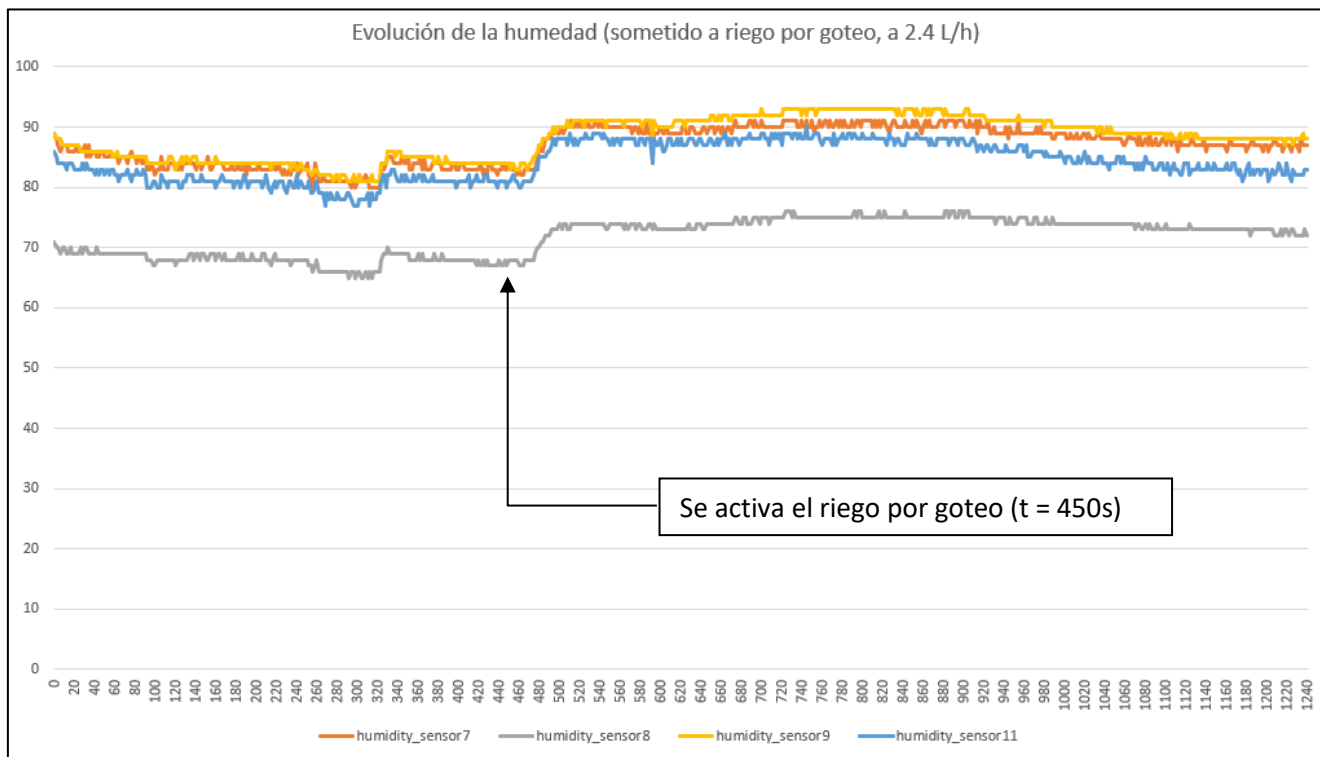


Figura 42. Evolución de la humedad registrada por lo sensores a lo largo del tercer experimento.

Como se puede observar, los cuatro sensores se comportan de forma muy similar (las curvas tienen prácticamente la misma forma). Estos resultados han sido algo desconcertantes ya que no se aprecia ninguna lógica en las lecturas: a los 480 segundos después de la ejecución (aproximadamente), los cuatro sensores detectan un cambio significativo en la humedad (unos 4 segundos antes que el sensor de temperatura nº8) de manera simultánea, lo que no coincide con el avance del agua que se puede apreciar en la fotografía mostrada anteriormente.

En esta prueba, solo los dos sensores de temperatura más cercanos al gotero detectan el avance del agua. Esto se debe a que el agua se infiltró muy rápidamente y no dio tiempo a que se expandiera horizontalmente, terminando el experimento antes de que alcanzara los sensores más alejados, como se puede apreciar en la siguiente fotografía (realizada justo al apagar el riego, a los 1200 segundos después del inicio de la ejecución, aproximadamente):



Figura 43. Fotografía del estado de la tierra al apagar el riego por goteo (1200s después del inicio del experimento).

En la fotografía se puede ver claramente que el agua solo llega a alcanzar los dos primeros pares de sensores. También se puede apreciar como el agua se expande mucho más por el lado opuesto al que están situados los sensores. Esto es una prueba de que la presencia de sensores en la tierra impide notablemente el avance del agua. Por esta razón es preferible colocar los sensores de manera que no estén alineados respecto al centro de la maceta.

Prueba 4:

Si bien las tres primeras pruebas indican que los sensores de humedad del suelo ofrecen resultados poco consistentes a la hora de detectar el avance del agua, para la última prueba se incluyeron también dichos sensores con el fin poder sacar una conclusión definitiva.

En la última prueba, se han preparado tres macetas (de 20cm de diámetro y 4L aproximadamente), cada una con un tipo de tierra diferente (figura 44):

- Arena fina (diámetro < 0.2mm).
- Sustrato universal.
- Tierra franco-arenosa (ver Anejo I: análisis de la tierra en laboratorio).

Seguidamente se han realizado tres pruebas, una en cada maceta, utilizando el mismo gotero (con un caudal de 2.4 L/h, igual que para la prueba nº3). Para que se pueda apreciar visualmente la diferencia en la distribución del agua entre los tres tipos de tierra, se han grabado las tres pruebas realizadas (ver Anejo II: Enlaces del contenido audiovisual).

