

## Contents

Pagina de créditos	1
Prologo	2
Tabla de contenidos	2
<b>EL RIEGO</b>	<b>2</b>
<b>EL CAMBIO CLIMATICO Y EL IMPACTO EN EL AGUA DE RIEGO</b> . . . . .	2
<b>INFORMACION DEL RIEGO PARA LA PLANIFICACION</b> . . . . .	2
<b>LISIMETRIA</b> . . . . .	2
<b>TIPOS DE LISIMETROS</b> . . . . .	3
<b>DISEÑO DEL LISIMETRO</b> . . . . .	6
<b>REQUISITOS AMBIENTALES DE LOS LISIMETROS</b> . . . . .	7
<b>LLENADO DEL LISIMETRO</b> . . . . .	10
<b>OPERACION DEL LISIMETRO</b> . . . . .	10
<b>DESARROLLO DEL COEFICIENTE DE CULTIVO USANDO LISIMETROS.</b> . . . . .	11
<b>INTERPRETACION DE DATOS DE LISIMETRO</b> . . . . .	13
<b>CALCULO DE ET MEDIANTE EL USO DEL LISÍMETRO DE DRENAJE</b> . . . . .	14
<b>RELACIÓN ENTRE ÁREA DEL LISÍMETRO Y LA EVAPORACIÓN</b> . . . . .	14
<b>ESTUDIOS DE LISIMETRIA PARA EVAPORACION EN CAMPO</b> . . . . .	14
<b>MEDICIONES DE ET DE ALFALFA CON LISÍMETROS DE DRENAJE</b> . . . . .	15
<b>USO DE MEDICIONES CON LISÍMETRO PARA DISEÑO DE PRINCIPALES</b>	
<b>SISTEMAS DE RIEGO</b> . . . . .	16
<b>EXPERIENCIAS DEL CER-ESPOCH EN LISIMETRÍA.</b> . . . . .	17
<b>OBTENCION DE KC PARA LA ZONA CENTRO DEL PAIS</b> . . . . .	18
<b>RECOMENDACIONES</b> . . . . .	18
<b>COEFICIENTE DE CULTIVO</b> . . . . .	18
<b>Glosario de términos</b>	<b>18</b>
<b>Referencia Bibliográfica</b>	<b>18</b>
<b>Contraportada</b>	<b>18</b>

degradación# Portada

Lisimetría Para el Manejo Eficiente del Agua

Autores: Paul Benalcazar, Ph.D.; Juan Leon, Ph.D.

Institution: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Año: Diciembre 9 th 2020.

(El día en que el agua fue cotizada en wall Street)

## Pagina de créditos

Lisimetría Para el Manejo Eficiente del Agua

Copyright : Paul Benalcazar ISBN : 0000000000000000 Autores: Paul Benalcazar, Ph.D.; Juan Leon, Ph.D.

Colaboradores: MsC Cristina Ross, Melany Ross

Aviso Legal: La reproducción parcial o total de la obra constituye una violación de los derechos de autor.

Editorial: ESPOCH

Imprenta: Gutenberg

## Prologo

El día en que el agua cotizó en la bolsa de valores de Wall Street, esta obra nació como elemento indispensable en la lucha contra de desertificación, erosión y degradación de los recursos naturales y especialmente el agua. De esta forma, esta obra tiene la finalidad aportar con las bases científicas para un manejo eficiente y optimizado del agua para el riego

Hoy por hoy el agua es uno de los recursos que es y será escaso para naciones donde con sus limitaciones y deficiencias, a través del desarrollo de la ciencia y estudios sobre el aprovechamiento al máximo del agua, Israel por ejemplo, ha podido desarrollar su agricultura mediante la dotación exacta de agua cuando lo necesita

Esta obra, a través del estudio lisimétrico pretende ser una guía para los estudios de coeficiente de cultivo, la estimación de necesidades hídricas de cultivos para la planificación de sistemas de riego, así como determinar los valores de infiltración, percolación o contaminación de agua subterráneas.

## Tabla de contenidos

Comment : Este libro servirá para un manejo optimizado de uno de los recursos mas escasos, hoy por hoy sobre el planeta. Agua cuyo uso en la agricultura supera mas del 70% del agua dulce para la producción de alimentos.

## EL RIEGO

TO see the *markdown* used the **ctrl shift m**

Water is one of the primary elements available and mis-used. Water is one of the primary element required for crop production around the world. Until now, there are not technology able to produce water safety and cheaper as nature. Therefore, water must be conserve and use smart to generate benefits to human society and people in general [see @ODE, pp. 33; also @smith04, chap. 1]. [@smith04; @doe99]

Smith says [-@smith04]

@smith04 says ... To add bibliography

- Point were are going to work
- 

## EL CAMBIO CLIMATICO Y EL IMPACTO EN EL AGUA DE RIEGO

## INFORMACION DEL RIEGO PARA LA PLANIFICACION

## LISIMETRIA

El Lisímetro se ha convertido una de las herramientas estándares para la medición de la **evapotranspiración (ET)** y la calidad de agua. Este ha venido siendo usada por más de 300 años para determinar el consumo de agua de los cultivos conocido como **coeficiente de cultivo (Kc)**.

En el siglo XVII, en Francia, se utilizó por primera vez el lisímetro por De la Mire of France citado por Kohnke et al (1940) y desde ese siglo hasta ahora, el lisímetro ha sido utilizado, replicado y mejorado. Por ejemplo Brutsaert (1982) condujo un experimento relacionado a la evaporación y utilizó el lisímetro desarrollado por Kohnke et al (1940). Soileau & Hauck (1987) estudió la calidad del agua percolada usando lisímetros, más tarde, Bergström (1990) realizó un estudio donde hablaba de la aplicación del lisímetro para el estudio de los pesticidas.

De acuerdo al diccionario de Oxford lisímetro es : > “ Un aparato para la medición de los cambio de humedad del suelo por pérdida, percolación, sometido a un cuerpo de tierra bajo condiciones controladas ”.

La palabra *lisímetro* proviene del griego:

” *Lysis* = disolución o movimiento ”

” *Metron* = medición ”

En la mayoría de los casos, un lisímetro, es un aparato que se utiliza para estimar la evapotranspiración real midiendo el drenaje y el contenido de agua de un perfil de suelo en condiciones naturales cuando se conoce la lluvia (UNESCO 1983). En ingeniería, la cantidad de evapotranspiración es la cantidad necesaria para completar el balance hídrico del lisímetro (CHOW, ET AL 1988).

**Table 1. Desarrollo de diseño de lisímetros.**

Hito	Investigador	Lugar	Año
Primer lisímetro	Dela Hire	Paris- Francia	1688
Primer lisímetro con provisión de escorrentía	Dalton	Manchester/Reino Unido	1796
Primer lisímetro de bloque de suelo	Welbel	Ploti/USSR	1903
Primer lisímetro de pesaje de bloques de suelo con mecanismo de auto-grabación	Harrold and Dreibelbis	Coshocton, Estados Unidos	1923

La FAO (1982) introdujo distinciones para determinar la evapotranspiración de un cultivo en crecimiento, de una cobertura vegetal de referencia o la evaporación de suelos desnudos. Para lo cual, se han desarrollado varios métodos indirectos para medir la evaporación. Sin embargo, los lisímetros miden el *ETc* directamente, brindando una medición más precisa del proceso físico que sucedió en campo abierto (Tanner 1969; Aboukhaled et al., 1982).

Para la construcción y diseño apropiado del lisímetro es necesario conocer 1) El propósito del experimento. 2) La percolación, geología y las condiciones climáticas (Kohnke & Dreirelbis, 1940 citado por Allen 1991). El lisímetro para propósitos de estudio de la evapotranspiración (ET) debe estar conformado por una estructura cilíndrica colocado en el suelo a una determinada profundidad, cuyo cuello se encuentra sobre la superficie donde cultivos son plantados (Allen, 1991).

