

Consideraciones de diseño en el prototipado de una maceta inteligente con sistema de irrigación autónomo gobernado por las ecuaciones de Penman-Moteith y Richards

Design and Prototyping Considerations of an Autonomous Plant-Pot Irrigation System Using Penman-Moteith Hydrological Equation and Data Processing

JOSÉ GONZÁLES SÁNCHEZ

Computer systems engineer,
Systems administrator
Centro de Desarrollo Agroempresarial
SENA Emprende Rural - SER - Chía
jzgonzales@gmail.com

JUAN CARLOS VÁSQUEZ RESTREPO

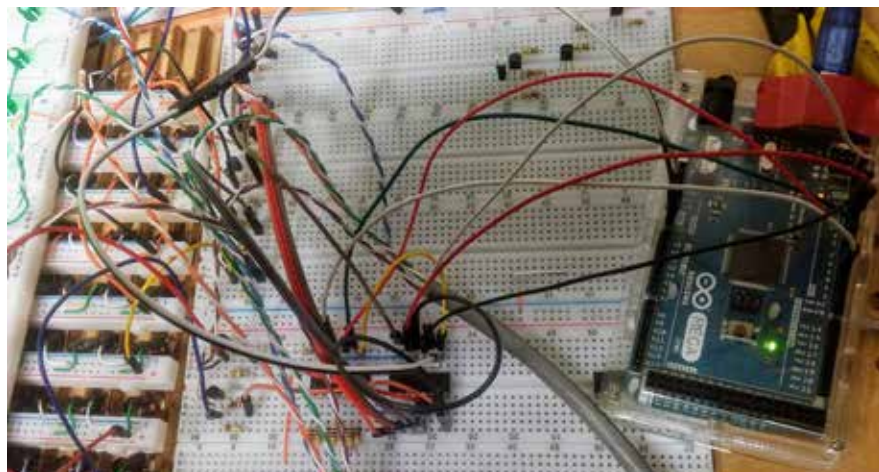
Mechanical engineer
Centro de desarrollo agroempresarial
SENA Emprende rural - SER - Chía
juanc-lp@hotmail.com

Fecha de recepción: 02-11-2018

Fecha de evaluación: 09-11-2018

Fecha de aceptación: 13-11-2018





Consideraciones de diseño en el prototipado de una maceta inteligente con sistema de irrigación autónomo gobernado por las ecuaciones de Penman-Moteith y Richards

Resumen

En varias áreas de la agricultura como la agricultura industrial, agricultura intensiva y agricultura de precisión el uso de sistemas de riego computarizados es cada vez más difundido debido a beneficios que incluyen el ahorro de recursos hídricos y estandarización de la calidad en la producción. La complejidad de estos sistemas semi-automatizados de riego requiere de personal calificado para realizar las tareas de operación y mantenimiento permanentemente.

En otra área de la tecnología, la inteligencia artificial promete desarrollar un nivel muy alto o quasi-autonomous en la automatización de procesos, independientemente de las posturas críticas escépticas o a favor sobre la posibilidad de que un sistema no biológico pueda desarrollar algún tipo de universalidad cognitiva [1], [2] podemos afirmar con certeza que la inteligencia artificial que conocemos hoy, aunque aún se encuentra en un nivel de desarrollo incipiente, ofrece una amplia gama de posibilidades que son relevantes para ser aplicadas en nuevos enfoques de la agricultura como el de agricultura de precisión.

Abstract

The availability offered by a set of technologies such as Big Data, artificial intelligence, computer vision and cloud computing must be linked to the real world through IoT technologies and microdevices like Arduino and Raspberry Pi. Therefore, farmers have achieved to find multiple solutions in their fields to irrigation issues, so they have been able to implement technologies based on computer systems. However, ornamental plants such as domestic flower-pots or even the ornamental pots in offices spaces, tend to appear such a different system from the large farms, but a closer examination reveals that we have the same elements of a complex ecosystem.

As a result, as designers of autonomous plant pot we should face almost the same challenges of traditional farming. In this regard, it is frequent to find a wide variety of Arduino plant irrigation prototypes and most of them mainly focused on solving the problem of water irrigation through the implementation of the soil humidity sensor. This paper assumes that irrigation system is no linear and there are several factors to take into account in order to achieve an accurate autonomous pot.