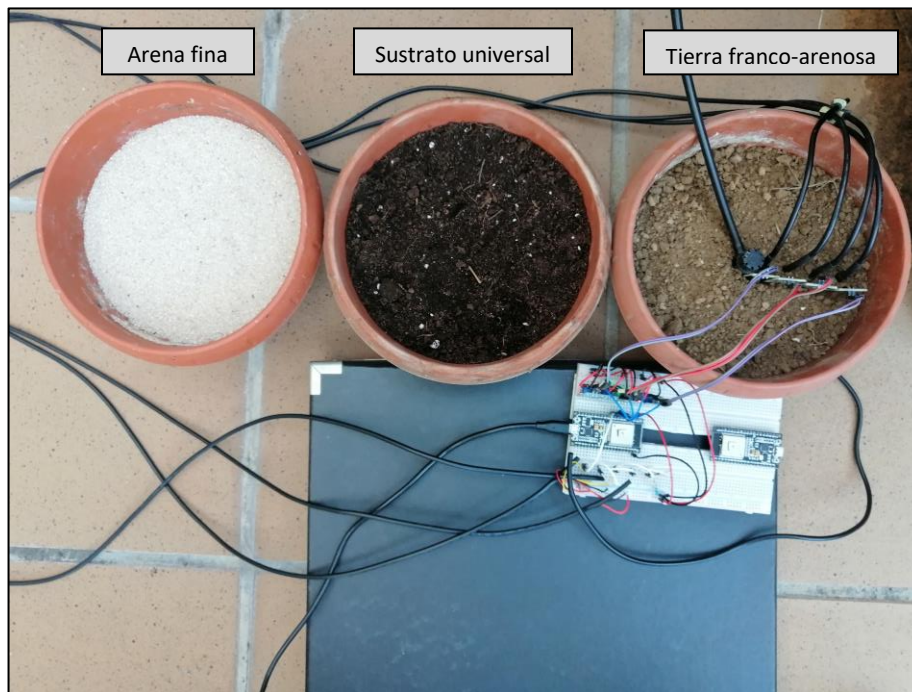


Figura 44. Fotografía del montaje realizado para el cuarto experimento, utilizando tres tipos de tierra (arena fina, sustrato universal y tierra franco-arenosa)

Los sensores de temperatura están dispuestos en el siguiente orden (partiendo del centro de la maceta): nº15, nº10, nº9 y nº12.

Los sensores de humedad del suelo están dispuestos en el siguiente orden: nº5, nº13, nº15, nº4.

La primera de las tres pruebas realizadas con este montaje ha sido en la maceta con tierra franco-arenosa, activando el riego a los 60 segundos después del inicio de la ejecución aproximadamente, obteniendo entonces los siguientes resultados:

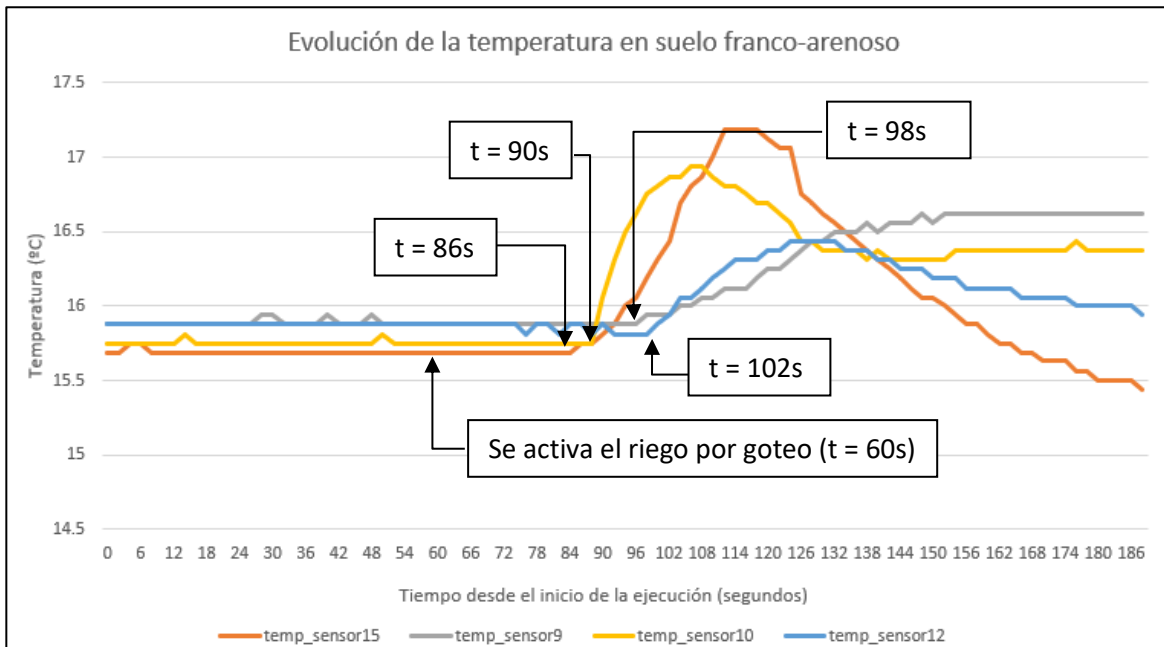


Figura 45. Evolución de la temperatura registrada por los sensores en el cuarto experimento (suelo franco-arenoso)

Como se puede observar en la figura 45, los cuatro sensores detectan una subida de la temperatura al entrar en contacto con el agua de riego, cada uno en un instante diferente. El primer sensor en detectar una subida de la temperatura es el nº15 (el más próximo al gotero), mientras que el último en hacerlo es el nº12 (el más alejado). Estos resultados ilustran muy bien el avance del agua que se puede apreciar en el vídeo realizado para esta prueba (ver Anejo II).

