



UNCUYO
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE CUYO

FACULTAD DE AGRONOMIA

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN
DE UN LISÍMETRO DE BAJO COSTO

ESPECIALIZACIÓN EN RIEGO Y DRENAJE

Nombre del Tesista: Silicani, Matias Ricardo

Director: Rivas Raúl
Codirector: Rearte Emilio

Mendoza, 02 de Junio de 2015

Dedicatoria

A mis padres Mónica y Ricardo, su apoyo y su amor incondicional son incomparables,
todos mis logros llevan consigo una parte de sus esfuerzos.

A mi esposa Lucrecia, que incondicionalmente esta a mi lado incentivándome y
ayudando a que logre mis metas y sueños.

A mis familiares y amigos por siempre contar con su apoyo.

Agradecimientos

Al **Instituto de Hidrología de Llanuras “Dr. Eduardo Usunoff”**, por confiar en mí y apoyarme en todo momento para la ejecución de este proyecto.

Al Msc. Eduardo Trentacoste por la dirección en el trabajo y por el aporte en la compra de instrumentos a través del **INTA Mendoza**.

Al Doc. Raúl Rivas por facilitar el lugar físico donde se colocó el lisímetro, por la ayuda en el montaje del equipo, por su apoyo y paciencia en todo el proyecto, y sus correcciones exigentes para realizar un buen trabajo.

A los Becarios del **IHLLA**, Facundo Carmona y Dora Ocampo, por la ayuda en campo y gabinete, y por el aporte de material bibliográfico.

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE UN LISÍMETRO DE BAJO COSTO

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo es: Diseñar, construir y operar un lisímetro de pesada de bajo costo dentro de la parcela del Instituto de Hidrología de Llanuras “Dr. Eduardo Usunoff”, ubicada en el Campus Tandil ($37^{\circ} 17'$ de latitud Sur y a los $59^{\circ} 07'$ de longitud Oeste, 214 msnm), perteneciente a la Universidad Nacional del Centro de la provincia de Buenos Aires. A partir de esto, se pretende estimar la evapotranspiración real (ET_r) del sistema suelo-agua-planta para una mezcla de gramíneas y estudiar la evolución diaria de la humedad de suelo en todo el perfil del lisímetro a través de sensores de humedad de suelo.

El montaje se realizó de acuerdo a Aboukhaled y Smith (1982), la superficie del lisímetro es de $0,27 \text{ m}^2$ y tiene una profundidad de 0,88 m (con una profundidad útil de suelo de 0,60 m) y un diámetro de 0,59 m. La profundidad seleccionada es debido a que la exploración de raíces no supera los 0,50 m. Además se conectaron sensores Decagon modelo EC-10 y sensores Cavadevices modelo SCH-20, para el monitoreo de humedad en todo el perfil, conectados a un logger con una resolución temporal horaria.

Las características técnicas y detalles de construcción considerados garantizan medidas de pérdida de agua de calidad con una resolución temporal de tres días y un error de estimación del orden de $0,5 \text{ mm día}^{-1}$. Es fácil de reproducir en otros sitios y el costo no es elevado. Es importante indicar que el lisímetro facilitó el seguimiento de la disponibilidad de agua en el perfil y que las comparaciones realizadas con medidas indirectas son consistentes. En la actualidad se encuentra con vegetación y en condiciones operativas que son representativas de la superficie de referencia considerada en la definición de Penman Monteith.

Palabras Claves: Evapotranspiración, Lisímetro, Sensores de Humedad, Tandil

DESIGN, CONSTRUCTION AND OPERATION OF A LOW COST LYSIMETER

ABSTRACT

The main aim of this work was to design, construct and operate a low cost weighting lysimeter located in a plot that belongs to the Instituto de Hidrología de Llanuras Dr. Eduardo Usunoff ('Plain's Hidrology Institute Dr. Eduardo Usunoff'), located at the Tandil campus of the Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (Central Buenos Aires Province State University; 37° 17' South latitude and 59°07' West longitude). The lysimeter will be used to estimate the actual (current) evapotranspiration (E_{Tr}) from the soil-water-plant system for a mixed grasses stand. Additionally, the soil moisture daily evolution was monitored with sensors.

The mounting followed the procedure described by Aboukhaled and Smith (1982). The lysimeter had a 0,27 m² area, with a diameter of 0,59 m, a total depth of 0,88 m with a usable section of 0,60 m for calibration and monitoring purposes. This depth correlated with grasses' rooting depth (0,50 m). Decagon model EC-10 and Cavadevices model SCH-20 sensors were distributed in the lysimeter to monitor the soil profile moisture. Sensors were connected to a data logger set up to store information with an hourly resolution.

Construction details and technical characteristics considered allowed reliable measurements of soil drainage with a time resolution of three days and an estimation error of 0,5 mm day⁻¹. It is not difficult to install or replicate in other sites and it is not expensive. This lysimeter contributed to the monitoring of soil water availability in the soil profile and comparisons with soil moisture sensors were robust (consistent). Currently the lysimeter is covered with grasses, and it is representative of the reference surface as defined by Penman – Monteith.

Key words: evapotranspiration, lysimeter, soil moisture sensors, Tandil

INDICE

| | |
|---|-----------|
| Capítulo I | 1 |
| Revisión Bibliográfica | 1 |
| 1- Generalidades | 1 |
| 2- Evapotranspiración | 2 |
| 2-1 Definiciones: | 2 |
| 2-2 Evaporación: | 2 |
| 2-3 Transpiración: | 2 |
| 3- Métodos directos e indirectos de estimación de la ETo | 3 |
| 3-1 Tanque Evaporímetro | 3 |
| 3-2 Balance de agua en el suelo | 5 |
| 3-3 Lisímetros | 7 |
| 4- Antecedentes. | 8 |
| 4-1 Antecedentes Nacionales. | 8 |
| 4-2 Antecedentes Internacionales. | 10 |
| Capítulo II | 13 |
| Introducción y Objetivos | 13 |
| OBJETIVOS: | 14 |
| i- Objetivo General | 14 |
| ii- Objetivos Específicos | 14 |
| Capítulo III | 15 |
| Materiales y Métodos | 15 |
| 1-Ubicación del ensayo | 15 |
| 2- Características de la zona | 15 |
| 2-1 Clima | 15 |
| 2-2 Suelo | 16 |
| 3-Montaje del Lisímetro | 17 |
| 3-1 Materiales y Equipo utilizado | 17 |
| 3-2 Construcción del pozo | 18 |
| 3-3 Diseño y construcción de la estructura | 19 |
| 3-4 Instalación de sensores de humedad | 21 |
| 3-5 Calibración | 22 |
| 4-Funcionamiento | 23 |
| 5- Cálculos de ETo y Humedad | 25 |
| Capítulo IV | 27 |
| Resultados | 27 |
| Capítulo V | 33 |
| Conclusiones y Perspectiva a Futuro | 33 |
| BIBLIOGRAFÍA | 35 |
| ANEXO I | 33 |

| | |
|---|-----------|
| Materiales y costo del lisímetro | 33 |
| Anexo II | 34 |
| Detalle del logger de 8 canales utilizado para los sensores de VWCC. | 34 |
| Anexo III | 35 |
| Sensor SCH-20 de Cavadevices. | 35 |
| Anexo IV | 37 |
| Sensor EC-10 Decagon Devices. | 37 |
| Anexo V | 38 |
| Característica de los sensores meteorológicos utilizados | 38 |
| Anexo VI | 40 |
| Detalle de la Pluma Hidráulica. | 40 |
| Anexo VII | 41 |
| Detalle de la Balanza Colgante. | 41 |

INDICE DE CUADROS

| | |
|---|----|
| <i>Cuadro 1. Coeficientes del tanque evaporímetro (K_p) para el tanque Clase A para diversas localizaciones y ambientes de los tanques y varios valores de velocidad media de viento y de humedad relativa (tomado de Allen et al., 2006).</i> | 5 |
| <i>Cuadro 2. Datos de laboratorio correspondientes a las muestras tomadas de la calicata en donde se instaló el lisímetro (datos procesados por el Laboratorio de Suelos de la facultad de Agronomía de la UNCPBA).</i> | 16 |
| <i>Cuadro 3. Modelo de los sensores de humedad de suelo</i> | 21 |
| <i>Cuadro 4. Estadísticos meteorológicos para el período analizado.</i> | 27 |
| <i>Cuadro 5. Pesadas del lisímetro, VWCEC y VWCEC promedio del perfil para el período analizado.</i> | 29 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| <i>Figura 2.a) Tanque A de parcela del IHLA Tandil., b) Esquema de características técnicas del tanque Tipo A (tomado de Allen et al. 2006)</i> | 3 |
| <i>Figura 3. Esquema de Balance de agua en el suelo de la zona radicular (Allen et al., 2006)</i> | 6 |
| <i>Figura 4. Fotos que muestran el pan de suelo con vegetación (izquierda) y los montículos de suelo para las diferentes profundidades (izquierda, centro y derecha).</i> | 18 |
| <i>Figura 5.a) Estructura de soporte y dimensiones y b) pozo con planchas dispuestas para sustentación final del lisímetro.</i> | 19 |
| <i>Figura 6. Croquis del lisímetro.</i> | 19 |
| <i>Figura 7. Cilindro sin material y fondo del lisímetro con protección anti óxido</i> | 20 |
| <i>Figura 8. Corte de lisímetro luego de la incorporación de los horizontes y sensores de humedad siguiendo los pasos 1-7 indicado anteriormente.</i> | 21 |
| <i>Figura 9.a) Pluma hidráulica sosteniendo la estructura b) Balanza colocada lista para medir.</i> | 24 |
| <i>Figura 10. Valores medios diarios de T_a, HR, U_2 y R_n del período analizado (los símbolos fueron definidos en el texto debajo de la Ecuación 4). El faltante de datos se debe a una falla en la batería del logger.</i> | 27 |
| <i>Figura 11. Relación peso del lisímetro y humedad promedio registradas por los sensores.</i> | 29 |
| <i>Figura 12. Relación E_{Tr} calculada con valores de F_Hs y medida por diferencia de pesos (línea punteada ajuste obligando a pasar por el origen y llena ajuste sin paso por el origen)</i> | 30 |
| <i>Figura 13. Evapotranspiración diaria para los 135 días considerados.</i> | 30 |
| <i>Figura 14. E_{To}, E_{Tr} y $VWCEC$ promedio de las tres medidas de H_s registradas.</i> | 31 |
| <i>Figura 15 a) Condición con disponibilidad de agua para evaporar y transpirar, b y c) condiciones con diferente disponibilidad de agua en el perfil.</i> | 31 |

Figura 16. Fotos del lisímetro en la actualidad. A) Junto a los sensores y B) Vista detallada a 45°. Foto tomada el día 03/09/2011

34

Referencia sobre las siglas usadas en este trabajo.

| | |
|------------------------|---|
| C - | Capilaridad |
| CC - | Capacidad de Campo |
| D - | Percolación Profunda |
| e_a - | Presión Real de Vapor |
| EBE - | Estación de Balance de Energía |
| Epan - | Evaporación del Tanque Evaporímetro |
| Es - | Escurrimiento Superficial |
| e_s - | Presión Vapor de Saturación |
| ET - | Evapotranspiración |
| Eto - | Evapotranspiración de Referencia |
| ETr - | Evapotranspiración Real |
| FHs - | Proporción de humedad de Suelo |
| FSin - | Flujo Sub-superficial hacia dentro de la zona radicular |
| FSout - | Flujo Sub-superficial hacia fuera de la zona radicular |
| G - | Flujo de Calor en el Suelo |
| GH - | Grado de Humedad |
| Hr - | Humedad Relativa |
| Kp - | Coeficiente de Tanque Evaporímetro |
| P - | Precipitación |
| Pmax - | Peso Máximo |
| Pmin - | Peso Mínimo |
| PMP - | Punto de Marchitez Permanente |
| R - | Riego |
| Rn - | Radiación Neta |
| T - | Temperatura |
| U₂ - | Velocidad de Viento |
| ΔFS - | Variación de Flujo Sub-superficial |
| ΔSW - | Variación de Cantidad de Agua en Suelo |
| [-] | Adimensional |

Capítulo I

Revisión Bibliográfica

1- Generalidades

El seguimiento de la disponibilidad de agua en los primeros metros de la superficie es fundamental y requiere que se realice con una adecuada precisión. En el mundo la cantidad de puntos en los que se registra de manera continua la medición de agua disponible en la zona no saturada son reducidos. Lo mismo ocurre en Argentina y es necesario que se comiencen a instrumentar las diferentes cuencas hidrológicas del país con aparatos y sensores que permitan un adecuado registro del almacenamiento de agua en el suelo.