**Foto 1. Lisímetro de drenaje.**

**Fuente:** *Centro Experimental del Riego - Espoch*

## TIPOS DE LISIMETROS

Existe diferentes tipos de lisímetros que varían de acuerdo a la necesidad. Estos pueden ser micro-lisímetros para suelos desnudos, lisímetros cuya superfcie abarca hileras de cultivos ó una area completa de pastos. De acuerdo a Kohnke & Dreirelbis (1940) los lisímetros se pueden clasifican en tres categorías:

1. De acuerdo al tipo de suelo

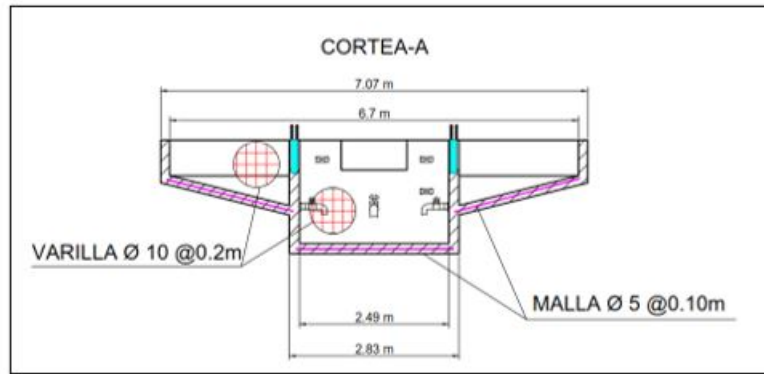


Figure 1: Lisímetro de drenaje

2. De acuerdo a la superficie de drenaje. Estos pueden ser por gravedad o por la tabla de agua contenida (Douglas et al, 1950).
3. De acuerdo a los métodos de medida y contenido de agua en el suelo.

Allen (1991) clasifica a los **ET-lisímetros** como:

1. Perfil de suelo no alternado -Monolíticos
2. Perfil de suelo alterado
3. Pesada y no Pesada ( drenaje y drenaje al vacío).

**Lisímetro de perfil de suelo no alterado - Monolíticos** Este tipo de lisímetros tiene la características de preservar el perfil del suelo, conservando las características físicas, químicas, biológicas del suelo y su vegetación. Sin embargo, puede haber alteraciones en la conductividad eléctrica, aunque otros como Pruitt y Angus (1960), Ven Bavel y Myers, (1962) indican que lisímetros reconstruidos o de perfil no alterado proporcionaron datos ET precisos.

Kinjiro Shibuya () indica que los lisímetro de inundación son utilizado para medir la ET de los arrozales y sus condiciones de inundación. Estos lisímetros se utilizan para medir la ET de los campos de las tierras altas, donde podrían producirse cambios considerables en la humedad del suelo por el consumo de agua del arroz de las tierras altas y otros cultivos.

**Foto 2. Lisímetro de Inundación. Fuente: (Hatiye, Hari Prasad, Ojha, & Adeloje, 2016)**

Existen otros tipos de lisímetros, descritos a continuación. \* **Lisímetro Hidráulico Pequeño.** El contenedor interior del lisímetro es uno de los cuerpos de carga hidráulicos especiales. El cambio de peso del recipiente interior con el suelo por evapotranspiración, precipitación, y la aplicación del riego se puede observar mediante el cambio de medidor de presión hidráulica.

- **Lisímetro de Drenaje sin capa Freática.** El área es generalmente de 2 x 3 metros y la profundidad del tanque de 2,5 m. La pared y el fondo están hechos de hormigón o ladrillos con la finalidad de evitar filtraciones. La parte superior del lisímetro suele estar de 10 a 15 centímetros más alta que la superficie del suelo. La ETo y las necesidades de agua del cultivo se calculan mediante las mediciones de precipitación, riego, drenaje y humedad del suelo en el lisímetro. Este tipo de lisímetro se ha utilizado ampliamente para la investigación de riego y drenaje desde la década de 1970.
- **Lisímetro de Compensación de Drenaje con Nivel Freático Constante.** La profundidad fija del nivel freático en el lisímetro es de 0.5, 1, 1.5, 2 hasta 8 m respectivamente y el área del lisímetro es de 1, 0.3, 0.6, 1, 10 m<sup>2</sup> respectivamente. La evapotranspiración de la capa freática del agua subterránea y la recarga de agua subterránea se controlan y miden mediante una botella de Mariotte. Este tipo de lisímetro se utiliza ampliamente para la investigación de la evapotranspiración del agua subterránea y la recarga de la precipitación y el riego de las aguas subterráneas. Los lisímetros de drenaje tiene algunas limitaciones, como la determinación directa del contenido de agua en el suelo o el contenido

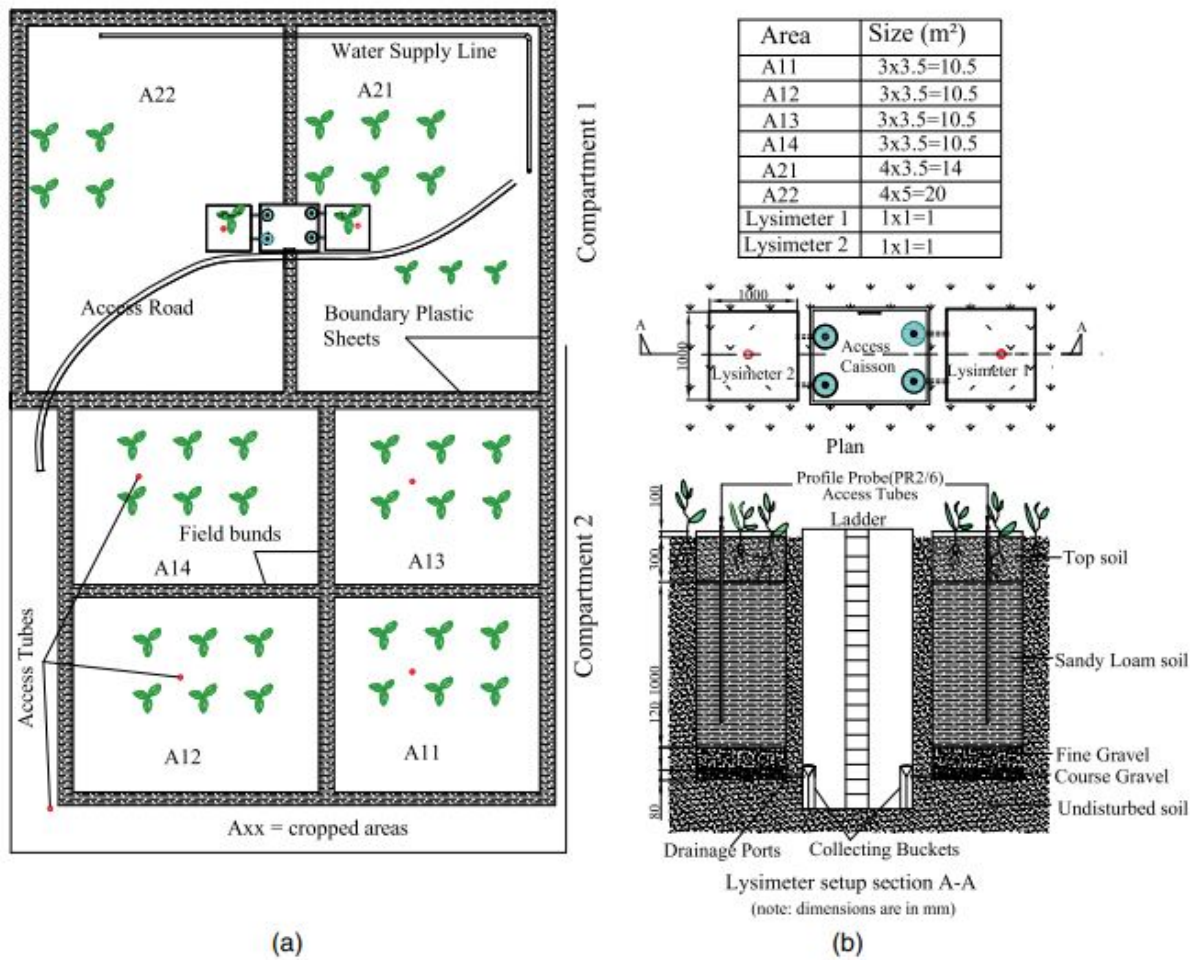


Figure 2: Lisimetro de drenaje

de humedad del mismo. Por lo que se requiere una determinación indirecta monitoreando el potencial del agua del suelo.

