

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**ANÁLISIS DE LA EVAPORACIÓN DE SUELO EN SISTEMAS DE  
MICRORIEGO**

**DANIELA CAMILA SANDOVAL SANDOVAL**

PROYECTO DE TÍTULO PRESENTADO A  
LA FACULTAD DE INGENIERÍA  
AGRÍCOLA DE LA UNIVERSIDAD DE  
CONCEPCIÓN, PARA OPTAR AL TÍTULO  
DE INGENIERA CIVIL AGRÍCOLA.

**CHILLÁN-CHILE**

**2021**

## ANÁLISIS DE LA EVAPORACIÓN DE SUELO EN SISTEMAS DE MICRORIEGO

Aprobado por:

Camilo Souto Escalona  
Ingeniero Civil Agrícola, Dr.  
Profesor Asistente

---

Profesor Guía

Eduardo Holzapfel Hoces  
Ingeniero Agrónomo, Ph. D.  
Profesor Emérito

---

Profesor Asesor

José Luis Arumí Ribera  
Ingeniero Civil, Ph. D.  
Profesor Titular

---

Profesor Asesor

Nicole Uslar Valle  
Ingeniero Civil Agrícola, Ph. D.  
Profesor Asistente

---

Directora de Departamento

María Eugenia González Rodríguez  
Ingeniero Agrónomo, Ph. D.  
Profesor Asociado

---

Decana

## ÍNDICE DE MATERIAS

	Página
RESUMEN.....	6
SUMMARY .....	8
1. INTRODUCCIÓN .....	9
2. OBJETIVOS.....	13
2.1 Objetivos General .....	13
2.2 Objetivos Específicos.....	13
3. ANTECEDENTES GENERALES .....	14
3.1 Evaporación de suelo (E).....	14
3.2 Alternativas para medir evaporación de suelo (E) .....	16
3.2.1 Micro-lisímetros (ML) .....	16
3.2.2 Pulso de calor en suelo (PCS) .....	17
3.2.3 Cámaras de evaporación de suelo (Chambers).....	18
3.2.4 Balance de energía con relación de micro-Bowen (BE-RB).....	19
3.2.5 Método de Eddy (EC).....	20
3.3 Estado del arte de la medición de evaporación de suelo mediante micro-lisímetros.....	22
4. METODOLOGÍA .....	25
4.1 Estimación de la evaporación de suelo (E) mediante métodos matemáticos .....	25
4.2 Construcción de Micro-lisímetros de pesada automática.....	31
4.3 Futuro desarrollo en la medición de la evaporación de suelo .....	33
4.3.1 ZigBee:.....	33
4.3.2 SigFox:.....	35
4.3.3 NB-IoT:.....	36
4.4 Condiciones para medir la evaporación de suelo .....	39
5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	41
6 CONCLUSIÓN.....	47
7 LITERATURA CITADA .....	49

## ÍNDICE DE FIGURAS

		Página
Figura 1.	Esquema de micro-lisímetro con celda de carga.....	17
Figura 2.	Sonda de PCS.....	18
Figura 3.	Sistema Automatizado de una cámara de evaporación de suelo.....	19
Figura 4.	Sistema de la relación de Micro-Bowen.....	20
Figura 5.	Instrumentos y equipo del método de Eddy Covariance instalados en una torre.....	21
Figura 6.	Modelo conceptual de evaporación.....	26
Figura 7.	Esquema de presentación del ML con la celda de carga y microcontrolador.....	32
Figura 8.	Esquemas de almacenamiento de información de una Red ZigBee.....	35
Figura 9.	Esquema de la red SigFox.....	36
Figura 10.	Estructura básica de NB-IoT.....	37
Figura 11.	Evaporación de suelo (E) con el método de Daltón y en terreno con ML con respecto a las fechas de medición.....	41
Figura 12.	Evaporación de suelo (E) estimado con el método del ML y medido en terreno en relación con la fecha de medición.....	42
Figura 13.	Evaporación de suelo (E) estimados con el método de evaporación para un suelo húmedo y el medido en terreno con ML para las fechas indicadas.....	44
Figura 14.	Evaporación de suelo (E) estimados con el método de Campbell y el medido en terreno con ML para las fechas indicadas.....	45

## ÍNDICE DE ECUACIONES

	Página
Ecuación 1. Evaporación según Daltón.....	25
Ecuación 2. Evaporación según método del balance hídrico.....	27
Ecuación 3. Evaporación del suelo desde el fondo del surco de riego.	28
Ecuación 4. Evaporación total del suelo para el frutal.....	28
Ecuación 5. Evaporación de suelo húmedo para la primera etapa.....	29
Ecuación 6. Relación empírica que depende del índice de área foliar y del sombreado.....	29
Ecuación 7. Constante de proporcionalidad.....	29
Ecuación 8. Evaporación total del suelo según González y Hill.....	30
Ecuación 9. Evaporación acumulada según Campbell.....	30



## ANÁLISIS DE LA EVAPORACIÓN DE SUELO EN SISTEMAS DE MICRORIEGO

### ANALYSIS OF SOIL EVAPORATION IN MICRO-IRRIGATION SYSTEMS

**Palabras claves:** Evaporación, micro-lisímetros, goteo.

#### RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue analizar métodos directos e indirectos para la medición de evaporación de suelo (E) en sistemas de microriego, otros sistemas de riego y en suelos desnudos. A partir del concepto de E se pudieron determinar distintas alternativas de cuantificación de esta, ya sea mediante instrumentos de medición como lo son los micro-lisímetros (ML) o métodos matemáticos como es la ecuación de Campbell (1998) entre otros. Con ello se analizaron futuros desarrollos para la medición de la E en sistema de microriego mediante redes disponibles para el funcionamiento de microcontroladores y celdas de carga, lo que serviría para una futura construcción de un ML de pesada automática de bajo costo que recopile los datos de E. Finalmente se evaluaron cuatro métodos de estimación de E para compararlos con datos obtenidos en terreno en frutales de Avellano Europeo (*Corylus Avellana L.*) mediante ML, obteniéndose como resultado que el método de Campbell es el que más se aproximó en su estimación. Así se puede concluir que el concepto de E es importante para analizar la disponibilidad de agua y eficiencia en el uso de esta y además considerando que el ML es el instrumento más confiable para la medición de E, es recomendable desarrollar prototipos de ML de pesada automática, ya que, al ser un instrumento pequeño se podría transportar a cualquier

lugar y ayudaría considerablemente en el tiempo de recopilación de datos en terreno.



## ANALYSIS OF SOIL EVAPORATION IN MICRO-IRRIGATION SYSTEMS

**Keywords: Evaporation, micro-lysimeters, drip irrigation.**

### **SUMMARY**

The goal of this research was to analyze direct and indirect methods for measuring soil evaporation (E) in micro-irrigation systems, other irrigation systems and in bare soils. From the concept of E, different alternatives for its quantification could be determined, either by means of measuring instruments such as micro-lysimeters (ML) or mathematical methods such as the Campbell equation (1998) among others. With this, future developments for the measurement of E in a micro-irrigation system were analyzed through available networks for the operation of microcontrollers and load cells, which would serve for a future construction of a low-cost automatic weighing ML that collects data from E. Finally, four methods for estimating E were evaluated to compare them with data obtained in the field in European Hazelnut (*Corylus Avellana L.*) fruit trees by means of ML, obtaining as a result that the Campbell method is the one that most closely approximated in its estimation. Thus, it can be concluded that the concept of E is important to analyze the availability of water and efficiency in its use and considering that the ML is the most reliable instrument for measuring E, it is recommended to develop prototypes of automatic weighing ML, since, being a small instrument, it could be transported anywhere and would help considerably in data collection time in the field.



## 1. INTRODUCCIÓN

Conocer los requerimientos de agua del cultivo es indispensable para realizar una planificación correcta del riego y mejorar la eficiencia de uso del agua, suministrando al cultivo la cantidad de agua suficiente para satisfacer plenamente sus necesidades (INTAGRI, 201?). Uno de los parámetros más importantes es la evapotranspiración (ET).

La ET es la combinación de dos procesos por separado, por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación (E) y por transpiración (T) de un cultivo. La E y la T ocurren simultáneamente y no hay una manera sencilla de distinguir entre estos dos procesos. Aparte de la disponibilidad de agua en los horizontes superficiales, la E de un suelo cultivado es determinada principalmente por la fracción de radiación solar que llega a la superficie del suelo. Esta fracción disminuye a lo largo del ciclo del cultivo a medida que la canopia del cultivo proyecta más sombra sobre el suelo. En las primeras etapas del cultivo, el agua se pierde principalmente por E directa del suelo, pero con el desarrollo del cultivo y finalmente cuando este cubre totalmente el suelo, la T se convierte en el proceso principal. En el momento de la siembra, casi el 100% de la ET ocurre en forma de E, mientras que cuando la cobertura vegetal es completa, más del 90% de la ET ocurre como T (Allen *et al.*, 2006).

Los riegos frecuentes tienden a aumentar las pérdidas por E desde el suelo. En terrenos con empastadas o cultivos que cubren completamente la superficie del suelo con el follaje, se reduce la E por la sombra que este produce, sin embargo, esta empastada transpira por lo que no es clara la disminución de ET (Tosso & Ferreyra, 1984).

Después de un evento de riego, la E desde la superficie del suelo es alta mientras permanece saturado, la velocidad de evaporación en estas condiciones es casi igual a la de una superficie de agua libre a la misma temperatura. A medida que el contenido de humedad en la superficie del suelo disminuye, la velocidad de evaporación se reduce drásticamente. La velocidad de evaporación del suelo entre riegos sucesivos depende de factores tales como: rastrajes, "mulching" (cobertura artificial del suelo), textura del suelo, clima, tipo de cultivo, estado de desarrollo vegetativo del cultivo y el método, frecuencia y profundidad del riego (Tosso & Ferreyra, 1984).

La E se mide por el espesor de la capa de agua evaporada expresada en milímetros y suele tomarse como intervalo entre dos observaciones consecutivas. La E es una magnitud difícil de medir, debido a que sufre considerables variaciones de carácter local y no se ha podido encontrar un proceso suficientemente representativo de las condiciones medias de una región determinada. La E en terrenos secos es distinta a la de terrenos con cuerpos de agua, por ejemplo la E en un río es diferente a la E de un bosque, influyen mucho las condiciones meteorológicas del aire. En las estaciones meteorológicas las medidas de evaporación corresponden a la E potencial (Grandón , 2009).

En el caso de mediciones de E existen investigadores como Ben-Asher (1983) el cual realizó un balance de energía superficial en la capa superior del suelo, con datos meteorológicos a 2 m de altura y después Kerridge (2013) tomo el modelo anteriormente mencionado, pero considero que era más adecuado para casos donde la velocidad de viento tendiera a cero entre hilera en viñedos.

