

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA
COLEGIO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
FACULTAD DE AGRONOMÍA
MAESTRÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS



TESIS

**EVAPOTRANSPIRACIÓN EN CULTIVOS DE CHILE (*Capsicum annuum*) Y
SANDÍA (*Citrullus Lanatus*) EN EL NOROESTE DE MÉXICO**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS AGROPECUARIAS**

**PRESENTA:
LEONARDO ROMÁN ROMÁN**

**DIRECTOR DE TESIS:
DR. TOMÁS DÍAZ VALDÉS**

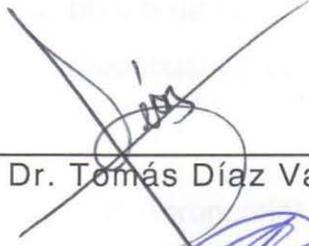
**CO-DIRECTOR DE TESIS:
MC. JESÚS ENRIQUE LÓPEZ AVENDAÑO**

CULIACÁN, SINALOA, AGOSTO 2015

Esta tesis fue realizada por **Leonardo Román Román**, bajo la dirección del Consejo Particular que se indica; ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

Maestría en Ciencias Agropecuarias

Director de tesis:


Dr. Tomás Díaz Valdés

Co-director de tesis:


MC. Jesús Enrique López Avendaño

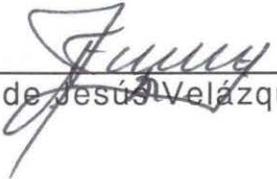
Asesor:

Dr. Julio Cesar Rodríguez

Asesor:


Dr. Felipe Ayala Tafuya

Asesora:


Dra. Teresa de Jesús Velázquez Alcaraz

Culiacán, Sinaloa, Agosto de 2015



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA
COLEGIO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA
FACULTAD DE AGRONOMÍA CULIACÁN
FACULTAD DE AGRONOMÍA VALLE DEL FUERTE
FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR
FACULTAD DE AGRONOMÍA VALLE DEL CARRIZO

En la Ciudad de Culiacán Rosales, Sinaloa, el día 20 de enero del año 2020, el que suscribe Leonardo Román Román, alumno del Programa de Maestría en Ciencias Agropecuarias, con número de cuenta 0520917-1, de la Unidad Académica Facultad de Agronomía, del Colegio de Ciencias Agropecuarias de la UAS, manifiesta que es autora intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de la Dr. Tomás Díaz Valdés y Dr. Jesús Enrique López Avendaño y cede los derechos del trabajo titulado "Evapotranspiración en cultivos de chile (*Capsicum annum*) y sandía (*Citrullus lanatus*) en el noroeste de Mexico", a la Facultad de Agronomía, del Colegio de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Autónoma de Sinaloa, para su difusión, con fines académicos y de investigación por medios impresos y digitales, todo esto en apego al artículo 27 de la Ley Federal de Derechos de Autor.

La Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México) protege el contenido de la presente tesis. Los usuarios de la información contenida en ella deberán citar obligatoriamente la tesis como fuente, dónde la obtuvo y mencionar al autor intelectual. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ATENTAMENTE

Leonardo Román R
Leonardo Román Román

CORREO ELECTRÓNICO: leo_roman16@hotmail.com
CURP: RORL901115HSLMMN02

AGRADECIMIENTOS:

A mis padres por su apoyo moral y económico, y por guiarme por el buen camino de la vida.

A CONACYT por la gran oportunidad que me brindó de concluir uno de mis más grandes objetivos, ser Maestro en Ciencias Agropecuarias con buena formación académica.

A la Universidad Autónoma de Sinaloa (Facultad de Agronomía).

AL Dr. Tomás Díaz Valdés por guiarme como director de tesis durante estos dos años.

Al Dr. Felipe Ayala Tafoya, por sus consejos, asesoría y todo el apoyo que me brindo para concluir con el proyecto.

A mis asesores, Dr. Julio Cesar Rodríguez, MC. Jesús Enrique López Avendaño y la Dra. Teresa de Jesús Velázquez Alcaraz, por su colaboración.

DEDICATORIAS:

A Dios por darme esta gran vida, y conocer tantas personas buenas.

A mis padres, Rosario y Eva Angelina, por su apoyo y confianza que siempre me han brindado.