La medición del almacenamiento de agua y el potencial de agua tiene una correlación directa con la curva de retención de humedad del suelo medida experimentalmente mediante la presión de succión del suelo. Las dificultades intrínsecas asociadas con la medición del contenido de agua cerca de la saturación (5 a 1 KPa) producen errores de hasta 4 % en las curvas de retención. Estos mismos valores están asociados a los errores de instrumentaciones de componentes electrónicos (0.2 KPa) produciendo error del 4 %.

- **Lisímetro tipo Embudo Grande.** El contenedor receptor de percolación en canal y el equipo de medición se instalan bajo el suelo que tiene la estructura original, junto con el subsuelo artificial horizontal o inclinado mediante tara en sentido lateral. La humedad del suelo por encima del embudo, la recarga de agua subterránea y evapotranspiración se mide con una sonda de neutrones. La Etc se calcula de acuerdo con la observación de la precipitación, el riego y la humedad del suelo, recibiendo agua en un recipiente de embudo y el potencial de humedad del suelo.
- **Lisímetro sin Fondo.** Ampliamente utilizado en China y la mayoría de ellos tienen el perfil original de suelo. La recarga de agua subterránea por precipitación, riego y evapotranspiración es analizado y calculado mediante el método de flujo de humedad del suelo y análisis del balance hídrico mediante la observación de precipitación, riego, escorrentía, humedad del suelo (por sonda de neutrones) y potencial hídrico del suelo (por tensiómetros verticales).
- **Lisímetro de Pesaje.** Son habituales en Europe( Italia), cuyo dispositivo de pesaje es una balanza de precisión dotada de contrapeso del 94% del total(suelo, agua y tanque). La resolución es igual a 0.05 a 0.06 mm de pérdida de agua por evapotranspiración. El peso, es transformado en señal eléctrica (a través de un sensor dinamométrico) y a través de transformador diferencial a una computadora para registro remoto automático. En cualquier caso, el sistema suelo-planta se encuentra en tanques de acero inoxidable con paredes de 4 mm de espesor y provisto en el fondo para drenaje natural o forzado (desagües y / o tuberías cerámicas conectadas al sistema de vacío).

## DISEÑO DEL LISÍMETRO

Hay cuatro características principales que deben ser tomadas en cuenta para el diseño de un lisímetro

**1. Precision ET.** Depende del período de medición previsto, por ejemplo, períodos de tiempo por hora, diarios o semanales

**2. Forma y área.** La forma y el área del lisímetro dependen del cultivo a investigar y de la profundidad de sus raíces. “Las diferencias entre el lisímetro y la geometría del cultivo pueden sesgar la relación entre la evaporación del agua del suelo y la transpiración del cultivo”. Por ejemplo, lisímetros circulares deben tener un diámetro varias veces el ancho de fila del cultivo, para minimizar el sesgo (Green y Bruwer, 1979).

**3.Material.** Diferentes materiales con los cuales el lisímetro puede ser construido existen, tales como: acero, plástico o cemento como contenedor de suelo. Sin embargo hay que tomar en cuenta que lisímetros de acero pueden provocar el calentamiento de la pared durante la mañana y el enfriamiento durante la tarde (Black 1968), mismos que en lisímetros de Wisconsin USA provocaron una variación de 0,004 mm / h de ET, por ejemplo.

Douglas et al. (1985) recomienda la utilización del acero con paredes de concreto misma que debe ser mas gruesa que el acero para evitar el calentamiento. La pared de acero debe usarse debajo de 0.3 m de la pared de concreto. Adicionalmente, la profundidad, es un elemento importante a tener en cuenta a la hora de realizar el estudio hidrológico. Estudios en periodos de sequía y riego, los lisímetros deben ser construidos brindando todo el espacio disponible para el desarrollo de raíces y extracción de agua del suelo de capas profundas.

**4. Entorno natural.** La intención del lisímetro es representar el entorno natural de la planta y las condiciones del suelo. Para ello, debe ubicarse evitando grandes edificios que puedan alterar el patrón de viento y la radiación. El lugar debe ser uniforme, patrón para el suelo y el cultivo. Es importante recrear el microambiente típico.

## REQUISITOS AMBIENTALES DE LOS LISIMETROS

Las mediciones lisimétricas de evapotranspiración son extremadamente sensibles a los factores ambientales, muchos de los cuales a menudo no se conocen bien o se ignoran en la práctica. Esto tiene como objetivo describir algunos de los problemas ambientales más comunes en las mediciones de lisímetros y que provocan que los valores de ET con lisímetros se desvíen de las características de medición de ET unidimensionales de los entornos agrícolas. Los efectos sobre estas condiciones ambientales son importantes y a menudo, invalidan las mediciones del lisímetro para uso científico o de ingeniería.

Los problemas comunes incluyen: 1. La bi-dimensionalidad de los límites del lisímetro, 2. La altura de la vegetación, su densidad, la variación dentro del alcance inmediato y local alrededor del lisímetro 3. Las estaciones meteorológicas, 4. Las condiciones térmicas del bloque de suelo del lisímetro 5. La densidad aparente del suelo y los efectos de la profundidad del lisímetro en el crecimiento y desarrollo en la raíz, 6. Los efectos sobre el perfil de humedad o capa freática por evaporación y extracción de humedad del suelo dentro del lisímetro.

Allen y Fisher (1999) enumeraron ten recomendaciones para preservar la integridad ambiental de la instalación del lisímetro.

**1. Áreas de evaporación y vegetación:** El lisímetro está diseñado para medir una muestra representativa de ET unidimensional (vertical) y el intercambio de energía de un cultivo agrícola. Por lo tanto, es esencial que un lisímetro contenga y esté rodeado de vegetación que represente ET unidimensional. También es importante que, cuando los volúmenes de pérdida de agua medidos lisimétricamente se conviertan en profundidades equivalentes de ET y se utilice la vegetación correcta del lisímetro.

**2. Estimación incorrecta del área ET de un lisímetro.** Es probablemente el error más común que se comete al calcular la ET del lisímetro. La ET unidimensional equivalente generalmente se calcula a partir de lisímetros de peso como el cambio en la masa del lisímetro dividido por el área de evaporación de la vegetación del lisímetro. Sin embargo, a menudo, en la práctica, la dimensión interior del lisímetro se utiliza como divisor, en lugar del valor real del área vegetativa, lo que provoca un error significativo.

Por ejemplo, si se construye un lisímetro de 1 m<sup>2</sup> en el interior y un espesor total de pared de 10 cm (incluidos el tanque interior y exterior, si está presente), el área vegetativa y de evaporación promedio se puede aproximar a 1,1 m. Este es el ancho vegetativo promedio de las dimensiones interior y exterior del lisímetro, y es una aproximación razonable, si la vegetación tanto del interior como del exterior del lisímetro atraviesa el borde del lisímetro y se encuentra en el centro. La relación entre el área vegetativa y el área interior en este ejemplo es 1.12/1.02 o 1.21. En otras palabras, las mediciones del lisímetro de ET se exagerarían en un 21%.