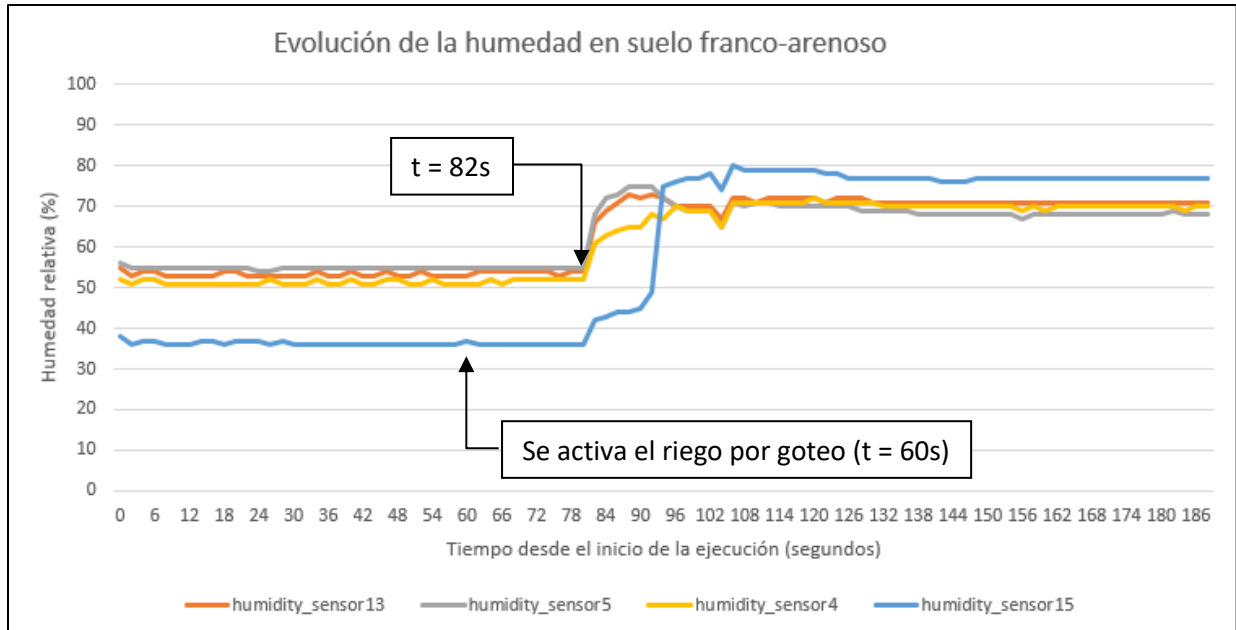


Figura 46. Evolución de la humedad registrada por los sensores en el cuarto experimento (tierra franco-arenosa).

En la figura 46 se puede apreciar que los cuatro sensores de humedad detectan un cambio drástico en la conductividad eléctrica del suelo en el mismo instante (a los 82s después del inicio de la ejecución). Como en las pruebas anteriores, uno de los sensores (el nº15 en este caso) parte de condiciones iniciales bastante diferentes a los demás (alrededor del 38% de humedad inicial frente a un 50-55% de los otros sensores).

Es evidente que estos datos no ilustran de ninguna manera el avance del agua, de igual forma que ha ocurrido en la prueba nº3 (ver Anejo II).

La segunda prueba se ha realizado en la maceta con sustrato universal, activando el riego a los 100 segundos después del inicio de la ejecución aproximadamente, obteniendo entonces los siguientes resultados:

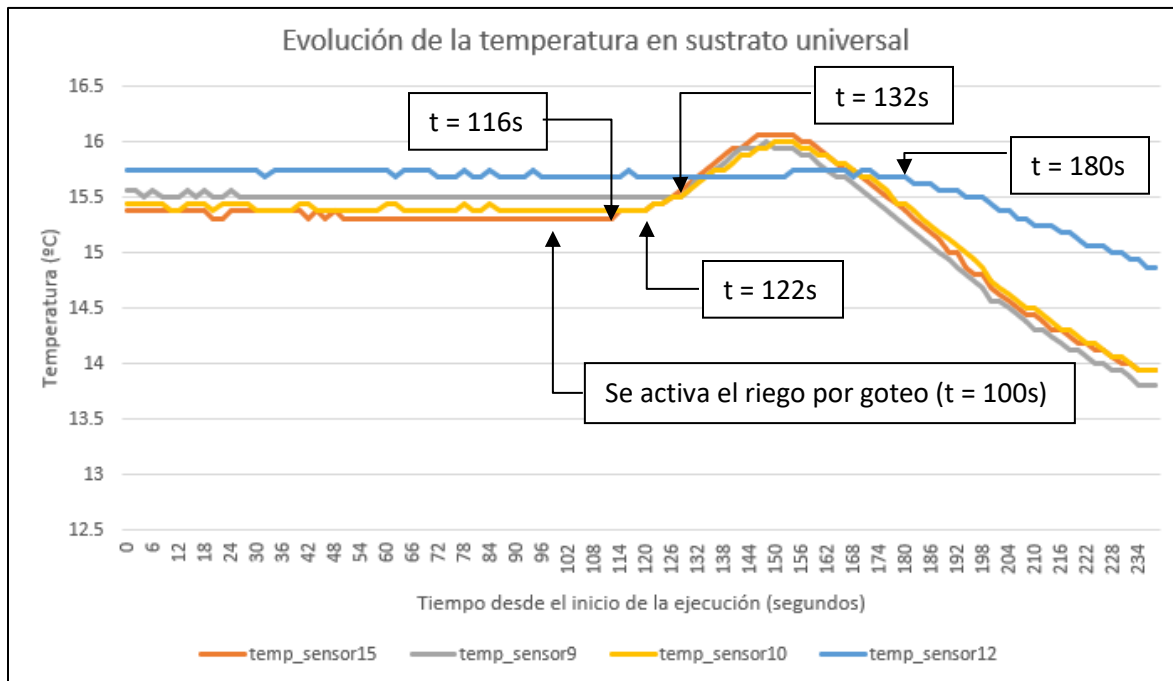


Figura 47. Evolución de la temperatura registrada por los sensores en el cuarto experimento (sustrato universal).

Como se puede ver en la figura 47 y al igual que en la prueba anterior, el primer sensor en detectar un cambio en la temperatura es el más próximo al gotero (el sensor nº15), mientras que el último en hacerlo es el más alejado (sensor nº12).

También se puede apreciar que los sensores nº15, 9 y 10 detectan una subida de temperatura muy similar, mientras que el sensor nº12 solo registra una bajada de temperatura. En el vídeo realizado (ver Anejo II) se puede ver que en esta prueba el agua avanza mucho más lentamente en superficie (lo que indica que se infiltra más rápido verticalmente). Esto hace que dé tiempo a que el agua se enfríe en superficie antes de alcanzar el último sensor, lo que explicaría que no detecte ninguna subida de temperatura.