A mis hermanos Bulmaro, Juan, Aníbal, Adrián, María, Daniel, Ismael y Lamberto.

A mi abuela Isabel (†) y María (†).

A todos mis amigos y compañeros, a los que tuve la oportunidad de conocer y compartir gratos momentos a lo largo de este proceso y me ayudaron a formarme como la persona que soy hoy.

CONTENIDO

	Página
ÍNDICE DE CUADROS	i
ÍNDICE DE FIGURAS	ii
RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
I. INTRODUCCIÓN	1
II. PROBLEMA	3
III. HIPÓTESIS	4
IV. OBJETIVOS	4
4.1. Objetivo general	4
4.2. Objetivos específicos	4
V. REVISIÓN DE LITERATURA	5
5.1. Importancia del chile en Sinaloa	5
5.1.1. Descripción botánica	5
5.1.2. Exigencias climáticas	6
5.2. Importancia de la sandía en Sonora	6
5.2.1. Descripción botánica	7
5.2.2. Exigencias climáticas	8
5.3. Evapotranspiración (ET)	9
5.3.1. Evapotranspiración del cultivo (ET)	9
5.3.2. Evapotranspiración de referencia (ET _o)	9
5.3.3. Coeficiente de cultivo (K _c)	10
5.4. Factores que afectan la evapotranspiración (ET)	10
5.5. Métodos para estimar evapotranspiración (ET)	10
5.5.1. Métodos directos	10
5.5.1.1. Método gravimétrico	10
5.5.1.2. Método del lisímetro	11
5.5.1.3. La técnica de covarianza de vórtices (EC)	12
5.5.2. Métodos indirectos	13
5.5.2.1. Método de Penman-Monteith (FAO-56)	13

	Página
5.5.2.2. Método del scintilómetro	13
5.5.2.3. Método del tanque evaporímetro	16
VI. MATERIALES Y MÉTODOS	17
6.1. Área de estudio (sandía)	17
6.1.1. Características del sitio experimental	18
6.1.2. Mediciones meteorológicas y procesamiento de datos	18
6.1.3. Agua en el suelo	20
6.2. Área de estudio (chile)	21
6.2.1. Características del sitio experimental	21
6.2.2. Mediciones meteorológicas	22
6.3. Estimación de ET	23
6.3.1. Método gravimétrico	23
6.3.2. Método de la FAO-56	24
6.3.3. Método del scintilómetro	24
6.3.4. Método de covarianza de vórtices (EC)	24
6.5. Evapotranspiración y coeficiente de cultivo	25
6.4. Análisis estadístico	26
VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	27
7.1. Evapotranspiración en el cultivo de sandía	27
7.1.1. Variables meteorológicas	27
7.1.2. Riego, humedad y tensión del agua en el suelo	28
7.1.3. Evapotranspiración obtenida mediante el método FAO-56 (ET FAO-56) y la técnica covarianza de vórtices (ET EC) en el cultivo de sandía	30
7.2. Evapotranspiración en el cultivo de chile	33
7.2.1. Variables meteorológicas	33
7.2.2. Evapotranspiración obtenida mediante los métodos FAO-56 (ET FAO-56), scintilómetro (Scint) y gravimétrico (Grav), evapotranspiración de referencia (ETo) y coeficiente de cultivo (Kc) de chile	34