En la actualidad existen diversas metodologías que permiten cuantificar la E producida desde el agua almacenada en el suelo. Por lo general, estas técnicas suelen clasificarse, de acuerdo con el modo de estimación, como métodos directos o indirectos. Dentro de las técnicas directas se encuentran los lisímetros, micro-lisímetros (ML), domo y correlación de Eddy (Eddy Covariance). Como técnicas indirectas pueden señalarse los acercamientos por medio de balances de agua, la modelación numérica y los métodos de análisis de imágenes satelitales o percepción remota, entre otros (Muñoz *et al.*, 2009).

El método estándar para medir E es el lisímetro de pesada. El cual se define como un recipiente cerrado lateralmente y con un drenaje en su base, donde se establece un cultivo de interés y se monitorea la variación del agua con respecto al tiempo mediante un balance hidrológico. Para determinar el incremento en la reserva de agua del suelo utilizable por las plantas, se pueden emplear los métodos de humedad de suelo y por pesada, para lo cual el plano inferior del recipiente está constituido por una plataforma con una báscula (Sánchez, 1992).

Los lisímetros convencionales para cultivos anuales poseen un diámetro superior a los 110 cm y una profundidad mayor a los 130 cm. Sin embargo, dificultades técnicas y económicas demuestran que muchos investigadores hayan optado por el uso de lisímetros de menor tamaño denominados como micro-lisímetros o mini-lisímetros.

Los micro-lisímetros son de distintos tamaños y formas, con diámetros inferiores a los 100 cm y una profundidad que no excede los 70 cm. Según la metodología empleada para determinar las variaciones del contenido de agua existen lisímetros de pesada e hidráulicos y de variación de altura de agua (Khan, 1998). Para definir los materiales con los que se debe construir los micro-lisímetros se han realizado estudios en acero y en plástico determinando que el primero se calienta mucho más rápido, por lo tanto, se recomienda que las investigaciones se realicen por una mayor cantidad de días sean en un material no conductor como el plástico o PVC, para que exista una buena conducción de calor. Para el caso de mediciones de evaporación diaria no debería existir una gran diferencia en los materiales utilizados como acero y plástico (Allen, 2006).

Debido a que el manejo del micro-lisímetro puede realizarse de forma automatizada mediante la integración de los componentes físicos y lógicos, algunas interrogantes que se busca responder en esta investigación son: ¿Es posible diseñar un micro-lisímetro de pesada automática de bajo costo?, ¿Es viable realizar este tipo de mediciones en un huerto agrícola?, ¿Qué beneficios podría entregar un micro-lisímetro de pesada automática de bajo costo?

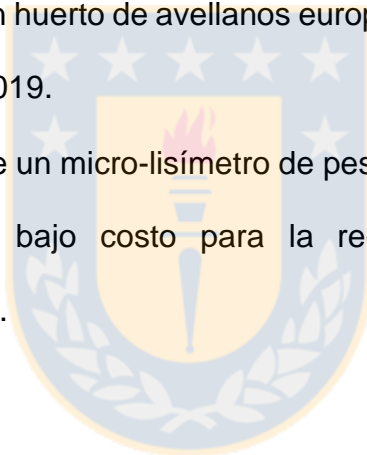
## 2. OBJETIVOS

### 2.1 Objetivos General

Analizar los métodos directos e indirectos de medición de la evaporación de suelo bajo sistemas de microriego.

### 2.2 Objetivos Específicos

- Analizar las diferentes alternativas existentes para cuantificar la evaporación de suelo desnudo en sistemas de microriego.
- Evaluar cuatro modelos de estimación de evaporación de suelo desnudo con datos obtenidos en un huerto de avellanos europeos (*Corylus Avellana L.*) en la temporada 2018-2019.
- Proponer el diseño de un micro-lisímetro de pesada automática mediante un microcontrolador de bajo costo para la recopilación de datos de la evaporación de suelo.



### 3. ANTECEDENTES GENERALES

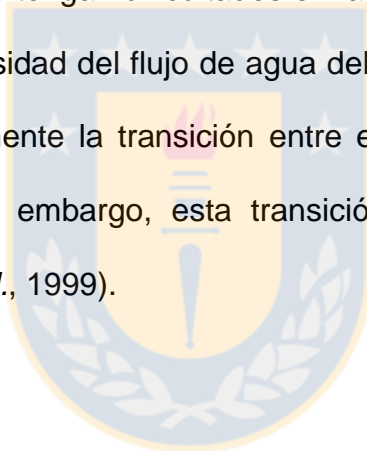
#### 3.1 Evaporación de suelo (E)

La evaporación es el proceso físico en el cual el agua cambia del estado líquido en que se encuentra en los cauces, lagunas, ríos y en las capas más superficiales del suelo, al estado gaseoso, el cual retorna a la atmósfera en forma de vapor tras haber adquirido la suficiente energía cinética para emerger por sí solas de la superficie del agua o del suelo húmedo y superar la tensión superficial. De esta manera las partículas de agua escapan al aire, consumen calor, produciendo así una disminución de la temperatura ambiental (Grandón, 2009). Hidrológicamente podría definirse como la tasa neta de transporte de vapor hacia la atmósfera (Aparicio, 1989).

Cuando se tiene que la superficie evaporante es la superficie del suelo, se deben considerar como factores el grado de cobertura del suelo por parte del cultivo y la cantidad de agua disponibles, como lo son las lluvias frecuentes, el riego y el ascenso capilar en un suelo con manto freático poco profundo. En zonas en las que el suelo es capaz de proveer agua con velocidad suficiente para satisfacer la demanda de la evaporación del suelo, este proceso está determinado solamente por las condiciones meteorológicas. Sin embargo, en casos en que el intervalo entre la lluvia y el riego es grande y la capacidad del suelo de conducir la humedad cerca de la superficie es reducida, el contenido en agua en los horizontes superiores disminuye y la superficie del suelo se seca. Bajo estas circunstancias, la disponibilidad limitada del agua ejerce un control sobre la evaporación del suelo. En ausencia de cualquier fuente de reabastecimiento de agua a la superficie del suelo,

la evaporación disminuye rápidamente y puede cesar casi totalmente en un corto lapso (Allen *et al.*, 2006).

Dentro de las investigaciones (Philip, 1957) se han podido establecer tres etapas dentro de la E, la primera controlada por condiciones atmosféricas externas; la segunda gobernada por la transmisión de agua en el suelo y la última controlada por los gradientes térmicos cuando el suelo se encuentra seco y el flujo de agua transcurre preferentemente en forma de vapor. Desde cierto punto de vista es importante mantener el suelo bajo la primera etapa porque en estas condiciones no es previsible que las plantas tengan dificultades en la absorción de agua. Por ello, y por la variación de la densidad del flujo de agua del suelo en las tres etapas, es interesante definir precisamente la transición entre ellas, especialmente entre la primera y la segunda, sin embargo, esta transición no está demasiado bien caracterizada (Giráldez *et al.*, 1999).



### **3.2 Alternativas para medir evaporación de suelo (E)**

En el diseño y operación la planificación de proyectos de riego se hace indispensable conocer las exigencias de agua de cada cultivo y los recursos de agua disponible en terreno, es por esto que se han realizado estudios para determinar cada una de las necesidades hídricas y se han ido desarrollando distintos métodos que nos entregan esta información, como lo es la E, la cual está directamente relacionada con el uso del agua en un predio. Es así como existen variados métodos para cuantificar la E y facilitar los balances posteriores, entre ellos destacan micro-lisímetros (ML), pulso de calor en suelo (PCS), cámaras de evaporación de suelo (Chambers), balance de energía con relación de micro-Bowen (BE-RB) y el método de Eddy Covariance (EC) entre otros.

#### **3.2.1 Micro-lisímetros (ML)**

Un ML también llamado mini-lisímetro o evaporímetro, generalmente consiste en un instrumento que permite medir las componentes del balance de agua mediante la obtención de diferencias de masa. Se considera un instrumento económico, fácil de construir y que entrega medidas confiables. Entre sus desventajas están destinar un tiempo importante para la medición y que requiere tener un suelo bien drenado, además se suele usar en periodos cortos y en determinadas condiciones ambientales. En la Figura 1 que se ve a continuación se presenta el esquema de un micro-lisímetro.



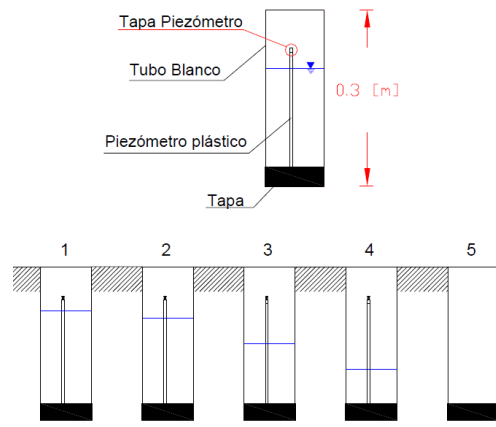


Figura 1. Esquema de micro-lisímetro con celda de carga. Fuente: Muñoz, 2009.

### 3.2.2 Pulso de calor en suelo (PCS)

La sonda de pulso de calor del suelo (PCS) fue desarrollada inicialmente para determinar el contenido de agua basado en las propiedades térmicas del suelo. La evaporación se puede estimar con las sondas de pulso de calor utilizando un equilibrio energético para una capa de suelo entre dos profundidades de medición mediante el flujo de calor del suelo entrante y saliente y el almacenamiento de calor. La energía que no puede ser contabilizada por el cambio en el flujo de calor del suelo o el almacenamiento de calor, se atribuye al flujo de calor latente. Entre las principales ventajas de este método destaca que se pueden realizar mediciones continuas y se puedan monitorear en profundidad, solo que las mediciones de E son aplicables para el II proceso. En la siguiente Figura 2 se muestra la sonda PCS y las partes que la componen.

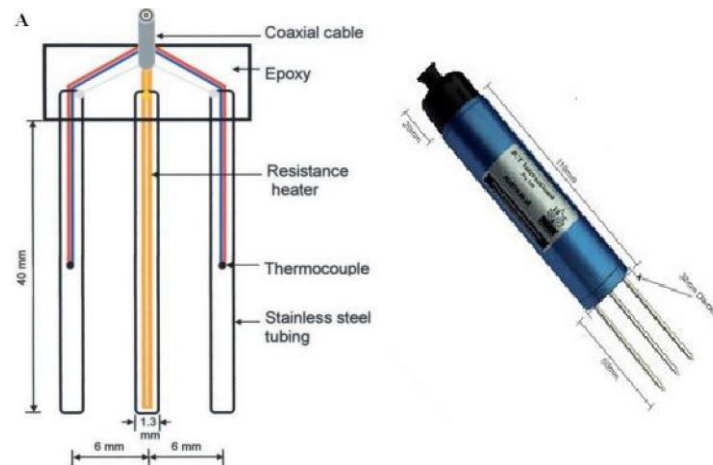


Figura 2. Sonda de PCS. Fuente: Souto, 2019.