Para comprender los procesos asociados a la Evapotranspiración se deben definir conceptos sencillos referentes al almacenamiento del agua en el suelo.

Grado de Humedad (GH): Peso de agua en una muestra respecto al peso de la muestra seca, expresado en porcentaje (%).

Capacidad de Campo (CC): Grado de humedad en el momento en que el suelo ha perdido su agua gravífica.

Punto de Marchites Permanente (PMP): Grado de humedad cuando las plantas no pueden absorber más agua.

Agua utilizable por las plantas: Diferencia entre PMP y CC

Contenido Volumétrico de Agua: Es la cantidad de agua contenida en el suelo, medida en función de la permisividad dieléctrica registrada en milivoltios, que con la aplicación de funciones específicas es llevado a contenido de agua en el suelo.

2- Evapotranspiración

2-1 Definiciones:

La Evapotranspiración (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 y por transpiración de un cultivo (Allen, et al. 2006).

La ET es el proceso primario de conducción de energía e intercambio de agua a través de la hidrósfera, la atmósfera y la biosfera (Priestley y Taylor, 1972; Brutsaert, 1984)

Se puede definir como el cambio de estado del agua, de líquido a gaseoso, desde la superficie de las hojas aunando al mismo cambio desde la superficie del suelo, proceso que solamente se produce cuando la tensión del vapor de agua que hay en el aire superficial es inferior a la tensión máxima o tensión de saturación (Sanchez 1999).

2-2 Evaporación:

Es el proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua y se retira de la superficie evaporante. Para la realización de este proceso se requiere de energía.

La radiación solar directa y, en menor grado la temperatura ambiente del aire, proporcionan esta energía.

2-3 Transpiración:

Una de las funciones más importantes de la vegetación es la de extraer agua del suelo y enviarla al sistema foliar perdiéndola como vapor de agua. A este proceso de retorno de la humedad del suelo a la atmósfera por medio de las plantas se lo llama transpiración.

La cantidad de agua transpirada varía con la vegetación y con la cantidad que se encuentra en el perfil del suelo disponible para las plantas.

Al fenómeno conjunto de evaporación de la superficie del suelo y de transpiración de las plantas se le llama evapotranspiración (Chambouleyron, 2005).

3- Métodos directos e indirectos de estimación de la ETo

3-1 Tanque Evaporímetro

La tasa evaporativa de los tanques de evaporación llenos de agua puede ser fácilmente obtenida. En ausencias de lluvia, la cantidad de agua evaporada durante un período (mm día^{-1}) corresponde a la disminución de la altura de agua en el tanque en ese período.

Los tanques proporcionan una medida del efecto integrado de la radiación, viento, temperatura y humedad sobre el proceso evaporativo de una superficie abierta de agua. Aunque un tanque evaporímetro responde de una manera similar a los mismos factores climáticos que afectan la transpiración del cultivo, varios factores producen diferencias significativas en la pérdida de agua de una superficie libre evaporante y de una superficie cultivada.

El tanque Clase A es circular, 120,7 cm de diámetro y 25 cm de profundidad. Esta construido de hierro galvanizado o de laminas de metal (0,8 mm). El tanque está colocado sobre una plataforma de madera en forma de reja que se encuentra a 15 cm del nivel del suelo, esta plataforma esta a nivel (Figuras 1a y b)

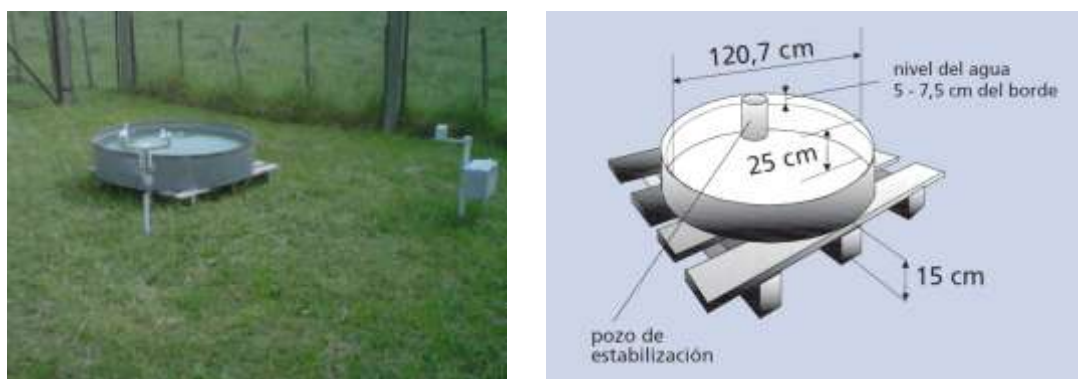


Figura 1.a) Tanque A de parcela del IHLLA Tandil., b) Esquema de características técnicas del tanque Tipo A (tomado de Allen et al. 2006)

Una vez instalado el tanque se llena con agua hasta 5 cm por debajo del borde y se mide periódicamente el descenso del nivel, cuidando que nunca supere los 7,5 cm por debajo del borde. La turbidez del agua y la formación de algas se combaten colocando sulfato de cobre (CuSO_4) semanalmente y realizando cambios del contenido de agua cuando sea necesario. Las lecturas del tanque se realizan diariamente, temprano, en las primeras horas de la mañana.

A pesar de la diferencia en los procesos ligados a la evaporación del tanque y la evapotranspiración de superficies cultivadas, el uso de la evaporación del tanque para predecir la ETo para períodos de 10 días puede ser considerado confiable si se usa correctamente. La evaporación del tanque está relacionada con la evapotranspiración de referencia por un coeficiente empírico derivado del mismo tanque (Ecuación 1):

$$E_{To} = K_p E_{pan} \quad (1)$$

Donde ETo evapotranspiración de referencia [mm dia^{-1}], Kp coeficiente del tanque evaporímetro [-], Epan evaporación del tanque evaporímetro [mm dia^{-1}] (Allen et al. 2006).

Bajo algunas condiciones no consideradas en el Cuadro 1, los coeficientes (Kp) pueden necesitar algún ajuste. Éste es el caso en áreas sin desarrollo agrícola, o donde los tanques están rodeados por cultivos altos. El variar el color del tanque evaporímetro a otro color diferente al estándar o la instalación de las mallas protectoras puede afectar la lectura del tanque evaporímetro y requerirá algún ajuste del coeficiente Kp.

En áreas sin desarrollo agrícola y extensas zonas con suelos desnudos, (caso B, Cuadro 1) como las encontradas en condiciones desérticas o semidesérticas, los valores de Kp aquí presentados para áreas áridas y ventosas pueden necesitar ser reducidos hasta en un 20%; en áreas con niveles moderados de viento, temperatura y humedad relativa, los valores presentados pueden necesitar una reducción del 5-10%; en climas húmedos y tibios se necesita poca o ninguna reducción del Kp.

En casos en que el tanque evaporímetro se encuentre dentro de un cercado y rodeado por cultivos de gran altura como por ejemplo el maíz (2,5 m), los coeficientes mencionados necesitarán ser incrementados hasta en un 30% en climas ventosos y secos, mientras que para condiciones templadas y húmedas solo se requiere un aumento del 5-10% del coeficiente.

La pintura de las paredes del tanque puede afectar la evaporación. Los coeficientes presentados se aplican para tanques galvanizados pintados anualmente con aluminio y a tanques de acero inoxidable. No se requiere corrección para los valores de Epan en caso de que las superficies interiores y exteriores del tanque evaporímetro estén pintadas de blanco. Un aumento en Epan de hasta 10% puede ocurrir cuando las paredes se pintan de negro. El material del que está fabricado el tanque produce reducidas variaciones en el valor de Epan.

El nivel en el cual se mantiene el agua en el tanque es importante; errores de hasta 15 % pueden resultar cuando el nivel del agua en el tanque evaporímetro Clase A se encuentra 10 centímetros por debajo del estándar aceptado que es de entre 5 y 7,5 centímetros debajo del borde. Las mallas colocadas sobre el tanque evaporímetro pueden reducir Epan hasta en un 10%. Con el fin de evitar que las aves beban agua del tanque evaporímetro Clase A, se pueden colocar cerca otros tanques llenos con agua hasta el borde; en general los pájaros prefieren beber del tanque completamente lleno. El tanque de evaporación se debe colocar rodeado de una verja o cerca que evite que los animales entren y beban el agua. La turbidez del agua en el tanque generalmente no afecta Epan en mas del 5%. La variación total en Epan no es constante en el tiempo debido al uso, al nivel de deterioro y las repetidas pinturas.

| Tanque Clase A | Caso A: Tanque situado en una superficie cultivada | | | Caso B: Tanque situado en un suelo desnudo | | | | |
|---|--|-----------|-------------|--|---|-------------|-----------|-----|
| | HR media | baja < 40 | media 40-70 | alta > 70 | baja < 40 | media 40-70 | alta > 70 | |
| Velocidad del viento (m s ⁻¹) | Distancia del cultivo a barlovento (m) | | | | Distancia del barbecho a barlovento (m) | | | |
| Baja < 2 | 1 | ,55 | ,65 | ,75 | 1 | ,7 | ,8 | ,85 |
| | 10 | ,65 | ,75 | ,85 | 10 | ,6 | ,7 | ,8 |
| | 100 | ,7 | ,8 | ,85 | 100 | ,55 | ,65 | ,75 |
| | 1 000 | ,75 | ,85 | ,85 | 1 000 | ,5 | ,6 | ,7 |
| Moderada 2-5 | 1 | ,5 | ,6 | ,65 | 1 | ,65 | ,75 | ,8 |
| | 10 | ,6 | ,7 | ,75 | 10 | ,55 | ,65 | ,7 |
| | 100 | ,65 | ,75 | ,8 | 100 | ,5 | ,6 | ,65 |
| | 1 000 | ,7 | ,8 | ,8 | 1 000 | ,45 | ,55 | ,6 |
| Alta 5-8 | 1 | ,45 | ,5 | ,6 | 1 | ,6 | ,65 | ,7 |
| | 10 | ,55 | ,6 | ,65 | 10 | ,5 | ,55 | ,65 |
| | 100 | ,6 | ,65 | ,7 | 100 | ,45 | ,5 | ,6 |
| | 1 000 | ,65 | ,7 | ,75 | 1 000 | ,4 | ,45 | ,55 |
| Muy alta > 8 | 1 | ,4 | ,45 | ,5 | 1 | ,5 | ,6 | ,65 |
| | 10 | ,45 | ,55 | ,6 | 10 | ,45 | ,5 | ,55 |
| | 100 | ,5 | ,6 | ,65 | 100 | ,4 | ,45 | ,5 |
| | 1 000 | ,55 | ,6 | ,65 | 1 000 | ,35 | ,4 | ,45 |

Cuadro 1. Coeficientes del tanque evaporímetro (Kp) para el tanque Clase A para diversas localizaciones y ambientes de los tanques y varios valores de velocidad media de viento y de humedad relativa (tomado de Allen et al., 2006).

3-2 Balance de agua en el suelo

La evaporación también puede determinarse midiendo varios componentes del balance de agua en el suelo. El método consiste en evaluar los flujos de agua que entran y salen de la zona radicular del cultivo dentro de un determinado período de tiempo (Figura 2).

