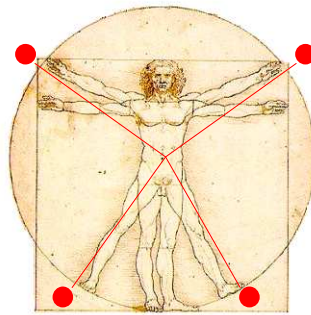


TECNOLOGÍ@ y DESARROLLO

Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente

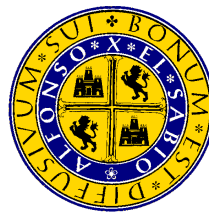
VOLUMEN XI. AÑO 2013

SEPARATA



MINI-TANQUE DE EVAPORACIÓN CLASE A Y PLUVIÓMETRO DE
BALANCÍN: SENSORES OPCIONALES PARA EL DISPOSITIVO ARDUDROP

Miguel Ángel de Pablo Hernández y C. de Pablo S.



UNIVERSIDAD ALFONSO X EL SABIO
Escuela Politécnica Superior
Villanueva de la Cañada (Madrid)

© Del texto: Miguel Ángel de Pablo Hernández y C. de Pablo S.
Mayo, 2013

http://www.uax.es/publicaciones/archivos/TECMAD13_001.pdf

© De la edición: *Revista Tecnol@ y desarrollo*

Escuela Politécnica Superior.

Universidad Alfonso X el Sabio.

28691, Villanueva de la Cañada (Madrid).

ISSN: 1696-8085

No está permitida la reproducción total o parcial de este artículo, ni su almacenamiento o transmisión ya sea electrónico, químico, mecánico, por fotocopia u otros métodos, sin permiso previo por escrito de la revista.

Tecnol@ y desarrollo. ISSN 1696-8085. Vol.XI. 2013.

MINI-TANQUE DE EVAPORACIÓN CLASE A Y PLUVIÓMETRO: SENSORES OPCIONALES PARA EL DISPOSITIVO ARDUDROP

Miguel A. de Pablo Hdez.¹ y C. de Pablo S.

(1) Departamento de Geología. Universidad de Alcalá. Edificio de Ciencias. Campus Externo. Ctra. A-II km 33,600. 28871 Alcalá de Henares, Madrid. España. miguelangel.depablo@uah.es

RESUMEN:

En este trabajo se presentan dos nuevos sensores para el dispositivo electrónico ArduDrop, dirigido al estudio de la evolución de la humedad del suelo y su relación con parámetros ambientales. Estos dos nuevos sensores son un pluviómetro de balancín y un mini-tanque de evaporación, desarrollados para medir la precipitación y la evaporación, aumentando así, opcionalmente, las variables medidas por este dispositivo. Su conexión es opcional porque requieren un mantenimiento más elevado que el originalmente planificado para este dispositivo. Ambos dispositivos han sido creados con una electrónica muy reducida que simplifica su desarrollo y mantenimiento. Finalmente, se presentan algunos códigos de programación para el uso de ambos sensores con ArduDrop.

PALABRAS CLAVE: *Agua, Precipitación, Evaporación, Sensores, Open-hardware, Arduino.*

ABSTRACT

In this work two new sensors are presented for the electronic device, ArduDrop, focused on the study of the evolution of soil moisture and its relation to environmental parameters. These two new sensors are a rain gauge and a mini-evaporation tank developed to measure precipitation and evaporation, thus increasing optionally variable measured by this device. Their connection is optional because they require higher maintenance than originally planned for this device. Both devices have been created with a very small electronics that simplifies development and maintenance. Finally, some examples of programming codes are included for use both sensors with ArduDrop device.

KEY-WORDS: *Water, Precipitation, Evaporation, Sensors, Open-hardware, Arduino.*

SUMARIO: 1. Introducción, 2. Fundamento teórico, 3. Minitanque de evaporación Clase A, 4. Pluviómetro de balancín, 5. Aplicaciones, 6. Mejoras del dispositivo, 7. Conclusiones, 8. Agradecimientos, 9. Referencias, 10. Direcciones web, 11. Anexos

http://www.uax.es/publicaciones/archivos/TECMAD13_001.pdf

1. Introducción

El dispositivo electrónico ArduDrop (de Pablo, 2010 y 2011) ha sido diseñado para la adquisición de datos ambientales y del suelo con el objetivo de establecer la humedad edáfica. Para ello, el dispositivo se diseñó con una dotación de sensores que permitían derivar, no sólo el estado de la humedad del suelo, sino también las necesidades hídricas de la vegetación (natural o agrícola) y, en definitiva, realizar una gestión adecuada de los recursos hídricos, especialmente en aquellos lugares con menores recursos económicos, ya que este dispositivo está basado en el uso de hardware libre y mediante sensores comerciales de bajo coste (de Pablo, 2010 y 2011).

Una característica importante del dispositivo ArduDrop es que está diseñado para la adquisición de datos a lo largo de un año de forma autónoma y sin mantenimiento alguno, con la grabación de los datos en una tarjeta de memoria SD. Estos datos son recuperados anualmente y procesados con el fin de establecer las necesidades hídricas a lo largo de las distintas estaciones y épocas agrícolas. Sin embargo, el usuario final podría requerir de estos datos en un periodo de tiempo mucho menor, incluso de forma diaria. Aunque es posible obtener los datos del dispositivo cada vez que sea preciso, existe la posibilidad de realizar esta cuantificación mediante un tanque de evaporación, ya que la observación directa de la evaporación ya daría, por sí misma, una indicación de las necesidades hídricas de la zona. El tanque de evaporación requiere un mantenimiento frecuente para evitar la reducción del agua del tanque o su colmatación por parte de las lluvias (además de su limpieza). En función del diseño del tanque de evaporación, éste también serviría para poder medir la precipitación. Sin embargo, para realizar esto de una forma más precisa, es conveniente el uso de un pluviómetro que permita realizar medidas más directas, finas y completas. Así, con los datos de precipitación, evaporación y temperatura, podría realizarse un balance hídrico en el punto de estudio, para periodos de tiempo más cortos, aunque con un mantenimiento algo mayor que el originalmente pensado para el dispositivo ArduDrop.

Por este motivo, y para cubrir las posibles necesidades de algunos usuarios, se han desarrollado dos nuevos sensores para el dispositivo ArduDrop, un minitanque de evaporación de tipo Clase A (Sleight, 1917; Allen et al., 1998), y un pluviómetro de balancín, con los que medir de forma continua la evaporación y la precipitación, respectivamente. Estos sensores son opcionales para el dispositivo ArduDrop, ya que requieren un mantenimiento muy frecuente, algo que está fuera de los objetivos iniciales del dispositivo. Sin embargo, por el interés del usuario final, podrían conectarse con los demás sensores del dispositivo. Los datos adquiridos por estos sensores, quedarían grabados en la tarjeta de memoria SD del dispositivo, de tal forma que podrían ser analizados junto con el resto de los datos procedentes de los demás sensores, completando

los parámetros ambientales conocidos de la zona. Además, como ya se ha mencionado, el control de la evaporación y de la precipitación permitirían, junto con los datos de temperatura del aire adquiridos por el dispositivo ArduDrop, realizar un balance hídrico (ej., Sokolov and Chapman, 1981), lo que, sin duda, ayudaría a interpretar y discutir los datos de humedad y temperatura del suelo (de Pablo, 2010 y 2011).