### 3.2.3 Cámaras de evaporación de suelo (Chambers)

El método se basa en la medición de los cambios en la concentración de gas en un volumen cerrado, desde el cual se estima el intercambio de gas entre la superficie del suelo y la atmósfera. Las cámaras pueden ser estáticas, utilizando un agente de absorción para integrar flujo durante un período de tiempo, o dinámicas midiendo las diferencias de concentración entre la entrada y la salida de aire. Este último es más comúnmente utilizado, especialmente como analizadores de gas infrarrojo (IRGA) donde se han vuelto ampliamente disponibles, pero también más costoso. Dentro de la cámara hay un ventilador o una bomba que imita el flujo de aire en el campo y/o circula gas a un IRGA externo. La estimación de  $E$  se obtiene utilizando una relación predeterminada con la pendiente máxima del cambio de densidad de vapor, medido con un psicómetro.

En la siguiente Figura 3 se presenta una Cámara de evaporación de suelo más moderna, con cada una de las partes que la componen.

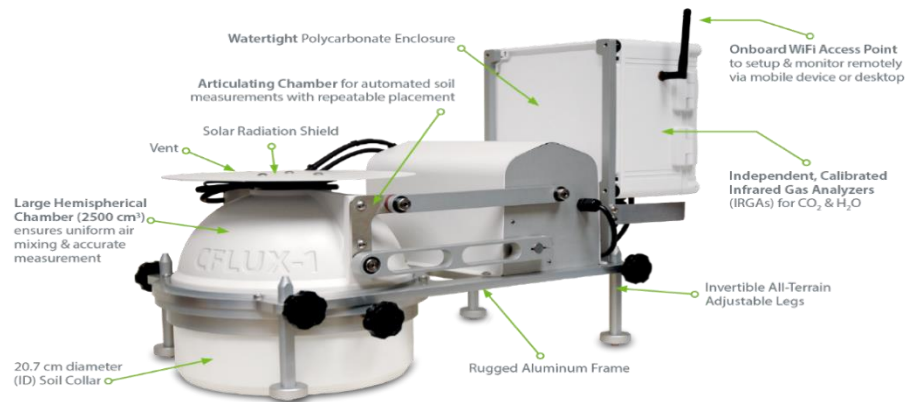


Figura 3. Sistema Automatizado de una cámara de evaporación de suelo. Fuente: PP Systems, 2017.

### 3.2.4 Balance de energía con relación de micro-Bowen (BE-RB)

La relación de Bowen ( $\beta$ ) fue planteada por Bowen (1926) y es la relación entre calor sensible ( $H$ ) y calor latente ( $\lambda E$ ), donde se estima el flujo de calor latente desde una superficie usando mediciones de los gradientes de temperatura y humedad del aire entre dos alturas por encima de la superficie (Todd *et al.*, 2000a) basándose en la suposición de que los mecanismos atmosféricos de transporte de vapor y calor son similares. En general, los sistemas de BE-RB proporcionan un enfoque razonable para determinar  $E$  y puede ser útil para comprender mejor las contribuciones de los componentes a los flujos de agua y energía en otros sistemas de cobertura parcial (Holland *et al.*, 2013). Este método es particularmente notable como una única opción para la medición continua representando una superficie relativamente grande (comparada, por ejemplo, con ML), sin embargo, aún se encuentra en su fase de desarrollo y requiere más pruebas y adaptaciones bajo diferentes condiciones ambientales antes de que pueda adoptarse ampliamente (Kool *et al.*, 2013). En la Figura 4 se presenta el sistema donde se mide la relación de Bowen un predio de viñedo.

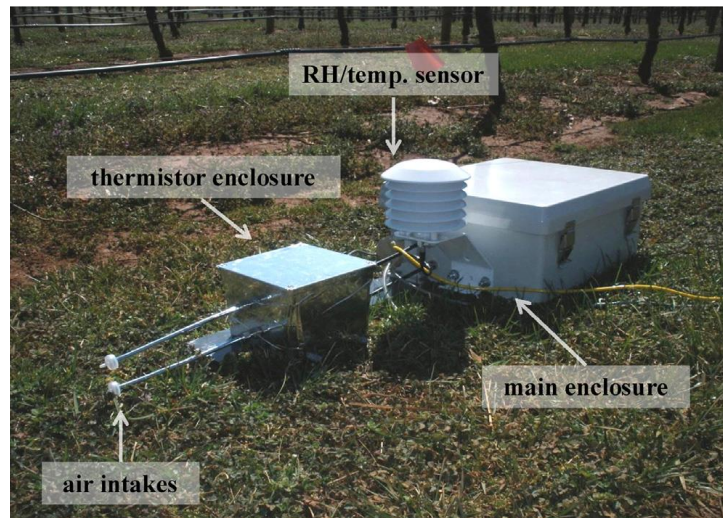


Figura 4. Sistema de la relación de Micro-Bowen. Fuente: Holland *et al.*, 2013.

### 3.2.5 Método de Eddy (EC)

El método Eddy (EC) se basa en la medición de alta frecuencia, típicamente 10-20 Hz, del momento, temperatura y vapor de agua para determinar la ET. La velocidad tridimensional del viento es más comúnmente medida por un anemómetro sónico y la concentración de vapor por lo general con un medidor de gases (como se muestra en la Figura 5) (Kool *et al.*, 2013). El método EC es conocido principalmente para medir ET debido a la facilidad de instalación, la capacidad de proporcionar un muestreo directo continua de la capa límite turbulenta y la posibilidad de asociar mediciones de los componentes del balance de energía (Allen *et al.*, 2011), pero también se ha aplicado con éxito para medir E bajo canopia forestales.

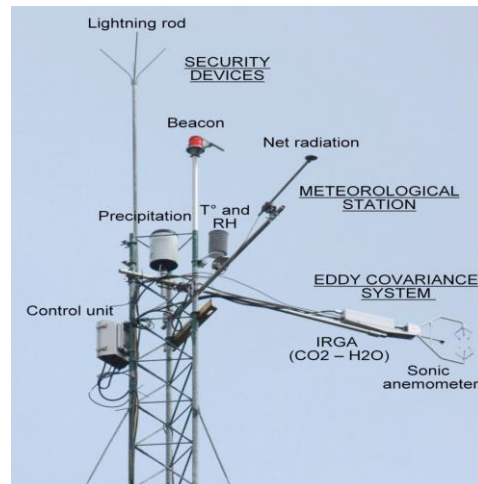


Figura 5. Instrumentos y equipo del método de Eddy Covariance instalados en una torre. Fuente: Center for Climate and Resilience Research, 2014.

Souto (2019) destaca que las mediciones representan un área a favor del viento desde el instrumento que se escala con factores tales como la altura del instrumento, la velocidad del viento y la estabilidad atmosférica (Allen *et al.*, 2011). El método requiere una superficie homogénea sin interrupciones entre la superficie y la altura del instrumento y por lo tanto, considerando que la precisión de la medición aumenta con la altura, tiene mejores resultados en canopias altas (por ejemplo, pino forestal). Para determinar las condiciones, incluida la altura de la canopia, es necesario realizar un trabajo adicional que permita el uso de EC para la medición de E bajo el canopia y explorar posibles soluciones para su uso bajo canopias bajas (Kool *et al.*, 2013).

### 3.3 Estado del arte de la medición de evaporación de suelo mediante micro-lisímetros

La E es importante dentro del balance hídrico, con respecto a la relación que existe entre el suelo, las plantas y las condiciones atmosféricas del lugar, por lo que es un tema interesante de investigar. Existen mediciones de forma directa y también basada en modelos teóricos de predicción de la E, pero sin duda el de mayor complejidad se basa en obtener este término de forma directa. Para esto debemos tener en cuenta que la E se conforma de dos etapas la primera referida a las distintas condiciones atmosféricas como la diferencia de vapor entre el suelo y la atmosfera y la segunda etapa referida a los contenidos de agua en el suelo y los gradientes de temperatura.

Souto (2019) describe la reseña sobre los ML hasta nuestra actualidad y los diferentes investigadores que estuvieron a cargo de cada una de ellas, como se muestra a continuación.

Dentro de los principales instrumentos de medición de la evaporación se encuentran los micro-lisímetros, que generalmente consisten en un cilindro pequeño de 0.1 m de diámetro y 0.3 m de alto. En 1982 se investigó por primera vez sobre el desarrollo de un lisímetro de tamaño pequeño el cual servía para medir el contenido de agua del suelo, esto con la facilidad que implicaba insertar el micro-lisímetro en el suelo y la determinación de la masa con una balanza de precisión, por lo tanto, considero la diferencia del peso gravimétrico en un determinado tiempo. Además, se evaluaron distintos largos del micro-lisímetro encontrando que el de 76 mm de profundidad poseía una exactitud de 0.5 mm por uno o días de medición (con una confianza

mayor al 95%), en condiciones de cobertura parcial y sombreado parcial, o en situaciones para las cuales la resolución espacial de los lisímetros tradicionales es demasiado grande (Boast y Robertson, 1982).

Posteriormente otros investigadores quisieron comparar si existe un efecto importante sobre el flujo de calor en los micro-lisímetros con el fondo tapado y sin tapar, además de analizar materiales como el plástico o acero, donde se comparó la evaporación acumulada en un periodo después de un riego, con diferentes longitudes de micro-lisímetros. Los resultados más relevantes respecto al tipo de material es que el acero se calienta más rápido en profundidad debido a que el flujo de calor es mayor que en los micro-lisímetros de plástico. El taponamiento de los micro-lisímetros hace que los resultados de evaporación se sobrestimen después de un riego, ya que no se da el espacio al drenaje que pasa en un suelo en condiciones normales. Así se llegó a que las paredes de los micro-lisímetros deben estar hechas de un material no conductor como el plástico y que se debe evitar que el flujo de calor en el fondo no se agrupe (Evetts *et al.*, 1995). Así los micro-lisímetros de plástico se sugieren que sean de una longitud de 30 cm si se dejaran en un terreno durante un periodo prolongado mayor a 9 días, además se debe evitar cambiar los micro-lisímetros cuando se desea tener una variabilidad espacial de evaporación. En 2006 se buscó la diferencia en E según el material de los micro-lisímetros encontrando que no existe diferencia significativa la cual no es mayor al 5% entre micro-lisímetros de plásticos y acero haciendo mediciones diarias de E (Todd, 2000b).