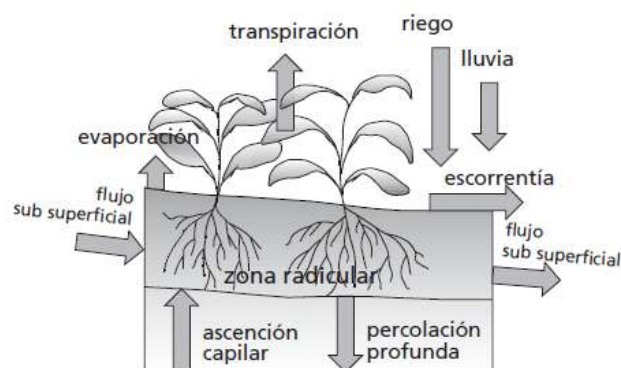


Figura 2. Esquema de Balance de agua en el suelo de la zona radicular (Allen et al., 2006)

El riego (R) y la precipitación (P) proporcionan agua a la zona radicular. Parte de esta puede perderse por escurrimiento superficial (ES), y la percolación profunda (D) la cual recargará el acuífero. El agua también puede ser transportada hacia la superficie mediante capilaridad (C) desde el nivel freático (en zonas de nivel próximo a superficie) sub-superficial hacia la zona de raíces o ser incluso transferida horizontalmente por flujo sub-superficial hacia dentro (FSin) o fuera (FSout) de la zona radicular (ΔFS). Sin embargo, excepto bajo condiciones de pendientes pronunciadas, normalmente los valores de FSin y FSout son mínimos y pueden ser considerados nulos. La evaporación del suelo y la transpiración del cultivo pueden agotar el agua de la zona radicular. Si todos los otros flujos a parte de la evapotranspiración (ET) pueden ser evaluados, ésta se puede deducir a partir del cambio en el contenido de agua en el suelo (ΔSW) a lo largo de un período de tiempo (Ecuación 2):

$$ET = R + P - ES - D + C \pm \Delta FS \pm \Delta SW \quad (2)$$

Algunos flujos como el flujo sub-superficial, la percolación profunda y la capilaridad desde el nivel freático son difíciles de medir y pueden no considerarse en períodos cortos de tiempo. El método de balance de agua en el suelo generalmente solo puede dar estimación de la ET para períodos largos de tiempo del orden de una semana o diez días (Allen et al., 2006).

3-3 Lisímetros

Existen diversas definiciones para los lisímetros:

(Medeiros A. 2002). “Según Aboukhaled et al. (1982), los lisímetros son grandes “contenedores” llenos de suelo (o incluso un bloque de suelo), ubicado en el campo, para representar el medio ambiente local, con superficie con vegetación o en suelo desnudo, para la determinación de evapotranspiración de un cultivo en crecimiento, o de una cobertura vegetal de referencia, o todavía de un suelo sin vegetación.”

(Quaglia L. 2005). “Son grandes recipientes con suelo, instalados en condiciones de campo, con sistemas de pesada o control de entradas y salidas de agua y que presentan una superficie con o sin cobertura vegetal. Este sistema puede ser utilizado para determinar la evapotranspiración de cultivos o tan sólo la evaporación de un suelo (Howell et al. 1991; Wright 1991; Grebet 1991; Khan et al. 1998; Campeche 2002). La medida directa de evapotranspiración por lisimetría es difícil y costosa, justificando su utilización sólo en condiciones experimentales...”

(Quaglia L. 2005). “Palabra que deriva del Griego Lysis, que es disolución o movimiento, e Metron, que significa medir, son pequeños reservorios de tierra instalados en campos que representan un ambiente específico, y pueden ser utilizados para determinar evaporación de suelo descubierto o evapotranspiración de un cultivo, Aboukhaled et al. (1982) y Howell et al. (1991), consideran lisímetros de pesada no sólo como el mejor equipo disponible para medir con precisión la evapotranspiración de referencia y la de cultivo, sino también para modelos de calibración...”

(Campeche L. 2002). “Investigadores como Allen, en Utah, desarrollaron lisímetros de pesada de bajo costo basados en células de carga, construidos en chapa de 0,005 m de espesor, con capacidad de 1,21m³.”

4- Antecedentes.

4-1 Antecedentes Nacionales.

En el ámbito nacional existen diversos trabajos publicados referidos a la temática de lisímetros, con diversos métodos, como así también se han encontrado trabajos en lo que se refiere al estudio de estaciones de balance de energía y el cálculo o estimación de Evapotranspiración a partir de las mismas. Entre los más destacados están:

(Bermejillo A. 1998), Tesis de Maestría en Riego y Drenaje; FCA, Universidad de Nacional de Cuyo. Estimación de la evapotranspiración real regional a partir de datos satelitales.

En este trabajo se fijó como objetivo determinar la Evapotranspiración real (ET_r) a nivel regional utilizando la información del satélite meteorológico NOAA-AVHRR y comparar los resultados obtenidos con los calculados a partir de un modelo de simulación de balance hídrico.

(Olmedo G., Vallone R., Tozzi F. 2010), V Jornadas de Riego y Fertilización, Mendoza. Diseño y construcción de un lisímetro de pesada para la medición de evapotranspiración real en vid en Mendoza, Argentina.

Para la realización de este trabajo se construyó un lisímetro de pesada de 2,5 metros de lado (6,25 m² de superficie) y una profundidad efectiva de 1,5 metros. Contiene en su interior dos plantas de vid que se mantienen en idénticas condiciones a las plantas de la parcela donde está instalado. Consiste en un tanque de fibra de vidrio, reforzado mediante una estructura metálica en forma de jaula que lo envuelve. El tanque reposa sobre una base rígida que a su vez apoya sobre cuatro celdas de carga. Todo el sistema apoya sobre un soporte de hormigón. La señal de las celdas de carga es leída y almacenada en un recolector de datos. El agua de drenaje es recolectada por un sistema por gravedad y pesada. El recolector de datos también almacena información de sensores de humedad y temperatura de suelo, ubicados dentro y fuera del lisímetro y los datos de sensores meteorológicos ubicados junto al lisímetro.

(Requena A., Nordenstron G., Castillo E., 2010), V Jornadas de Riego y Fertirriego, Mendoza. Coeficientes de cultivo de manzano en período de formación obtenidos en lisímetros de drenaje.

En la Estación Experimental INTA Alto Valle, se determinaron coeficientes de cultivo (Kc) de manzano “Cripp’s Pink”, en su segunda temporada de crecimiento, mediante la utilización de tres lisímetros de drenaje de 4 m³ de capacidad y una profundidad mínima de 1 metro. Dentro de cada lisímetro se colocó un manzano, en la misma fecha que se realizó la plantación del monte frutal (16/09/2008). El cultivo fue regado diariamente, mediante un lateral, con goteros integrales de 4l/h (caudal nominal) distanciados cada 0.50m.

(Requena A., Mañueco L., Castillo E., 2010), V Jornadas de Riego y Fertirriego, Mendoza. Evapotranspiración y coeficientes de cultivo del manzano en su tercera temporada de crecimiento.

En la Estación Experimental INTA Alto Valle, se determinaron coeficientes de cultivo (Kc) de *Malus domestica* B cv Cripp’s Pink, en su tercera temporada de crecimiento, mediante la utilización de tres lisímetros de drenaje. Dentro de cada lisímetro se colocó un manzano, en la misma fecha que se realizó la plantación del monte frutal. Durante la temporada de crecimiento del cultivo se realizaron determinaciones de volumen de agua aplicada y drenada, tensión del agua en el suelo, área seccional del tronco, índice de área foliar y porcentaje de superficie sombreada.

(Carmona F., Rivas R. 2011), Teledetección: Recientes aplicaciones en la región Pampeana, Pág. 83-101 Capítulo 5, Estimación de la evapotranspiración real mediante datos meteorológicos e imágenes de satélite.

Este capítulo de libro trata sobre una experiencia realizada en parcelas homogéneas de pastura y soja con cobertura vegetal total; en un campo en las cercanías de Tandil.

Se instaló una estación de balance de energía en una parcela de 5 ha y configurada para almacenar valores medios ambientales con sensores a una resolución temporal de 15 minutos en un datalogger CR 10X.

A partir de estos datos meteorológicos registrados y de dos imágenes del sensor TM (30 m de resolución espacial), se hacen estimaciones de la Evapotranspiración real.

(Carmona, F.; Rivas, R.; Ocampo, D.; Schirmbeck, J. y Holzman, M. 2011) Aqua-LAC - Vol. 3 - N° 1 - pp. 26 - 36.; Sensores para la medición y validación de variable hidrológicas a escalas local y regional a partir del balance de energía.

En este trabajo, se describen las ecuaciones y el instrumental básico necesario para estimar, principalmente, la evapotranspiración a escalas local y regional resaltando la importancia de disponer de medidas reales de terreno. Se hace un detalle de cada sensor con el error asociado a la medida, la configuración de la estación de balance de energía y además las formas de poder extender los datos puntuales a escala regional. Se presenta un registro de datos de radiación neta diaria del período 2006-2010 y se muestra la utilidad de la información registrada para la obtención de funciones de aplicación hidrológica. Se describen en detalle el balance de energía en situaciones de interés y se muestran ejemplos de aplicación en la estimación de la radiación neta y la evapotranspiración real con sus respectivas referencias bibliográficas para que los interesados puedan profundizar en los temas abordados.

4-2 Antecedentes Internacionales.

En el ámbito internacional existen diversos trabajos de lisímetros, con diversos métodos. Entre los más importantes, que fueron los que dieron origen a este trabajo, se destacan:

(Aboukhaled A., Alfaro A., Smith M. 1982) Lysimeters, FAO Irrigation and Drainage paper N°39

Publicación de la FAO donde se presenta respuesta a preguntas de índole práctica y donde se proporcionan guías generales de selección, instalación, construcción y manejo de los lisímetros.

(Khan L.P., Gil J.A. y Acosta R. 1998) Bioagro 10(1): 11-17.; Diseño y funcionamiento de un lisímetro hidráulico para medición de la evapotranspiración potencial.

Este trabajo trata de un lisímetro diseñado e instalado, de bajo costo. Con el objetivo de comprobar su funcionalidad para medir la evapotranspiración potencial.

El método consta de tres tanques cilíndricos que se utilizaron como envases contenedores del suelo; dos de ellos se usaron para medir evapotranspiración y al tercero se le interrumpió la pérdida o ganancia de agua, con el fin de detectar variaciones por efecto de la temperatura y así usarlo para corregir lecturas. Debajo de cada tanque se colocó un sensor en forma de aro conectado a un manómetro de agua.

La experiencia se realizó en un invernadero y demostró estabilidad, sencillez y fácil manejo del lisímetro. Se obtuvieron resultados que demostraron confiabilidad con un valor de 0,71 r^2 para la relación ETP/Evaporación medida en tanque.

(Medeiros A. 2002) Tesis Doctoral; Estimación de la evapotranspiración de referencia a partir de la ecuación de Penman-Monteith, de medidas lisimétricas y de ecuaciones empíricas, en Paraipaba, CE

En el presente trabajo se avaló la ETo a través de la comparación de medidas lisimétricas y métodos de estimación con la ecuación de Penman-Monteith. Los métodos de estimación de la ETo utilizados fueron: Thornthwaite (1948) modificado por Camargo, Tanque evaporímetro Clase “A”, Hargreaves y Samani (1982) y Priestley y Taylor (1972).

El trabajo fue realizado en un período de Marzo a Junio, durante dos años, con datos obtenidos por una estación meteorológica automática instalada en una estación experimental, donde también se encontraba instalado un lisímetro de pesada, con celdas de carga. El análisis se basó en datos diarios y quincenales.

(Campeche L. 2002) Tesis Doctoral; Construcción, calibración y análisis de funcionamiento de lisímetro de pesada para determinación de evapotranspiración de cultivo de, Lima Acida “tahiti” (Citrus Latifolia tan.)

Los principales objetivos expresados en este trabajo fueron la construcción, calibración y operación de un lisímetro de pesada, basado en una celda de carga, para monitorear el consumo de agua de árboles; la medición de la evapotranspiración en el estado inicial de implantación y la determinación del coeficiente de cultivo Kc para el cultivo estudiado.

(Tumbaco P. 2004) Determinación del requerimiento hídrico de cuatro pastos mediante el uso de lisímetros bajo condiciones de El Zamorano, Honduras.