**3. Anillo del lisímetro.** Puede influir en las mediciones de ET sea contribuyendo al calentamiento o reflejando la radiación a la vegetación del lisímetro (Makkink, 1957). La radiación solar (Fig. 16) incide en la pared o borde del lisímetro y puede reflejarse directamente en el dosel vegetativo del lisímetro, o puede calentar el material del borde o la pared, produciendo una micro-advección de calor sensible en el dosel del lisímetro. Ambos efectos dan como resultado un aumento de energía para la evapotranspiración del lisímetro, obteniendo como resultado una medición del lisímetro que excede la ET de una superficie unidimensional. Ver figura pág.173.

Este efecto se agrava si incluso el pequeño espacio que rodea al lisímetro se deja sin cultivar o si ha sido pisoteado durante la operación de mantenimiento. Los errores estimados del efecto borde están entre el 10 y el 20 %. Esto ocurrió en Coshocton, Ohio -1962. La instalación de lisímetro monolítico de pesaje estaban originalmente equipados con bordes de 0,2 m de espesor y fueron reemplazados por un borde de 5 cm (Mustonen y McGuinness 1968). Si los bordes del lisímetro son demasiado altos en relación con el cultivo (o el suelo desnudo), entran en juego dos efectos adicionales. Estos son el blindaje del viento y la modificación del balance energético relativo. Fig 16

**4. Protección del viento.** Un borde alto de las paredes del lisímetro puede disminuir significativamente la turbulencia y la mezcla de la capa superior que se encuentra dentro del dosel vegetativo del lisímetro. La *figura 1c* muestra que la extensión del borde de la pared del lisímetro por encima del horizonte cero del

suelo provoca un desplazamiento de la turbulencia alrededor de el borde. Capas superficiales del suelo dentro del lisímetro tendrán como resultado una disminución de la turbulencia dentro del mismo. En consecuencia, aumentará el efecto aerodinámico de resistencia a la transpiración en relación con la vegetación circundante.

Si el borde del lisímetro es alto y el cultivo es bajo en relación a al borde, el balance de radiación puede verse alterado, además de los efectos del viento (**Figura 1c**). La radiación solar será mucho más intensa en las áreas internas del lisímetro que los bordes, debido a la protección de las paredes altas del lisímetro. Además, la radiación solar en los bordes del lisímetro puede provocar el calentamiento del borde de este, aumentando la advección del calor dentro del lisímetro o aumentando la emisión de radiación de onda larga. Esto es un problema en épocas de poco viento, principalmente.

**5. Uni-dimensionalidad de la vegetación dentro y fuera del lisímetro.** La aparición de vegetación diferente o escasa fuera del lisímetro es muy común en la práctica. En esta situación, la determinación del área equivalente verdadera de vegetación transpirante puede complicarse por una “inclinación” desigual de la vegetación interior y exterior a través de los bordes del lisímetro. La vegetación exterior del lisímetro “roba” la energía evaporativa de la vegetación interior, mientras que la vegetación interior del lisímetro aumenta la energía evaporativa y la extracción de agua del sistema lisímetro.

**6. Efecto tendadero.** Bajo el efecto tendadero, cuando la altura de la vegetación es mayor que la de los alrededores (diferentes condiciones de rugosidad), o bajo el efecto oasis, cuando la vegetación tiene mayor disponibilidad de agua en el suelo que los alrededores (diferentes condiciones de humedad), los valores máximos de  $K_c$  pueden superar el límite de 1.20-1.40.

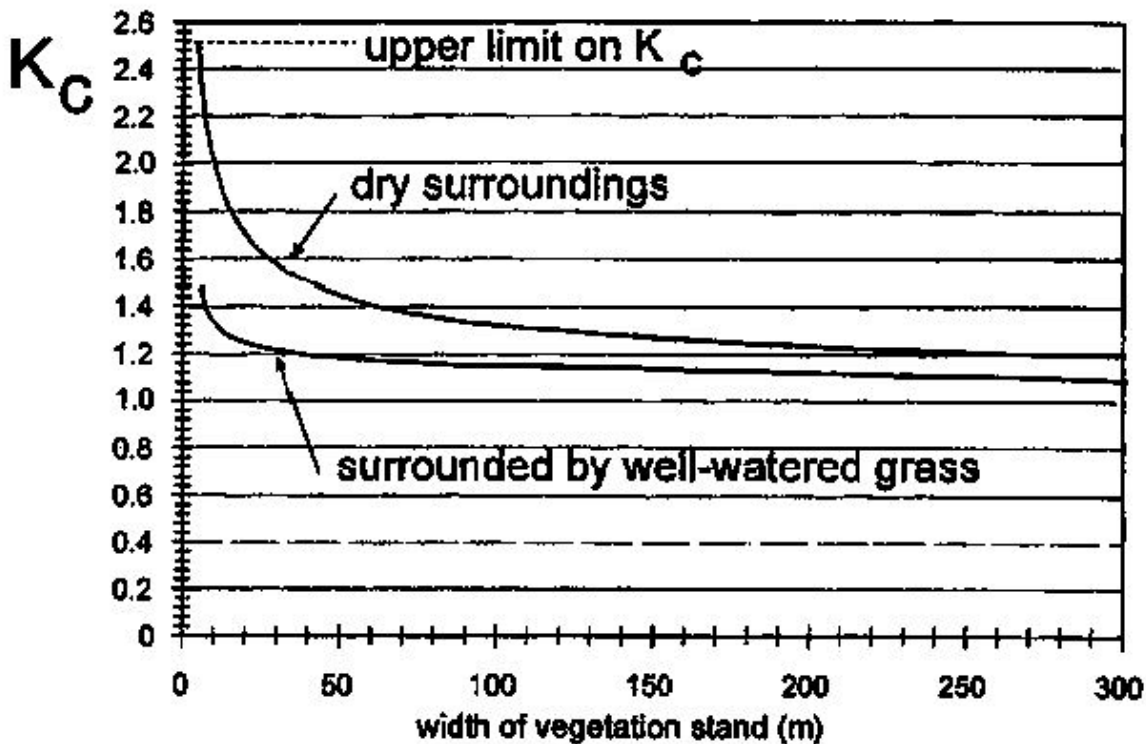


Figure 3:  $K_c$  efecto oasis

\*\*Foto 3. Curvas de  $K_c$  para pequeñas áreas de vegetación bajo el efecto oasis en función de la anchura de la extensión de la vegetación para condiciones en las que  $RH_{min} = 30\%$ ,  $u_2 = 2$  m/s, altura de vegetación ( $h$ ) = 2 m y  $LAI = 3$

**Fuente:** (Allen, 1998) (<http://www.fao.org/3/X0490E/x0490e0g.htm#:~:text=Small%20expanses%20of%20tall%20vegeta>)



Las diferencias de altura y densidad de vegetación entre el lisímetro y la vegetación exterior pueden afectar gravemente las mediciones del lisímetro. Uno de esos efectos se conoce comúnmente como el efecto de “tendedero”, donde, debido a la naturaleza más alta de la vegetación del lisímetro o al aumento de plomo, aumenta la transferencia aerodinámica y radiativa al dosel del lisímetro, lo que resulta en un aumento de la ET del área del lisímetro\*\* (Figura 1a)\*\*

El aumento de la altura de la vegetación dentro del lisímetro puede deberse a prácticas de fertilización diferentes, características térmicas del tanque del lisímetro, diferencias en los regímenes de humedad del suelo dentro y fuera del lisímetro. Así mismo debido a la reducción del crecimiento de plantas fuera del lisímetro causado por el tránsito de peatones o vehículos, la compactación del suelo, la humedad, disponibilidad o densidad de plantas. Cuanto menor sea el área del lisímetro, más pronunciado será el efecto. Ejemplo de efecto de tendedero provocado por una tasa de crecimiento más rápida de la vegetación del lisímetro, como por ejemplo en el maíz, mismo que fue cultivado en un lisímetro flotante de 6.1 m en Davis, California en 1970. En esta situación, el maíz dentro del lisímetro alcanzó una altura, cuya diferencia fue 0,4 y 0,5 m más larga. El Kc resultante basado en las mediciones del lisímetro fue superior en del 10 al 12%

**7. Efecto oasis.** Un efecto Oasis ocurre cuando el lisímetro y las áreas inmediatas están rodeadas por una gran extensión de vegetación más seca o superficie que no evaporan. Como resultado de la variación neta en las áreas circundantes, el exceso de intercambio de calor latente se convierte en calor sensible que puede posteriormente provocar la advección hacia el lisímetro. El aumento de calor adveído al lisímetro aumenta el suministro neto de energía al lisímetro (las áreas secas circundantes y ET).