Por otro lado, el tanque de evaporación diseñado podría emplearse, incluso sin la necesidad del dispositivo ArduDrop, simplemente mediante la medida directa de la altura de la lámina de agua en el tanque por el operador del dispositivo, realizando a la vez el mantenimiento requerido por este tipo de dispositivos (control de la cantidad de agua disponible en el mini-tanque) y su limpieza.

Aunque este tipo de dispositivos ya existe de forma comercial, sus grandes dimensiones y las necesidades de agua y mantenimiento son mayores, a la vez que los sensores para la medición automática y continua del nivel del agua, relativamente elevados. La sencillez de estos dispositivos y el bajo coste de los sensores necesarios para su desarrollo los hacen ideales para ser incluidos como sensores del dispositivo ArduDrop, dejando a la elección del usuario su conexión en función de sus necesidades y objetivos. En cualquier caso, los dos sensores que aquí se presentan han tenido los siguientes condicionantes: (1) bajo coste, (2) bajo mantenimiento, (3) bajas necesidades de agua, y (4) compatibilidad con el dispositivo ArduDrop.

En este trabajo se realiza, en primer lugar, una revisión de los fundamentos teóricos que rigen la medición de la evaporación y la precipitación, y su relación con la evapotranspiración y el balance hídrico en un lugar. A continuación se describe el mini-tanque de evaporación desarrollado, su soporte y la electrónica que lleva asociado para la medición de la evaporación a través del dispositivo ArduDrop. Posteriormente, se muestra un ejemplo de cómo realizar la calibración del mini-tanque de evaporación Clase A. Se seguirá un esquema similar para el pluviómetro con la descripción del mismo, la electrónica requerida para su funcionamiento. En este trabajo se recogen además ejemplos de los códigos (Firmware) en lenguaje C a emplear con el dispositivo ArduDrop para calibrar y adquirir datos. En cualquier caso, no se ha desarrollado un escudo específico para estos sensores, ya que en futuros trabajos se presentará un nuevo diseño del dispositivo ArduDrop que permita la conexión voluntaria de sensores sin necesidad de modificaciones en la electrónica por parte del usuario final, así como otras muchas mejoras en la electrónica y la alimentación del dispositivo. Por último, en este trabajo se muestran algunas de las aplicaciones de los datos recogidos por estos dos sensores en el estudio de la humedad del suelo y del balance hídrico en el terreno.

2. Fundamento teórico

Como ya se ha revisado en los trabajos previos del dispositivo ArduDrop (de Pablo, 2010 y 2011), la abundancia agua en un territorio depende de las condiciones climáticas reinantes, pero su permanencia en él depende de diversos factores como son (1) las características del propio terreno: textura, estructura, permeabilidad, composición química, grado de alteración del terreno, etc., (2) las características topográficas: pendiente, orientación, etc., y (3) la presencia de vegetación: tipo, desarrollo, etc. Todos estos factores condicionan el balance de agua en el terreno (Figura 1) (ej., Thornthwaite, 1948; Palmer and Havens, 1958; Pereira and Pruitt, 2004) de manera que se cumple la siguiente expresión:

$$\text{Entradas} = \text{Salidas} \pm \text{Variación del agua almacenada en el terreno} \quad [1]$$

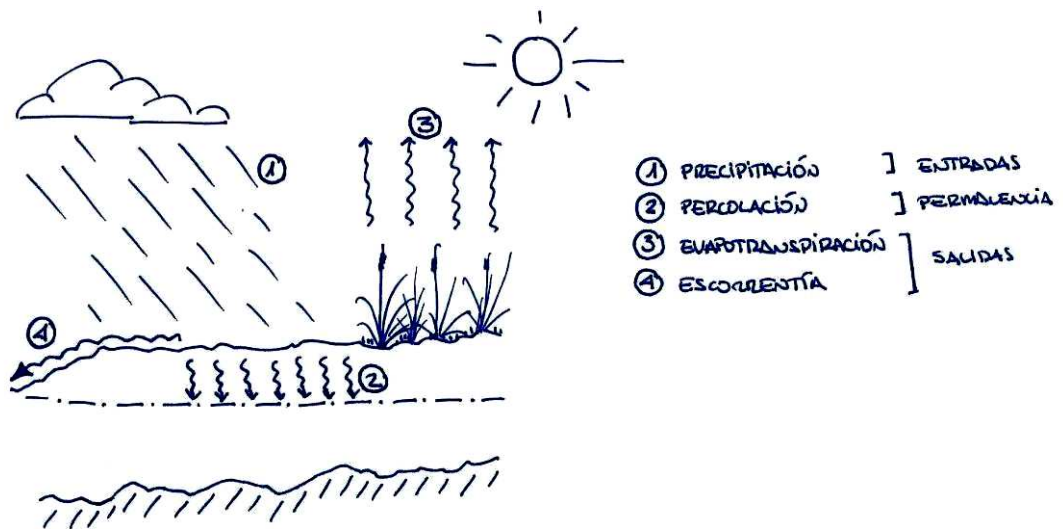


Figura 1: Esquema del balance hídrico en el terreno (de Pablo, 2010)

A su vez, la evapotranspiración es un parámetro que mide la cantidad de agua que se evapora del terreno por efecto de las condiciones ambientales (temperatura, radiación solar incidente, velocidad del viento, etc.), así como por efecto de la transpiración por parte de la masa vegetal existente en el lugar, y que ésta, a su vez, depende del tipo de vegetación, su fase de crecimiento, la época del año, etc. (ej., Allen et al., 1998) así como también de las condiciones ambientales. Evaporación y transpiración se consideran conjuntamente dadas las dificultades para la medida de ésta última, pero la evaporación puede ser más fácilmente medible mediante el uso de tanques de evaporación (Allen et al., 1998).

Estos tanques de evaporación son recipientes de distintos tamaños y formas (aunque estandarizados) que contienen agua que se va evaporando de forma gradual en función de las condiciones ambientales, como se ha mencionado previamente.

Como se ha tratado en trabajos anteriores (de Pablo, 2010 y 2011), y tal y como demuestra una amplia bibliografía (ej., Penman, 1948; Blaney and Cridley, 1950; Papadakis, 1962; Monteith, 1965; Priestley and Taylor, 1972; Jensen, 1974; Doorenbos and Pruitt, 1977; Hargreaves et al., 1985, 2003; Hargreaves and Samani, 1991; Allen et al., 1998; Jacobs et al., 1998) la cuantificación de la evapotranspiración es compleja debido a la variedad de factores implicados, y a las dificultades intrínsecas de la medición. Uno de los métodos más fiables, pero más complejos y costosos para medir este parámetro, son los lisímetros: parcelas de terreno constituidas como sistemas cerrados respecto al terreno circundante, en el que se controla todo el agua entrante y saliente. Las diferencias observadas en éstos es, por tanto, debida a la evapotranspiración. Dada la complejidad de este sistema de medida, se ha optado en muchas ocasiones por separar la medida de la evapotranspiración en evaporación y transpiración, siendo posible medir la primera de ellas y derivar, a partir de ese dato, la evapotranspiración mediante el uso de ecuaciones empíricas basadas en datos experimentales (ej., Allen et al., 1998).