El objetivo del trabajo fue determinar el requerimiento hídrico de cuatro pastos mediante el uso de lisímetros bajo condiciones de El Zamorano, Honduras, y correlacionarlos con las variables meteorológicas. Se instalaron cuatro lisímetros de drenaje sin nivel freático por pasto.

Se utilizó el método del balance hídrico para evaluar el uso consuntivo de agua. Los resultados indicaron que al aplicar riego hay que diferenciar entre pastos. Los K_c promedio de los pastos para la primera, segunda y tercera semana, respectivamente, son superiores a los recomendados por FAO. Se encontraron correlaciones bajas entre la ET_c y la humedad relativa, la temperatura mínima y la velocidad del viento; también existe una correlación positiva, aunque no significativa, entre la temperatura promedio y la ET_c , indicando que es posible el control del riego por vía de estas variables climatológicas.

Capítulo II

Introducción y Objetivos

El manejo hidrológico de un país depende, en gran medida, del conocimiento de las cuencas hidrológicas existentes, del potencial de éstas y de la manera de gestionar adecuadamente los recursos hídricos. A partir del estudio de una cuenca es posible desarrollar un manejo hidrológico adecuado, siendo necesario registrar información a partir de estaciones de modo de lograr medidas consistentes de las variables hidrológicas (Carmona et al., 2011). Se han llevado adelante importantes esfuerzos en Argentina por conocer la evapotranspiración real, variable de compleja estimación, a partir de datos registrados por una estación de balance de energía (EBE).

La estimación de la pérdida real del sistema suelo-agua-planta se puede lograr por medio de métodos directos e indirectos (Carmona et al., 2011). Uno de los métodos directos corresponde a los lisímetros, que miden la variación en el contenido de agua del suelo, siendo estos, la mejor forma de determinar el consumo de agua por parte de las plantas. Aún cuando no existe un modelo único, 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 microlisímetros o minilísimetros. Estos micro o minilísimetros 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 (Khan et al., 1998) y de variación de altura de agua.

En el marco de este trabajo final se construirá un lisímetro de pesada y se mostrará la operatividad del mismo para 135 días en período de elevada evapotranspiración.

OBJETIVOS:

i- Objetivo General

Diseñar, construir y operar un lisímetro de pesada de bajo costo dentro de la parcela del Instituto de Hidrología de Llanuras “Dr. Eduardo Usunoff”, ubicada en el Campus Tandil de la Universidad Nacional del Centro de la provincia de Buenos Aires.

ii- Objetivos Específicos

- ▶ Estimar la evapotranspiración real (ETr) del sistema suelo-agua-planta para una mezcla de gramíneas.

- ▶ Estudiar la evolución diaria de la humedad de suelo en todo el perfil del lisímetro a través de sensores de humedad de suelo.

Capítulo III

Materiales y Métodos

1-Ubicación del ensayo

El lisímetro de pesada se instaló dentro del predio meteorológico ubicado en el Campus Tandil (37° 17' de latitud Sur y a los 59° 07' de longitud Oeste, 214 msnm), perteneciente a la Universidad Nacional del Centro de la provincia de Buenos Aires, que mantiene el Instituto de Hidrología de Llanura “Dr. Eduardo Usunoff” desde el 2005.

2- Características de la zona

2-1 Clima

En el presente estudio se procesaron y analizaron medidas locales registradas en una zona subhúmeda-húmeda de la Pampa Argentina, con precipitación promedio anual de 912 mm (Servicio Meteorológico Nacional de Argentina, período 2000-2010) y una evapotranspiración de entre 730 y 820 mm año⁻¹ (registros del IHLLA 1994-2014).

Tandil, está ubicada en el centro-este de la provincia de Buenos Aires, República Argentina. Se halla a 352 Km de la ciudad de Buenos Aires, forma parte de una gran planicie, rodeada de serranías. Posee un clima templado, donde se registran precipitaciones frecuentes a lo largo de todo el año, lo que ayuda a la producción agrícola.

Al norte del partido se extiende una llanura verde, de suave declive y montes cubiertos con diversas especies arbóreas, con excelentes suelos para cultivos propios de la región como avena, cebada, maíz, trigo, girasol, lino, alfalfa, papa y frutales.

2-2 Suelo

En el sector en que se ubica el lisímetro se realizó una calicata, obteniendo una clasificación descriptiva del suelo, para la determinación textural y contenido de materia orgánica entre otros (Cuadro 2). Del análisis descriptivo se observa que el suelo corresponde a un Argiudol Típico de la serie de suelos Tandil (Rivas y Ocampo, 2009).

Argiudol significa que el suelo es un Molisol, es decir, un suelo con un horizonte superficial (A) formado en superficie y enriquecido con materia orgánica que esta humificada (en estrecha asociación con la matriz mineral); la partícula Argi implica que en el subsuelo se acumuló arcilla como resultado de un proceso de migración (por suspensión y movimiento en agua) desde horizontes suprayacentes (horizontes Bt1 y Bt2).

Según mapa de suelos 1:50000 del INTA pertenece a la Unidad cartográfica SP (Sierra de los Padres) 6, una asociación que incluye los suelos serie Mar del Plata, serie Tandil y serie Cinco Cerros

El suelo tiene una cubierta vegetal mixta (*Dactylis glomerata*, *Festuca arundinacea* y *Lolium Multiflorum*) y está rodeada por un área de experimento de pastoreo de ganado vacuno (Schirmbeck y Rivas 2007). El entorno donde se ubica el lisímetro siempre está rodeado de vegetación de pastoreo.

| Horizonte | Profundidad (cm) | ph (1:2,5, agua) | MO% | CO Kg ⁻¹ | Análisis Mecánico | | | Clase Textural |
|-----------|------------------|------------------|------|---------------------|-------------------|--------|---------|----------------|
| | | | | | % Arcilla | % Limo | % Arena | |
| Ap1 | 0 -- 7 | 5,80 | 5,69 | 33,00 | 26 | 37 | 37 | Franca |
| Ap2 | 7 -- 20 | 6,10 | 4,00 | 23,20 | 26 | 38 | 36 | Franca |
| AB | 20 -- 35 | 6,30 | 2,08 | 12,10 | 27 | 36 | 37 | Franca |
| Bt1 | 35 -- 57 | 6,40 | 1,45 | 8,40 | 45 | 26 | 29 | Arcillosa |
| Bt2 | 57 -- 70 | 6,50 | 0,79 | 4,60 | 40 | 25 | 35 | Arcillosa |
| BC | 70 -- 78 | 6,70 | 0,52 | 3,00 | 20 | 36 | 44 | Franca |
| C | 78 + | 6,80 | 0,34 | 2,00 | 8 | 39 | 53 | F. Arenosa |

Cuadro 2. Datos de laboratorio correspondientes a las muestras tomadas de la calicata en donde se instaló el lisímetro (datos procesados por el Laboratorio de Suelos de la facultad de Agronomía de la UNCPBA).

3-Montaje del Lisímetro

El montaje se realizó de acuerdo a [Aboukhaled y Smith \(1982\)](#) quienes consideran a los lisímetros como “recipientes grandes llenos de suelo (o encerrando una masa de suelo), ubicados en el campo para representar sus condiciones naturales, de superficie desnuda o con cubierta vegetal (cultivos o césped), utilizados para determinar la evapotranspiración de un cultivo en crecimiento, o cubierta vegetal de referencia, o para determinar la evaporación en suelos desnudos.” Por lo tanto el montaje tiene finalidades similares a las definidas por estos autores.

3-1 Materiales y Equipo utilizado

Para la construcción se utilizaron los siguientes materiales:

- a) 1 Tanque de chapa (capacidad de 200 litros)
- b) 1 Chapón para fondo
- c) 2 Bases de concreto (tapa de cámara séptica)
- d) $\frac{1}{4}$ m³ Piedra partida 620
- e) 3 m de cadena N°6
- f) 3 Eslabones N° 8
- g) 2 Sensores de humedad de suelo marca Cavadevice de 20 cm
- h) 1 Sensor de humedad de suelo marca Decagon de 10 cm
- i) 1 Logger marca Cavadevices de 8 canales
- j) 1 Balanza electrónica de colgar (hasta 500 kg)
- k) 1 Pluma hidráulica (hasta 2000 Kg)

En el Anexo I se detalla el costo de los materiales del lisímetro.

3-2 Construcción del pozo

En primer lugar se seleccionó dentro de la parcela un sector topográficamente adecuado, considerando que las futuras mediciones dentro del lisímetro no sean influenciadas por escurrimiento superficial.

Una vez seleccionado el lugar, se procedió a realizar el pozo donde sería colocada la estructura. El procedimiento constó de un pozo, de 1,05 m de profundidad, disturbando el suelo, pero separando el mismo cada 20 cm de profundidad, y realizando montículos perfectamente separados e identificados, para luego incorporarlo al cilindro preservando los horizontes con las características propias del perfil (Figura 3). De esta manera se evitó la mezcla de horizontes del suelo (se denota claramente, en la Figura 3, cada horizonte por la tonalidad de cada montículo). Cada camada de terreno se compactó con un pisón con la finalidad de lograr una densidad similar a la original. Se conservó la vegetación y las raíces de la misma en perfecto estado sacando la misma en un pan junto al suelo (Figura 3 izquierda).



Figura 3. Fotos que muestran el pan de suelo con vegetación (izquierda) y los montículos de suelo para las diferentes profundidades (izquierda, centro y derecha).

En el fondo del pozo, previo a la colocación del lisímetro, se armó una estructura de soporte, formada por dos planchas de cemento de 59 cm de lado por 5 cm de espesor (Figura 4.a). La primera apoyada y nivelada sobre el fondo, y la segunda separada de la anterior por medio de bloques de 5 cm de altura que sostienen la estructura, permitiendo que esta no esté en contacto directo con el suelo, y facilitando así el drenaje profundo (Figura 4.b).



Figura 4.a) Estructura de soporte y dimensiones y b) pozo con planchas dispuestas para sustentación final del lisímetro.

3-3 Diseño y construcción de la estructura

La superficie del lisímetro es de $0,2734 \text{ m}^2$ y tiene una profundidad de 0,88 m (con una profundidad útil de suelo de 0,60 m) y un diámetro de 0,59 m. La profundidad seleccionada es debido a que la exploración de raíces no supera los 0,50 m (Dormaar, et al. 1995). La Figura 5 muestra el croquis del lisímetro con las dimensiones específicas y con el detalle del drenaje del fondo, en el mismo (de izquierda a derecha) se puede ver, en principio la estructura del tambor utilizado para el lisímetro, debajo del mismo se ve especificado cada una de las planchas que constituyeron a la “estructura de soporte”, luego se expone una vista superior e inferior del tambor, donde en la última se demuestra gráficamente el fondo del tambor que a continuación se describe; y por último se puede ver un corte de la estructura de drenaje.

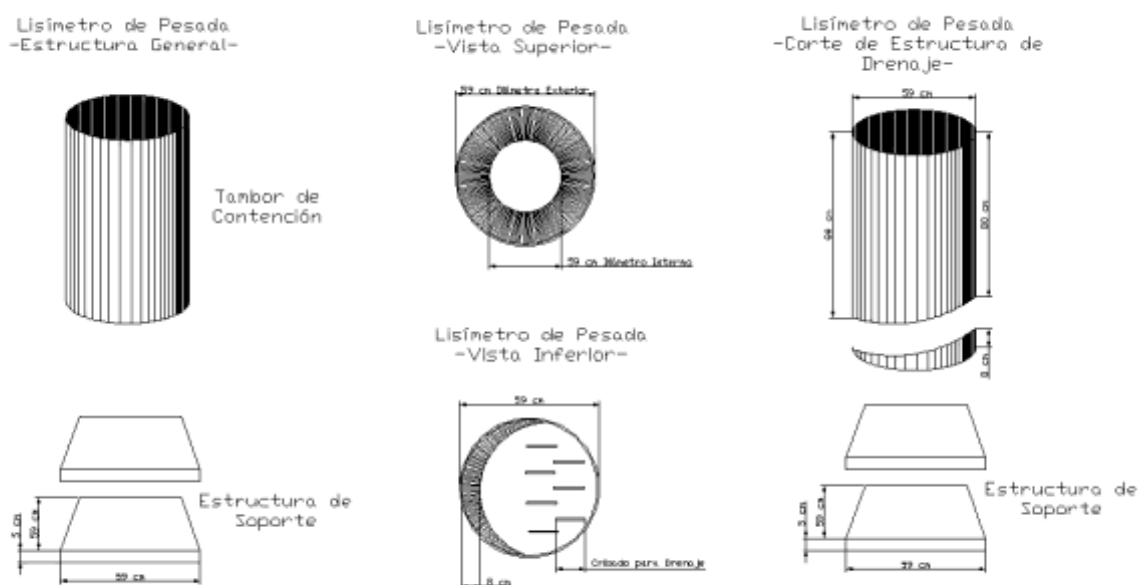


Figura 5. Croquis del lisímetro.