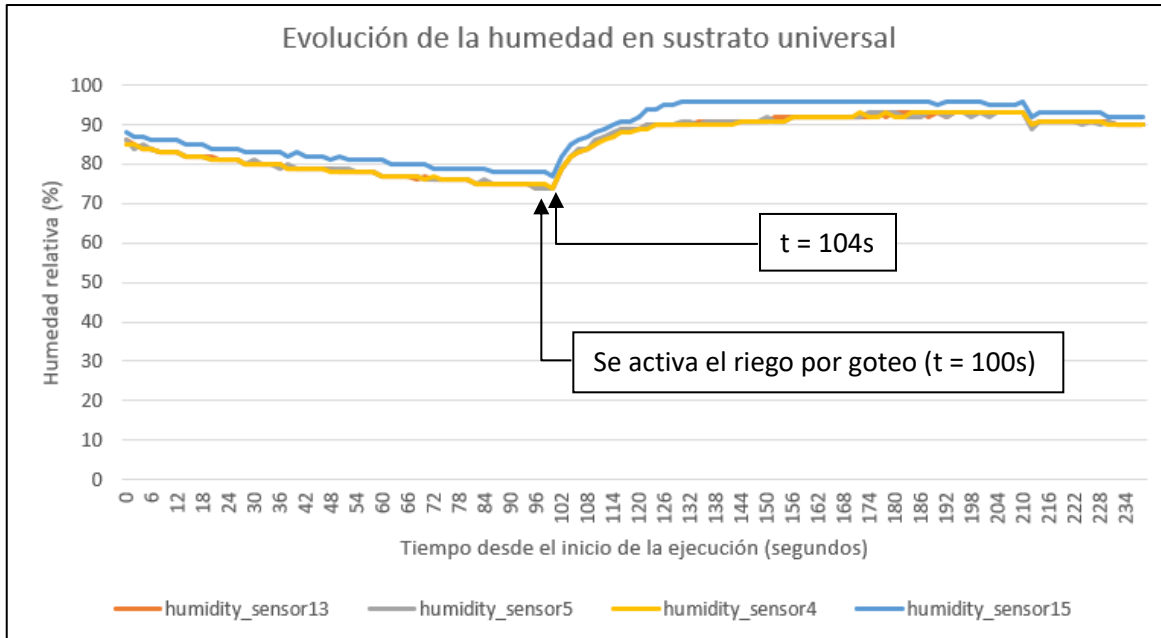


Figura 48. Evolución de la humedad registrada por los sensores en el cuarto experimento (sustrato universal).

En la figura 48 se puede observar que los cuatro sensores de humedad detectan un cambio drástico en la conductividad eléctrica del suelo en el mismo instante (a los 104s después del inicio de la ejecución).

A diferencia de las otras pruebas, en ésta las condiciones iniciales de los sensores de humedad son muy similares (todos marcan alrededor de 85% de humedad inicial). Sin embargo, al igual que en todas las pruebas en las que se ha utilizado un gotero como emisor de agua, las lecturas de los sensores de humedad no ilustran el avance real del agua.

La tercer y última prueba se ha realizado en la maceta con arena fina, activando el riego a los 100 segundos después del inicio de la ejecución aproximadamente, obteniendo entonces los siguientes resultados:

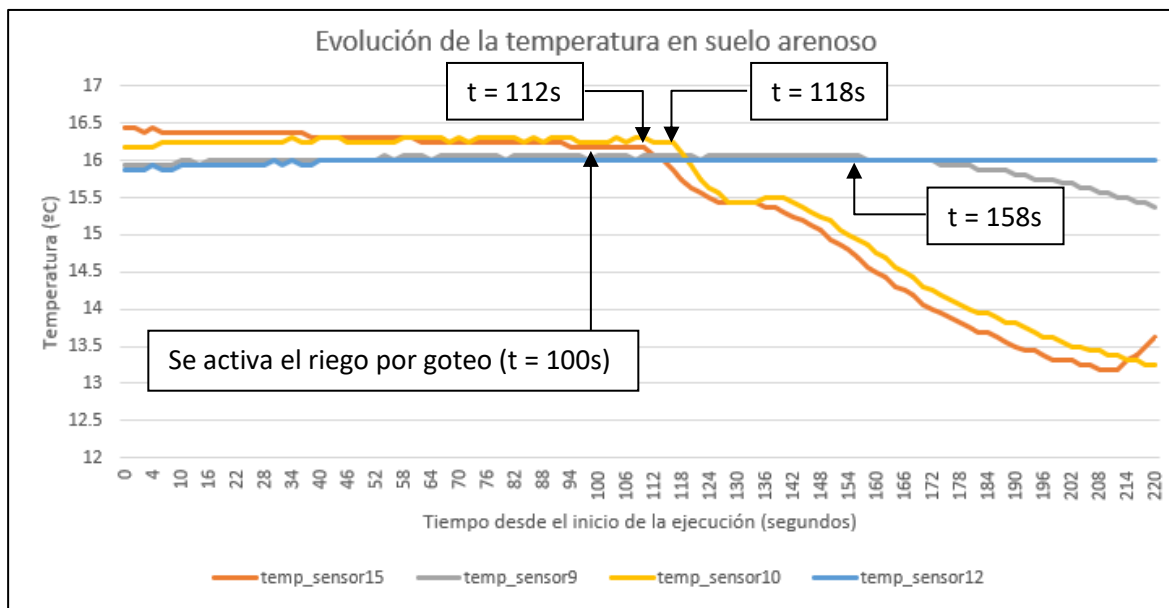


Figura 49. Evolución de la temperatura registrada por los sensores en el cuarto experimento (arena fina).

Como se puede observar en la figura 49, el primer sensor en detectar una bajada de la temperatura es el más próximo al gotero (sensor nº15) mientras que el sensor más alejado (nº12) no detecta ningún cambio en la temperatura. Esto ilustra bien el avance del agua en esta prueba (ver Anejo II) ya que el agua solo alcanza los dos primeros sensores en superficie. El sensor nº9 detecta una bajada de temperatura mucho más suave a los 158s (40s después de que el sensor nº10 detecte un cambio de temperatura), lo que indicaría que el agua alcanza al sensor entre 0 y 4cm de profundidad (que es la longitud del sensor enterrado).