A menudo, se crea un efecto de oasis alrededor de la instalación de un lisímetro debido al cultivo en barbecho o la recolección de cultivos diferentes en el campo adyacente a las parcelas del lisímetro. Esto ocurre a menudo en lisímetros de investigación que a menudo se dividen en parcelas de 1 ha o menos. Un ejemplo de efecto oasis se señaló Lourence y Proitt (1971) donde la ET del arroz cultivado en un sistema de lisímetro en la Universidad de California excedió las mediciones de ET para el arroz cultivado en grandes áreas agrícolas de hasta en un 28%.

**8. Régimen de humedad del lisímetro.** Una desventaja del sistema de lisímetro es que los perfiles del suelo son comúnmente más superficiales que los perfiles del suelo agrícola circundante. Como resultado, el drenaje y el perfil de humedad del suelo pueden diferir. Los perfiles del lisímetro pueden afectar la disponibilidad total de agua para las raíces de las plantas y posteriormente el proceso de ET, especialmente en cultivos de secano. Además, puede afectar el desarrollo de raíces debido al nivel freático en el y fuera del lisímetro, pero con diferentes elevaciones. Presencia de niveles freáticos altos o bajos en estudios de evaporación del suelo puede afectar los resultados de evaporación.

**9. Arquitectura del sistema de medición.** Las paredes laterales del lisímetro no permiten el flujo horizontal de agua dentro del lisímetro y el fondo del lisímetro restringe el movimiento vertical del agua. De hecho, el flujo vertical se acelera debido a la interfaz entre el suelo y las paredes laterales del lisímetro. Consideraciones que deben ser tomadas en cuenta en la arquitectura ambiental del suelo.

**10. Compactación y diferencias de crecimiento de cultivos.** Para obtener estimaciones fiables de ET con el lisímetro, el cultivo en el lisímetro debe ser representativo de el campo circundante. Usualmente este objetivo es difícil de alcanzar debido a que es necesario realizar mediciones dentro del sistema y no perturbar los cultivos circundantes, aun durante el mantenimiento del lisímetro. Kincaid et al. (1977) determina que las condiciones del cultivo es una de las variables más difíciles de controlar en la operación del lisímetro. El tráfico peatonal puede resultar en áreas de suelo desnudo-pisoteadas, con áreas cultivadas y no cultivadas alrededor de los lisímetros. Mismas que aumentan la longitudes de onda visibles de la radiación reflejada, cambiando el balance energético local, afectando el dosel de las áreas vegetativas del lisímetro. La mejor forma de acercarse al sistema es por el norte (en el hemisferio norte) siendo esta la orientación NO predominante del viento.

Ejemplos de operaciones de lisímetro por daños mecánicos a las plantas y la compactación del suelo debido al tráfico aparentemente, causaron diferencias de suelo entre los lisímetros y los campos circundantes. La compactación del suelo se puede medir utilizando un penetrómetro de registro, donde valores superiores a 300 psi indican problemas de compactación.

## LLENADO DEL LISIMETRO

Es la operación en la que se retira el volumen de suelo, luego todos los componentes de monitoreo del suelo son colocados en el cilindro vacío y posteriormente el suelo se reconstituye de tal manera que su estado se parezca a su estado natural.

De acuerdo a Kohnle et al, (1940) existen tres métodos para reconstruir el suelo de un lisímetro - **Ebermeyer**. No apto para estudios de ET. El suelo se deja in situ, y el bloque de suelo se deja sin muro. Entonces un embudo para recoger el agua percolada es colocada debajo del bloque de suelo para su monitoreo. Este embudo tiene un tubo que se intercepta el percolador en un receptáculo para su respectiva medición.

- **Llenado in situ.** Consiste en un contenedor de paredes vertical abiertas en la parte superior, en el que se rellena la tierra que se removió. A veces, la tierra se mezcla para uniformar el perfil. Este método es económico y fácil de instalar. No hay contención de la parte superior del lisímetro debido a las actividades culturales de la agricultura. Sin embargo hay problemas relacionados con la alteración del perfil del suelo tales como: *densidad aparente, estructura del suelo y movimientos del agua*.

Para evitar estos problemas, muchos investigadores rellenan el lisímetro utilizando varios horizontes de suelo del mismo grosor y tipo de suelo que el encontrado en el estado natural (Howell et al, 1985). Pero aún cuando se realice el procedimiento anterior, todavía existen problemas el cambio de tamaño, orientación de microporos y cambios en la densidad aparente del suelo.

- **Suelo no perturbado.** Es el mismo que el llenado in situ, excepto que el perfil del suelo no se altera y un bloque monolítico de suelo es encerrado por las paredes de el lisímetro, aislando del suelo circundante. El método de bloque de suelo sin perturbaciones es costoso y tiene implicaciones en las áreas circundantes debido a la maquinaria pesada para construir este lisímetro. Si el monolito es obtenido de otro lugar y este es ubicado en el área de estudio, las características físicas del suelo serán diferentes (Allen 1992), por lo tanto es necesario tomar mucho en cuenta las características propias del área de estudio.

Howell et al. (1985) realizó una investigación sobre tres ciclos de cultivo para medir la ET con lisímetro usando lisímetro de drenaje y el método Penman operado en Argentina. Durante el primer año, los cultivos tienen una gran diferencia entre la medición de ET y la calculada. La planta creció más en el área del lisímetro que en sus alrededores. Durante el segundo año hubo una ligera diferencia entre la medición de ET y el calculado. Durante el tercer año, los dos métodos fueron casi similares mostrando que las propiedades del suelo se han estabilizado.

## OPERACION DEL LISIMETRO

**Operación cultural:** La operación normal debe realizarse a mano, como fertilizante, pesticida, labranza. El problema más común surge cuando el tráfico de visitantes al sitio altera la hidrología y el desarrollo del cultivo. Alguna estación de lisímetro usaba un camino peatonal para permitir el tránsito de personal al equipo cuando la superficie del suelo está mojada ocasionando compactación y por lo tanto la vegetación del lisímetro es afectada en su ET. Se debe minimizar el tráfico alrededor de los lisímetros para evitar problemas de compactación y mantener una cosecha uniforme dentro y alrededor del lisímetro. Por ejemplo Meyer et al. (1990) encontró que el 30% de reducción de soja en un lisímetro con una cosecha 0.1 m más corta.

**Registro de datos.** Desde hace 20 años, el registro de datos ha cambiado de un registro manual a microordenadores. El registro de datos puede ser de minutos u horas, según el método, requerimiento y se pueden agregar datos meteorológicos, según la necesidad. Por otro lado, los lisímetros de pesaje hidráulico deben ser calibrados al inicio y al final de la cada temporada de crecimiento. El coeficiente de calibración se expresa (mm/mm). Adicionalmente, si la temperatura del sistema no ha cambiado apreciablemente durante la prueba y si la calibración se realiza durante momentos de ET insignificante, la lectura final debe ser la misma que la lectura inicial. Esto para lisímetros de pesaje hidráulico, principalmente.

**Automatización y operación.** Si los lisímetros se utilizan para medir los valores de ET diarios, los manómetros deben leerse al menos una vez al día (horarios matutinos), antes de que se produzca la ET

apreciable del día, aprovechando las temperaturas tranquilas en todo el sistema del lisímetro. Esto para lisímetros hidráulicos, principalmente.