Para medir la evaporación se emplean recipientes (denominados tanques) rellenos de agua en los que se controla el nivel del agua cada 24h (generalmente a las 7h) aunque en ocasiones también cada 12 o 6 horas). La diferencia entre las medidas es, por tanto, la evaporación. Sin embargo, la cantidad de agua evaporada de estos tanques depende a su vez de diversos factores como el tamaño del tanque (diámetro y profundidad), los materiales en los que está construido, el grado de ventilación del recipiente, etc. Para poder tener valores comparativos de evaporación, se han establecido unas características estandarizadas de tanques, existiendo dos tanques de evaporación normalmente empleados:

El primero denominado Clase A, es un recipiente metálico de 120 cm de diámetro y 25 cm de profundidad, que se rellena de agua hasta unos 5 cm por debajo del borde (y nunca puede vaciarse por debajo de 7,5 cm del mismo). Este recipiente está sobreelevado respecto del terreno mediante un soporte de madera (que debe levantar el recipiente del suelo), para favorecer la ventilación y aislar el recipiente del terreno.

El segundo tipo de tanque de evaporación se denomina Sunken Colorado, y consiste en un recipiente cuadrado de metal, de 92 cm de lado y 46 cm de altura, apoyado directamente sobre el terreno. Este recipiente se rellena de agua hasta 5 cm del borde, y nunca debe vaciarse por debajo de 7,5 cm de éste. El mantenimiento de ambos tipos de tanques consiste únicamente en rellenar con agua el recipiente para que se mantenga dentro de los

niveles de trabajo, y aliviarlo de agua en caso de precipitaciones, y la limpieza del mismo (hojas, polvo, etc.).

La diferencia de dos medidas consecutivas de la altura del nivel del agua en el tanque representa la evaporación para ese periodo de tiempo (como se ha mencionado, generalmente de 24 horas), expresado en mm/día. Ese valor depende, no sólo de las características del propio tanque, sino también de las condiciones ambientales, radiación, velocidad del viento, situación y altura de la vegetación circundante, y temperatura y humedad ambiental, principalmente. Por esta razón, los tanques de evaporación suelen ir acompañados de instrumentos meteorológicos (como los incluidos en el dispositivo ArduDrop) para la medida de estos parámetros.

Conocida la evaporación a través de las medidas en el tanque, es necesario calcular la evapotranspiración potencial o de referencia (ET_0). Para ello, existen diversos métodos empíricos basados en múltiples experimentos, mediante los que se deriva la ET_0 a partir de la evaporación medida y de los valores de temperatura, humedad, velocidad del viento, etc. Con dichos modelos se ha comprobado la relación entre la cantidad de agua que se evapora en el tanque y las condiciones climáticas externas.

Dada la sencillez y economía de este método de cálculo de la evapotranspiración mediante tanque de evaporación, es un método muy empleado en todo el mundo. Esto a su vez ha facilitado que existan gran cantidad de datos disponibles de evapotranspiración calculado mediante estas ecuaciones, lo que ha permitido elaborar tablas de referencia en las que se simplifican los valores de éstas ecuaciones para conseguir una expresión como la siguiente:

$$ET_0 \text{ (mm/día)} = K_{\text{pan}} \times E \text{ (mm/día)} \quad [2]$$

donde K_{pan} es la denominada constante del tanque, que varía entre 0 y 1, de tal forma que su valor es 1 cuando la transpiración es nula, y el agua únicamente se evapora, pero no hay plantas que lo transpiren. Diferentes estudios experimentales han permitido tabular los valores de K_{pan} en función de la velocidad del viento, la humedad relativa, o la ubicación del tanque respecto a la vegetación circundante, evitando así el uso de los cálculos matemáticos más elaborados (ej., Allen et al., 1998).

Por otro lado, existen muchos trabajos que estudian la relación entre la evaporación medida (E) y los distintos métodos empíricos de cálculo, llegando a distintas conclusiones en función de las condiciones climáticas de cada región y cada época del año.

Al igual que el tanque de evaporación permite medir las salidas del sistema (ecuación [1]),

las entradas (naturales en forma de precipitación, o artificiales en forma de riego) pueden ser medidas mediante el uso de un pluviómetro. Existen distintos modelos más o menos complejos para la medida de la precipitación, pero el más extendido es el pluviómetro de balancín. Éste tipo de dispositivos consiste en dos recipientes simétricos respecto de un eje sobre el que se balancean al llenarse desde un colector situado inmediatamente por encima que recoge la precipitación en el área cubierta por el colector. La electrónica interna del dispositivo cuenta (mediante distintos mecanismos dependiendo del modelo comercial) el número de balanceos, por lo que sabiendo el volumen de agua que cabe en cada uno de los recipientes del balancín, da una medida de la precipitación en un tiempo determinado en el área cubierta por el colector. El cálculo necesario, por tanto, para obtener la precipitación en mm/m² requiere el uso de la siguiente expresión:

$$P = (B * Vb) / A \quad [3]$$

Siendo P la precipitación medida en mm/m² para el periodo de tiempo considerado; B es el número de balanceos medidos por el dispositivo (adimensional); Vb es la capacidad en mm de agua, de cada uno de los recipientes del balancín; y A es el área del colector del pluviómetro, en m². La medida de la precipitación puede hacerse de forma instantánea, horaria (el total acumulado durante esa hora), diaria (la suma de lo acumulado en todo el día), etc. En función de la aplicación o del objetivo de los cálculos a realizar, se requerirá de uno u otro valor.

Con los datos facilitados por estos dos dispositivos (tanque de evaporación y pluviómetro) y los datos de la temperatura del aire, es posible ya realizar un balance hídrico en el punto de estudio. Así, (1) la suma de la evapotranspiración potencial calculada con los datos del mini-tanque de evaporación clase A, (2) la suma de las precipitaciones medidas con el pluviómetro de balancín, y (3), la media de la temperatura del periodo considerado (generalmente mensual), es posible completar una tabla (Tabla 1) a partir de la cual se realiza el balance hídrico (ej., Sokolov and Chapman, 1981),

	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Anual
T (°C)	14,9	16,1	18,3	19,8	20,5	19,8	19,1	19,2	18,6	17,8	16,3	14,8	
P (mm)	6,9	3,1	5,1	17,7	82,0	179,3	105,0	110,4	138,3	60,0	18,4	5,5	731,7
ET ₀ (mm)	45,7	49,1	70,1	81,5	92,0	84,9	81,9	80,6	71,1	65,2	53,0	45,2	820,2

Tabla 1: Ejemplo de datos necesarios para elaborar un balance hídrico.

3. Mini-tanque de evaporación Clase A

3.1. Descripción del dispositivo

El Mini-tanque de evaporación diseñado es similar a los dispositivos de Clase A, aunque de menores dimensiones y de diferente material, consistente en un recipiente cilíndrico de 6 cm de altura, y 11,4 cm de diámetro, de plástico blanco de 0.5 mm de espesor. Las dimensiones de este recipiente lo hacen suficientemente pequeño para poder ser ubicado en cualquier lugar, sin necesidad de grandes espacios abiertos, mientras que el material del que está construido permite que el agua no se caliente como lo haría si fuese metálico, como los tanques comerciales, lo que, dadas las dimensiones del mini-tanque diseñado produciría una importante evaporación debida a factores del propio tanque y no climáticos o ambientales.

Para la medición de la altura del agua en el recipiente de forma automática, se ha optado por desarrollar un sensor capacitativo basado en otros trabajos previos con similar objetivo (Pal y Barik, 2010). Este sensor consiste en dos láminas de aluminio de 1 mm de espesor, pegadas al exterior del recipiente, con una separación de 2 mm entre ellas por cada lado. Pegado a cada una de estas láminas, en su parte central, y de arriba abajo, se ha ubicado una lámina de cobre que sirve como material conductor sobre el que realizar las conexiones del cableado requerido. Con el objetivo de impermeabilizar este conjunto, y dar mayor rigidez al mismo, se ha recubierto de cinta adhesiva que evita, la entrada de humedad y la separación entre las láminas de aluminio y cobre. Los extremos de las láminas de cobre que sobresalen del conjunto por la parte inferior, constituyen los bornes para la conexión de los cables de medida y comunicación de datos del mini-tanque de evaporación con el dispositivo ArduDrop.