Keywords: Internet of things, IoT, Electronic Plant Pot, Arduino, Water Irrigation Systems, Urban Gardening, Penman-Moteith Equation, FAO, Hydrology, Cloud Computing, Artificial Intelligence, Urban Gardening, Open Hardware.

Introducción

En el aspecto social y conforme a información de la FAO, para 2030 el 60% de la población mundial vivirá en zonas urbanas. En la actualidad se estima que aproximadamente 3.500 millones de personas vive en ciudades. Frente a este hecho la Food and Agriculture Organization - FAO, indica que dentro de los objetivos de desarrollo sostenible [4] "La FAO promueve la agricultura urbana y periurbana, con el cultivo de plantas y la cría de animales dentro y alrededor de las ciudades, y trabaja para construir vínculos entre zonas rural y urbanas y además abordar los problemas de tenencia de la tierra." En este sentido, esta iniciativa incorpora este llamado social de la FAO desde la perspectiva de las aplicaciones de la tecnología a la jardinería aplicando un enfoque social orientado a generar autonomía en los dispositivos con la finalidad de promover la tenencia de plantas en ambientes domésticos y urbanos.

En el aspecto de tendencias en tecnología y de acuerdo al estudio "Five vectors of progress in the internet of things" desarrollado por Deloitte en Junio de 2018 [7] se estima que en los 3 años siguientes solamente el sector empresarial realizara inversiones estimadas en 15 billones de dólares para la adopción de tecnologías de Internet de las cosas - IoT ; el estudio también indica, que para el segmento que denomina *Consumidor* existen oportunidades calificadas como significativas en experiencia de usuario y mejoras [6] en la calidad de vida, también identifica que en las oportunidades denominadas como representativas se encuentran; los hogares inteligentes, dispositivos remotos, edificios inteligentes, ciudades inteligentes e irrigación inteligente.

La amplia disponibilidad de tecnologías que incluyen; Cloud computing, Big Data, Inteligencia artificial o aprendizaje de máquinas, representa una oportunidad para desarrollar dispositivos que permitan no solamente el desarrollo de dispositivos conectados y remotamente monitoreables sino en nuestra visión dispositivos que

aprendan y desarrollen elementos de autonomía apoyados sobre tecnologías como las que mencionamos anteriormente.

Fundamentación teórica

Consideraciones desde el aspecto biológico

Como consideraciones básicas para el diseño de nuestra maceta autónoma en lo que corresponde a los aspectos biológicos hemos tomado en cuenta los siguientes:

- a) Condiciones y propiedades del sustrato.
- b) Formulación del modelo de riego de agua.
- c) Requerimientos generales de nutrición.

Estos tres aspectos se encuentran directamente relacionados entre sí, el problema siguiente será encontrar un conjunto o técnica que proponga un modelamiento matemático a cada uno de estos aspectos con la finalidad de que, como hemos enfatizado a lo largo de este documento, sea posible implementar un modelo programable que conlleve a la implementación un sistema automatizable dicho de otra forma es necesario considerar una aproximación general pero que al mismo tiempo que sea susceptible de ser modelada matemáticamente. Este problema no es una barrera menor, por ejemplo, consideremos como punto de partida que por definición los ecosistemas están catalogados dentro de los sistemas complejos, en nuestro caso procederemos a tratar únicamente con el problema asociado a los aspectos del suelo y riego [7].

Para comprender este problema y abordarlo, debemos considerar el ciclo hidrológico. El ciclo del agua va desde la absorción del agua en el suelo hasta la evaporación del agua en la atmósfera o viceversa si se prefiere, este ciclo se encuentra representado en el siguiente diagrama.

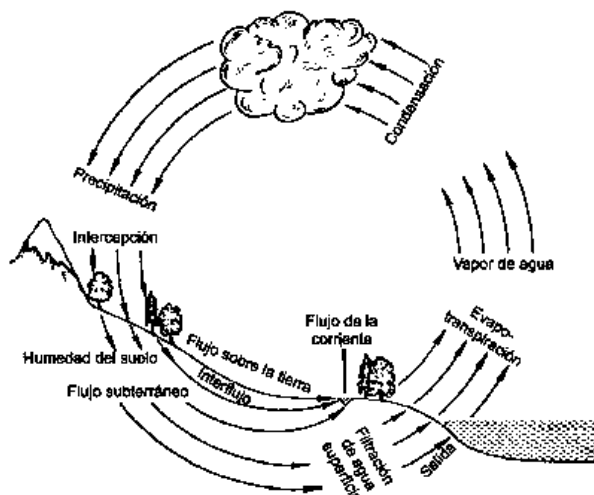


Figura 1. Ciclo hidrológico o ciclo del agua.