Por otra parte, se evaluaron los micro-lisímetros en suelos arenosos considerando el diámetro, la profundidad y la vida útil de estos, donde se encontró que el principal error es el drenaje en la base del lisímetro luego de un riego o precipitación y la extracción de agua de las raíces bajo un cultivo. Sus principales recomendaciones fueron que los micro-lisímetros deben ser de PVC por su capacidad calórica y conductividad termal similares a la del suelo, con diámetros interno no inferior a 50 mm y una longitud no menor a 100 mm, además de sellar con una cinta impermeable en los costados para asegurar un flujo vertical y nivelar los micro-lisímetros al momento de fijar en el suelo (Daamen, 1983). En 1997 Thompson junto a otros investigadores utilizaron las técnicas de Klocke donde los micro-lisímetros estaban contruidos de PVC con diámetro interno de 15 cm y de longitud de 20 cm (Klocke *et al.*, 1990) los cuales tuvieron un buen desempeño en la temporada comparando los contenidos de humedad del suelo descubierto y los micro-lisímetros, lo importante de esta investigación es que cada vez que se realizaba un riego los micro-lisímetros eran sacados y después insertados nuevamente y el agua de riego aplicada al predio fue agregada manualmente a ellos, puesto que tenían una placa en la zona inferior evitando el drenaje del agua (Thompson *et al.*, 1993).

Finalmente, en 2014 se dijo que los micro-lisímetros se consideran el método más confiable para medir la evaporación y normalmente sirven como validación para otros métodos (Kool *et al.*, 2013).



## 4 METODOLOGÍA

El avellano europeo (*Corylus Avellana L.*) ha experimentado un fuerte desarrollo en las zonas centro sur y sur del país, debido a que se encuentra dentro de los productos más exportados a nivel internacional. Es así como se ha determinado evaluar el concepto de E en avellanos europeos localizados en la región de Ñuble, principalmente en el sector de Pullami donde se utilizarán datos medidos en terreno comprendidos entre diciembre de 2018 y enero de 2019, los cuales servirán para la estimación de los métodos que más adelante se detallan y también para comparar con los resultados de E obtenidos en terreno.

### 4.1 Estimación de la evaporación de suelo (E) mediante métodos matemáticos

La evaporación se produce por efecto de la radiación solar, el viento y las diferencias de tensión de vapor entre el agua y la atmósfera o déficit higrométrico. De esta forma, la E es proporcional al déficit higrométrico y se relaciona inversamente a la presión atmosférica total (Custodio, 1996).

Daltón 1802 dedujo la expresión

$$EV = K \cdot (e_s - e_d) \quad [1]$$

donde:

EV = Evaporación (mm).

$e_s$  = Tensión de vapor a saturación del vapor de agua (kPa).

$e_d$  = Tensión de vapor del aire (kPa).

$K$  = Coeficiente que refleja la influencia de otras variables en el proceso ( $\text{mm kPa}^{-1}$ ) (temperatura, velocidad de viento, presión atmosférica, forma de la superficie evaporante y calidad de agua).

Los mecanismos de  $E$  desde el suelo se encuentran gobernados por el movimiento de agua tanto en su estado líquido como gaseoso. De esta forma, la  $E$  se encontrará caracterizada por el transporte ascendente o descendente de vapor en la parte superior del perfil de suelo ( $F_V$ ) y por un flujo líquido ascendente en su sección inferior ( $F_L$ ). La línea divisoria entre ambos fenómenos es conocida como frente de evaporación ( $F_E$ ). A continuación, la Figura 6 presenta un esquema explicativo de los factores involucrados en el proceso de evaporación (Muñoz *et al.*, 2009).

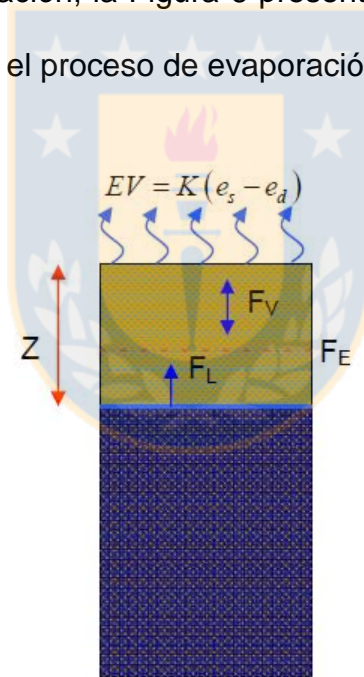


Figura 6. Modelo conceptual de evaporación. Fuente: Muñoz *et al.*, 2009.

Según método del balance hídrico basado en el principio de conservación de la masa aplicado a una parte del ciclo hidrológico. La  $E$  en un cuerpo de agua natural o artificial queda determinada por la diferencia entre las variables de entrada, precipitación ( $P$ ) y caudal de entrada ( $I$ ), y las variables de salida: almacenamiento

en las orillas ( $V_s$ ), caudal de salida ( $O$ ) y la variación en el volumen de almacenamiento ( $\Delta S$ ).

$$E = P + I - V_s - O \pm \Delta S \quad [2]$$

Donde

$E$  = Evaporación (mm).

$P$  = Precipitación (mm).

$I$  = Caudal de entrada (mm).

$V_s$  = Almacenamiento en las orillas (mm).

$O$  = Caudal de salida (mm).

$\Delta S$  = Variación del volumen de almacenamiento (mm).

Este método no es el más recomendado, debido a que los errores en las mediciones de las variables de entrada, salida y almacenamiento son a menudo grandes comparados con la evaporación calculada.

Otro método investigado para medir  $E$  fue en un cultivo donde se posicionaron micro-lisímetros en tres diferentes posiciones dentro de las filas de flujo de savia: en el fondo del surco de riego y en las partes sombreadas y no sombreadas del surco no humedecido, donde se realizaron repeticiones en cada una de las posiciones antes mencionadas. Además, se reinstalaron dentro de un día después de cada riego y fuertes lluvias. El pesaje se realizó por la mañana, cada uno o dos días

mediante balanza eléctrica con una precisión de 0,1 g (Zhan *et al.*, 2011). La evaporación del suelo se calculó a partir de la siguiente ecuación:

$$E_{s1} = \frac{10}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\Delta M_1}{S_e} \quad [3]$$

donde:

$E_{s1}$  = Evaporación del suelo desde el fondo del surco de riego (mm).

$S_e$  = Área de la sección transversal de los micro-lisímetros (cm<sup>2</sup>).

$\Delta M_1$  = Diferencia de los pesos iniciales y finales (g).

$N$  = Réplicas.

Las evaporaciones de sombra ( $E_{s2}$ ) y las porciones no sombreadas ( $E_{s3}$ ) del surco no humedecido se determinaron de la misma manera. A escala del cultivo, la evaporación podría calcularse mediante la ecuación:

$$E_s = A_1 E_{s1} + A_2 E_{s2} + A_3 E_{s3} - P \quad [4]$$

Donde:

$A_1$ ,  $A_2$  y  $A_3$  = Área de las tres posiciones para todo el cultivo (%).

$P$  = Precipitación durante ese período (mm).

Para el método que se describe a continuación se tomó como la evaporación de un suelo húmedo según Ritchie *et al.* (1976) y Kanemasu *et al.* (1976), donde el proceso consistió en la estimación de la evaporación del suelo cuando las pérdidas respectivas se ven limitadas sólo por factores climáticos (primera etapa); cuando el agua no puede ser transportada a la superficie del suelo con la misma intensidad

que los factores climáticos demandados (segunda etapa), y en la estimación de la transpiración, tanto cuando el agua del suelo no es una limitante como cuando lo es (González, 1998).

Se puede determinar la evaporación del suelo cuando el suelo está húmedo (primera etapa) calculada como:

$$E_0 = \left(\frac{\tau}{\alpha}\right) * ET_{max} \quad [5]$$

donde:

$ET_{m\acute{a}x}$  = Evapotranspiración máxima ( $W\ m^{-2}$ ).

$\tau$  = Relación empírica que depende del índice de área foliar (L) y del sombreado explicada como:

$$\tau = \exp(-0.389L + 0.15) \quad [6]$$

la constante de proporcionalidad ( $\alpha$ ) está determinada como:

$$\alpha = \frac{ET_{m\acute{a}x}}{\left(\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}\right)Rn} \quad [7]$$

donde:

$Rn$  = Radiación neta ( $W\ m^{-2}$ ).

$\Delta$  = Pendiente psicrométrica ( $kPa\ ^\circ C^{-1}$ ).

$\gamma$  = Constante psicrométrica ( $kPa\ ^\circ C^{-1}$ ).

por lo tanto, la evaporación total se puede calcular:

$$E = E_o [T^{0.5} - (T - 1)^{0.5}] \quad [8]$$

$E$  = Evaporación de suelo total (mm día<sup>-1</sup>).

$E_o$  = Evaporación de suelo primera etapa (mm día<sup>-1</sup>).

$T$  = Tiempo desde que se inició la segunda etapa de evaporación (día).

Finalmente, se utilizará la relación que utiliza Campbell (1998) para determinar la evaporación total de la superficie de suelo. Campbell propone la tasa de evaporación durante la primera fase es determinada por la demanda evaporativa de la atmósfera (ET potencial), por lo que, si la demanda es alta, esta fase es corta y viceversa. La fase dos, tasa de secado del suelo, podría ser determinada calculando la conductancia de vapor de la capa seca del suelo y la diferencia de presión de vapor, pero la tasa es determinada por la disponibilidad del suelo para conducir agua a la superficie evaporante. Así, la fase de secado del suelo, la tasa de evaporación decrece linealmente con la raíz cuadrada inversa del tiempo, por lo que la evaporación acumulada de la superficie de suelo puede obtener como:

$$E_{cumII} = C * \sqrt{t - t_1} \quad [9]$$

Donde:

$E_{cumII}$  = Evaporación acumulada en la fase dos (mm).

$t_1$  = Tiempo que dura la primera fase de secado del suelo (días).

$C$  = Constante que depende del suelo (mm día<sup>-1/2</sup>).

$C$  puede tomar valor de 5.1, 4.0, 3.5 y 3.0 mm día<sup>-1/2</sup> para suelos arcillo-limoso, limos, arcilloso y arenoso, respectivamente.

Es así como existen varios métodos además de los antes mencionados para la medición de E, pero más generalmente en el término de evapotranspiración el cual como sabemos por descripción involucra tanto la evaporación como la transpiración.

#### **4.2 Construcción de Micro-lisímetros de pesada automática**

Según las secciones anteriores para el estudio de E de suelo in situ y enfocándose en el balance los ML son los instrumentos más confiables para la medición de E en condiciones de buen drenaje, por lo tanto se realizará el diseño de un ML que realice registros automáticos de la cantidad de agua evaporada en una columna de suelo, en un tiempo determinado con celdas de carga y un microcontrolador considerando que el tamaño del ML sea cómodo para el transporte e instalación.

Para la construcción del ML y la zona de medición se eligió que sean de PVC por la capacidad calórica y conductividad termal que es similar a la del suelo ( $C_{t\text{PVC}}=1.5 \cdot 10^{-5} \text{ W s}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , según Evett (1995)), además de la fácil instalación y fabricación de este. Se determinó que las medidas fueran de un diámetro de 11 cm y una longitud de 15 cm, ya que según Campbell y Norman (1998) así se abarcan los cambios en el contenido de agua solo producto de la E. Posteriormente el ML será puesto en la parte inferior de la columna de suelo sobre la celda de carga (previamente calibrado), donde por señales eléctricas que trasmite se irán registrando las diferencias de masas en un tiempo determinado por el usuario, las que se registrarán en el microcontrolador o datalogger.