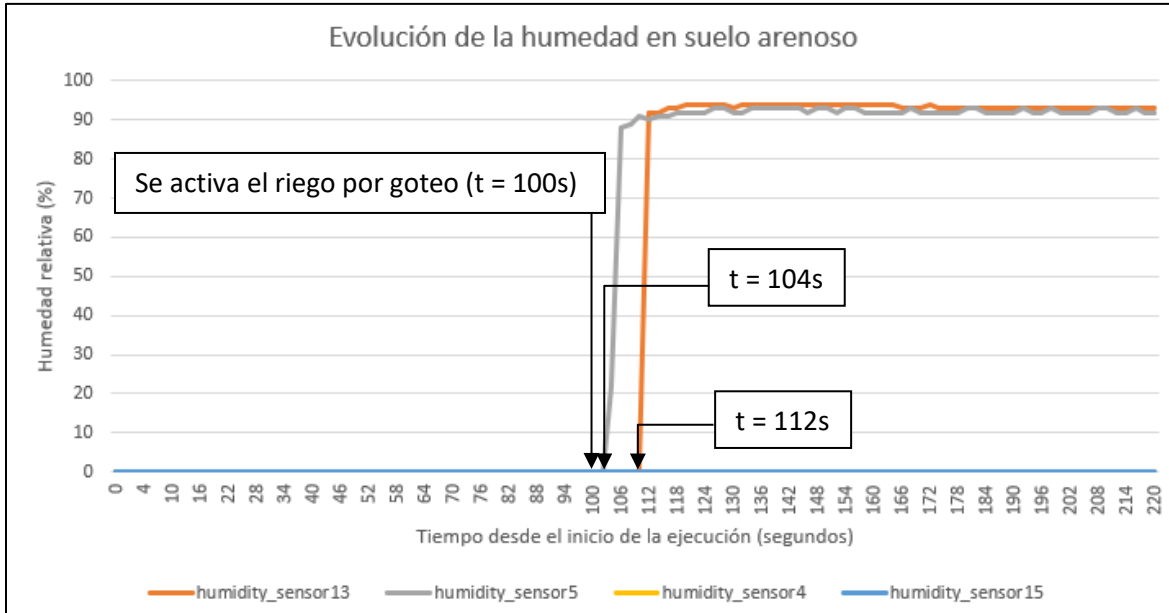


Figura 50. Evolución de la humedad registrada por los sensores en el cuarto experimento (arena fina).

En la figura 50 se puede ver claramente que los sensores de humedad nº 4 y 15 (los dos más alejados) no detectan ningún cambio en la humedad. El sensor más próximo al gotero (sensor nº5) detecta un cambio drástico a los 104s después del inicio de la ejecución mientras que el nº13 lo detecta a los 112s.

Esta prueba ofrece resultados interesantes dado que las condiciones iniciales de los sensores de humedad son iguales para todos (0% de humedad inicial). Este experimento es el único (de los que se han realizado con gotero) en el que los datos recogidos por los sensores de humedad ilustran correctamente el avance del agua, lo que parece indicar que, a partir de cierto nivel de humedad inicial en el suelo, cualquier adición de agua altera la conductividad eléctrica en toda la zona ya humedecida, por lo que los sensores de humedad detectan ese cambio en el mismo instante.

3.3 Planificación y costes del proyecto

El material utilizado para el conjunto del trabajo se resume en la siguiente tabla:

Cantidad	Componente	Unidad (€)	Total unidades
15	Sensor de humedad del suelo	8.9	133.5
15	Sonda de temperatura DS18B20	10	150
3	Sensor DHT22	8.8	26.4
10	Microcontrolador ESP32	8.99	89.9
1	Saco arena fina (20Kg)	32.8	32.8
1	Sustrato universal (20L)	11	11
10	Protoboard	3	30
2	Cables de conexión (pack de 100)	7	14
3	Tubo de PVC (2m)	1.48	4.44
1	Cable micro-USB (pack de 6)	14	14
1	Cinta adhesiva doble cara	5.39	5.39
1	Caja protectora	6.23	6.23
	TOTAL		517.66

Tabla 5. Costes del proyecto.

Además de todo esto se han utilizado los siguientes elementos (adquiridos de forma previa e independiente al trabajo):

- Probeta de plástico de 100mL (para poder medir el caudal del riego).
- Sistema de riego por goteo regulable.
- Talador eléctrico (para perforar el tubo de PVC y poder insertar los sensores).
- Cutter.
- Pelador de cables.

4. Discusión y conclusiones

4.1 Síntesis. Sumario de contribuciones

Este trabajo ha servido para concluir que las sondas de temperatura DS18B20 permiten detectar con precisión el avance del agua en distintos tipos de suelo (y a distintas temperaturas), al mismo tiempo que ha permitido descartar completamente los sensores de humedad YL-69/HL-69. Con ello se ha propuesto un prototipo de red de sensores que automatiza la ingesta de datos, eliminando la dificultad física y técnica de realizar pruebas de campo de manera tradicional y agilizando también los estudios sobre la infiltración del agua en suelos agrícolas. Si bien es cierto que existen muchos otros tipos de sensores (especialmente sensores de humedad del suelo), los sensores de temperatura DS18B20 ofrecen muy buenos resultados, tienen un coste relativamente bajo y ofrecen la ventaja de poder ser conectados en serie. El prototipo propuesto puede servir de precedente para el diseño de un instrumento preciso y práctico para los ingenieros agrícolas a la hora de diseñar instalaciones de riego por goteo o bien a la hora de realizar estudios sobre la infiltración del agua en suelos agrícolas.

4.2 Limitaciones y dificultades encontradas

Dada la situación excepcional en la que nos encontramos, ha sido imposible reunirme físicamente con mis tutores, dado que vivo y trabajo en Barcelona (estuve en Madrid sólo mientras cursaba las asignaturas del Máster). Esto ha complicado la realización del presente trabajo. En un principio se iba a realizar el experimento en la ETSISI, haciendo uso también de los laboratorios para montar la circuitería y realizar las pruebas. Sin embargo todo esto no ha sido posible debido a la pandemia que vivimos actualmente, por lo que he tenido que realizar en casa tanto el montaje como las distintas pruebas. Inicialmente el experimento iba a realizarse en una jardinera lo suficientemente grande como para enterrar las piquetas de 1 metro de profundidad, pero finalmente, por las razones ya comentadas, se optó por modificar el experimento, utilizando macetas de unos 4L y con distintos tipos de tierra.