La humedad del suelo en el perfil del lisímetro debe medirse a varias profundidades. ***Los orificios de muestreo del suelo deben rellenarse y empaquetarse a la misma densidad.*** Muchos lisímetros tienen tubos de acceso a sondas de neutrones para monitorear la humedad del suelo para conocimiento de la capacidad de retención de agua del suelo de diferentes capas de suelo dentro del lisímetro. Se puede mantener un balance de agua basado en el contenido de humedad inicial del suelo y la medida de evaporación diaria con el sistema de manómetro.

**Gestión de datos.** Los Data Loggers (Campbell Scientific , Inc) controlan la recolección de datos mediante el uso de *CSI software* operado en computadoras. El programa registra datos de los sensores en varios intervalos, y el software controla la frecuencia de cuando los equipos recolectan la información y luego ser enviados al laboratorio para analisis y modelamiento.

**Análisis de los datos** Mediciones de almacenamiento de agua son analizados por minuto o por hora en lisímetro desnudos y de cobertura de césped ubicados en laboratorios (almacenamiento = cambio de masa / densidad del agua \* área del lisímetro) y se compara con sondas de humedad de neutrones. El drenaje se elimina del fondo a través de bombas de succión.

**Mantenimiento del lisímetro.** Es importante mencionar que el lisímetro debe tener su mantenimiento y será diferente al resto del area de trabajo. El sistema de lisímetro debería tener más atención en términos de fertilizantes, riego, etc.

Por otro lado, es muy difícil obtener información relacionada con problemas o errores de datos utilizando lisímetros. Tabla 2, muestra algunos cálculos(desviación estándar) para varios años entre 2 a 6 lisímetros que tuvieron el mismo cultivo, durante el mismo período, en la misma estación de investigación.

**Roedores y filtraciones.** En los sistemas de lisímetro puede ser encontrado nidos de roedores o puede haber perdido de agua por la ruptura de tubería en el sistema.

**Table 2. Desviación estándar de las medidas de ET (mm) de agua para el lisímetro de drenaje en diferentes lugares para varios cultivos durante un período de 7 días.**

Cultivo	Lisímetro 1 (Clement)	Lisímetro 2 (Dijon)	Lisímetro 3 (Rennes)
Reygrass			2.6
Fetuke	5.8	5.7	6.8
Alfalfa	7.9		9.7

**Aislamiento del bloque del suelo.** Uno de los principales errores que ocurre en el lisímetro se dan entre suelo del lisímetro y el aire debajo de él. La mayoría de lisímetros incluidos los de drenaje de drenaje se han instalado sin tener en cuenta el efecto aire - suelo en el fondo del lisímetro. El drenaje de agua gravitacional debe superar la tensión superficial antes de que ésta pueda drenar completamente del lisímetro (Allen 1994).

Para evitar esta tensión superficial, arena o grava se añadido al fondo del lisímetro entre la masa de suelo y la línea de drenaje. Esto mejora el drenaje del agua. La tension superficial es no grave en climas muy húmedos; donde las tasas de infiltración y percolación son altas. Sin embargo, en climas más secos, el lisímetro tiende a contener mucha más humedad en la capa inferior del suelo en un perfil sin perturbaciones. Esto tendrá implicaciones para la planta que tiene un sistema de raíces abundante. Esto ocasiona que la exceso de humedad en el fondo le da más nutrientes a la planta que en las condiciones naturales.

## DESARROLLO DEL COEFICIENTE DE CULTIVO USANDO LISIMETROS.

Hay varios métodos disponibles para determinar el llamado **coeficiente de cultivo**. El término “coeficiente de cultivo” infiere que la participación de algún valor de nivel de referencia de evapotranspiración y está puede determinarse de tres formas:

1. La pérdida real de un cultivo llamado *cultivo de referencia* (**Kc**). Como por ejemplo el uso directo del lisímetro. Mantener un cultivo de referencia es una condición estandarizada durante un largo período de tiempo y es difícil debido a las prácticas culturales requeridas, los efectos del clima severo, los patrones de crecimiento del cultivo y el mantenimiento de los regímenes de humedad del suelo que niegan una variación significativa del control estomático.
2. Una pérdida hipotética de tal cultivo calculada mediante una ecuación aceptada como válida para ese propósito. Por ejemplo la formula de Penman-Monteith usada para estimar la ET de referencia para gramíneas (Eto) o alfalfa (ETr).
3. Según lo estimado por algún dispositivo de evaporación estándar. Es importante señalar que los lisímetros han sido vitales en el desarrollo y / o mejoras de muchas de las ecuaciones utilizadas para estimar un ET de referencia.

La estimación del Etr ha evolucionado durante las últimas dos décadas para acelerar la estimación de ET del cultivo a partir de los datos disponibles sobre cultivos, suelo y condiciones climáticas. La ET estimada de los cultivos tiene una aplicación práctica en la programación de riego, el modelado del rendimiento de los cultivos en relación con el uso del agua, en la planificación y gestión de proyectos de riego. Generalmente, se utilizan fórmulas basadas en parámetros meteorológicos para caracterizar la ETr y los Kc de cultivo utilizados para tener en cuenta las condiciones específicas del cultivo.

Los lisímetros y los lisímetros de pesaje, por ejemplo son útiles en el desarrollo o verificación de técnicas ETr y en el desarrollo de curvas de coeficientes de cultivos específicos. La determinación del ETr, se basa en la determinación del Kc basado en :

$$Kc = \frac{Eto}{ETr}$$

| **Ecuación 1** |

Donde :

>Kc = coeficiente de cultivo diario adimensional

Eto = mide la ET diaria del cultivo (mm/día),

ETr= es la ETr diaria (mm/día) Estimado o medido.

La distribución de Kc con el tiempo a lo largo de la vida del cultivo forma la curva de Eto. Cuando el Kc y ETr están disponibles, la Eto se puede determinar usando la ecuación (1) para la Eto.

Tomando en cuenta los efectos del estado hídrico del suelo, el Kc puede ser resuelto por:

$$Kc = Kcb Ka + Ks$$

| **Ecuación 2** |

Donde:

Kcb = coeficiente de cultivo basal

Ka = coeficiente relativo relacionado con el agua del suelo disponible

Ks = coeficiente relativo relacionado con la humedad del suelo superficial disponible

Wright (1982) definió Kcb para representar la condiciones cuando la superficie del suelo estaba visualmente seca, por lo que la evaporación del suelo era mínima, pero la disponibilidad de agua del suelo no limitaba el crecimiento o la transpiración de las plantas. Un coeficiente medio de cultivo (Kcm) que promedia el efecto de Ks, viene dado por:

$$Kc = Kcm Ka$$

| Ecuación 3|

En la práctica,  $ETr$  generalmente se estima a partir de datos meteorológicos porque de alguna manera las mediciones directas rara vez están disponibles. La referencia de alfalfa ET, ( $Etr$ ) se ha utilizado para climas áridos (Jensen et al, 1971, 1990, Wright y Jensen 1972, 1978, Wright 1982 1982) y se define como la ET diaria de un cultivo de alfalfa en crecimiento activo que cubre un área extensa de al menos 30 cm de altura, erguidos, muy bien regado cuya disponibilidad no limita la ET.

Una forma modificada de la formula de Penman (Jensen et al 1990) se usa a menudo para estimar la  $ETr$  con el uso de datos meteorológicos.

$$Etr = \left[ \frac{\Delta}{\Delta + r} \times (Rn - G) + \frac{(r)}{\Delta + r} \times wf(es - ed) \right] l^{-1}$$

| Ecuación 4|

Donde:

$Rn$  = Radiación neta

$G$  = Flujo de calor del suelo (media diaria)

$wf$  = función del viento que depende de la dirección diaria de esta y de la naturaleza de la superficie seleccionada de diferencia ( $es-ed$ )

= pendiente de presión de saturación de vapor - curva de temperature

$r$  = la constante psicométrica

$L$  = calor latente de evaporación

En resumen las mediciones de  $ETc$  se pueden realizar de forma directa (mediante lisímetro) o indirectamente (mediante el balance energético sobre una cubierta vegetal o mediante el balance hídrico del suelo), o se puede calcular ( $ETo$ ) mediante métodos basados en datos meteorológicos. Uno de los problemas que no se ha resuelto por completo se refiere a la mejor elección de los métodos de estimación de  $ETo$  y muchos estudios relevantes de diferentes países todavía están trabajando en el tema para probar y calibrar sus mejores métodos de estimación de  $Etc$  para sus propios ecosistemas.