En el fondo del cilindro, de 0,59 m de diámetro, se soldó una chapa con un ángulo de 10°, en la que se realizó un ranurado para facilitar el drenaje del excedente de agua. La Figura 6 muestra el cilindro y el fondo ranurado con la protección de anti óxido colocado para evitar la oxidación.



Figura 6. Cilindro sin material y fondo del lisímetro con protección antióxido

Encima de las planchas (estructura de soporte) se ubicó el cilindro metálico y se fue llenando en el siguiente orden para quedar finalmente como se muestra en la Figura 7:

- 1° Se extendieron 15 cm de grava de tamaño 12-24 mm.
- 2° Se incorporó el espesor de suelo 60-40 cm y se compacto.
- 3° Se instaló a 40cm de la superficie uno de los sensores de humedad de suelo de 20 cm de longitud, marca Decagon.
- 4° Se incorporó el espesor de suelo 40-20 cm y se compacto.
- 5° Se instaló un segundo sensor de humedad de suelo de 20 cm de longitud a 20 cm de la superficie.
- 6° Se incorporaron los panes que corresponden al espesor de suelo 20-0 cm y se rellenaron los espacios vacíos con suelo del mismo horizonte
- 7° Sobre la superficie, se instalo un tercer sensor de humedad de suelo de iguales características que los anteriores.

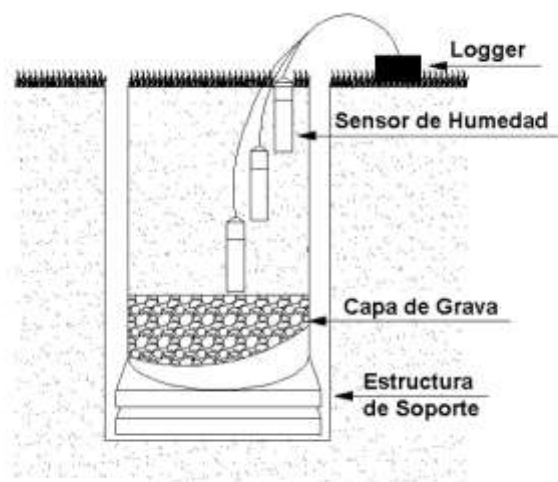


Figura 7. Corte de lisímetro luego de la incorporación de los horizontes y sensores de humedad siguiendo los pasos 1-7 indicado anteriormente.

Adicionalmente se añadieron tres cadenas de 1 m de longitud en el borde superior del lisímetro, separadas entre sí por ángulos de 120°, que permiten colgar la estructura para su posterior pesada.

3-4 Instalación de sensores de humedad

Los sensores de humedad fueron conectados a un logger (en el Anexo II se pueden observar los detalles técnicos del logger), y se configuraron con una resolución temporal horaria. La humedad estimada a las 3 profundidades consideradas se registraron con sensores Decagon modelo EC-10 y sensores Cavadevices modelo SCH-20 (Especificaciones técnicas en Anexo III). Las medidas registradas corresponden a valores en mV que luego de aplicar las funciones específicas para cada sensor (Cuadro 3), se obtienen valores volumétricos de humedad (VWC) entre 0 y 1 (VWC para cada profundidad) que posteriormente son transformados a VWC en % (ver Anexo IV)

| <i>Modelo sensor</i> | <i>Marca</i> | <i>Ecuación de transformación</i> |
|----------------------|----------------------|---------------------------------------|
| EC-10 | Decagon Devices Inc. | $VWC-10H_2O = (0,00093 * mV - 0,376)$ |
| SCH-20 | Cavadevices | $VWC = 0,0007 * mV - 0,0764$ |

Cuadro 3. Modelo de los sensores de humedad de suelo

Con el fin de reducir los errores en las mediciones, se realizaron las pesadas con intervalos mínimos de 3 días. Para permitir conocer el valor diario de ETr, se realizó una planilla de cálculo, en la cual se colocan los valores de las pesadas y se determina el valor diario de la ETr dentro del lisímetro como un promedio.

Junto al lisímetro se instalaron un pluviómetro y 3 estaciones de balance de energía (Carmona et al. 2011). Los datos brindados por la estaciones de balance de energía (Temperatura (T), Humedad (HR), Radiación neta (Rn) y Velocidad (U₂)) fueron utilizados para estimar la ET de referencia (ET_o) (ver detalles de los sensores en el Anexo V).

3-5 Calibración

Una vez instalado el lisímetro con todo el contenido de suelo en su interior y los sensores de humedad, se procedió a la operación y registro de medidas para la calibración del mismo.

Para ello se realizó una primera medida y se repitió en tres oportunidades, viendo que esta se mantenía en el tiempo, se tomo la misma como lectura inicial. Luego se peso un recipiente y se le agrego el volumen de agua correspondiente a una lluvia de 1 mm, se colocó sobre el lisímetro y se volvió a pesar obteniendo nuevamente tres lecturas. Esta operación se repitió durante tres ocasiones más, obteniendo los resultados esperados (Ecuación 3), por cada milímetro aportado (simulando lluvia contenida), la balanza demuestra un incremento; el inconveniente que se presenta es que la balanza posee un solo dígito para los gramos, lo que hace que la lectura por cada milímetro leída sea de 2 (dos) y la calculada es de 273,2585 g teniendo un error.

Considerando una superficie calculada de 273,2 cm²

$$1\text{mm evaporado} = \frac{1\text{l}}{\text{m}^2} = \frac{1\text{Kg}^*}{\text{m}^2} = \frac{1000\text{g}}{10000\text{cm}^2} = \frac{1\text{g}}{10\text{cm}^2}$$

* considerando una densidad del agua de 1g/cm³

Entonces

1mm evaporado equivale a 273,2 g

(3)

4-Funcionamiento

El pesado se realiza suspendiendo la estructura de la siguiente manera; los extremos de las cadenas se colocan a la parte inferior de una balanza digital (de capacidad máxima de 500 kg y mínima de 0,200 kg) y la parte superior de la balanza es acoplada a una pluma hidráulica (capacidad máxima 2000 kg). Una vez acopladas las partes se procede a elevar toda la estructura de manera lenta y verificando que no se produzcan roces sobre los costados del pozo que la contienen. Este procedimiento se repite tres veces para obtener una correcta medida realizando los siguientes pasos:

- 1- Se coloca la “pluma Hidráulica”, de manera que al levantar la estructura esta quede totalmente suspendida en el aire, **sin que haya ningún tipo de rozamiento con las paredes del pozo del lisímetro.**
- 2- Una vez colocada la pluma se cuelga la balanza (posee autonomía de 72 hs), se enciende y se espera unos minutos hasta calentar la resistencia interna (de no hacer esto se puede tener un error de 200 g, que para el sistema es aproximadamente 0,7 mm).
- 3- Cuando la balanza ya está colocada, prendida y puesta en cero (tarada), se colocan las cadenas de la estructura y se levanta suavemente, considerando nuevamente que no haya rozamiento y que, en el caso de que la pluma este por sobre la estructura del lisímetro, no levantar demasiado porque los pastos pueden provocar una resistencia que se traducirá en un peso falso (200 a 400 g).
Esto se realiza tres veces como mínimo y de no haber anomalías, se reproducirá la misma lectura, de no ser así se deberán anotar las tres lecturas y sacar un promedio de las mismas, considerándola como lectura final.
- 4- En cada ocasión se lleva un cuaderno con las lecturas anteriores para tener en cuenta las medidas previas y en las condiciones climáticas que fueron tomada, para así saber si estamos dentro del rango de pesos determinados, si se produjeron lluvias, se deberá anotar el valor de la misma que se encuentra en el pluviómetro.

Es importante tener presente que también se registra la humedad del perfil dentro de la estructura, que es un indicador de las condiciones del suelo y por lo tanto se puede tener un control de la calidad de la medida. La Figura 8 muestra de manera simplificada los pasos seguidos en la operación del lisímetro.

En los anexos VI y VII se describen los detalles de la pluma y de la balanza.

Precauciones a tener en consideración para una correcta medida:

1. Que no se produzcan rozamientos en el entorno al lisímetro.
2. Que se halla esperado el tiempo de calentamiento del sistema electrónico de la balanza
3. Poner la balanza en cero cuando está suspendida y sin las cadenas colocadas.
4. Colocar en las ruedas de la pluma maderas para que esta no se entierre y no cambiar el entorno de la cobertura vegetal de la parcela.
5. No pisar mucho en el entorno del lisímetro.
6. Considerar la existencia de los cables de los sensores Decagon. (no pisarlos ni aplastarlos con la pluma).
7. Al finalizar la medida, colocar la estructura del lisímetro en el centro del pozo.
8. Verificar el entorno y de encontrar anomalías anotar.
9. Si se registro una lluvia en el pluviómetro, anotarla y vaciar el recipiente.



Figura 8.a) Pluma hidráulica sosteniendo la estructura b) Balanza colocada lista para medir.

5- Cálculos de ETo y Humedad

Para la estimación de ETo se utilizó el procedimiento propuesto por el manual 56 de la FAO (Allen et al., 1998) siguiendo los lineamientos indicados por Ocampo y Rivas (2010) (Ecuación 4):

$$ET_0 = \frac{0.408 \cdot \Delta (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0.34 \cdot u_2)} \quad (4)$$

donde ET_0 es la evapotranspiración de referencia (mm día^{-1}), R_n es la radiación neta ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$), G es el flujo de calor en el suelo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$), T es la temperatura media del aire a 2 m de altura ($^{\circ}\text{C}$), u_2 es la velocidad del viento a 2 m de altura (m s^{-1}), e_s es la presión de vapor de saturación (kPa), e_a es la presión real de vapor (KPa), $(e_s - e_a)$ es el déficit de presión de vapor (KPa), Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor ($\text{KPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$), γ es la constante psicrométrica ($\text{KPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$), 0.408 es un factor de conversión a mm día^{-1} , 273 es un factor de conversión para expresar la temperatura en K, 900 es un coeficiente para el cultivo de referencia ($\text{kJ}^{-1} \text{ Kg K día}^{-1}$), 0.34 es un coeficiente resultante de asumir una resistencia de cultivo de 70 s m^{-1} y una resistencia aerodinámica de $208/U_2$ para el cultivo de referencia (s m^{-1}). G en el contexto del presente trabajo a nivel del día es considerado nulo.

La humedad del suelo se estimó de manera directa a través de las diferencias en las pesadas y de forma indirecta a partir de los sensores incluidos dentro de la estructura del lisímetro (0-60 cm).

La estimación directa de la proporción de humedad del suelo (FHS) para una medida (Pa) se obtuvo a partir de la ecuación 5, considerando el peso máximo (Pmax) y mínimo (Pmin) del lisímetro (con máxima y mínima humedad).

$$FHS = \frac{Pa - P_{min}}{P_{max} - P_{min}} \quad (5)$$

Para la estimación indirecta se calculo el promedio de humedad de los tres sensores incluidos en el cilindro y se observaron los máximos de VWCEC (%) para la máxima humedad y el mínimo VWCEC (%) para la mínima humedad.