Con el fin de aislar la parte electrónica de la intemperie, se introdujo el conjunto anteriormente descrito en el interior de otro recipiente cilíndrico similar al primero, quedando, el conjunto sensor del dispositivo entre ambos recipientes, sellados entre sí con silicona para evitar la filtración de humedad al espacio entre ellos. En el interior del recipiente los cables se encuentran conectados a dos tornillos que atraviesan el recipiente exterior en su base, sirviendo, a su vez, como anclaje del recipiente con el soporte aislante que se describe a continuación. Finalmente, en el interior del recipiente se ha ubicado, pegada a uno de sus laterales, una pequeña regla para medir de forma manual la altura de la lámina de agua en el recipiente. Esto permitirá, por un lado el calibrado del dispositivo, y, por el otro, la comprobación manual de la altura de la

lámina de agua sin necesidad de emplear ningún dispositivo de adquisición de datos, como puede ser el dispositivo ArduDrop.

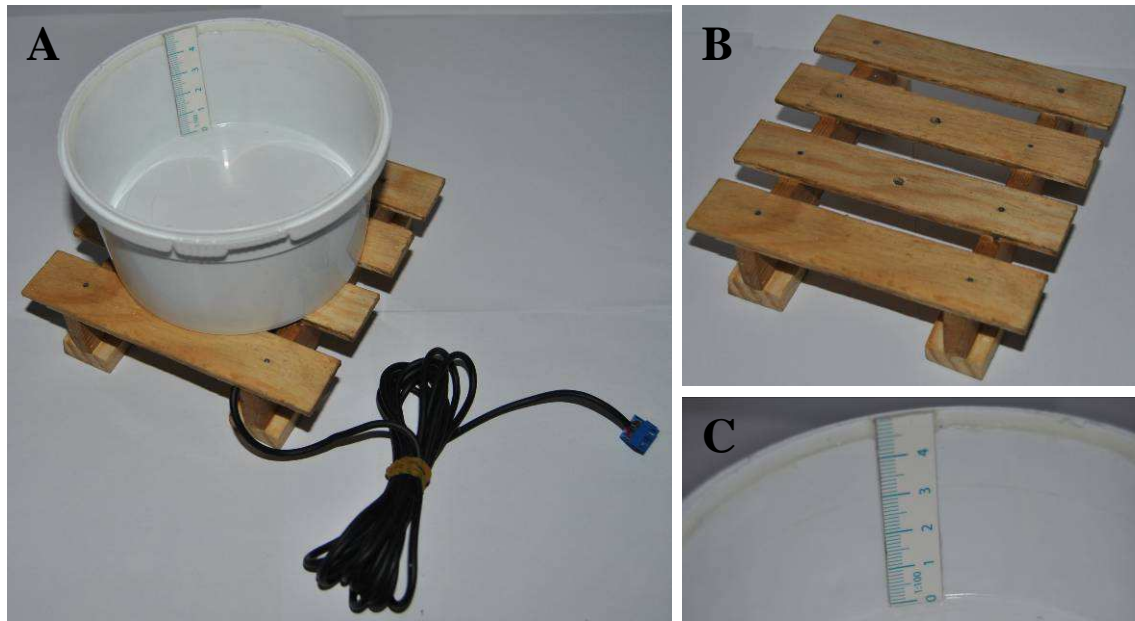


Figura 2: Mini-tanque de evaporación clase A (A), su soporte (B), y detalle del sistema de medida directa adicional (C).

3.2. Plataforma

Al igual que ocurre con los tanque de evaporación de Clase A comerciales, el recipiente debe estar aislado de la superficie del terreno mediante una plataforma de madera, que permite el flujo de aire por todos los lados del recipiente. Por este motivo se ha diseñado una plataforma de madera a escala empleando listones de 130x15x1 mm de longitud, anchura y espesor, respectivamente. Estos listones están dispuestos horizontalmente y separados entre sí 10 mm. Sobre ellos se sitúa el recipiente. Para soportar estos listones, se ha ubicado otro de forma perpendicular al que se han clavado dichos listones. A su vez, estos dos travesaños, de 130x25x4 mm, se apoyan sobre cuatro patas de madera de 25x25x4 mm para permitir que permanezca horizontal sobre el terreno en el que se ubique, controlado mediante un nivel esférico de burbuja sobre la plataforma. El recipiente se encuentra sujeto a la plataforma mediante dos tornillos situados en la base que, a su vez, como se ha mencionado anteriormente, sirven de conectores para la parte electrónica del dispositivo.

3.3. Electrónica

La parte electrónica del dispositivo es muy sencilla y consiste, como se ha mencionado, en un sensor capacitativo formado por dos placas de material conductor envolventes al recipiente, y separadas entre sí 2 mm, siguiendo el modelo propuesto por Pal y Barik, (2010). Este sensor capacitativo devuelve un valor elevado cuando existe un material conductor entre ambas piezas del sensor. Como el agua es más conductivo que el aire, a medida que el recipiente se rellena de agua, los valores capacitativos (en unidades arbitrarias) son paulatinamente mayores.

La capacidad sensitiva de este conjunto viene dado por un sencillo circuito en el que se trata de medir el tiempo que tarda en descargarse el condensador constituido por las dos placas de aluminio, que dependerá, como se ha dicho, del material que se encuentre entre ambas placas (Pal y Barik, 2010). Así, una de las placas es cargada con +5V y mediante la otra se mide el tiempo que tarda en descargarse este voltaje. De esta forma, el circuito final del dispositivo es muy sencillo y económico, consiste únicamente en una resistencia (680 K Ω) y un condensador cerámico (0.1 μ F), tal y como se muestra en la Figura 3.

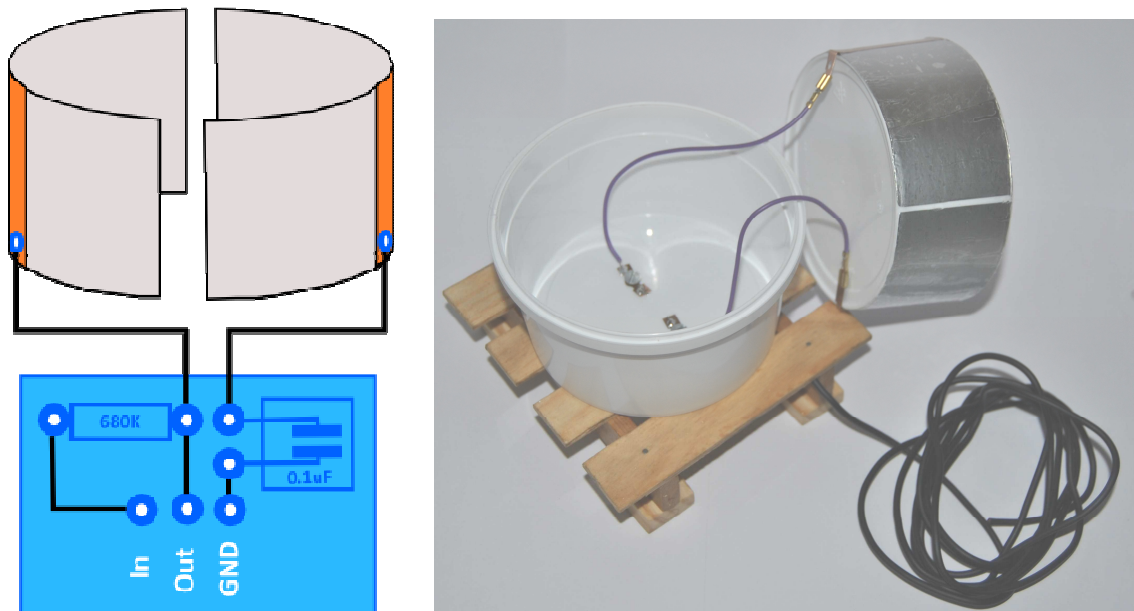


Figura 3: Esquema del circuito electrónico (izqda.) y electrónica del mini-tanque de evaporación Clase A (dcha.).