En la Figura 7 se muestra un esquema del ML según las medidas, tipo de material y partes que lo componen.

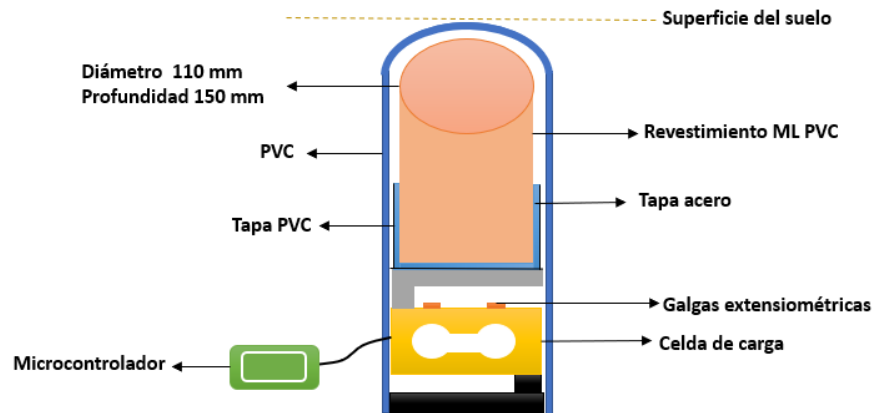


Figura 7. Esquema de presentación del ML con la celda de carga y microcontrolador. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente las medidas determinadas para la construcción del ML pueden variar, pero considerando que al ser más grande el ML la carga aumenta y así la precisión de la balanza disminuye y como este instrumento debería ser de fácil manipulación y transporte las dimensiones están dentro de los parámetros. Con respecto a la celda de carga (célula de carga) la idea es que se vayan registrando las diferencias de masa de la columna de suelo en el datalogger o microcontrolador mediante redes de conexión los cuales sirven para tener estos datos en línea o guardarlos en el mismo dispositivo.



### 4.3 Futuro desarrollo en la medición de la evaporación de suelo

La idea de automatizar el registro de datos se debe a la necesidad de facilitar las labores operacionales de la investigación, además de una mayor precisión en los datos obtenidos. Aun así, existen variadas alternativas en el mercado para la toma automática de datos de evaporación, pero principalmente basados en el instrumento de lisímetro que determina la lámina de agua requerida en el cultivo (evapotranspiración). En el caso de los micro-lisímetros se encuentran principalmente microcontroladores y celda de carga, los cuales son más simples por su facilidad de uso y bajo costo, que se enfocan operar en bucle abierto o cerrado, los primeros son capaces de actuar en algunos dispositivos, de acuerdo con un calendario de horas y fechas previamente definidos. En los sistemas de control de circuito cerrado, el controlador depende de sensores o algoritmos, el cual propicia algún mecanismo de retroalimentación (Camargo, 2012).

Entre las redes utilizadas con los microcontroladores se mencionan los siguientes:

#### 4.3.1 ZigBee:

ZigBee es un protocolo de comunicaciones inalámbricas basado en el estándar 802.15.4, está pensado para comunicaciones a baja velocidad entre dos o varios dispositivos, se pueden formar redes con miles de dispositivos comunicándose entre sí, por lo que es ideal para muchas aplicaciones. ZigBee es desarrollado por la ZigBee Alliance, formada por cientos de compañías que quieren solventar la necesidad de un estándar para comunicaciones a baja velocidad, con un bajo coste de implementación y donde los dispositivos que forman parte de una red

pueden requerir un bajo consumo, llegando a estar funcionando durante años con un par de pilas.

Se basa en el estándar de comunicaciones 802.15.4 que define el hardware y software de las capas physical (Phy) y media access control (MAC). Cada capa es responsable de una serie de funciones necesarias para la comunicación, ZigBee añade capas sobre las dos capas anteriores del 802.15.4, una capa no sabe nada sobre la capa que está por encima de ella y cada capa que añadimos añade una serie de funciones a la base de las inferiores.

Cualquier dispositivo de un fabricante que soporte este estándar de comunicaciones y pase la certificación correspondiente, podrá comunicarse con otro dispositivo de otro fabricante distinto. Un dispositivo ZigBee estaría formado por una radio según el estándar 802.15.4 conectada a un microcontrolador con la pila (stack) de ZigBee, donde se implementan las capas por encima de las del 802.15.4. Esta pila está diseñada para poder ser implementada en microcontroladores de 8 bits (Peñalver, 2012).

A manera de ejemplo, en la Figura 8 se presenta un esquema general de posibles medios para almacenar la información proveniente de una red ZigBee.

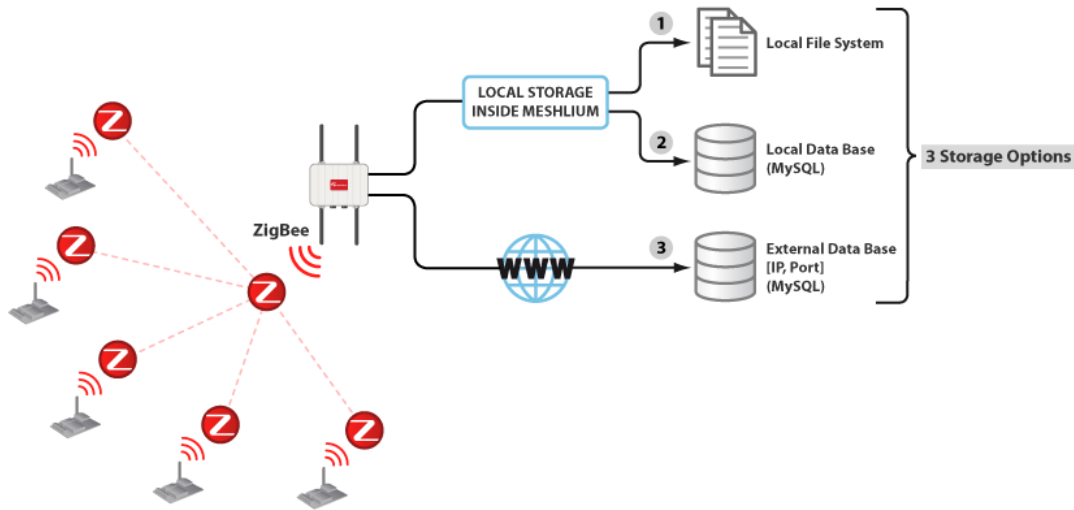


Figura 8. Esquemas de almacenamiento de información de una Red ZigBee.  
Fuente: Cruz, 2018.

#### 4.3.2 SigFox:

La red global Sigfox ofrece una transmisión de pequeñas tramas de datos bidireccional, económica y energéticamente eficiente, permitiendo ampliar notablemente la duración de la batería y la vida útil de los dispositivos conectados. La conectividad de esta red está diseñada bajo una infraestructura de antenas o estaciones base, independientes entre sí, construida para enlazar un gran número de dispositivos de baja velocidad, utilizando la tecnología de radio Ultra Narrow Band (UNB), consiguiendo así, una red de alta capacidad, fácil de implantar y que opera en las bandas de radio Industrial, Scientific and Medical (ISM) (Abad, 2015). La red global Sigfox se distribuye a través del programa de alianza SIGFOX Network Operator™, con más de dos millones de kilómetros cuadrados cubiertos en la actualidad. Además, SigFox ofrece una alternativa para desarrollar proyectos del IoT a muy bajo costo y totalmente escalables. Gracias al acuerdo que llegó con

Arduino, tenemos a nuestro alcance la placa Arduino MKRFOX1200 que dota de comunicación con la red SigFox y una suscripción por un periodo de 2 años (Valle, 2017?).

Figura 9 describe el esquema de red de SigFox, donde se observan los distintos sensores, estaciones base y la forma en que se traspasan los datos obtenidos.

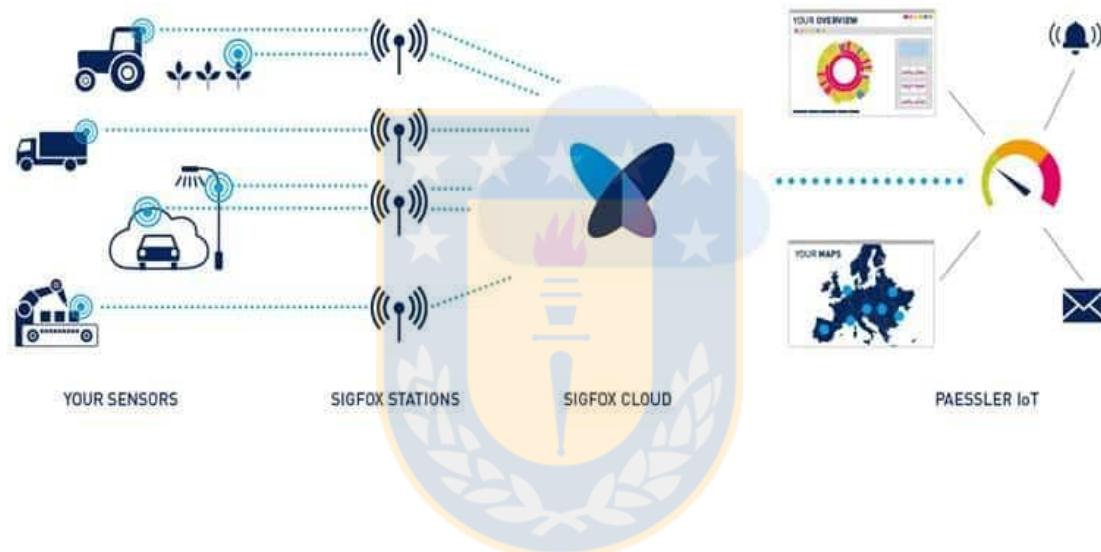


Figura 9. Esquema de la red SigFox. Fuente: Muñoz, 2019.

#### 4.3.3 NB-IoT:

“Narrowband Internet of Things” (NB-IoT) también conocida como LTE Cat NB1, es una tecnología de área amplia de baja potencia (LPWA) que se ha desarrollado para conectar varios dispositivos utilizando redes móviles existentes. Ir a internet “Narrowband Internet of Things” (NB-IoT) ha sido desarrollada para soportar la implementación de las aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT). Es una tecnología de banda estrecha y de baja potencia que maneja pequeñas cantidades de transmisión de datos bidireccional de manera eficiente, segura y confiable.

NB-IoT es una de las tecnologías LPWA más populares que se pueden usar en aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT). Proporciona la combinación correcta de características. La señal bajo demanda de banda estrecha de baja frecuencia tiene características de propagación a larga distancia que pueden penetrar paredes y conductos metálicos. Los requisitos de alimentación son lo suficientemente bajos como para que la vida útil de un solo dispositivo con batería pueda superar los 10 años. Su velocidad de datos es la adecuada para aplicaciones de Internet de las cosas (IoT) como lecturas de medidores, farolas, monitoreo de espacios de estacionamiento, monitoreo de datos industriales y algunas otras aplicaciones de baja velocidad de datos (MCI Capacitación, 2019).