Hemos identificado que en este proceso o ciclo hidrológico existen dos etapas mayores las cuales son: Absorción y Evaporación. Con este fundamento continuaremos presentando la ecuación de Balance hídrico de un cultivo (1), que presenta la FAO y que sintetiza las dos etapas en las que hemos hecho énfasis, en este punto nos adelantamos a referenciar una segunda ecuación subyacente conocida como la ecuación Penman-Moteith (2).

La ecuación de balance hídrico (1) incorpora la etapa de evaporación o como la denomina mediante la variable ET Evapotranspiración y la etapa de absorción queda representada como una función de la precipitación P y ET.

$$URC = ET_c - P - DS \quad (1)$$

Donde:

URC = Consumo del agua de riego necesario para satisfacer la demanda del cultivo (mm).

ET = Evapotranspiración potencial del cultivo (mm).

P = Precipitación efectiva (mm).

DS = Variación de la humedad del suelo (mm).

La segunda ecuación Penman-Moteith (2) desarrolla en detalle la variable ET presentada en la Ecuación de balance hídrico.

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + k \rho_a c_p \left(\frac{e_s - e_a}{r_a} \right)}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right)} \quad (2)$$

Donde:

R_n	Radiación neta
G	Flujo de calor del suelo
$(e_s - e_a)$	Déficit presión de vapor de aire
ρ_a	Densidad del aire a presión constante
c_p	Calor específico del aire a presión constante
γ	Constante psicrométrica
Δ	Pendiente de la curva de presión de calor
k	Constante para la conversión de unidades
r_a	Resistencias aerodinámica
r_s	Resistencia de superficie

El proceso de evapotranspiración de la planta es un proceso complejo en donde las variables que intervienen se agrupan en cuatro categorías:

- Temperatura del aire.
- Humedad del aire.
- Velocidad del viento.
- Luz solar y radiación.

La representación de esta caracterización se encuentra presente en la interfaz de entrada de datos de la calculadora ETo de la ecuación Penman-Moteith proporcionada por la FAO en su portal, como se puede observar en la captura de la imagen.

The screenshot shows a software interface for calculating Penman-Monteith. The window has a title bar 'Data and ETo menu' and a menu bar with 'File' (containing 'ejemplo.DTA') and 'Data and ETo menu'. Below the menu bar are four tabs: 'Input data description' (selected), 'Meteorological data and ETo', 'Plot data', and 'Export results'. The 'Input data description' tab contains several input sections: 'Air temperature' with radio buttons for '° Celsius' and '° Fahrenheit', and checkboxes for 'Mean temperature' and 'Minimum and Maximum temperature'; 'Air humidity' with checkboxes for 'Mean Relative Humidity', 'Minimum and Maximum Relative Humidity', 'Mean dew point temperature', and 'Mean actual vapour pressure', along with a 'Psychrometric data' section for 'Mean dry and wet bulb temperature' and 'Natural ventilated' coefficient; 'Wind speed' with a checkbox for 'Mean wind speed' and a 'height of measurement' input; 'Sunshine and Radiation' with checkboxes for 'Hours of bright sunshine (n)', 'Relative sunshine hours (n/N)', 'Solar radiation (Rs)', and 'Net radiation (Rn)'; and 'IF missing radiation' with a formula for R_s based on T_{max} and T_{min} . At the bottom are 'Cancel' and 'Main menu' buttons.

Figura 2. Calculadora para la ecuación Penman-Monteith. Fuente: FAO.

Ambas ecuaciones, Ecuación de balance hídrico (1) y ecuación Penman-Monteith (2) son parte fundamental del modelo hidrológico propuesto por la FAO para estimaciones requerimiento de riego en cultivos.