Otra limitación encontrada ha sido el hecho de no poder conectar más de cuatro sensores analógicos mientras se esté usando el módulo Wi-Fi del microcontrolador ESP32. Esto es algo que desconocía al diseñar el sistema, por lo que tuvo que modificarse para que incorporase únicamente cuatro sensores de humedad (y por tanto cuatro sensores de temperatura, ya que van en pares).

4.3 Impactos éticos, sociales y ambientales

Este sistema de detección del avance del agua puede ser una herramienta más para facilitar y mejorar el diseño de sistemas de riego por goteo, promoviendo su uso. Teniendo en cuenta que hoy en día la mayor parte del terreno irrigado se hace mediante técnicas tradicionales, la conversión a sistemas de riego más eficientes (como el riego por goteo) puede tener un impacto ambiental muy positivo, sobretodo en las regiones donde el agua es un recurso escaso. A esto hay que añadir que la productividad de los cultivos aumenta con una dosis de agua adecuada y una distribución homogénea, en acorde con la zona radicular de los mismos. Con todo ello se podría conseguir, por un lado, reducir el consumo de agua por parte del sector agrícola, siendo este el principal consumidor de agua a nivel mundial. Por otro lado, se incrementaría la productividad de las explotaciones agrícolas, lo que se traduciría (en principio) en una mayor renta para los agricultores, mejorando entonces su calidad de vida.

4.4 Implicaciones, prospectiva y cómo extender el trabajo

A partir de este estudio se podría perfeccionar el instrumento para la medición del avance del agua (la pica), sobretodo en términos de durabilidad (mejores materiales, mejor aislamiento...). El siguiente paso sería elaborar un método estándar para la obtención de modelos de infiltración del agua en el suelo, según el tipo de suelo y otras características edafoclimáticas. De esta manera sería más fácil tanto la realización como la comparación entre los distintos estudios que giran en torno a lo mismo.

Como se ha comentado al principio, este trabajo pretende complementarse con el software presentado como TFG por el autor, que automatiza el diseño de instalaciones de riego por goteo. Es por ello que, a largo plazo, la idea es utilizar este sistema para elaborar modelos numéricos, analíticos y/o empíricos, para describir la evolución del bulbo húmedo en el suelo y no depender de una prueba de campo para poder realizar el diseño de la instalación (solo con conocer el tipo de suelo y sus principales características debería bastar).

4.5. Objetivos de desarrollo sostenible

Este trabajo ha sido becado por el Campus Sostenible de la UPM (Res2 + U), en el que los proyectos deben abordar alguno de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible definidos por Naciones Unidas. A continuación se listan los ODS a los cuales se cree haber contribuido, y porqué:

- **ODS nº12:** Producción y consumo responsables.

La implementación de sistemas de riego modernos, si se lleva a cabo adecuadamente (con diseños bien realizados), supone un salto drástico en la eficiencia del uso del agua. Esto significa en el fondo que los cultivos aprovechan una parte mucho mayor del agua suministrada. De esta manera podemos hablar de una producción responsable, puesto que se optimiza el uso de los recursos.

- **ODS nº13:** Acción por el clima.

La transformación de los sistemas de regadío conlleva una reducción del uso del agua por parte del sector agrícola. Esto se traduce en un menor agotamiento de ríos, acuíferos y lagos, lo que a su vez ralentiza los procesos de desertificación.

- **ODS nº15:** Vida de ecosistemas terrestres.

Similarmente al punto anterior, la conservación de ríos, acuíferos y lagos favorece directamente la conservación de la biodiversidad y por tanto de los ecosistemas que forman.



5. Agradecimientos

Deseo expresar mi agradecimiento al Tribunal por el esfuerzo que supone haber adelantado la fecha de mi defensa, sobretodo teniendo en cuenta la situación excepcional en la que nos encontramos. Muchas gracias.

También deseo agradecer de manera especial al profesor Bernardo Tabuenca ya que sin su ayuda no habría podido terminar a tiempo mi trabajo. El apoyo a nivel técnico, científico y académico ha sido clave para el desarrollo del presente estudio.

Gracias también a Carlos Gilarranz, Vicente García Alcantara y a Samuel Barrado por impulsarme a llevar a cabo el proyecto, por asesorarme desde el principio y por ayudarme en todo lo posible.

Por último deseo agradecer a los profesores y profesoras del Máster en Software de Sistemas Distribuidos y Empotrados de la ETSISI, por abrirme un mundo de posibilidades que desconocía prácticamente en su totalidad y que sin duda aprovecharé en mi vida personal y profesional.

Referencias

- AQUASTAT Main Database – FAO (2016). Food and Agriculture Organization of the United Nations. Url de acceso: <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/index.html>
- Arviza, J.V (1996). Riego localizado. Universidad Politécnica de Valencia (Servicio de publicación).
- Bakhtiar, K., Parva, M., Hadi, S., Sinan, Q. S. & Zaher, M. Y (2020). *Modelling wetted areas of moisture bulb for drip irrigation systems: An enhanced empirical model and artificial neural network*. Computers and Electronics in Agriculture, volume 178.
- Cañas, J. R., Sierra, A. Z., Requena, R. R. & Pérez, M.M (2020). *Study of the wet bulb in drip irrigation in stratified soils using HYDRUS*. 22nd EGU General Assembly (held on-line 4-8 May, 2020 – BibCode: 2020EUGA..22.4575R).
- Ecologistas en Acción – Almería (2004). *Los problemas del agua en Almería*. Obtenido de: https://spip.ecologistasenaccion.org/IMG/pdf/Agua_H20.pdf
- Espressif Systems (2016). *ESP-IDF Programming Guide*. Obtenido en: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/index.html>
- Gil-Marín, J. (2001). *Forma y dimensiones del bulbo húmedo con fines de diseño de riego por goteo en dos suelos típicos de sabana*. Departamento de Ingeniería Agrícola, Escuela de Ingeniería Agronómica de la Universidad de Oriente (Núcleo de Monagas).
- Gleick, P.H et al. (2014). *The World's Water: The Biennial Report on Freshwater Resources*. Washington, DC: Island Press.
- Ismail, S.M., Zin El-Abedin, T.K. & Wassif, M.A. (2006). *Wetting pattern simulation of surface and subsurface drip irrigation systems I-Model development*. Journal of Agriculture Engineering, 23(3), 715-740.
- Ismail, S.M., Zin El-Abedin, T.K. & Wassif, M.A. (2006). *Wetting pattern simulation of surface and subsurface drip irrigation systems II-Model validation and analyses*. The 14th Annual Conference of Misr Society of Agricultural Engineering 24.
- Karmeli, D., Peri, G. & Todes, M. (1985). *Irrigation Systems: Design and Operation*. Oxford University.