Posteriormente se compararon las medidas del lisímetro, respecto a los sensores y complementariamente para situaciones de máxima humedad con la ETo estimada con la Ecuación 4.

Capítulo IV

Resultados

En el Cuadro 4 se presentan los estadísticos de las variables ambientales registradas en el período de análisis en las estaciones instaladas en la parcela en la que se encuentra el lisímetro. Además la Figura 9 muestra el comportamiento diario (como valor promedio de medidas realizadas cada 15 minutos) de las variables meteorológicas utilizadas para la estimación de la ETo aplicando la Ecuación 4.

| | Unidad | Máximo | Mínimo | Media |
|----------------------|----------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Temperatura Ambiente | °C | 37,7 °C | 4,2 °C | 20,2 °C |
| Humedad Relativa | % | 100% | 17% | 70% |
| Radiación Neta | mm día ⁻¹ | 8,2 mm día ⁻¹ | -0,1 mm día ⁻¹ | 4,9 mm día ⁻¹ |
| Velocidad de Viento | m s ⁻¹ | 13,5 m s ⁻¹ | 0 m s ⁻¹ | 3 m s ⁻¹ |

Cuadro 4. Estadísticos meteorológicos para el período analizado.

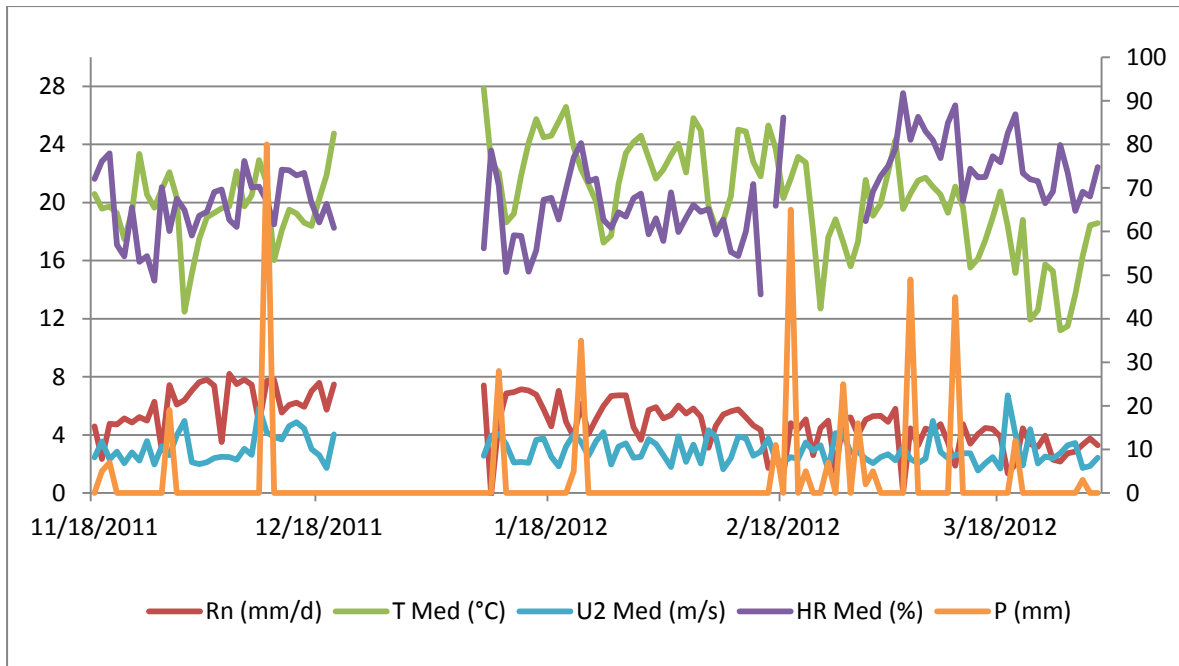


Figura 9. Valores medios diarios de Ta, HR, U2 y Rn del período analizado (los símbolos fueron definidos en el texto debajo de la Ecuación 4). El faltante de datos se debe a una falla en la batería del logger.

En el Cuadro 5 se detallan los valores de las pesadas realizadas con el lisímetro y con los sensores de humedad para el período considerado (las celdas en blanco en el Cuadro 5 indican falta de datos por fallas en las baterías del logger). En la Figura 10 se presenta un buen grado de ajuste, es decir, valida el valor entre Peso-FHs. Se observa en la Figura 11 la comparación de la ETr medida en el lisímetro versus la ETr calculada como producto de la ET mezcla de gramíneas por FHs (considerando la FHs como la calculada a partir de los datos de los sensores de humedad de suelo de 0-60 cm). Los valores graficados corresponden a 20 días de pesadas en el lisímetro en los que se excluyeron 8 medidas por durante días de alta nubosidad y con precipitaciones (en general en días que se registran precipitaciones se observan errores en los balances de masa). Se puede notar que existe un buen ajuste considerando la ordenada al origen en cero (con un coeficiente de determinación de 0,72) y mejora considerando una ordenada diferente de cero (coeficiente de determinación 0,78). Se puede notar que el parámetro pendiente de la recta es cercano a uno indicando una baja tendencia a la subestimación o sobreestimación. Como el perfil de suelo no logró su estabilización en los primeros meses de operación del lisímetro es de esperar que para medidas a largo plazo mejore dado que el perfil tenderá a ordenarse aproximándose a las condiciones naturales.

| Fecha | Lisímetro | Humedad | | | |
|------------|--------------|-----------|------------|------------|-------|
| | Pesada en Kg | 0 - 10 cm | 20 - 40 cm | 40 - 60 cm | Media |
| 17/11/2011 | 291,4 | 15,6 | 29,2 | 32,1 | 25,6 |
| 21/11/2011 | 290,2 | 12,4 | 25,5 | 31,5 | 23,1 |
| 24/11/2011 | 283,0 | 9,5 | 20,5 | 30,3 | 20,1 |
| 28/11/2011 | 279,4 | 7,6 | 16,8 | 27,9 | 17,4 |
| 01/12/2011 | 277,0 | 6,3 | 15,0 | 24,5 | 15,3 |
| 05/12/2011 | 269,0 | 4,5 | 14,1 | 20,0 | 12,9 |
| 08/12/2011 | 269,2 | 4,9 | 13,5 | 15,9 | 11,4 |
| 22/12/2011 | 271,4 | 6,7 | 19,0 | 15,2 | 13,6 |
| 27/12/2011 | 267,0 | 5,4 | 17,0 | 14,1 | 12,2 |
| 29/12/2011 | 266,2 | 4,1 | 16,7 | 13,5 | 11,4 |
| 06/01/2012 | 262,6 | 2,9 | 15,5 | 11,0 | 9,8 |
| 12/01/2012 | 264,7 | 14,7 | 14,9 | 10,1 | 13,2 |
| 16/01/2012 | 264,0 | 7,0 | 15,2 | 10,7 | 11,0 |
| 24/01/2012 | 272,6 | 14,5 | 17,2 | 10,2 | 14,0 |
| 27/01/2012 | 270,4 | 10,7 | 17,0 | 10,3 | 12,7 |
| 31/01/2012 | 267,8 | 7,0 | 16,2 | 10,7 | 11,3 |
| 03/02/2012 | 265,0 | 5,8 | 15,4 | 10,9 | 10,7 |
| 07/02/2012 | 263,0 | 4,6 | 14,7 | 11,2 | 10,2 |
| 10/02/2012 | 263,0 | 3,7 | 14,2 | 10,3 | 9,4 |
| 13/02/2012 | 262,4 | 3,3 | 14,2 | 10,5 | 9,3 |
| 17/02/2012 | 265,0 | 20,4 | 23,3 | 10,0 | 17,9 |
| 22/02/2012 | 279,8 | 15,5 | 25,5 | 9,7 | 16,9 |
| 27/02/2012 | 282,0 | 15,5 | 28,5 | 10,4 | 18,1 |
| 01/03/2012 | 285,2 | 13,5 | 28,2 | 16,7 | 19,5 |
| 07/03/2012 | 291,2 | 12,9 | 33,4 | 32,8 | 26,4 |
| 13/03/2012 | 298,0 | 18,9 | 41,4 | 36,4 | 32,2 |
| 16/03/2012 | 296,0 | 12,7 | 34,1 | 33,1 | 26,6 |
| 20/03/2012 | 295,8 | 14,3 | 31,4 | 31,7 | 25,8 |
| 23/03/2012 | 293,4 | 11,8 | 30,6 | 31,3 | 24,6 |
| 29/03/2012 | 292,9 | 8,4 | 29,3 | 30,8 | 22,8 |

Cuadro 5. Pesadas del lisímetro, VWCEC y VWCEC promedio del perfil para el período analizado.

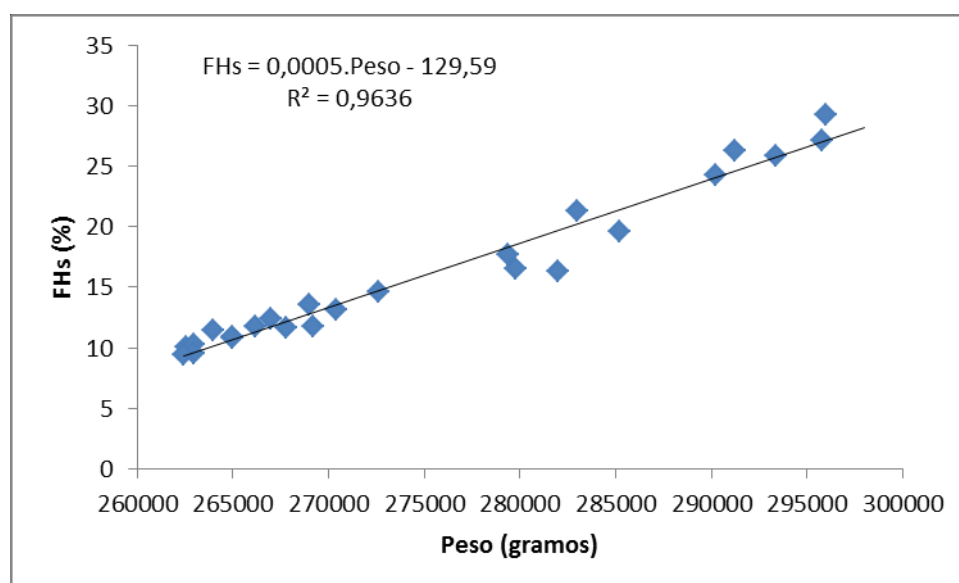


Figura 10. Relación peso del lisímetro y humedad promedio registradas por los sensores.

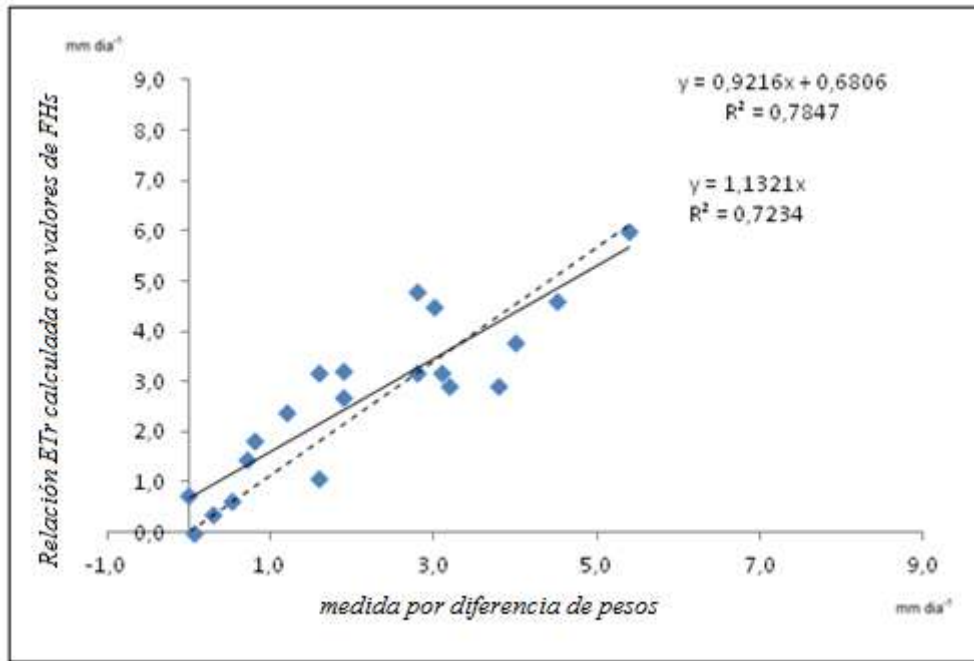


Figura 11. Relación ETr calculada con valores de FHs y medida por diferencia de pesos (línea punteada ajuste obligando a pasar por el origen y llena ajuste sin paso por el origen)

En la Figura 12 se grafica la ETo diaria de Penman Monteith utilizando la Ecuación 4 con los datos registrados en la estación de balance de energía. Hubo días con ETo cercana a los 14 mm día⁻¹ debido a las elevadas temperaturas del aire y viento por encima de la media histórica dado que el verano de 2012 fue seco en los primeros meses (períodos en blanco corresponde a faltante de registro de datos).