El siguiente aspecto para considerar en la fundamentación del diseño corresponde a la etapa de absorción del agua. Es este punto se introducen los elementos de tipos de suelo y nuevas funciones asociadas a la mecánica de fluidos. Este último campo de estudio, la mecánica de los fluidos abarca de forma general los aspectos del tipo de suelo en lo que corresponde al elemento de la etapa de absorción en nuestro análisis. En este punto, es útil presentar cómo se conforma el patrón de humedad respecto del tipo de suelo. De forma general observamos que los tipos de

suelos varían entre arenosos y arcillosos [9], los cuales son más permeables o menos permeables, respectivamente. En el siguiente cuadro, encontramos como la humedad idónea del suelo según su tipo, varía entre la capacidad de campo como límite superior y el punto de marchitez como límite inferior.

La dirección del movimiento del agua ocurre conforme a lo que se expone en la figura(4), estos movimientos se realizan simultáneamente y están afectadas por variables como la dirección del riego o lluvia, magnitud del cuerpo de agua y tipo de suelo, entre otras, este es el componente de parametrización adicional que se requiere para completar el modelo de riego a implementar en nuestra maceta autónoma.

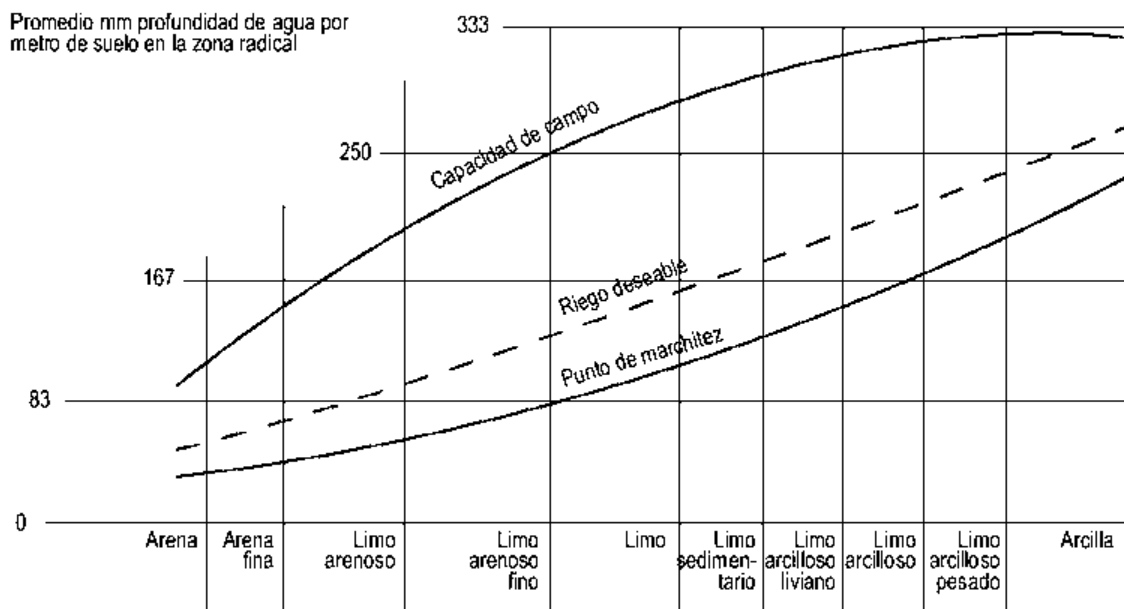


Figura 3. Capacidad de agua disponible típica en suelos de diferentes texturas. Fuente: Smith & Ruhe 1955.