En la Figura 10 se muestra la arquitectura troncal de NB-IoT la cual es la misma de la red LTE, denominada EPC (Evolved Packet Core), pero optimizada para despliegue masivo de dispositivos, que permita transmisiones cortas de datos de las aplicaciones M-IoT optimizando los planos de usuario y de control.

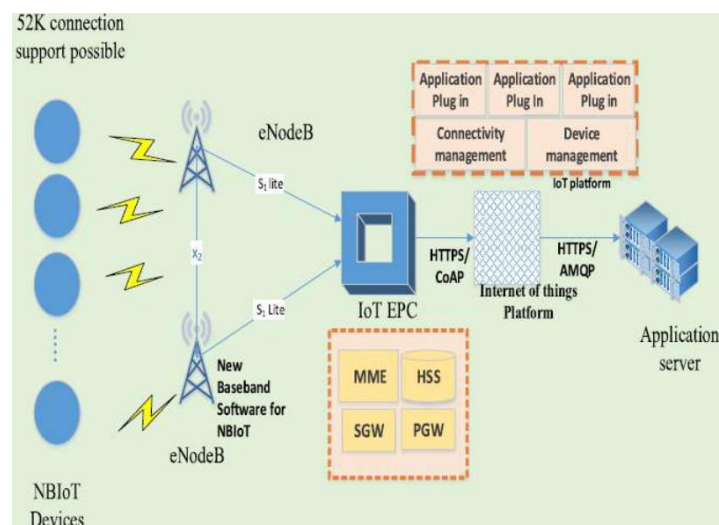


Figura 10. Estructura básica de NB-IoT. Fuente: Saiz, 2019.

Para cerrar este capítulo podemos señalar formas de uso de estas redes, de los cuales se ha probado con éxito en sensores en distintas áreas o usos como lo son: en aplicaciones medioambientales, industriales, salud, hogar, exploración científica y en la agricultura (Conde y Martínez, 2013).

Respecto al ámbito de la agricultura se han desarrollado sensores de monitoreo del suelo los cuales brindan lecturas en tiempo real de la temperatura del suelo, el contenido volumétrico de agua y la temperatura del aire, directamente desde el campo a Internet. Estos llamados sensores inteligentes entregan datos a intervalos personalizables, eliminando la necesidad de lecturas manuales. Los cuales ayudan a predecir con mayor exactitud los tiempos óptimos de siembra, reducir el uso de agua y minimizar el estrés de la planta que proviene del exceso o falta de riego. Además de permitir analizar patrones históricos para tomar mejores decisiones de manejo de cultivos a largo plazo.

En la actualidad existe un sensor llamado Sens'it el cual fue desarrollado directamente por la compañía y red de comunicación del mismo nombre SigFox el cual destaca en varios países, debido a los distintos usos que se le pueden dar tanto dentro del hogar, ambientes exteriores, campos, oficinas, etc. Como funciones destacan el monitoreo de temperatura y humedad, monitoreos de luz, detecciones de aperturas de puertas, entre otras funciones. Además te permite estar conectado directamente con la red SigFox y con una aplicación de fácil uso el cual funciona con el teléfono móvil, al que se le puede indicar lo que quieres realizar. Es así como las redes de comunicación se han ido adaptando de acuerdo con las diferentes necesidades de los usuarios, por lo mismo han desarrollado otras funciones que les

permitan conectarse y trabajar con diversos mecanismos o en este caso con variados sensores.

#### **4.4 Condiciones para medir la evaporación de suelo**

Se deben tomar en cuenta distintos factores para la medición de E de suelo, los cuales al final de los ensayos nos den valores representativos y acordes a los resultados esperados. Además, con ello se debe establecer la ubicación donde se realizarán los ensayos, las características del suelo como textura y composición, entre otros.

Los factores que influyen en la tasa de evaporación de cualquier cuerpo o superficie se pueden dividir de manera general en dos grupos, a saber, los factores meteorológicos y los factores propios de la superficie; cualquiera de ellos puede limitar el valor de la tasa. A su vez, los factores meteorológicos se pueden subdividir en variables energéticas y aerodinámicas. La evaporación del agua líquida exige una energía que existe abundantemente en la naturaleza en forma de radiación solar y terrestre. Las variables aerodinámicas, como la velocidad del viento a nivel de la superficie y la diferencia de la presión de vapor entre la superficie y la atmósfera que se halla en contacto con ella, rigen la tasa de transferencia del vapor de agua evaporada.

Conviene hacer una distinción entre las situaciones en las que existe agua libre en la superficie y las que no. Entre los principales factores que entran en juego cabe señalar la cantidad y el estado del agua, así como también las características de la superficie que influyen en el proceso de transferencia hacia la atmósfera o a través de la superficie del cuerpo que se examina. La resistencia a la transferencia de

humedad hacia la atmósfera depende, por ejemplo, de la rugosidad de la superficie; en las regiones áridas y semiáridas, la extensión y la forma de la superficie desempeñan también un papel fundamental. La transpiración vegetal depende de factores meteorológicos y de las características de la superficie mencionadas anteriormente, y también depende en gran medida de las características y de las reacciones de las plantas y especialmente del número, tamaño y grado de apertura de las estomas. La resistencia de las estomas a la transferencia de humedad indica una reacción diurna, pero también depende considerablemente de la humedad del suelo donde crecen las raíces.

La cantidad de agua del suelo para las raíces y para la evaporación de los suelos desnudos depende de los suministros capilares, es decir, de la textura y de la composición del suelo. La evaporación proveniente de lagos y de embalses se ve influida por el calor acumulado en la masa de agua (WMO, 2018).

Quinn (2018) habla en su investigación acerca de la medición de la E en suelos desnudos con lisímetros, donde pudo concluir que la E se reduce a medida que cae el nivel freático del suelo y que las variables climáticas como la velocidad de viento y el sombreado del exterior modifican las mediciones. Adicionalmente se comprobó que la mayor pérdida de agua en suelo se produce por E y que existen tres etapas reconocibles de E real de suelos superiores desnudos: una etapa inicial de tasa constante; una etapa de caída intermedia y una etapa residual de baja tasa. Finalmente, se recomienda hacer planes experimentales en la zona antes de instalar los equipos definitivos ya que los factores climáticos pueden afectar las mediciones finales.



## 5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los resultados de los modelos revisados en las Ecuaciones 1,4,8 y 9 sobre la medición de E y los valores obtenidos de las mediciones en terreno con ML para avellanos europeos, además de los indicadores estadísticos (RMSE, RD y coeficiente de correlación).

La Figura 11 muestra valores de E calculados mediante el método de Daltón (Ecuación 1), los cuales se obtuvieron con datos de tensiones de vapor y fueron comparados con los valores de E medidos en terreno con ML.

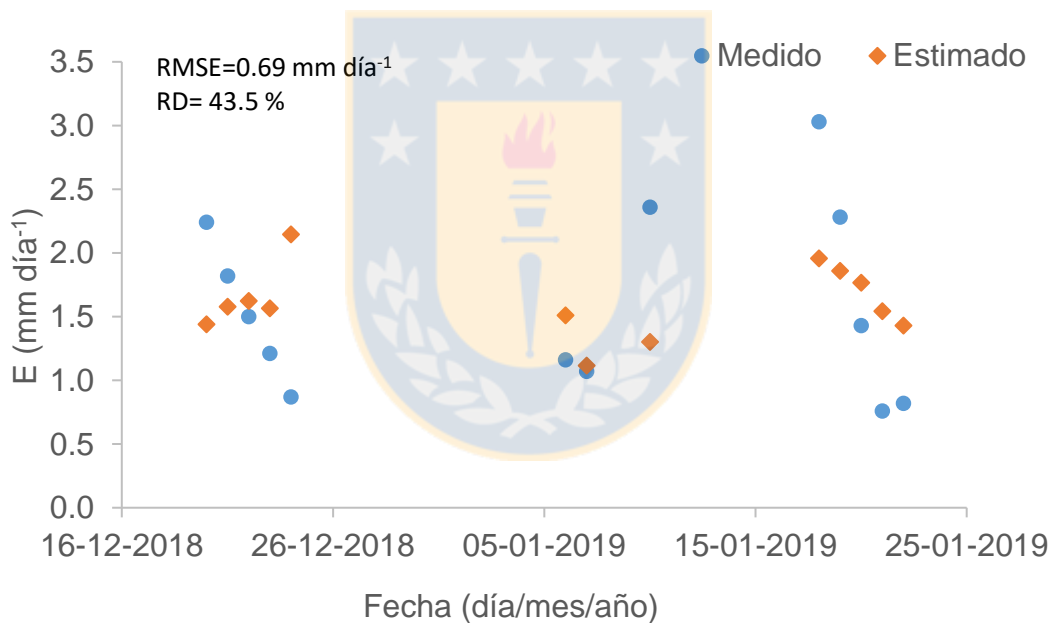


Figura 11. Evaporación de suelo (E) con el método de Daltón y en terreno con ML con respecto a las fechas de medición. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 11 se observa que existe una gran dispersión respecto a los datos medidos y estimados, esto se puede deber a que en alguno de los valores ocupados en la ecuación correspondiente fueron adaptados como es el caso de los valores de K, el cual no se encontró mediante bibliografía con un valor exacto, por lo tanto, se

tuvo que estimar. Los valores de E encontrados con el modelo (Ecuación 1) tiene una correlación de 0.17, por lo tanto nos indica que existe una baja asociación entre estos datos y por lo mismo se observa dispersión de los puntos en la Figura 11.

Para la Figura 12 se presentan los valores estimados de E mediante el método designado como ML, ya que se debió hacer mediante las Ecuaciones 3 y 4, integrando los datos del área de ML, diferencias de peso, precipitaciones y área de la posición del ML. Todo esto se comparó con los datos obtenidos de E directamente desde ML en terreno.