Loizu, M. (2018). *Automatització del càlcul i el disseny de subunitats de reg localitzat en cultius hortícoles i parcel·les rectangulars*. Escola Superior d'Agricultura de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya. Obtenido de:
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/123141/memoria.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

MAPA – Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (2017). *Encuesta sobre superficies y rendimientos de cultivos*. Obtenido de:
<https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/agricultura/esyrce/>.

Martínez, R. (2020). *Sistema para la caracterización del bulbo húmedo en riego localizado*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sistemas Informáticos, Universidad Politécnica de Madrid.

Richie, H. & Roser, M. (2017). *Water Use and Stress*. Publicado on-line en:
<https://www.ourworldindata.org/water-use-stress>.

Simunek, J.J., Šejna, M. & Van Genuchten, M. Th (1998). *The Hydrus software package for simulating the two- and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated porous media (Technical Manual, version 2.0)*. University of California Riverside, Department of Mechanical Engineering (Federal University of Rio de Janeiro) & PC Progress (Prague).

Skaggs, T. & Trout, T. J. (2004). *Comparison of Hydrus-2D simulations of drip irrigation with experimental observations*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 130(4).

World Bank (2008). *World Development Report (2008): Agriculture for Development*. Washington, DC: World Bank.

Anejo I: Análisis de laboratorio de la tierra franco-arenosa.

Laboratori Agroambiental
 Applus Agroambiental, S.A.
 Partida Satsambis, s/n
 25222 Sidamon (Lleida)
 T 973 71 70 00
 F 973 71 70 33
 agroambiental@appluscorp.com
 www.appluscorp.com

ENAC
ENAC

Applus⁺

BUTLLETÍ D'ANÀLISIS

DADES IDENTIFICATIVES DEL CLIENT	
NOM:	ADRICAMP, SL (12314)
ADREÇA:	Pol. Ind. Pont del Príncep 17400 VILAMALLA

DADES IDENTIFICATIVES DE LA MOSTRA		T.M.:	
TIPUS DE MOSTRA:	Sòls	LOCALITZACIÓ:	
S/REFERÈNCIA:	SÒL	POL:	
CODI/MOSTRA:	01203212/1	PARCEL·LA:	
DATA/HORA ARRIBADA:	09/09/2013 09:05	CULTIU:	
MENÚ / ANÀLISI:	S90	VARIETAT:	
PORTADOR:	Transportista		

Les incerteses de les determinacions acreditades per ENAC estan calculades i a disposició del client.
 Les interpretacions estan excloses de l'abast de l'acreditació.
 (*) Determinació no acreditada

Anàlisi	Resultat	Unitats	Mètode d'anàlisi / P/N	Interpretació
HUMITAT 105 °C	<1,0	%	Gravimetria/CS110007	
pH (ext. 1:2,5 H ₂ O)	7,9		Potenciometria/CS110008	Moderadament bàsic
COND. ELEC. 25°C (ext. 1:5 H ₂ O)	0,23	dS/m	Conductimetria/CS110009	No limitant
MAT. ORGÀNICA (WSB) *	1,97	% s.m.s.	Càlcul	Mitja
CARBONAT CàLCIC EQUIV. *	4	% s.m.s.	Potenciometria	Inapreciable
NITRÒGEN NITRÍC (N-NO ₃) *	60	mg/kg s.m.s.	Colorimetria	Molt alt
FOSFOR (P) (Olsen) *	39	mg/kg s.m.s.	Espectrofotometria UV-VIS	Alt
POTASSI (K) (ext. acetat amònic) *	285	mg/kg s.m.s.	Espectrometria ICP-OES	Alt
CÀLCI (Ca) (ext. acetat amònic) *	5085	mg/kg s.m.s.	Espectrometria ICP-OES	Alt
MAGNESI (Mg) (ext. acetat amònic) *	147	mg/kg s.m.s.	Espectrometria ICP-OES	Normal
RODONS (ext. acetat amònic) *	60	mg/kg s.m.s.	Espectrometria ICP-OES	Normal
ARENA TOTAL (0,05 < D < 2 mm) *	57,2	%	Gravimetria	
LLM GROS (0,02 < D < 0,05 mm) *	11,0	%	Gravimetria	
LLM FI (0,002 < D < 0,02 mm) *	18,4	%	Gravimetria	
ÀRGILA (D < 0,002 mm) *	13,4	%	Gravimetria	
CLASSE TEXTURAL USDA *				Frango-arenosa

RESUM DE RESULTATS FORA DE L'ABAST D'ACREDITACIÓ

Anàlisi	Resultat	Unitats
HUMITAT 105 °C	0,6	%

Responsable Tècnic
 M. PILAR NURILLO
P. Nurillo

DATA INICI: 13/09/2013
 DATA FI ANÀLISI: 02/10/2013
 DATA D'EMISSIÓ: 02/10/2013

Certificat per SSI segons la norma ISO 9001:2000. Certificat Núm. 538845.
 Autoritzat per la Direcció General de Salut Pública. Núm. Registre RI-100-00.
 Establiment Tècnic Auxiliar de l'Agència Catalana de l'Aigua (ACA).
 Laboratori d'Assaigs per al Control de Qualitat de l'Edificació amb Declaració Responsable núm. LD600004 presentada a la Generalitat de Catalunya en data 01/10/10.
 Reconegut pel DAR. Núm. Registre 212.
 Garantia de Qualitat de Servei

Applus+, garantia que aquest treball s'ha realitzat dins d'allò exigible pel nostre Sistema de Qualitat i Sostenibilitat, havent-se complert les condicions contractuals i la normativa legal.
 En el marc del nostre programa de millora, els agrairèm que ens transmetin qualsevol comentari que considerin oportú, adreçant-se al responsable que signa aquest escrit, o bé, al Director de Qualitat d'Applus+, a l'adreça: satisfaccio.cliente@appluscorp.com

Pàgina 1 de 1

Les dades que es mostren a partir de l'informe acreditat de l'empresa i dels seus clients per a la finalitat de les condicions contractuals d'acord amb el que disposa la Llei 16/1999 sobre Protecció de Dades de Caràcter Personal. Pot ser rebuda sense cap cost, modificació i cancel·lació a l'adreça indicada en aquestes dades.