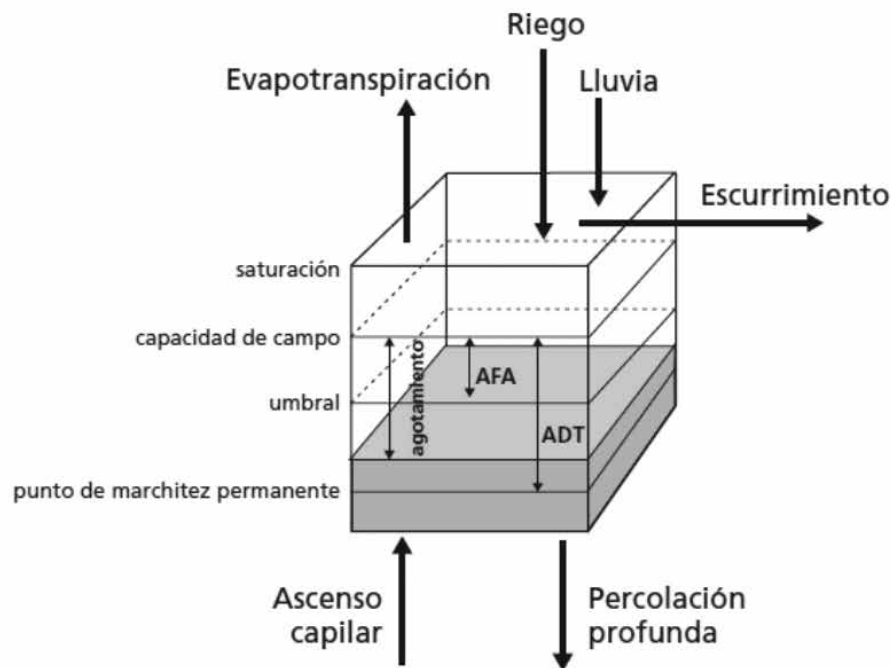


Figura 4. Balance de agua en la zona radicular. Fuente: Allen *et al.*

La caracterización de los patrones de retención hídrica del suelo [10] son útiles como punto de partida; la aproximación teórica, sin embargo, requiere ser comparada con algún tipo de técnica experimental

que permita cotejar el comportamiento teórico propuesto por el modelo de ecuaciones. Este será uno de los aspectos experimentales que se propondrán en la siguiente fase del proyecto.

Elementos convergentes de la tecnología

De las diferentes consideraciones mencionadas anteriormente podemos resumir que matemáticamente el modelamiento del comportamiento del riego está vinculado directamente con las propiedades de resistencia física de los materiales, en nuestro caso el suelo o sustrato.

El aspecto correspondiente a la nutrición de la planta es abordable desde la perspectiva de la química, los nutrientes son moléculas que se asocian a la estructura molecular del suelo y son absorbidas por la planta para que se efectúen procesos como el de fotosíntesis, respiración y transpiración.

Para trasladar la representación gráfica y registrar el modelo de exploración del suelo y los fenómenos del movimiento del agua y los nutrientes asociados, consideremos, que en cierta forma existen dos "espacios", o si lo prefiere existe un espacio físico, pero con dos representaciones.

La primera representación de nuestro espacio físico ocurre en el conjunto teórico, este es conjunto o espacio continuo donde recaen las soluciones a todas las ecuaciones y modelamientos que se han presentado hasta el momento o cualquier otra que pueda aportar una solución a los problemas de irrigación, suministro y traslado de los nutrientes a la planta.

El segundo espacio es lo que llamaremos representación virtual o computacional del espacio de, en primer lugar, se observa que este espacio virtual es un subconjunto de, esto es claro al considerar que la estructura de datos que se use para almacenar la información depende de la memoria del computador y por lo tanto es finita, razón por la cual en la declaración de una estructura tipo arreglo o lista se determina el tamaño de dicha estructura.

Una consideración importante y que debemos tomar en cuenta es que idealmente quisiéramos medir lo que ocurre en cada uno de los puntos de nuestro espacio real, es decir el suelo o sustrato, no obstante, como se ha hecho notar requerimos implementar una capa de sensores de una resolución suficiente que permita monitorear el comportamiento del modelo de riego.

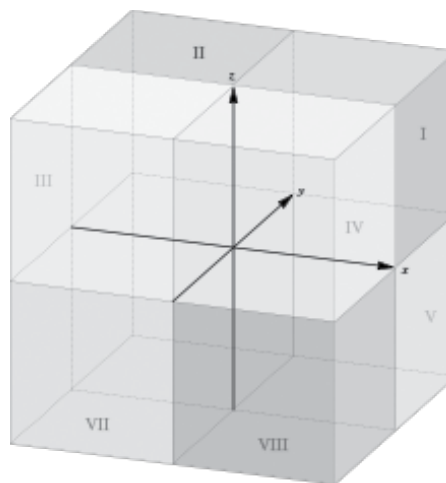


Figura 5. Representación del suelo como del espacio en R3. **Fuente:** Elaboración propia.

En este caso además para elegir una resolución también debemos considerar el tipo y tamaño de los sensores que queremos implementar, por ejemplo, los sensores de humedad más comunes para Arduino y Raspberry Pi son los FC28, dado que el voltaje de operación de este sensor es de 3-5 VDC de entrada y 0-5 VDC de salida, además de verificar la calibración de los sensores es necesario mapear correctamente cada una de las mediciones a una estructura de datos que se conformará como la base para la realización de los procesos de simulación.