## INTERPRETACION DE DATOS DE LISIMETRO

Estimaciones de uso consuntivo y contenido de agua del suelo. El uso de agua de la vegetación lisimétrica durante un período de tiempo específico se estimó mediante la siguiente ecuación de balance hídrico:

$$ET = \Delta SW + IRR + Rain + DRNG$$

| Ecuación 5|

Donde:

$SW$  (cambio de agua  $sw1 - sw2$ )

$IIR$  = riego

$RAIN$  = lluvia

$DRNG$  = agua de drenaje

$SW$  = fue estimado usando lecturas de sonda de neutrones

## CALCULO DE ET MEDIANTE EL USO DEL LISÍMETRO DE DRENAJE

A continuación se presenta uno de los métodos para determinar la Et mediante el uso de lisímetro:

$$ET = \frac{(IR + K * PR - DR)}{ND}$$

| *Ecuación 6* |

Donde:

ET = evapotranspiración

IR= riego (litros)

K = Constant to conversion precipitación en volumen (L mm-1)

DR= medición del drenaje (l)

ND= números de días en periodos

ETr se calculó utilizando el método de combinación de Penman modificado presentado por Burman et al (1980). Los coeficientes de viento utilizados en este calculo fueron los de Wright y Jensen (1972). La radiación solar neta se estimó a partir de datos diarios de temperatura y punto de rocío usando valores y funciones desarrollados por Wright (1982) para Kimberly, Idaho.

## RELACIÓN ENTRE ÁREA DEL LISÍMETRO Y LA EVAPORACIÓN

De acuerdo al area de exposición en el lisímetro, éste tiene un efecto sobre la evapotranspiración de la siguiente manera:

1. **Efecto de la energía.** La radiación solar provoca la elevación de temperatura de las paredes del lisímetro. La energía térmica hace que la humedad del lisímetro se evapore rápidamente.
2. **El efecto de la evaporación de la pared.** La pared de suelo del lisímetro contribuye a aumentar el área de evaporación. Cuanto menor sea el área del lisímetro, mayor será la proporción del perímetro de la pared y el área de evaporación. Los materiales con los cuales los lisímetros son construidos provocan errores entre diferentes lisímetros, cuyos errores y diferencias deben ser eliminados. Estudios demuestran que lisímetros cuyas areas son menores a 6 m<sup>2</sup> son significativos y deben eliminarse.

Cuanto menor sea el área del lisímetro, mayor será la tasa de evapotranspiración y evapotranspiración medida y viceversa. Por ejemplo lisímetros de 0.132 m<sup>2</sup>, 0.6m<sup>2</sup>, 3.2 m<sup>2</sup> y 6 m<sup>2</sup>; las relaciones de evapotranspiración son respectivamente 1.23, 1.04 y 1. El coeficiente de correlación lineal para todas las áreas del lisímetro (comparado con 6m<sup>2</sup>) fue de 0.99

## ESTUDIOS DE LISIMETRIA PARA EVAPORACION EN CAMPO

La información del lisímetro se puede aplicar a una escala extendida (cuenca, subcuenca) para cálculos de balance hídrico, permitiendo la gestión de recursos hídricos debido al entorno local inmediato. La respuesta de evaporación a las diferentes comunidades de plantas muestreadas por lisímetro proporciona una base para comprender el cambio hidrológico particularmente en el tratamiento contemporáneo de la degradación de la tierra. Por ejemplo, las diferencias observadas en las tasas máximas de evaporación tanto en magnitud como en tiempo entre pastizales naturales y trigo, son relevantes debido a la conversión del uso y cobertura del suelo para cereales y pasturas de producción en climas mediterráneos (Sur de Australia).

Inicialmente, reducciones significativa de escorrentía han venido acompañado de cambio de uso del suelo de cereales y pastos. Especies introducidas para mejorar la productividad. El aumento del uso de agua durante las temporadas de cultivo ha resultado en una gran infiltración de agua lluvia, pero sin cambios significativos en el contenido de agua del subsuelo durante el año. Evaporación sostenida de pastizales naturales durante todo el año generaron importantes déficits de agua en el subsuelo durante el verano. Diferencias observada

en el régimen hídrico del subsuelo por el cambio en la evaporación han sido responsable por el incremento del agua de drenaje y la transportación de solutos, debido a las nuevas especies introducidas causando serios problemas de salinidad y acidez del suelo.

La lisimetría se extiende más allá de la función de herramienta de monitoreo. Estas sirven para pronosticar la naturaleza de las perturbaciones en el paisaje. El lisímetro se ha utilizado para explicar la interacción inesperada de la atmósfera superficial y seguirá utilizándose para ofrecer información crítica para formular escenarios más realistas de cambio climático y gestión de recursos.

## MEDICIONES DE ET DE ALFALFA CON LISÍMETROS DE DRENAJE

- **Construcción del lisímetro:** Los lisímetros tenían 1.8 m<sup>2</sup> por 1.8 m de profundidad y cuyas paredes se encuentran 15 cm por debajo de la superficie del suelo. Los lados se construyeron con madera contrachapada de 19 mm (3/4 pulgadas) y la parte inferior revestidos con 4 capas de plástico negro sin costura de 0.15 mm. Los agujeros para los lisímetros se excavaron con una retroexcavadora y el suelo se apiló en capas. Los lisímetros se colocaron con retroexcavadora. Se instalaron 2 sistemas de drenaje para eliminar el agua de filtración del fondo del lisímetro: Un sistema de tubería PCV consistió en 4 tuberías perforadas de 19 mm (3/4 pulg.) Envueltas con una malla de nailon para ventanas y una tela de nailon de tejido grueso. La tubería se conectó a un colector con un tubo ascendente que se extendía hasta la parte superior del lisímetro.

El otro sistema de drenaje se construyó a partir de nueve vasos de cerámica de 13 mm (0.5 pulgadas) de diámetro por 30 cm. Largas piezas de cerámica conectados con tubo plásticos de 3 mm. Las cerámicas se instalaron de 10 a 15 cm por encima del sistema de drenaje de PVC en cada lisímetro. Las capas de suelo se devolvieron al lisímetro en el orden original de excavación. Se utilizó un compactador neumático para consolidar el suelo hasta la densidad aparente aproximada del suelo no perturbado. Después de la instalación de todos los lisímetros, el área que rodea a los lisímetros fue inundada. No se observó ningún asentamiento producto de la inundación.

En cada lisímetro se instalaron dos sondas de neutrones de 1.8 m, centrados en la dirección este-oeste y con una separación de 0.9 m en la dirección norte-sur. Se instalaron tensiómetros con una profundidad promedio de 15 cm, 30 cm y 150 cm. Un cuarto de control, fue construido con madera de 5 cm por 30 cm (2 x 12 pulgadas), se enterró al ras de la superficie a 1.0 m del lado Este de los lisímetros. Las líneas de succión del sistema de drenaje de copa y de PVC extendieron desde los lisímetros hasta las cajas de control y se enterraron 15 cm por debajo de la superficie del suelo. Para minimizar el tráfico peatonal alrededor de los lisímetros, los tensiómetros se instalaron en las cajas de control y se conectaron a los tensiómetros con tubos de plástico enterrados de 3 mm.