ES MEXICANA OBTINGIT COME DIVERS B. DE MEXICANA QUALITAT

APPLUS AGROAMBIENTAL, S.A. inscrita en el Registre Mercantil de Lleida, Tom 24, Folí 123, Secció 8, Full 1422-inscripció I.a. C.I.F. A20244849



Anejo II: Enlaces del contenido audiovisual.

Vídeo de la prueba 4-1 (con suelo franco-arenoso): <https://youtu.be/IPF5y3F04VE>

Vídeo de la prueba 4-2 (con sustrato universal): https://youtu.be/AjjizN7_fQE

Vídeo de la prueba 4-3 (con arena fina): <https://youtu.be/1t3Xerq1IAs>



Anejo III: Enlaces código GitHub.

Todo el código está subido en GitHub, en un solo archivo ("ESP32_CODE.ino"). Se puede acceder al repositorio mediante este enlace: https://github.com/Loizu/TFM_MSSDE.

Índice de Figuras

Figura 1. Consumo de agua por parte de la agricultura respecto al gasto total, según el nivel de ingresos del país	7
Figura 2. Mapa de aridez de España	8
Figura 3. Riego por inundación	9
Figura 4. Riego por aspersión	9
Figura 5. Riego por goteo	9
Figura 6. Triángulo de texturas	10
Figura 7. Forma del bulbo húmedo formado por un gotero según el tipo de suelo	10
Figura 8. Esquema del sistema implementado (red de sensores encapsulada en tubo de PVC (pica), conectada vía Wi-Fi a un servidor local)	16
Figura 9. Sensor de humedad del suelo YL-69/HL-69	17
Figura 10. Sensor de humedad corroído	17
Figura 11. Sonda de temperatura DS18B20	18
Figura 12. Esquema electrónico de la conexión del bus de sensores DS18B20 mediante el protocolo 1-Wire	18
Figura 13. Sensor DHT-22	19
Figura 14. Características del sensor DHT-22	19
Figura 15. Microcontrolador ESp32-WROOM Devkit	20
Figura 16. Interfaz del programa XAMPP	21
Figura 17. Interfaz de gestión phpMyAdmin	22
Figura 18. Script php para automatizar la inserción de datos vía el servidor MySQL alojado en local.....	24
Figura 19. Esquema del circuito electrónico implementado	25
Figura 20. Asignación de los pines de conexión para los sensores de humedad del suelo	26

Figura 21. Obtención de los datos leídos por los sensores de humedad	26
Figura 22. Asignación del pin de conexión para el bus de sensores (oneWireBus)	27
Figura 23. Identificadores únicos de las sondas de temperatura, en formato decimal	27
Figura 24. Inicialización del programa (función 'setup)	28
Figura 25. Obtención de las lecturas registradas por los sensores de temperatura, en grados Celsius	28
Figura 26. Construcción de la cadena de conexión para la realización de una petición GET	29
Figura 27. Definición de las variables necesarias para la conexión a la red Wi-Fi y la posterior comunicación con el servidor	29
Figura 28. Visualización de los datos recogidos por el servidor a través del interfaz phpMyAdmin.....	30
Figura 29. Taladro eléctrico	31
Figura 30. Cutter	31
Figura 31. Tubo de PVC perforado para la inserción de los sensores	31
Figura 32. Inserción de los sensores de temperatura a través del interior del tubo	32
Figura 33. Vista aérea de la circuitería y la caja protectora	32
Figura 34. Vista transversal de la circuitería y la caja protectora	32
Figura 35. Vista transversal de la caja cerrada	33
Figura 36. Vista aérea del montaje llevado a cabo para la realización de las tres primeras pruebas.....	34
Figura 37. Evolución de la temperatura registrada por lo sensores a lo largo del primer experimento	35
Figura 38. Evolución de la humedad registrada por lo sensores a lo largo del primer experimento.....	36
Figura 39. Evolución de la temperatura registrada por lo sensores a lo largo del segundo experimento.....	37

Figura 40. Evolución de la humedad registrada por lo sensores a lo largo del segundo experimento.....	38
Figura 41. Evolución de la temperatura registrada por lo sensores a lo largo del tercer experimento	39
Figura 42. Evolución de la humedad registrada por lo sensores a lo largo del tercer experimento.....	40
Figura 43. Fotografía del estado de la tierra al apagar el riego por goteo (1200s después del inicio del experimento)	41
Figura 44. Fotografía del montaje realizado para el cuarto experimento, utilizando tres tipos de tierra (arena fina, sustrato universal y tierra franco-arenosa)	42
Figura 45. Evolución de la temperatura registrada por los sensores en el cuarto experimento (suelo franco-arenoso)	43
Figura 46. Evolución de la humedad registrada por los sensores en el cuarto experimento (suelo franco-arenoso)	44
Figura 47. Evolución de la temperatura registrada por los sensores en el cuarto experimento (sustrato universal)	45
Figura 48. Evolución de la humedad registrada por los sensores en el cuarto experimento (sustrato universal)	46
Figura 49. Evolución de la temperatura registrada por los sensores en el cuarto experimento (arena fina)	47
Figura 50. Evolución de la humedad registrada por los sensores en el cuarto experimento (arena fina)	48

Índice de Tablas

Tabla 1. Fórmulas de Karmelli, Peri y Todes (1985)	11
Tabla 2. Estructura de la tabla (sensorsdata_test1) creada en la base de datos	23
Tabla 3. Número de identificación único de las sondas de temperatura DS18B20.....	27
Tabla 4. Resultados de la prueba para la determinación del caudal del gotero utilizado.....	39
Tabla 5. Costes del proyecto	45