Hasta este punto hemos establecido que por medio de algunos modelos y ecuaciones disponibles es posible abordar el problema del ciclo hidrológico y representar el comportamiento del riego en el suelo para que finalmente por medio de un recurso computacional se estimen trayectorias óptimas de riego acordes con las necesidades de la planta.

El siguiente aspecto que nos interesa para que nuestra maceta desarrolle capacidad de autonomía es que la maceta se encuentre en capacidad de medir. Por lo tanto, debemos considerar la necesidad de disponer del conjunto de elementos, sensores, y en general conjuntos de datos que permitan comparar el desempeño real comparado con el modelamiento teórico.

Para proceder automatizar el registro de las variables ambientales caracterizadas en las ecuaciones (1) y (2), requerimos sensores y/o conjuntos de datos que registren las variables ambientales que hemos mencionado reiteradamente, estas son:

- i. Temperatura del ambiente.
- ii. Humedad del ambiente.
- iii. Velocidad del viento.
- iv. Luz solar.

Al considerar el diseño hemos encontrado múltiples oportunidades en el uso de microarquitecturas como Arduino, Raspberry Pi, tarjetas FPGA entre otras, sin embargo, es necesario considerar también las limitaciones que tienen. Las limitaciones de estas microarquitecturas son principalmente en capacidad de memoria y limitaciones de capacidad de procesamiento.

Recordemos que nuestra maceta autónoma es un sistema diseñado alrededor de la tecnología IoT, luego, estas limitaciones nos llevan a considerar la necesidad de hacer uso de las tecnologías de computación en la nube[12] no tanto para suplir estas deficiencias, sino para buscar herramientas que permitan disponer de capacidad de comunicación con otros dispositivos o sistemas. Por lo tanto, haremos uso de canales y protocolos de comunicación que permitan transmitir los datos a un centro de cómputo por medio del cual se puedan consumir y procesar una serie de servicios cloud que permitan ampliar el conjunto de [4] características.

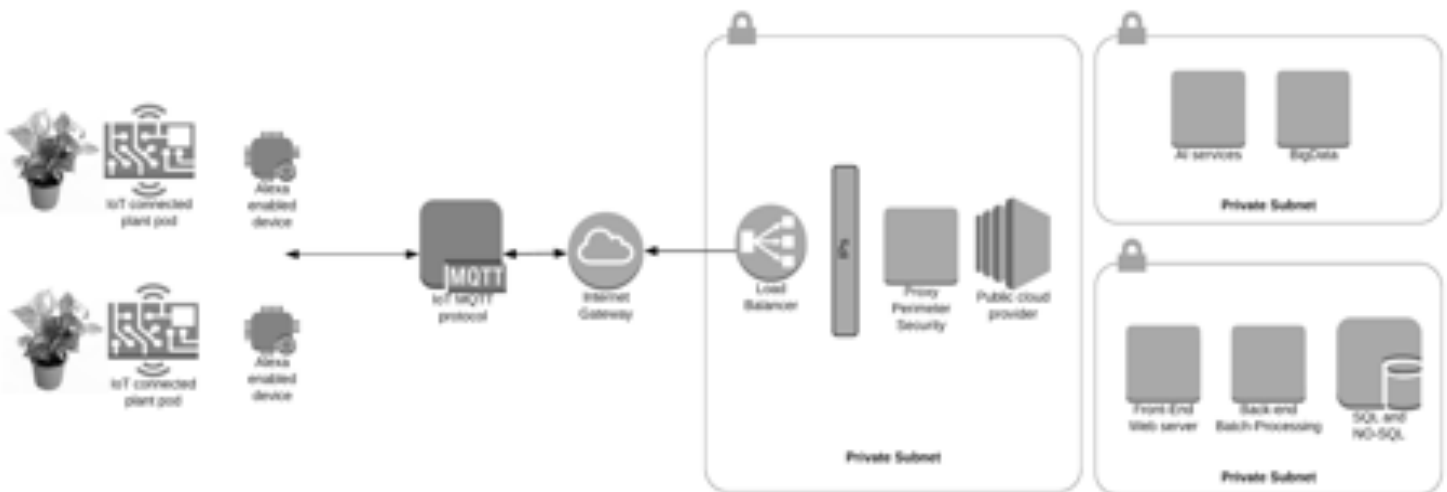


Figura 6. Comunicaciones de la maceta a servicios cloud. Fuente: Elaboración propia.