3.4. Código de ejemplo

La lectura de la altura de la lámina de agua en el interior del recipiente es fácilmente medible mediante el uso de la librería CapSense (Link 1) en el entorno de desarrollo Arduino, para la medición de la capacitancia mediante el uso de dos pins digitales de la placa Arduino que constituye el núcleo del dispositivo ArduDrop.

A continuación se muestra un pseudocódigo (Cuadro 1) del funcionamiento del código capaz de leer el sensor capacitativo que constituye este dispositivo, transformarlo en altura de lámina de agua mediante el uso de la ecuación de calibración previamente obtenida, y el cálculo de la diferencia de altura de la lámina de agua respecto a una medición anterior (Anexo 1).

Cuadro 1: Pseudocódigo de ejemplo para el funcionamiento del tanque de evaporación

1. Definición de los pins
2. Declaración y configuración de las librerías
3. Definición de las constantes y variables
4. CONFIGURACIÓN INICIAL
 - 4.1. Configuración de los pins
 - 4.2. Configuración de la comunicación por el puerto serie (*)
 - 4.3. Mostrar la pantalla de inicio en el puerto serie (*)
 - 4.4. Inicio del reloj virtual
5. DESARROLLO DEL PROGRAMA
 - 5.1. No ejecuta ninguna acción... espera a las 7 de la mañana para medir
 - 5.2. Mide el nivel del agua en el tanque
 - 5.3. Almacena el valor y calcula el nivel
 - 5.4. Calcula la diferencia entre el valor medido con la medición del día anterior
 - 5.5. Muestra el resultado en el puerto serie.
 - 5.6. Espera a medir de nuevo al día siguiente.

El código mostrado en el cuadro 1 es un ejemplo de las posibilidades de medición, no muestra el pseudocódigo empleado cuando el sensor se encuentra integrado dentro del dispositivo ArduDrop, aunque el fundamento es el mismo.

4. Pluviómetro de balancín

4.1. Descripción del dispositivo

El pluviómetro de balancín ha sido el dispositivo seleccionado para la medición de la precipitación por su sencillez mecánica y electrónica. Su diseño está basado en un recipiente cilíndrico de 11,4 cm de diámetro, y 13,5 cm de altura, de plástico de 0,5 milímetros de espesor, en cuya parte superior se encuentra un recipiente cónico (con un área de 78,5 cm² en su base) invertido y abierto por su ápice, cuyo objetivo es el de recoger el agua de precipitación (o riego) y dirigirlo hacia los recipientes de 7.2 ml de capacidad, simétricos sobre un eje cilíndrico. Estos recipientes están realizados en un material rígido pero resistente, como es el metacrilato de 2 mm de grosor. El fondo del recipiente, con numerosas aperturas para el drenaje del agua, ejerce como tope para el balanceo. Todo este dispositivo se soporta mediante un anillo de acero conectado a un mástil que lo permita mantener elevado del suelo (Fig. 4).

El balancín se encuentra sujeto a una estructura en forma de arco de madera adecuadamente impermeabilizada con pintura plástica que sirve, a su vez, como soporte para la electrónica del dispositivo. El dispositivo sensor se encuentra en el margen del arco de sujeción del balancín (Fig. 4), frente a la pared de separación entre ambos recipientes, sobre el eje de balanceo.

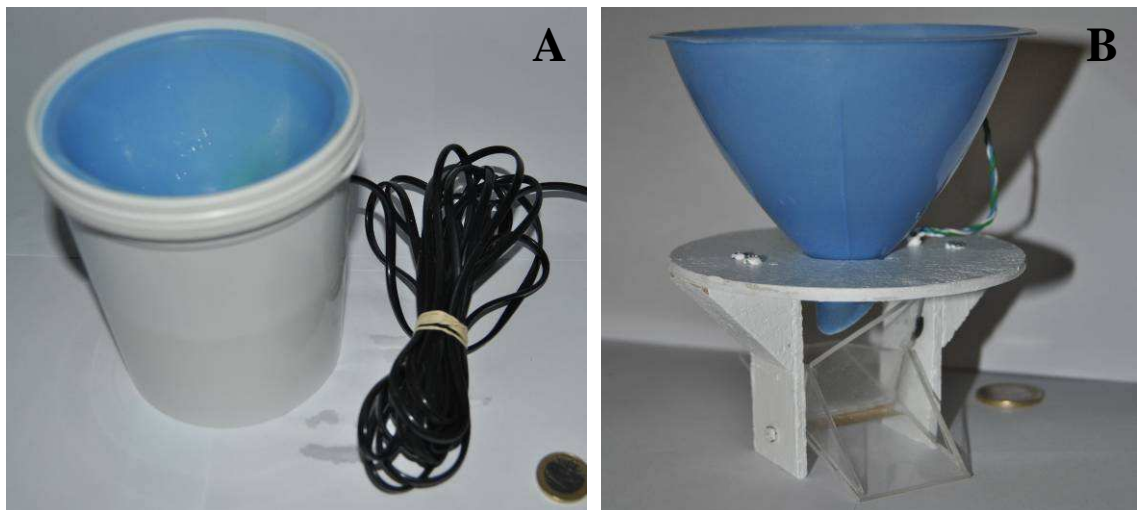


Figura 4: vistas exterior (A) e interior (B) del pluviómetro de balancín.

4.2. Electrónica

La parte electrónica de este dispositivo es realmente sencilla, consistente, únicamente en un interruptor magnético (reed switch) y una resistencia, formando un interruptor en un circuito de tipo pull-up.

Este interruptor magnético se ve cerrado cada vez que un pequeño imán pasa por sus proximidades. Este imán se ha ubicado en el balancín, en la separación entre ambos recipientes simétricos, en la vertical del eje de balanceo. Por su parte, el sensor se encuentra en el arco que soporta el balancín, adecuadamente aislado de la humedad, frente a la posición del imán, también en la vertical del eje del balancín. De esta forma, cada vez que el balancín cambia de posición cierra el interruptor magnético durante unos milisegundos cuando el imán pasa frente al sensor, volviéndose a abrir inmediatamente, marcando así un pulso. Estos cierres del interruptor son detectados en el dispositivo ArduDrop mediante el uso del código adecuado, en alguno de los pins con capacidades de interruptor de la placa Arduino.