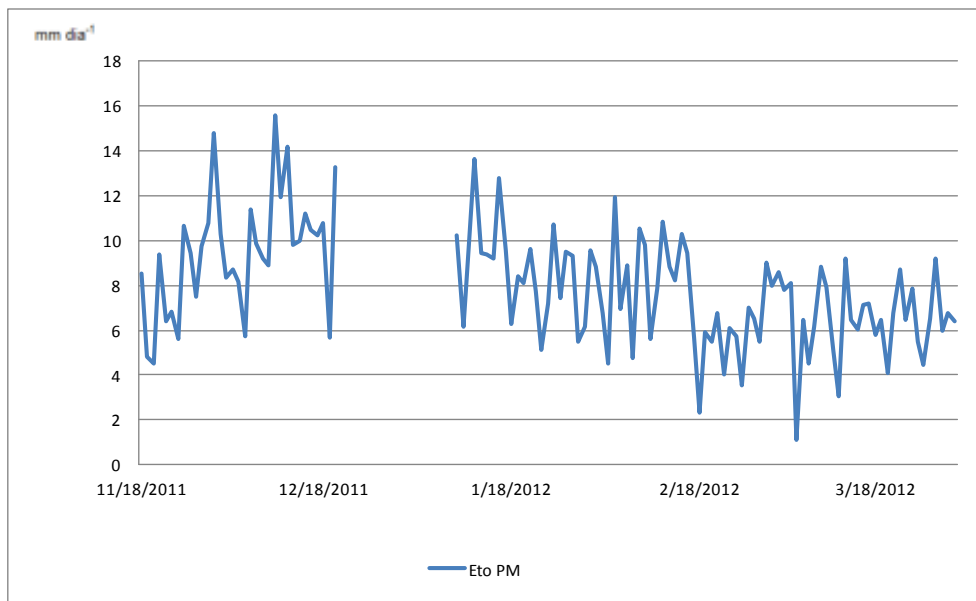


Figura 12. Evapotranspiración diaria para los 135 días considerados.

Con la finalidad de mostrar una aplicación práctica de la utilidad del lisímetro se muestra en la Figura 13 la ETo calculada y la ET real medida a partir de la diferencia de pesadas registradas en el lisímetro.

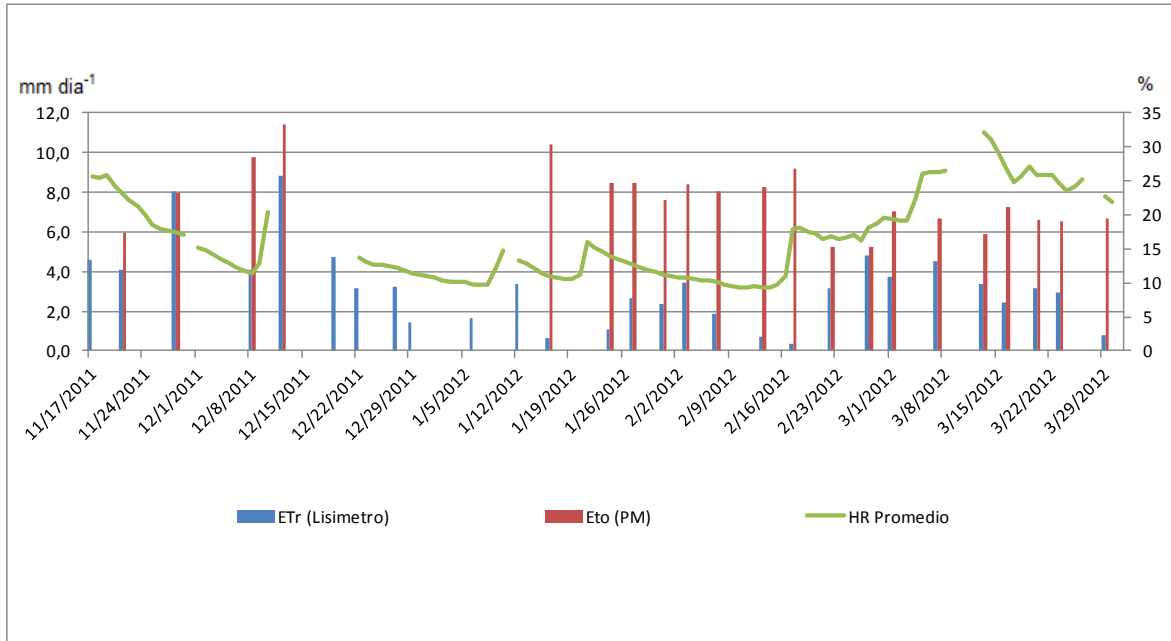


Figura 13. ETo, ETr y VWCEC promedio de las tres medidas de Hs registradas.

Claramente se observa a partir de la Figura 13, como en los períodos en que hay suficiente humedad en el perfil del suelo la ETr tiende a valores cercanos a la ETo (Figura 14a), y como en los períodos de menor humedad en el perfil la diferencia entre ETr y ETo es mayor (Figura 14 b y c).

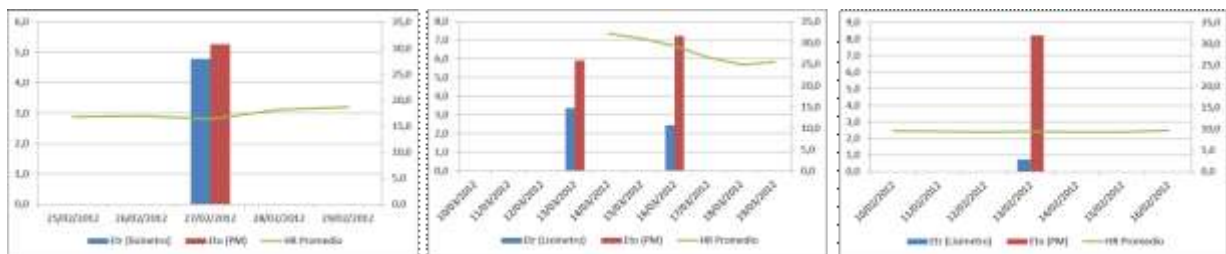


Figura 14 a) Condición con disponibilidad de agua para evaporar y transpirar, b y c) condiciones con diferente disponibilidad de agua en el perfil.

De manera simplificada se podría determinar que la diferencia entre E_{To} y E_{Tr} en mm, es la lámina que se debería aportar, al pasto corto de la parcela para cumplir con la demanda de agua desde la atmósfera para estas condiciones. A la vez si se deseara considerar la demanda de agua de un cultivo específico, del área cercana al lisímetro, basta con relacionar la E_{To} de la parcela con la del cultivo considerado (mediante el coeficiente de cultivo “ K_c ”) y de este modo se podría tener una demanda de agua de riego.

Capítulo V

Conclusiones y Perspectiva a Futuro

En el marco del trabajo final de tesis de especialización se construyó un lisímetro de pesada de operación manual que será de utilidad para el seguimiento de la evapotranspiración real de una cubierta de gramíneas. Las características técnicas y detalles de construcción considerados garantizan medidas de pérdida de agua de calidad con una resolución temporal de tres días y un error de estimación del orden de $0,5 \text{ mm día}^{-1}$. Es fácil de reproducir en otros sitios y el costo no es elevado, por el contrario, requiere una alta dedicación dado que es necesario ir a medir de manera manual. En caso de replicarse el lisímetro en otros ambientes es importante considerar de adaptar las dimensiones (sobre todo la profundidad) a las condiciones de la vegetación que se desea estudiar.

Además la incorporación de sensores, de registro continuo de humedad en el perfil, en el propio lisímetro permite el seguimiento del comportamiento de la humedad de forma más precisa y avizora importantes avances en la validación de datos de evapotranspiración real logrados por medios indirectos (balance de energía y métodos semiempíricos). Seguramente, de lograrse un registro extenso de medidas de pesadas en el lisímetro y de humedad del perfil con los sensores, se logrará una calibración de un modelo de funcionamiento del sistema suelo agua planta atmósfera que permitirá extender las medidas locales a la región utilizando información de satélite.

Es importante indicar que para los 135 días considerados el lisímetro facilitó el seguimiento de la disponibilidad de agua en el perfil y que las comparaciones realizadas con medidas indirectas son consistentes. En la actualidad el lisímetro está con vegetación y en condiciones operativas que son representativas de la superficie de referencia considerada por Penman Monteith (Figura 15).



Figura 15. Fotos del lisímetro en la actualidad. A) Junto a los sensores y B) Vista detallada a 45°. Foto tomada el día 03/09/2011

A futuro, y considerando que se sabe cómo operar el lisímetro, se espera transformar a éste a un sistema de registro continuo mediante celdas de carga que registren en el mismo logger de los sensores de humedad la variación diaria (y porque no horaria) del peso con una resolución del orden del 0,2 mm.

BIBLIOGRAFÍA

Aboukhaled A., Alfaro A., Smith M. Lysimeters, FAO Irrigation and Drainage paper N°39, Rome 1982

Allen, Pereira, Raes, Smith Evapotranspiración del cultivo, Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos, FAO Irrigation and Drainage paper N°56 Roma 2006.

Brutsaert, W. Evaporation into the atmosphere. Theory, history, and applications. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland, 299 p. (Año 1984)

Campeche L. Construcción, calibración y análisis de funcionamiento de lisímetro de pesada para determinación de evapotranspiración de cultivo de, Lima Acida “tahiti” (Citrus Latifolia tan.) Tesis Doctoral, 2002

Carmona F, Rivas R. Estimación de la evapotranspiración real mediante datos meteorológicos e imágenes de satélite. Teledetección: Recientes aplicaciones en la región Pampeana, Pag 83-101 Capitulo 5, (Año 2011)

Carmona, F.; Rivas, R.; Ocampo, D.; Schirmbeck, J. y Holzman, M Sensores para la medición y validación de variable hidrológicas a escalas local y regional a partir del balance de energía. Aqua-LAC - Vol. 3 - N° 1 - pp. 26 - 36.; (Año 2011)

Chambouleyron J. “Riego y Drenaje, técnicas para el desarrollo de una agricultura sustentable” Libro publicado por EDIUNC (Editorial de la Universidad de Cuyo, Mendoza) 1040 p. (Año 2005)

Dormaar J. F., Naeth M. A., Willms W. D. and Chanasyk D. S. “Effect of native prairie, crested wheatgrass (Agropyron cristatum (L.) Gaertn.) and Russian wildrye (Elymus junceus Fisch.) on soil chemical properties,” J. Range Manag., vol 48, no. 3, pp.258-263 (Año 1995)

Grebet P., Precision lysimetry in France. In R.G. Allen et al. (ed.) Lysimeters for Evapotranspiration Enviromental Measurements. Proc. Int. Symp. Lysimetry, Honolulu 1991. American Society of Civil Engineers (New York) pp. 105-113. (Año 1991)

Hargreaves, G. and Samani. Z. Estimating potential evapotranspiration. ASCE, J. Irrigation and Drainage Division 108(3): 225-230. (Año 1982.)