Resultados y discusión

En los aspectos experimentales del proyecto se tiene previsto someter los modelos teóricos a un proceso de validación experimental. Las pruebas tienen la finalidad de determinar que el riego cumpla con las expectativas

de que por medio del sistema físico de riego el modelo programado lleve la planta al nivel de hídrico deseable, esto es entre nivel de capacidad de campo y el punto de marchitez permanente.

Para comparar la ejecución real de la ejecución de los aspectos de riego, el tipo de sensores requerido se puede limitar a sensores de humedad del suelo, no obstante, el aspecto principal para considerar es la profundidad y distribución de los sensores; adicionalmente, tomando en cuenta que las ecuaciones que conforman los modelos de riego son principalmente ecuaciones diferenciales que se relacionan con respecto al tiempo, deberemos encontrar un método que sincronice y mida la magnitud del riego y mida su dispersión por regiones en términos diferentes momentos o tiempos.

Conclusiones

En la actualidad es posible aprovechar un conjunto de tecnologías para ofrecer mayor precisión en un sistema de maceta autónoma. La maceta, es susceptible de que se comunique, monitoree y se retroalimenta por medio de protocolos de comunicación estándar actuales como Wifi, TCP y Bluetooth. Las capacidades de las plataformas de computación en la nube son una gran oportunidad para compensar las restricciones de memoria y procesamiento de las micro arquitecturas, pero sobre todo ofrecen la posibilidad de acceder a técnicas y algoritmos complejos que se encuentran disponibles como recursos de servicios web por diferentes proveedores.

Finalmente, la posibilidad de desarrollar el modelo matemático, una capa de sensores remotamente programables y aprovechar la data y estadística generada por múltiples macetas, permiten que el concepto de maceta autónoma sea realizable.

Agradecimientos

Ing. Diana Paola Mora, instructora del programa SER, Centro agroempresarial Chía.

Referencias

- [1] G. L. Drescher, *Made-up minds: a constructivist approach to artificial intelligence*. MIT press, 1991
- [2] R. Penrosa, "Precis of the emperor's new mind: Concerning computers, minds, and the laws of physics," *Behavioral and Brain Sciences*, vol. 13, no. 4, p. 643-655, 1990.
- [3] C.M. Christense and M. Overdorf, "Meeting the challenge of disruptive change", *Harvard business review*, vol. 78, no. 2, pp. 66-77, 2000.
- [4] R.R. Miks, W.C. Fonteno, and R. A. Larson, "Hydrology of horticultural substrates. ii. predicting physical properties of media in containers", *Journal of the American Society for Horticultural Science (USA)*, 1989
- [5] S. B. Schatsky, Camhi, "Internet of things (iot): Five vectors of progress in the internet of things", *Delloite insight*, 2018.
- [6] FAO, *Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva y sostenible y fomentar la innovación*, consultado del sitio web "<http://www.fao.org/sustainable-development-goals/goals/goal-9/es/>".
- [7] C. Batchelor, "The accuracy of evapotranspiration estimated with the fao modified penman equation", *Irrigation Science*, vol. 5, no. 4, pp. 223-233, 1984.
- [8] P. M. Allen, "A complex systems approach to learning in adaptive networks", *International Journal of Innovation Management*, vol. 5, no. 02, pp. 149-180, 2001.
- [9] H. E. Orsolini, E. D. Zimmermann, and P. A. Basile, "Hidrología: procesos y métodos," in *Hidrología: procesos y métodos*, Universidad Nacional de Rosario, 2000.
- [10] L. S. Pereira, J. de Juan, M. Picornell, and J. Tarjuelo, "El riego y sus tecnologías," *Albacete: CREA-UCLM*. 296 p, 2010.
- [11] L. Zotarelli, M. D. Dukes, and K. T. Morgan, "Interpretación del contenido de la humedad del suelo para determinar capacidad de campo y evitar riego excesivo en suelos arenosos utilizando sensores de humedad," *The Institute of Food and Agricultural Sciences (IFAS)*, pp. 2-5, 2013.
- [12] M. Hori, E. Kawashima, and T. Yamazaki, "Application of cloud computing to agriculture and prospects in other fields," *Fujitsu Sci. Tech.J*, vol. 46, no. 4, pp. 446-454, 2010.