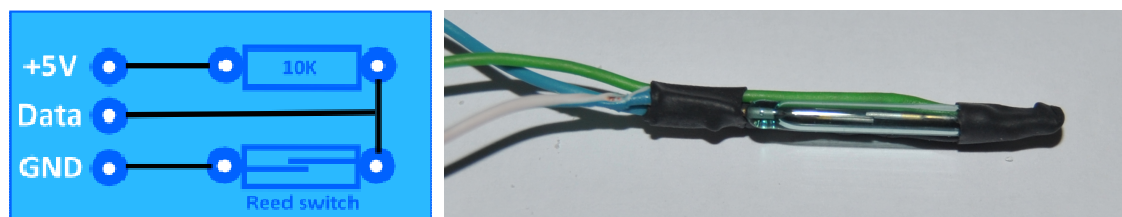


Figura 5: Electrónica del pluviómetro de balancín.

4.3. Código de ejemplo

El funcionamiento del sensor requiere un código muy sencillo (Cuadro 2) mediante el que el dispositivo ArduDrop detecta cada uno de los balanceos debido al peso acumulado en uno de los recipientes por el agua que lo ha rellenado. El cambio de posición del balancín hace que el imán pase por delante del interruptor magnético, cerrándolo y abriéndolo de forma muy rápida. Las variaciones en el pin al que se encuentra conectado el pluviómetro pueden ser registradas, cuantificando así el número de balanceos o pulsos.

Para realizar el cálculo de la precipitación en un tiempo determinado, tan sólo es necesario multiplicar el número de pulsos (p) por una constante que es el volumen de agua que cabe en cada recipiente antes de que se produzca el vuelco (V). Esto facilita el total de precipitación (P) para el área cubierta por el pluviómetro (constante), en el tiempo preestablecido por el usuario (t) extrapolado a un área de 1 m², mediante la ecuación [4].

$$P(t) = p \cdot V \quad [4]$$

La precipitación puede calcularse de forma horaria, siendo posible calcular precipitaciones diarias mediante la suma de las precipitaciones horarias, o precipitaciones mensuales mediante la suma de las diarias. De esta forma, el cálculo de la precipitación requiere del factor tiempo, por lo que es necesario incluir la gestión del tiempo en el código (Anexo 2), bien sea mediante el uso de tiempo de oscilación del cristal interior de la placa Arduino, o una librería desarrollada para ello (por ejemplo, la librería TIME (Link 2)), o mediante el uso de un Reloj de Tiempo Real como el que se encuentra en el dispositivo ArduDrop (DS1337) en su escudo de almacenamiento de datos (de Pablo , 2011).

Cuadro2: Pseudocódigo de ejemplo para el funcionamiento del pluviómetro

1. Definición de los pins
2. Declaración y configuración de las librerías
3. Definición de las constantes y variables
4. CONFIGURACIÓN INICIAL
 - 4.1. Configuración de los pins
 - 4.2. Configuración de la comunicación por el puerto serie (*)
 - 4.3. Mostrar la pantalla de inicio en el puerto serie (*)
 - 4.4. Inicialización del Reloj Virtual
 - 4.5. Pantalla de inicio
5. DESARROLLO DEL PROGRAMA
 - 5.1. No ejecuta ninguna acción, sólo espera la lluvia... y cuando la recibe...
 - 5.2. Añade un pulso al contador con cada balanceo
 - 5.3. Calcula la cantidad de lluvia una vez transcurrida una hora
 - 5.4. Calcula la cantidad de lluvia transcurrido un día

5. Aplicaciones

Los sensores descritos en este trabajo suponen una ampliación de las posibilidades que brinda el dispositivo ArduDrop y que, aunque requieren una mayor atención por parte del usuario (por el mantenimiento necesario del tanque de evaporación), tanto desde el punto de vista científico como didáctico, permitiendo la adquisición de una mayor variedad de datos, algunos de los cuales requieren de un procesamiento previo.

ArduDrop 1.0 tiene diversas aplicaciones posibles, comenzando por el campo de la didáctica. Dentro de este campo, el dispositivo puede ser empleado en muy diversos ámbitos y niveles educativos, incluyendo Educación Secundaria, Bachillerato, Formación Profesional y Universidad. En el campo de las enseñanzas técnicas, el dispositivo electrónico puede ser empleado para la enseñanza de electrónica y sus aplicaciones en el medio ambiente, incentivando al alumno a desarrollar otros dispositivos que faciliten, simplifiquen o reduzcan costes de las investigaciones que se llevan a cabo en la actualidad. En el campo de las enseñanzas científicas, el dispositivo abre una vía al desarrollo de investigaciones viables gracias al uso de instrumentos de bajo coste, o en regiones en vías de desarrollo, donde la instalación masiva de sensores estándar implican costes difíciles de asumir, y que es además donde mayores necesidades hay de monitorizar la evolución del agua en el suelo, y de realizar un uso y gestión responsable de los recursos hídricos.

Desde el punto de vista científico, este dispositivo debe ser calibrado de forma adecuada para el tipo de terreno en el que se sitúe, con el fin de que los valores de humedad que devuelve el sensor sean valores realistas. El sensor de intensidad de lluvia o disdrómetro, también debe ser calibrado por código para establecer la intensidad de lluvia mínima que puede reconocer sin mezclarse con el ruido instrumental. El resto de los sensores no requieren de calibración. Todos estos sensores permiten desarrollar interesantes trabajos de relación entre los distintos parámetros para cada emplazamiento, y su relación con los valores de precipitación, escorrentía y evapotranspiración de las estaciones cercanas al punto de ubicación del sensor. Por otro lado, es posible estudiar la relación entre parámetros como iluminación, temperatura y humedad del suelo para establecer valores aproximados de evapotranspiración y estudiar su relación con los valores estándar generalmente empleados en los balances hídricos.

Finalmente, desde el punto de vista aplicado, este dispositivo, por su sencillez de construcción, lo reducido de sus costes y su simplicidad operativa, es adecuado para realizar amplios estudios de detalle de la evolución del agua en el suelo para aplicar a la mejora del regadío, la caracterización del entorno en el que se realizarán reforestaciones

para la selección adecuada de la vegetación a emplear, etc. (Allen et al., 1998). Por estas mismas razones, la utilización de este dispositivo tiene interés en áreas afectadas en mayor o menor medida por la desertización y desertificación, así como en áreas en vías de desarrollo, ya que en estos casos, la instrumentalización no suele ser extensa debido a los altos costes de instalación y mantenimiento de sensores, que suelen ser empleados en otro tipo de necesidades de la población.

6.- Mejoras del dispositivo

La introducción de los nuevos sensores en el dispositivo ArduDrop requiere de mayores capacidades de las disponibles con la placa Arduino Duemilanove (o en su nueva versión Arduino Uno), por lo que para la integración completa de estos sensores en el dispositivo sin necesidad de eliminar alguno de los sensores previos (de Pablo y de Pablo, 2010 y 2011), precisa el uso de una placa más completa. Sin abandonar las condiciones que facilita el entorno de hardware libre Arduino, en futuras versiones del dispositivo se plantea el uso de la placa Arduino Mega (modelo 2560), que tiene un mayor número de entradas/salidas digitales y analógicas, permitiendo la conexión de una mayor cantidad de sensores, incluidos los presentados en este trabajo.

El cambio de placa base del proyecto a una placa Arduino Mega 2560 permitirá, además añadir otra serie de sensores adicionales para los usuarios que quieran convertir el proyecto en una completa estación meteorológica, ya que se podrá conectar sensores de presión atmosférica, sensores de temperatura y humedad del suelo (ampliando los contenidos en el diseño original del dispositivo ArduDrop – de Pablo y de Pablo, 2010), adecuándolo a las directivas propuestas por la Organización Meteorológica Internacional (WMO, 2008).