Una línea colectora de 19 mm, fue enterrada a unos 30 cm de profundidad, que venía desde el camino de acceso a través de la caja de control para los 5 lisímetros. Se utilizó una bomba de vacío alimentada por un generador eléctrico portátil para aplicar vacío a la línea del colector en la caja de control central. Un válvula de cierre de gas en una "T" fue instalada en la línea de recolección permitió que se aplicara vacío a cualquiera o todas las líneas del lisímetro. Se conectó una botella de vidrio de 19 litros al sistema entre válvula de la línea colectora y la línea de succión de cada lisímetro para que el filtrado de cada lisímetro se midiera volumétricamente. Luego se sembró alfalfa y avena en el campo, luego en el área del lisímetro se replantó a mano para obtener un crecimiento uniforme.

- **Operación del lisímetro.** Se instaló un sistema de riego por aspersión. La aplicación de rociadores se midió con latas de captura en cada sitio del tubo de acceso de la sonda de neutrones. La humedad del suelo se midió antes de iniciar el sistema de riego y luego nuevamente dos días después del evento de riego. El agua de drenaje se bombeó de los lisímetros antes del riego posterior.
- **Cálculo de ET y ETr**

$$ET = IR + PR - DR - SMC$$

| Ecuación 7 |

Donde:

IR = Riego;

PR = precipitación efectiva

DR = drenaje

SMC = cambio de humedad del suelo entre fechas de medición.

La ETr se calculó utilizando la ecuación de combinación de Penman modificada presentada por Burman et al (1980). El coeficiente de viento utilizado en el informe fue el de Wright y Jensen (1972). El término de radiación neta se estimó a partir de la radiación solar diaria y los datos del punto de rocío utilizando valores y funciones desarrollados por Wright (1982) para Kimberly, Idaho.

## USO DE MEDICIONES CON LISÍMETRO PARA DISEÑO DE PRINCIPALES SISTEMAS DE RIEGO

A principios de los años 50, la Unión de Republicas Socialistas Soviéticas -Republica de Rusia- adoptó el método bioclimático sugerido por el profesor Alpatyev para estimar las necesidades de los cultivos. La ecuación basal, este caso es:

$$E = Kb \sum dm$$

| *Ecuación 8* |

Donde: > E = Agua demandada por el cultivo

Kb = Coeficiente bioclimático

dmm = representa la suma de los valores medios diarios de déficit de humedad del aire durante el período estimado.

Las mediciones lisimétricas se tomaron regularmente en zonas de precipitación inestable y en áreas con diferentes condiciones climáticas. Las observaciones fueron siempre de cultivos para un área en estudio. Siguiendo el procedimiento estándar se instalaron lisímetros en las cercanías de las estaciones meteorológicas estatales. Esos experimentos permitieron establecer correlaciones entre el valor del coeficiente *Kb* (áreas medias con diferentes condiciones climáticas) y la suma de la media temperaturas diarias, en relación con los principales cultivos.

El procedimiento de determinación del coeficiente bioclimático se basó en medir cada 10 días los componentes del balance hídrico en un lisímetro cargado con una muestra de suelo característica de una determinada zona climática. El contenido de humedad en una capa de 0 a 50 cm se mantuvo entre el 75% y el 80% de la capacidad máxima de humedad. Se estimó cada 10 días de agua hacia un cultivo agrícola particular midiendo los componentes del balance hídrico en un lisímetro. El valor resumido del déficit de humedad del aire durante 10 días ( dm) se obtuvo de la estación meteorológica más cercana.

El valor del coeficiente bioclimático cada 10 días del período de vegetación se calculó con la siguiente fórmula:

$$Kb = \frac{(w1 - w2) + p + i + q}{\sum dm}$$

| *Ecuación 9* |

w1 = almacenamiento de humedad del suelo en la capa radicular, al comienzo del período (mm)

w2 = almacenamiento de humedad del suelo en la capa radicular, al final del período (mm)

p = precipitación (mm)



i = es agua de riego (mm)

q = intercambio de agua entre la capa de la raíz y la capa subyacente (entrada; salida)

El coeficiente bioclimático (Kb) es un factor complejo basado en un parámetro clave que determina el coeficiente de agua del cultivo.

### ***Relaciones de humedad del suelo***

La ecuación 9 usó el valor máximo posible en cualquier momento del período de vegetación debido a que la capa de raíces en el lisímetro siempre se caracterizó por un suministro completo de humedad. El requerimiento potencial de agua para el cultivo está influenciado únicamente por la temperatura del aire y la humedad.

### ***Aplicaciones de los estudios de lisimetría en la planificación***

Para poder pronosticar los cambios en el contenido de humedad en la capa de raíces a lo largo del período de vegetación, se debe conocer lo siguiente:

1. Tipo de régimen hídrico en diferentes parcelas involucradas en rotaciones de cultivos en toda el área de los sistemas de riego propuestos.
2. Datos meteorológicos sobre precipitación, suma de los déficits de temperatura y humedad del aire para cada 10 días de período de vegetación.
3. Fecha verificada estadísticamente del aumento de temperatura por encima del nivel de + 50 ° C en el contenido crítico de humedad en la capa de 1 m de espesor para la fecha de estudio (para específicas áreas-zonas costeras).

La siguiente ecuación 10 se utilizó para calcular la humedad del suelo en un día determinado:

|ecuacion 10 | ***Ecuación 10*** |

Los datos para la primera y subsiguientes aplicaciones de agua ocurren cuando el almacenamiento de humedad en la capa de la raíz disminuye al contenido de humedad anterior ( U2) EL contenido de humedad se calcula para el final de cada día, empezando con el día en que la temperatura diaria promedio supera con seguridad los niveles de + 5 °C. Los días empiezan a partir del 1 de enero del año en curso.

Donde:

U2 es el contenido de humedad en la capa de la raíz al final del día, mm

N = representa el número de día, contado desde el 1 de enero

W2 = es la humedad de la capa de la raíz al final del día% de MWC (CC)

h = es el espesor de la capa de la raíz, m

q = es la recarga de agua a la capa de la raíz desde la capa subyacente,(mm/día)

P = precipitación, mm / día

I = es aplicación de agua, mm / día

Kb = es un coeficiente bioclimático, mm / milibar

d = es milibares de déficit de humedad del aire

t = es la suma de la temperatura al final del día °C

## **EXPERIENCIAS DEL CER-ESPOCH EN LISIMETRÍA.**

1. Lisímetro de drenaje
2. Investigaciones previas
  - Determinación del tamaño apropiado para el diseño del lisímetro
  - DRENAJE

- tradicional
    - ciclo 1 ( usando las vinetas)
    - ciclo 2
  - Elaboración del lisímetro de drenaje-CER-Espoch
3. Instalación del lisímetro de drenaje
  4. Calibración del lisímetro de drenaje
  5. Realización de investigaciones

## **OBTENCION DE KC PARA LA ZONA CENTRO DEL PAIS**

1. Papa
2. Cebolla
3. Brocoli
4. Lechuga
5. Frejol
6. Maiz
7. Lechuga

## **RECOMENDACIONES**

- a. Uso y manejo del lisímetro
- b. Problemas comunes a la hora de operar el lisímetro
- c. Elaboración e instalación de lisímetros por zonas de estudio
- d. Condiciones de suelo
- e. Condiciones climáticas.

## **COEFICIENTE DE CULTIVO**

## **Glosario de términos**

## **Referencia Bibliográfica**

No mas de 10 paginas

## **Contraportada**

Resumen de la obra ( 150 palabras )

Hoja de vida del primer autor 75 palabras

Hoja de vida del segundo autor 75 palabras

La contraportada mostrara la parte de la imagen de la portada y el ISBN con el código correspondiente.

print in pdf

```
pandoc lysimeter2.md -s -o libro.pdf --pdf-engine=xelatex --fmarkdown-implicit_figures -o --from=markdown
-V geometry:margin=1in --toc --highlight-style=espresso
```