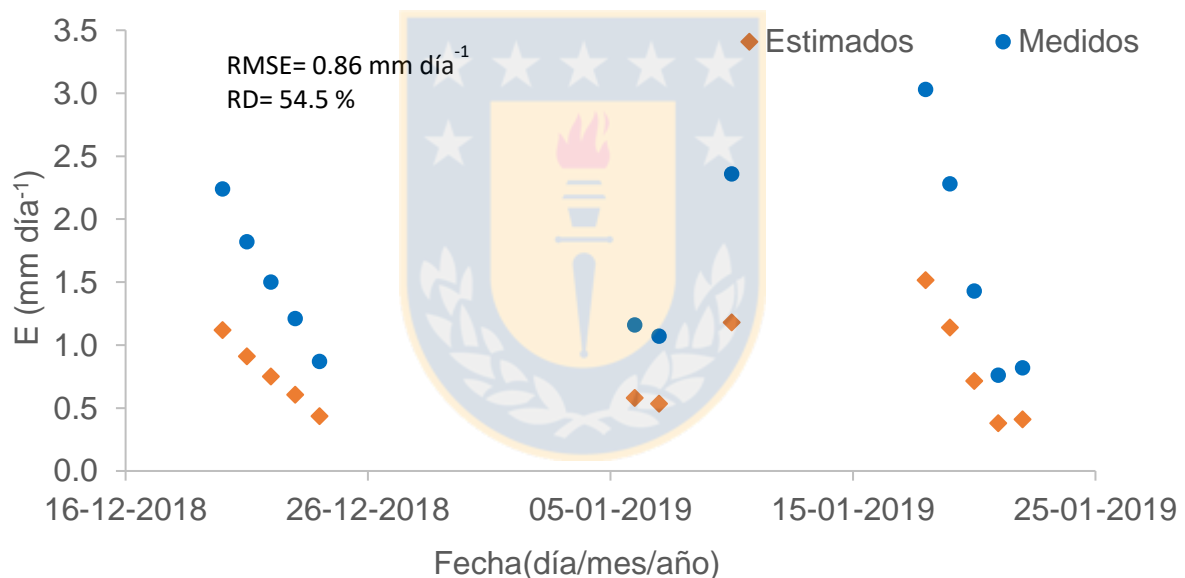


Figura 12. Evaporación de suelo (E) estimado con el método del ML y medido en terreno en relación con la fecha de medición. Fuente: Elaboración propia.

En el caso anterior se observa que los valores estimados mediante el método se ajustaron en valores más pequeños que los medidos (50% menos), este método describía que debían ser tres mediciones en terrenos con ML el cual era para riego por surco (Ecuación 3), por lo tanto el método se adaptó para compararlos con datos en terreno en el huerto de avellanos con riego con microaspersión. Así se asumió que estos ML estaban instalados en el centro de la hilera de los avellanos. Para mejorar la precisión del modelo se deben tener al menos tres mediciones: en el fondo del surco de riego y en las partes sombreadas y no sombreadas del surco no humedecido. Con los indicadores de ajuste de la Figura, se puede decir que a pesar de que los datos estimados con la Ecuación sean menores que los medidos en terreno, este podría ajustarse de buena forma si se tuvieran las mediciones correctas de terreno.

En la siguiente Figura 13 se presentan los valores E determinados mediante las ecuaciones 5,6,7 y 8 donde se diferencié la evaporación de la primera etapa de un suelo húmedo y donde más tarde se estimó la evaporación total del proceso (estimados), comparando con los datos obtenidos en terreno con el ML (medidos).

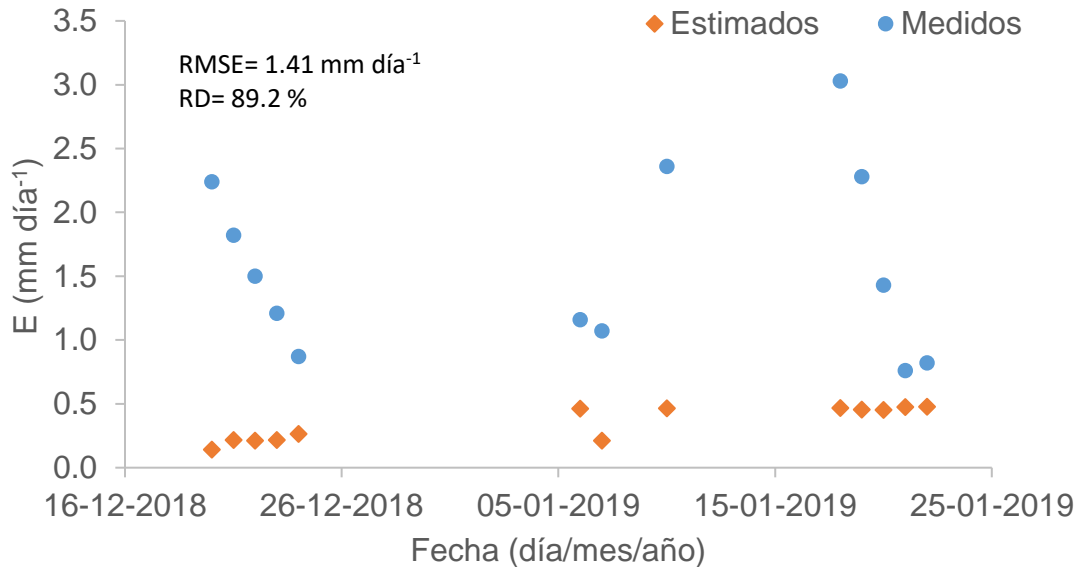


Figura 13. Evaporación de suelo (E) estimados con el método de evaporación para un suelo húmedo y el medido en terreno con ML para las fechas indicadas. Fuente: Elaboración propia.

Haciendo un análisis a la Figura 13 se debe establecer que el modelo estimado (Ecuación 8) no se ajustó a los datos de E en terreno con el ML y fue el que menor coeficiente de correlación tuvo (0.08), esto a causa de que se debían tener bastantes datos los cuales fueron proporcionados con estaciones meteorológicas cercanas (como la radiación neta, índice de área foliar, evapotranspiración y el tiempo entre otras variables), por lo tanto, este modelo no sería el mejor estimador de E para hacer un análisis.

Para terminar con los métodos elegidos para la estimación de E se calculó mediante la ecuación 9 relacionada con el método propuesto por Campbell, donde se tiene un intervalo de tiempo y dependiendo del tipo de suelo en este caso se seleccionó el de tipo arcilloso que era el más cercano al de terreno(C), así se obtuvo una evaporación de suelo para la fase dos ( $E_{acum II}$ ) y estos datos finalmente fueron comparados con los métodos en terreno con ML como se muestra en la Figura 14.

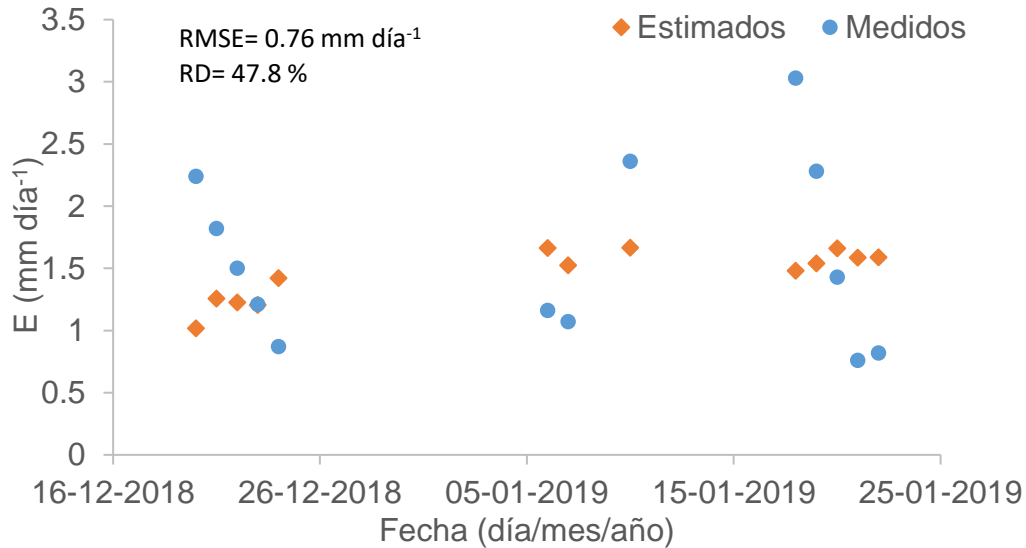


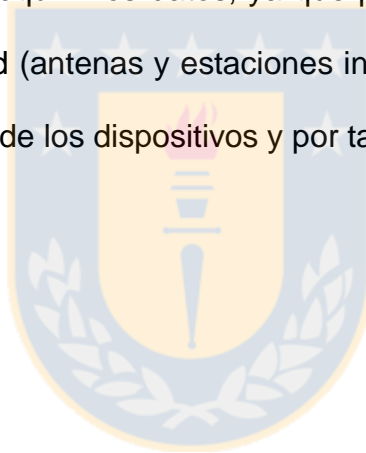
Figura 14. Evaporación de suelo (E) estimados con el método de Campbell y el medido en terreno con ML para las fechas indicadas. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 14 existe la diferencia de valores estimados con el método de Campbell y los medidos en terreno con ML, por lo que los valores de bondad de ajuste nos indican que el modelo no se ajustó de la mejor manera con un valor de error de 47.8 %. Este valor puede deberse a que el intervalo de tiempo no fue el adecuado, ya que se debía hacer con el tiempo desde que empezaba la segunda fase de E hasta el término de esta, el cual se calculó mediante la primera etapa de E (ecuación 5) y así se despejó para después obtener la  $E_{acum II.}$ , donde también se asumió un C para suelo arcilloso, ya que era el que más se ajustaba al tipo de suelo de terreno (Campbell, 1998).

Haciendo un análisis se consideró que los modelos mejor evaluados con respecto a los datos obtenidos en terreno fueron los de la Figura 11 y Figura 13 respectivamente, esto de acuerdo con los indicadores estadísticos que percibieron un menor porcentaje de error y que en su defecto son los que se ajustan de mejor

manera con los datos obtenidos con los ML en terreno. Aunque comparando los coeficientes de correlación el modelo de la Figura 12 sería el que indica una relación directa o una menor dispersión de los datos analizados.

Para terminar el capítulo se propone un modelo de ML de pesa automática (capítulo 4.2), el que tendría que ser construido de PVC y teniendo unas dimensiones de 11 cm de diámetro y 15 cm de profundidad, el cual registrara las diferencias de masa con celda de carga y un mecanismo automatizado con microcontrolador o datalogger conectados en este caso a la red SigFox la que garantiza mayor conectividad a la hora de adquirir los datos, ya que permite conectarse con otros dispositivos de la misma red (antenas y estaciones independientes) y permite una larga duración de la batería de los dispositivos y por tanto una mayor vida útil.



## 6 CONCLUSIÓN

De acuerdo con la investigación realizada en esta tesis fue posible realizar un análisis de los métodos directos e indirectos de medición de la evaporación de suelo bajo sistemas de microriego, otros sistemas de riego y suelo descubierto. Los principales métodos encontrados para medir evaporación de suelo son cámaras de evaporación de suelo, micro-lisímetro, método de Eddy entre otros instrumentos y también indirectamente mediante métodos matemáticos como los comprendidos entre las Ecuaciones 1 y 9.

Adicionalmente se evaluaron cuatro métodos para la estimación de E en un huerto de avellanos europeos destacando como mejor evaluados los métodos de Campbell y Daltón (Figura 11 y Figura 13) según indicadores estadísticos, ya que se ajustaron de mejor forma a los datos que se tenían de un ML en terreno, aun considerando que se debieron adaptar ciertas variables que se establecían. De esta forma la estimación de E mediante métodos no es fácil, ya que de los evaluados en esta investigación ninguno se acercó a los valores medidos en terreno, aun así sirven para estimación en caso de no poder hacerlo directamente.