Disponer de nuevos puntos de conexión en la placa permitirá una mejora en las capacidades de control del propio dispositivo, siendo posible la instalación de interruptores de uso de cada uno de los sensores (para seleccionar su uso o no), la inclusión de leds para el control de errores de forma visual, el control de los niveles de batería, placa solar y alimentación, etc.

Para las futuras versiones del dispositivo ArduDrop se plantea la implantación de dos mejoras de gran importancia para el manejo del dispositivo. La primera de estas mejoras consiste en la instalación de comunicación bluetooth. De esta manera sería posible la actualización del hardware, la lectura de datos en tiempo real, y el volcado de datos desde la memoria SD sin la necesidad de la manipulación directa por parte del usuario

con el propio dispositivo. Esta mejora pretende, por un lado evitar errores en el sistema por falta de cuidado en el manejo y, por el otro, simplificar el manejo del dispositivo, y ampliar las posibilidades para su uso mediante teléfonos móviles, equipos portátiles, etc. y sin necesidad de cables específicos.

La segunda mejora del dispositivo ArduDrop en la que se está trabajando es en la modificación del código fuente para permitir la conexión con un programa informático, desarrollado específicamente para este dispositivo, con el fin de realizar la actualización del firmware, la visualización de datos en tiempo real, y la descarga de datos sin la necesidad de manipular el dispositivo retirando la tarjeta de memoria SD, o el uso del entorno de programación Arduino IDE. Esto permitirá, por un lado, una visualización directa de los datos, para poder comprobar el correcto funcionamiento de todos los sensores, mostrar gráficas de los datos, programar el reloj interno del dispositivo, programar el periodo de medida, configurar los sensores, etc.

En otro sentido, actualmente se está trabajando en la mejora del sistema de alimentación del dispositivo, pasando de utilizar 6 pilas recargables NiMH de 3.2 V, a una batería de polímetro de Litio (Li-Po) de 3.7V y 3000 mA, controlada mediante el componente LipoRider (Link 3) y recargada mediante placas solares. La descripción de todas estas (y otras mejoras) será objeto de otro trabajo una vez finalizadas las pruebas que actualmente se están desarrollando.

7.- Conclusiones

El dispositivo ArduDrop 1.0 es un ejemplo de desarrollo de tecnología de bajo coste mediante el uso de hardware y software libre para la monitorización de la humedad del suelo y de diversas constantes ambientales que pueden ayudar a comprender, de forma local, la evolución del agua en el terreno. Este dispositivo es de fácil construcción y no requiere de grandes conocimientos de electrónica ni programación, y puede ser fácilmente mejorable y ampliable por personal especialmente formado en estos ámbitos. El objetivo de este dispositivo es realizar un acercamiento cualitativo pero con datos reales al balance hídrológico de una zona determinada. ArduDrop 1.0 tiene múltiples aplicaciones, tanto en el campo de la didáctica (en ámbitos técnicos y científicos), como en el del medio ambiente, ya que una serie larga de datos puede ayudar a conocer la evolución de la humedad del terreno en función de las condiciones ambientales y, con ello, a realizar riegos adecuados o a la selección de vegetación capaz de adaptarse a las condiciones existentes, entre otras aplicaciones.

8.- Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias a la plataforma libre (open-hardware) Arduino, así como al entorno de desarrollo Arduino 022 (www.arduino.cc), pero especialmente a la comunidad de usuarios de Arduino a través de su foro, así como a los desarrolladores de la librería CapSense. Los autores deseamos agradecer especialmente a nuestra familia su paciencia por las horas en las que hemos estado enfrascados en el desarrollo del dispositivo.

9.- Referencias

- ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D., SMITH, M. (1998) “*Crop evapotranspiration – guidelines for computing crop water requirements*” Irrigation and drainage paper, 56. FAO, Rome, Italy. 300 pp.
- DE PABLO, M.A. y DE PABLO, C. 2010. ArduDrop 1.0: Dispositivo electrónico para el estudio de la humedad del suelo. *Tecnologí@ y Desarrollo*, 8. 30 pp.
- DE PABLO, M.A. y DE PABLO, C. 2011. ArduDrop 1.2: Nuevos dispositivos y mejoras en el dispositivo. *Tecnologí@ y Desarrollo*, 9. 30 pp.
- DOREENBOS, J. and PRUITT, W.O. (1977).- Las necesidades de agua de los cultivos. Riego y Drenaje, 24. FAO. 195 pp. (Este trabajo ha sido actualizado por la FAO mediante el de Allen et al. 1998)
- HARGREAVES, G., ASCE, F., and ALLEN, R. (2003). History and evaluation of Hargreaves Evapotranspiration Equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* , v.129, n.1, p.53-63
- HARGREAVES, G.H., SAMANI, Z.A., 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Eng. in Agric.*, 1(2): 96-99.
- ISEMAN, L. (2009) “*The Garduino garden controller*”. *Make magazine*, 18. 91- 101.
- JACOBS, A.F.G., HEUSINKVELD, B.G., LUCASSEN, D.C. (1998) “*Temperature variations in a class A evaporation pan*” *Journal of Hydrology*, 206. 75-83.
- MONTEITH, J. (1965). Evaporation and the environment. The state and movement of water in the living organisms, XIX Symposium of Soc, for Exp. Biol.,Swansea,Cambridge Univ. Press. New York , p.205-234
- PAL, S., BARIK, R. (2010) “*Design, development and testing of a semi cylindrical capacitive sensor for liquid level measurement*”. *Sensors & Transducers*, 116(5). 13-20.
- PALMER, W.C., and HAVENS, H.A. (1958) “*A graphical technique for determining evapotranspiration by the Thornthwaite method*”. *Monthly Weather Review*, 86. 123-128.

- PENMAN, H. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proceeding of the royal Society of London , Serie A. 193, p.120-145
- PEREIRA, A.R., PRUIT, W.O. (2004). “*Adaptation of the Thornthwaite scheme for estimating daily reference evapotranspiration*”.Agricultural Water Management, 66. 251–257.
- PRIESTLEY, C., and TAYLOR, R. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters. Mon Weather , v.100, n.2, p.82-92
- SLEIGHT, R.R. 1917. Evaporation from surfaces of water and river-bed materials. J. of Agr. Res., X No.5:209-261 + plate
- SOKOLOV, Y. and Chapman, T.C. 1981. Methods for Water Balance Computation. No. 17 de la serie "Studies and Reports in Hydrology. UNESCO
- THORNTHWAITE, C.W. (1948) “*An approach toward a rational classification of climate*”. Geographic Review, 38. 55-94.
- WMO, 2008. WMO guide to meteorological instruments and methods of observation. WMO-No. 8 (Seventh edition).