Howell T.A., Schneider A.D., Jensen M.E., History of lysimeter design and use for evaporation. En Allen, Howell Pruitt, Walter, Jensen. Lysimeters for evapotranspiration and environmental measurements. New York ASCE p 1-9 (Año 1991)

Khan P.L, Gil J.A. y Acosta R. Diseño y funcionamiento de un lisímetro hidráulico para medición de la evapotranspiración potencial. Bioagro 10(1): 11-17. 1998

Medeiros A. Estimación de la evapotranspiración de referencia a partir de la ecuación de Penman-Montieth, de medidas lisimétricas y de ecuaciones empíricas, en Paraipaba, CE, Tesis Doctoral, (Año 2002)

Priestley C., Taylor R. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale. Mon. Weather Rev., 100, 81-92. (Año 1972)

Quaglia L. Calibración de un lisímetro de pesada para monitoreo de evapotranspiración en suelo sin cobertura vegetal. Tesis de Maestría, 2005

Rivas R., Ocampo D. Comportamiento del balance de energía en un cultivo de *Avena sativa L.* Estudios en la Zona no saturada del Suelo, Vol IX O. Silva et al. Barcelona, 18 a 20 de Noviembre 2009.

Thornthwaite C. W. An Approach toward a Rational Classification of Climate. Geographical Review, Vol. 38, No. 1. (Jan., 1948), pp. 55-94.

Tumbaco P. Determinación del requerimiento hídrico de cuatro pastos mediante el uso de lisímetros bajo condiciones de El Zamorano, Honduras. (Año 2004)

Schirmbeck J., Rivas R. Comportamiento de los términos del balance de energía en una pastura. TELEDETECCION, Hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional. Ed. Martin ISBN: 978-987-543-126-3, (Año 2007)

Wright J.L. Using weighing lysimeters to develop evapotranspiration crop coefficients, in R.G Allen T.A. Howell, W.O Pruitt, I.A. Walter, and M.E Jensen (eds.) *Lysimeters for Evapotranspiration and Environmental Measurements*, Proc. Int Symp. Lysimetry, July 23-25 Honolulu HI, ASCE, NY. (Año 1991)

ANEXOS

ANEXO I

Materiales y costo del lisímetro

Costos de materiales del lisímetro a Octubre de 2014

| Lisímetro de Pesada | | | |
|---------------------|--------|-----------------|-----------------|
| Descripción | Unidad | Precio x Unidad | Total |
| Tanque | 1 | \$ 70 | \$ 70 |
| Soldadura | 1 | \$ 160 | \$ 160 |
| Cadena | 3 | \$ 43,90 | \$ 132 |
| Piedra | 1 | \$ 21 | \$ 21 |
| Balanza | 1 | \$ 1.335 | \$ 1.335 |
| Envío de Balanza | 1 | \$ 80 | \$ 80 |
| Pluma | 1 | \$ 3.390 | \$ 3.390 |
| Tablones de Apoyo | 2 | \$ 55 | \$ 110 |
| Total | | | \$ 5.298 |
| Sensores de Humedad | 3 | \$ 1.435 | \$ 4.305 |
| Logger | 1 | \$ 4.030 | \$ 4.030 |
| Total | | | \$ 8.335 |

Anexo II

Detalle del logger de 8 canales utilizado para los sensores de VWCC.

El LOGGER8 de temperatura o milivoltios posee 8 canales. En temperatura de aire o suelo entre -40 y +125 °C. En milivoltios de 0 a 4095 mV (12 bits). HR entre 0 y 100%.

La capacidad de recolección de datos es de 2000 por cada canal.

En el caso de una tasa de muestreo de 1 hora se podrá recolectar datos por más de 80 días.

Anexo III

Sensor SCH-20 de Cavadevices.

El sensor ECH2O de contenido hídrico de suelos posee 3 conductores. Rojo, negro y blanco, siendo:

El + de alimentación +2,5v es el cable blanco.

El (-) de alimentación es el cable negro.

El cable rojo es la salida de señal hacia el canal que corresponda.

Este sensor posee un error típico 3% tomando como base cualquier suelo en donde se lo utilice. Para aplicaciones en las que se necesite una mayor exactitud en la medida del contenido de agua, mediante una calibración específica para el tipo de suelo, se puede reducir el error hasta un 1%. El sensor mide de 0 a 100% de contenido volumétrico de agua.

Su funcionamiento se basa en la medición de la constante dieléctrica de un condensador, donde el dieléctrico es el suelo, la frecuencia de operación es de 40 mhz.

Si fabricamos un condensador utilizando como dieléctrico materia orgánica, encontramos que la constante de este “material” es de 4. Si usamos suelo muy mineralizado: 4. Finalmente el aire posee 1. Muy alejado de estos valores, el agua posee 80. Esto significa que en una mezcla de materia orgánica y agua, esta última resulta altamente representativa a la hora de medir el contenido hídrico y la clase de materia orgánica resulta poco importante.

Error:

El error típico esperable es de un 3% sin calibrar.

Este error puede llevarse a un 1% si se ajusta con el medio en el que se encuentra.

Algunos datos útiles:

El sensor expuesto al aire entrega unos 110 a 120 milivoltios.

El sensor en tierra seca compactada entrega unos 150 a 170 milivoltios.

El sensor inmerso en agua entrega unos 1030 a 1080 milivoltios.

Si se lo calibra se puede medir contenido de agua en granos.

Funciona muy bien en compost o materia orgánica.

La compactación adecuada y la integración con el suelo son muy importantes para reflejar la realidad.

Instalación:

Se clava una planchuela de hierro de 3 cm de ancho por 4 mm de espesor.

Se la clava en el suelo verticalmente utilizando una maza. Se quita con cuidado de no llenar el agujero resultante con tierra. Insertar el sensor y compactar levemente el suelo de los laterales del mismo.

El sensor puede estar situado en cualquier orientación. A veces si se lo coloca horizontal y paralelo al suelo, puede que se acumule agua en su superficie, evitando que esta drene hacia abajo. En este caso la lectura podría no reflejar la realidad.

Anexo IV

Sensor EC-10 Decagon Devices.

| | |
|----------------------------|---|
| Presión | Aparente dieléctrica permitida (ϵ_a): ± 0.5 en ϵ_a de 2 a 10, ± 2.5 desde ϵ_a del 10 al 50 . Contenido Volumétrico de Agua de Sulo (VWC): Utilizando la ecuación de calibración estándar: $\pm 0,03$ m ³ /m ³ ($\pm 3\%$ VWC) típicos en suelos minerales que tienen en solución conductividad eléctrica <10 dS / m; utilizando calibración específica del suelo, $\pm 0,02$ m ³ /m ³ ($\pm 2\%$ VWC) en cualquier tipo de suelo |
| Resolución | ϵ_a : 0.1 de ϵ_a de 1 a 30, 0,2 de ϵ_a de 30 a 50. VWC: 0,0008 m ³ /m ³ (0,08% VWC) en suelos minerales 0-0,50 m ³ /m ³ (0-50% VWC) |
| Rango | ϵ_a : 1 (aire) a 50 VWC: Calibración dependiente; hasta 0-57% VWC con la ecuación polinómica |
| Tiempo de Medición | 10 ms (milisegundos) |
| Tipo de Sensor | Capacitancia (Dominio de la Frecuencia) |
| Salida | 300 - 1250 mV, independientemente de la tensión de excitación |
| Entorno de Funcionamiento | Temperatura de Supervivencia: -40 - 50 ° C Temperatura de funcionamiento: 0 - 50 ° C |
| Requisitos de Alimentación | 3 VDC @ 12 mA to 15 VDC @ 15 mA |

Anexo V

Característica de los sensores meteorológicos utilizados

Texto tomado de Aqua-LAC - Vol. 3 - N° 1 - Mar. 2011. pp. 26 - 36.

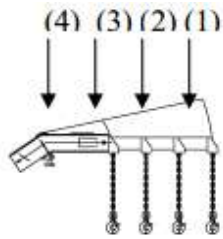
La estación de balance de energía (EBE) fue configurada para almacenar los valores promedio medidos por los sensores cada 15 minutos en un datalogger CR 800 (Campbell Scientific, Inc.), alimentado por una batería de 12 V. Cuenta con dos sensores de R_n (ambos a 2,15 m sobre la superficie), uno que discrimina la radiación entrante-saliente y otro integrado. El primero de ellos es un radiómetro neto *CNRI* (Kipp & Zonen), el cual presenta un diseño que permite medir la radiación de onda corta y larga por separado. Está constituido por dos sensores de radiación de onda corta (piranómetros CM3up ($R_{s\downarrow}$) y CM3down ($R_{s\uparrow}$), rango espectral 0,305 - 2,800 μm) y dos sensores de radiación de onda larga (CG3up ($R_{l\downarrow}$) y CG3down ($R_{l\uparrow}$), rango espectral 5 - 50 μm), pudiéndose estimar la R_{nd} con una precisión de $\pm 10\%$. El otro radiómetro neto instalado es un *NR-LITE* (Campbell Scientific, Inc.), consiste básicamente en una termopila que mide la suma algebraica de toda la radiación entrante y saliente de la superficie (rango espectral 0,2 - 100 μm). Presenta un fácil mantenimiento y una buena estabilidad pero es menos preciso que otros radiómetros convencionales. Sin embargo, el *NRLITE* puede ser recalibrado a partir del *CNR1* mejorando así la estimación de la R_n . Para estimar la temperatura radiativa de superficie se instaló un sensor de alta precisión *IRR-P 1505* (Apogee Instruments, Inc.), a la misma altura de los sensores de R_n , el cual mide la temperatura mediante la detección de la radiación infrarroja recibida (rango espectral 8-14 μm , ángulo de visión 22°). La $Trad$ observada es obtenida con una precisión de $\pm 0,2$ °C para valores entre -15 °C y 60 °C. Para medir el G se instaló bajo suelo (a 0,08 m de profundidad) un sensor *HFT3* (Campbell Scientific, Inc.), el cual consta de una placa de flujo de calor (una termopila) con un rango de medida de ± 100 W m⁻² y una precisión de $\pm 10\%$. Para medir la velocidad/dirección horizontal del viento se instaló el equipo *MOII 034B* (Campbell Scientific, Inc.) en la parte más alta de la EBE (a 2 m de altura). La u es medida con un anemómetro de tres cazoletas, presenta un rango de operación de 0 a 49 m s⁻¹ con una precisión de $\pm 0,12$ m s⁻¹ para u inferiores a 10,1 m s⁻¹ y de $\pm 1,1\%$ para u superiores. Un sensor de temperatura y humedad relativa del aire (Ta y HR , respectivamente) *CS215-L16* (Campbell Scientific, Inc.), fue instalado a la misma altura que los radiómetros. El sensor de Ta opera entre -40 °C y 70 °C con una precisión de $\pm 0,9$ °C,

aunque la precisión mejora siendo $\pm 0,4$ °C entre 5 y 40 °C, y $\pm 0,3$ °C a 25 °C. La *HR* es obtenida con una precisión inferior o igual a $\pm 4\%$

Anexo VI

Detalle de la Pluma Hidráulica.

| | |
|-----------------------------------|--------------------------|
| Capacidad Máxima | 2000 Kg. |
| Altura Máxima con Brazo Extendido | 2770 mm |
| Peso | 175 Kg. |
| Presión Máxima | 725 Kg./ cm ² |



| Posición del Brazo | Peso Soportado |
|--------------------|----------------|
| 4 | 2000 kg. |
| 3 | 1800 Kg. |
| 2 | 1700 Kg. |
| 1 | 1600 Kg. |

Anexo VII

Detalle de la Balanza Colgante.

La balanza colgante, posee un rango de medición de hasta 500 Kg., con una resolución de 200g, cuenta con la función de tara, lo que le permite efectuar pesados con precisión. Posee una pantalla LED de fácil lectura con cifras de 20 mm de altura e iluminación de fondo, alimentación por una batería interna con autonomía de 72 horas, que se recarga con un transformador que se conecta a 220 volt, eslabón de acero y gancho de cinc. La sobrecarga permitida de 150%.

Medidas de la Balanza Colgante