Se propone un diseño de ML de acuerdo con lo investigado, el cual fuese construido de PVC y con ciertas medidas, estableciéndose un esquema y logrando obtener un sistema automatizado mediante microcontroladores y redes de funcionamiento en este caso mediante SigFox. La que entrega más ventajas aportando en este caso con una vida útil mayor en los dispositivos y una mayor conectividad que aportaría en los bajos costos de construcción. Su única desventaja es que sus redes aún

están siendo expandidas y aquí en nuestro país esta red aun es inestable, pero se pretende en un futuro establecer redes en todo Latinoamérica.

Para finalizar se puede establecer que aunque existen variadas formas de cuantificar la E, la manera más confiable para establecer este valor directamente será mediante un ML. Razonablemente diseñar un modelo automatizado de este tipo de instrumento a bajo costo, sería lo ideal para el desarrollo de huertos agrícolas en sus primeras etapas, ya que facilitaría los cálculos de disponibilidad de agua y la eficiencia del uso de esta.





## 7 LITERATURA CITADA

1. Abad, B. 2015. Diseño y prueba de un prototipo para la evaluación de la tecnología de comunicación SigFox - Internet of thing para un dispositivo wearable. Treball final de grau, Ingeniería Electrónica Industrial y Automática. Universitat Politècnica de Catalunya, Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú. Barcelona, España.
2. Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes y M. Smith. 2006. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje N°56. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia.
3. Allen, R.G., L.S. Pereira, T.A. Howell and M.E. Jensen. 2011. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. *Agric. Water Manag.* 98(6): 899-920.
4. Aparicio, F.J. 1989. Fundamentos de hidrología de superficie. Limusa. México D.F., México.
5. Ben-Asher, J., A.D. Matthias and A.W. Warrick. 1983. Assessment of evaporation from bare soil by infrared thermometry. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47(2): 185-191.
6. Boast, C.W., T.M. Robertson. 1982. A "micro-lysimeter" method for determining evaporation from bare soil: description and laboratory evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46(4): 689-696.
7. Bowen, I.S. 1926. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. *Phis. Rev.* 27(6): 779-787.

8. Camargo, A. 2012. Desenvolvimento de um controlador de irrigação para áreas experimentais. Tese, Doutor em Ciências, Área de Concentração em Irrigação e Drenagem. Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba, Brasil.
9. Campbell, G.S., J.M. Norman. 1998. An introduction to environmental biophysics. (2nd. ed.). Springer Verlag. New York, USA.
10. Center for Climate and Resilience Research. 2014. Eddy flux tower (EFT, torre de flujo) [en línea]. Center for Climate and Resilience Research, Chile. <<http://www.cr2.cl/wp-content/uploads/2014/12/Descripci%C3%B3n-Torre-de-Flujo.pdf>>. [Consulta: 08 junio 2021].
11. Conde, H., J.A. Martínez. 2013. Red inalámbrica de sensores ambientales mediante el uso de tecnología Zigbee. Proyecto de investigación, Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica. Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. México D.F., México.
12. Cruz, J.C. 2018. ZigBee para IoT [en línea]. Medium. <<https://medium.com/an%C3%A1lisis-de-la-tecnolog%C3%ADa-zigbee-para-su-uso-en-el/zigbee-para-iot-12666b636821>>. [Consulta: 08 junio 2021].
13. Custodio, E., M.R. Llamas. 1996. Hidrología subterránea. (2a. ed.). Omega. Barcelona, España.

14. Daamen, C.C., L.P. Simmonds, J.S. Wallace and M.V.K. Sivakumar. 1993. Use of microlysimeters to measure evaporation from sandy soils. *Agric. For. Meteorol.* 65(3-4): 159-173.
15. Evett, S.R., A.W. Warrick and A.D. Matthias. 1995. Wall material and capping effects on microlysimeter temperatures and evaporation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59(2): 329-332.
16. Giráldez, J.V., K. Vanderlinden y H.F.M. ten Berge. 1999. La evaporación del suelo bajo control atmosférico. pp: 181-186. En: R. Muñoz-Carnepa, A. Ritter y C. Tascón (Eds.). *Estudios de la zona no saturada del suelo*. ICIA. Tenerife, España.
17. González, A., R.W. Hill. 1998. Teoría y desarrollo de la simulación del balance hídrico en PASTMOD. *Ing. Hidrául. Méx.* 13(3): 29-34.
18. Grandón, A.O. 2009. Determinación de curvas de evaporación desde la napa en diferentes tipos de suelos. Proyecto de título, Ingeniero Civil. Universidad del Bío Bío, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil. Concepción, Chile.
19. Holland, S., J.L. Heitman, A. Howard, T.J. Sauer, W. Giese, A. Ben-Gal, N. Agam, D. Kool and J. Havlin. 2013. Micro-Bowen ratio system for measuring evapotranspiration in a vineyard interrow. *Agric. For. Meteorol.* 177: 93-100.
20. INTAGRI (México). 2017. La evapotranspiración de los cultivos [en línea]. INTAGRI, México. <<https://www.intagri.com/articulos/agua-riego/la-evapotranspiracion-de-los-cultivos>>. [Consulta: 08 octubre 2020].

21. Kerridge, B.L., J.W. Hornbuckle, E.W. Christen and R.D. Faulkner. 2013. Using soil surface temperature to assess soil evaporation in a drip irrigated vineyard. *Agric. Water Manag.* 116: 128-141.
22. Khan, L., J.A. Gil y R. Acosta. 1998. Diseño y funcionamiento de un lisímetro hidráulico para medición de la evapotranspiración potencial. *BioAgro* 10(1): 11-17.
23. Klockle, N.L., D.L. Martin, R.W. Todd, D.L. DeHaan and A.D. Polymenopoulos. 1990. Evaporation measurements and prediction from soils under crop canopies. *Trans. ASAE (Am. Soc. Agric. Eng.)* 33(5): 1590-1596.
24. Kool, D., N. Agam, N. Lazarovitch, J.L. Heitman, T.J. Sauer and A. Ben-Gal. 2013. A review of approaches for evapotranspiration partitioning. *Agric. For. Meteorol.* 184: 57-70.
25. MCI Capacitación. 2019. ¿Qué es el NB-IoT? [en línea]. MCI Capacitación, Chile. <<https://cursos.mcielectronics.cl/2019/06/27/que-es-nb-iot/>>. [Consulta: 10 septiembre 2020].
26. Muñoz, J.F., P. Rengifo y J. Yáñez. 2009. Levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en áreas prioritarias de la zona norte de Chile, regiones XV, I, II y III. Etapa 2: Informe final parte vii. Medición de la evaporación mediante el método del "Domo" S.I.T N°95. Pontificia Universidad Católica de Chile. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Santiago, Chile.

27. Muñoz, X. 2019. Tecnología SigFox [en línea]. DSET Energy, España <<http://www.dset-energy.com/2019/06/05/tecnologia-sigfox/>>. [Consulta: 11 junio 2021].
28. Peñalver, M.Á. 2012. ZigBee: protocolo de comunicaciones inalámbricas basado en el estándar 802.15.4 [en línea]. WordPress.com. <<https://domotiva.wordpress.com/2012/08/22/zigbee-protocolo-de-comunicaciones-inalambricas-basado-en-el-estandar-802-15-4/>>. [Consulta: 10 septiembre 2020].
29. Philip, J.R. 1957. Evaporation and moisture and heat fields in the soil. *J. Meteorol.* 14(4): 354–366.
30. PP Systems. 2017. CFLUX-1 automated soil CO<sub>2</sub> flux system [en línea]. Instrumentos del Sur, Argentina. <<https://www.idelsur.com/wp-content/uploads/2018/03/EDSCFLUX1.pdf>>. [Consulta: 05 junio 2021].
31. Quinn, R., A. Parker and K. Rushton. 2018. Evaporation from bare soil: Lysimeter experiments in sand dams interpreted using conceptual and numerical models. *J. Hydrol.* 564: 909–915.
32. Reckmann, O. 2009. Demanda de agua por parte de los cultivos. Boletín N°190. INIA La Platina. Santiago, Chile.
33. Saiz, J. 2019. Estudio en detalle de NB-IoT. Comparación con otras tecnologías LPWAN considerando diferentes patrones de tráfico. Tesis. Universitat Oberta de Catalunya. Catalunya, España.

34. Sánchez, M.I. 1992. Métodos para el estudio de la evaporación y evapotranspiración. Geofoma Ediciones. Logroño, España.
35. Souto, C.I. 2019. Transpiración de cultivo y evaporación de suelo para cultivos de cobertura parcial y suelos parcialmente humedecidos. Tesis, Doctor en Ingeniería Agrícola con mención en Recursos Hídricos en la Agricultura. Universidad de Concepción, Dirección de Postgrado. Chillán, Chile.
36. Thompson, A.L., D.L. Martin, J.M. Norman, J.A. Tolk, T.A. Howell, J.R. Gilley and A.D. Schneider. 1997. Testing of a water loss distribution model for moving sprinkler systems. *Trans. ASAE (Am. Soc. Agric. Eng.)* 40(1): 81–88.
37. Todd, R.W., S.R. Evett and T.A. Howell. 2000a. The Bowen ratio-energy balance method for estimating latent heat flux of irrigated alfalfa evaluated in a semi-arid, advective environment. *Agric. For. Meteorol.* 103(4): 335-348.
38. Todd, R., S.R. Evett, T.A. Howell and N.L. Klocke. 2000b. Soil temperature and water evaporation of small steel and plastic lysimeters replaced daily. *Soil Sci.* 165(119): 890-895.
39. Tosso, J., R. Ferreyra. 1984. Manejo de riego por goteo. I Parte: necesidades del agua. pp: 27-33. Informe Técnico N°25. IPA La Platina. Santiago, Chile.
40. Valle, L. del. 2019. Introducción Arduino MKRFOX1200 SigFox y redes LPWAN [en línea]. Programarfacil.com. <[https://programarfacil.com/blog/arduino-blog/arduino-mkrfox1200-sigfox-lpwan/#Que\\_es\\_SigFox](https://programarfacil.com/blog/arduino-blog/arduino-mkrfox1200-sigfox-lpwan/#Que_es_SigFox)>. [Consulta: 15 enero 2021].

41. WMO (Switzerland). 2018. Guide to Instruments and methods of observation. Volume I –Measurement of meteorological variables WMO- N°8. World Meteorological Organization. Geneva, Switzerland.
42. Zhang, Y., S. Kang, E.J. Ward, R. Ding, X. Zhang and R. Zhen. 2011. Evapotranspiration components determined by sap flow and microlysimetry techniques of a vineyard in northwest China: Dynamics and influential factors. *Agric. Water Manag.* 98(8): 120-124.