10.- Direcciones web

- 1: <http://arduino.cc/playground/Main/CapSense>
- 2: <http://arduino.cc/playground/Code/Time>
- 3: http://seedstudio.com/wiki/Lipo_Rider_V1.1

ANEXO 1

Código comentado del Firmware de ejemplo para la lectura automática de la evaporación en el minitanque de evaporación de clase A.

```
/* Tanque de evaporación 1.0 (ArduDrop)
 *
 * Dispositivo para la medida de la evaporación
 * mediante el uso de un sensor capacitativo.
 *
 * Autores: M.A. de Pablo y C. de Pablo S.
 * Hardware: 1.0 20110615
 * Firmware: 0.5 20110715
 */

// Definición de las librerías a utilizar
#include <Time.h>
#include <TimeAlarms.h>
#include <CapSense.h>

// Definición de los pin analógicos
// No se requieren

// Definición de los pins digitales
// No se requiere definición.
// Tanque de evaporación conectado a los pins digital 2 y 4

// Activación de librerías
CapSense cs_4_3 = CapSense(4,3)

// Definición de constantes
//No se requieren

// Definición de variables
unsigned float nivel0 = 0;
unsigned float nivel1 = 0;
float mmevaporacion = 0;

void setup(){
  // Inicialización del reloj virtual
  setTime(12,05,00,15,07,2011);           // Ajusta la hora y la fecha de sistema
  Alarm.alarmRepeat(7,00,00, midenivel);  // Ajusta la alarma para calcular la lluvia cada hora
  Alarm.delay(0);
  // Inicia el puerto serie
}
```

```
Serial.begin(9600);
// Muestra información inicial
splashscreen();
// mide el nivel de referencia
midenivel();
}

void loop()
{
// No ejecuta ninguna acción, sólo mide una vez al día, a las 7 horas de la mañana
}

void splashscreen(){
  Serial.println(" Mini tanque de evaporacion clase A ");
  Serial.println("-----");
  Serial.println("M.A. de Pablo & C. de Pablo S., 2011");
  Serial.println();
  Serial.println("Código de ejemplo de uso");
  Serial.println();
}

void midenivel(){
  long inicio = millis();
  long total = cs_4_3.capSenseRaw(100000);
  Serial.print(millis() - inicio);
  Serial.print("\t");
  Serial.print(total);
  Serial.print("\t");
  Serial.print(total/10);
  Serial.print("\t");
  Serial.print(total/100);
  Serial.print("\t");
  Serial.println(total/1000);
  delay(100);
  nivel0=nivel1;
  nivel1=total/100;
}

void evaporacion(){
  mmevaporacion = nivel1-nivel0;
}
```

ANEXO 2

Código comentado del Firmware de ejemplo para la lectura automática de la precipitación en el pluviómetro de balancín.

```
/* Pluviometro 1.0 (ArduDrop)
 *
 * Dispositivo de balancín para la medida de la precipitación
 * mediante el uso de un sensor pasivo reed switch.
 *
 * Autores: M.A. de Pablo y C. de Pablo S.
 * Hardware: 1.0 20110714
 * Firmware: 0.5 20110715
 */

// Definición de las librerías a utilizar
#include <Time.h>
#include <TimeAlarms.h>

// Definición de los pin analógicos
// No se requieren

// Definición de los pins digitales
// No se requiere definición. Pluviómetro conectado al pin digital 2

// Activación de librerías
// No se requiere

// Definición de constantes
const float capacidad = 0.0075; // Volumen de agua (litros o mm/m2) de la cazoleta del balancín

// Definición de variables
unsigned long pasos = 0; // Cuenta los pasos del balancín
float mmlluvia = 0; // Lluvia en 1 hora (en litros o mm/m2)
float lluviahoras[24]; // Valores horarios de lluvia para cada día(n litros o mm/m2)
float totalluviadia = 0; // Total de lluvia en 24 horas
float maximolluviadia = 0; // Máxima precipitación del día en mm/hora
float medialluviadia = 0; // Media de precipitación por hora del día en mm/hora

void setup(){
  // Inicialización del reloj virtual
  setTime(12,05,00,15,07,2011); // Ajusta la hora y la fecha de sistema
  Alarm.alarmRepeat(13,00,00, calculolluvia); // Ajusta la alarma para calcular la lluvia cada hora
}
```



```
Alarm.delay(0);
// Inicialización del puerto serie
Serial.begin(115200);
// Mostrar cabecera en el puerto serie
SplashScreen();
// Inicialiación del sensor de lluvia
attachInterrupt(0, contador, RISING);
}

void loop(){
  // No ejecuta ninguna acción, sólo espera la lluvia...
}

void contador(){
  // Cuenta los pasos
  pasos++;
  // Muestra el momento a través del puerto serie
  Serial.print(hour());
  Serial.print(":");
  Serial.print(minute());
  Serial.print(":");
  Serial.print(second());
  Serial.print(" ");
  Serial.println(pasos);
  detachInterrupt(0);
}

void SplashScreen(){
  Serial.println("Pluviómetro 1.0 para el dispositivo ArduDrop");
  Serial.println("-----");
  Serial.println(" V.20110715 M.A. de Pablo & C. de Pablo S.");
  Serial.println(" *** Código de prueba del sensor ***");
  Serial.println();
  Serial.println("Se mostrarán los datos de precipitación una vez cada hora.");
  Serial.println("A las 00h se muestra los resultados de precipitación diaria.");
  Serial.println();
  Serial.print("Medida de la precipitación del día ");
  Serial.print(day());
  Serial.print("/");
  Serial.print(month());
  Serial.print("/");
  Serial.print(year());
  Serial.println();
}
```

```
void calculolluvia(){
  mmluvia = pasos * capacidad;           // Calcula mm de lluvia en 1 hora
  muestraresultadoshora();               // Muestra los resultados de la última hora
  lluviahoras[hour()] = mmluvia;         // Almacena el valor de la lluvia en esa hora
  if (hour() == 00){
    calculodiario();                     // Calcula los valores del día anterior
    muestraresultadosdia();              // Muestra los resultados en el puerto serie
    //lluviahoras[]={0};                 // Pone a cero los datos de precipitación horaria
  }
  pasos = 0;                             // Pone a cero el contador de balanceos
  unsigned short hora;                    // Ajusta la alarma para el siguiente periodo de medida
  hora = hour()+1;
  if (hora == 23){
    hora = 00;
  }
  Alarm.alarmRepeat(hora,00,00, calculolluvia);
}

void calculodiario(){
  totalluviadia = 0;                      // Pone a cero antes del cálculo
  maximolluviadia = 0;
  for (int i =0; i<24; i++){
    totalluviadia = totalluviadia + lluviahoras[i]; // Suma la lluvia de cada hora en mm
    if (lluviahoras[i]>maximolluviadia){
      maximolluviadia = lluviahoras[i];         // Calcula el máximo de precipitación horaria en mm/hora
    }
  }
  mediallyuviadia = totalluviadia / 24;      // Calcula la media de precipitación horaria en mm/hora
}

void muestraresultadoshora(){
  Serial.print("Son las ");
  Serial.print(hour());
  Serial.print(". Durante la última hora: ");
  Serial.print(pasos);
  Serial.print(" pasos x 0.0075 mm = ");
  Serial.print(mmluvia);
  Serial.println("mm de precipitación");
  Serial.println();
}

void muestraresultadosdia(){
  Serial.println("Los resultados de la lluvia del día de hoy han sido: ");
  Serial.print("Precipitación total: ");
  Serial.print(totalluviadia);
  Serial.println(" mm");
}
```

```
Serial.print("Precipitación horaria máxima del día: ");
Serial.print(maximolluviadia);
Serial.println(" mm/hora");
Serial.print("Precipitación media horaria: ");
Serial.print(medialluviadia);
Serial.println(" mm/hora");
Serial.println(".....mañana más");
Serial.println();
Serial.print("*****");
Serial.print("Medida de la precipitación del día ");
Serial.print(day());
Serial.print("/");
Serial.print(month());
Serial.print("/");
Serial.print(year());
Serial.println();
}
```