		Página
VIII.	CONCLUSIONES	36
IX.	LITERATURA CITADA	37

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Área de estudio y equipo instalado, predio el Águila, Costa de Hermosillo, México.	17
Figura 2. Instrumentación instalada en el cultivo de sandía.	18
Figura 3. Frecuencia de la dirección de vientos en 2011, datos a 10 minutos, multisensor WXT520, Vaisala, instalado a 2.0 m de altura en de Departamento de Agricultura y Ganadería de la Universidad de Sonora.	19
Figura 4. Área de estudio y equipo instalado, Campo el Cafetal, Navolato, México.	21
Figura 5. Instrumentación instalada en el cultivo de chile.	22
Figura 6. Comportamiento diario de temperatura, humedad relativa y precipitación durante el ciclo de cultivo de sandía en el predio el Águila.	27
Figura 7. Riego, humedad volumétrica (θ_v) y, tensión del agua (WP) en el suelo en el cultivo de sandía, predio el Águila, Costa de Hermosillo.	29
Figura 8. Evapotranspiración obtenida mediante el método FAO-56 (ET FAO-56) y la técnica covarianza de vórtices (ET EC); evapotranspiración de referencia (ET _o) y coeficiente de cultivo (K _c) de sandía en el predio el Águila, Costa de Hermosillo.	31
Figura 9. Comportamiento de las variables de energía, radiación neta (R _n), flujo de calor del suelo (G), flujo de calor sensible (H) y flujo de calor latente (LE), en chile cultivado en Navolato, Sinaloa.	33
Figura 10. Comportamiento de la evapotranspiración del cultivo (ET) determinada con el método FAO-56, scintilómetro (Scint) y gravimétrico (Grav), y de la evapotranspiración de referencia (ET _o) en cultivo de chile en Navolato, Sinaloa.	34

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Sensores instalados en el cultivo de sandía, predio El Águila, Costa de Hermosillo, México.	20
Cuadro 2. Sensores instalados en el cultivo de chile, campo El Cafetal, Navolato, México.	23
Cuadro 3. Resumen semanal de lluvia, riego, evapotranspiración del cultivo (ET), evapotranspiración de referencia (ET _o) y coeficiente de cultivo (K _c) de sandía, Costa de Hermosillo	32
Cuadro 4. Relación de los datos estimados con el análisis de Willmott (dr), RSME y R ² , entre los métodos covarianza de vórtices (ET EC) y FAO-56 (ET FAO-56) en sandía cultivada en la Costa de Hermosillo, México.	32
Cuadro 5. Relación de los datos estimados con el análisis de Willmott (dr), RSME y R ² , entre los métodos FAO-56, scintilómetro (Scint) y gravimétrico (Grav) en chile cultivado en Navolato, Sinaloa.	35

RESUMEN

Entre 80 y 90% del agua se destina a la agricultura, a nivel mundial, con una eficiencia del 50%. Diversos estudios se han llevado a cabo para precisar la demanda hídrica de los cultivos, algunos de ellos mediante la estimación de la evapotranspiración (ET). Se realizaron dos trabajos de investigación, uno en sandía triploide (*Citrullus Lanatus*) en la Costa de Hermosillo, Sonora, y otro en chile Bell (*Capsicum annuum*) en Navolato, Sinaloa, con el objetivo de comparar métodos para determinar ET. La ET de sandía, determinada con la técnica de covarianza de vórtices (ET EC), fue de 214 mm para todo el ciclo, y de 201 mm con el método FAO-56 (ET-FAO-56). El análisis estadístico de Willmott indicó que no existe buena concordancia entre los métodos utilizados ($dr=0.40$), aun cuando el coeficiente de determinación fue bueno ($R^2=0.91$). La ET promedio de la etapa de cosecha de chile, determinada con el método gravimétrico, fue de 3.6 mm d^{-1} , y de 3.1 mm d^{-1} con el scintilómetro, mientras que con el método de la FAO-56 fue de 4.5 mm d^{-1} . Existe una buena concordancia para estimar ET entre el método gravimétrico y scintilómetro, de acuerdo al índice de concordancia entre los valores estimados y observados (0.48).

Palabras claves: *Citrullus Lanatus*, *Capsicum annuum*, evapotranspiración, agua.

ABSTRACT

Between 80 and 90% of water for agriculture is allocated, worldwide, with an efficiency of 50%. Various studies have been conducted to clarify the water demand of crops, some of them by estimating evapotranspiration (ET). Two research were carried out, one in triploid watermelon (*Citrullus lanatus*) in the Coast of Hermosillo, Sonora, and another in Bell pepper (*Capsicum annuum*) in Navolato, Sinaloa, in order to compare methods to determine ET. ET of watermelon, given with vortex covariance technique (ET EC), was 214 mm for the entire cycle, and 201 mm with FAO-56 method (ET-FAO-56). Statistical analysis indicated that there isn't good Willmott's concordance index between the methods used ($dr = 0.40$), even if the coefficient of determination was good ($R^2 = 0.91$). The average harvest stage of Bell pepper, determined with the gravimetric method, ET was 3.6 mm d^{-1} , and 3.1 mm d^{-1} with scintilometer, while the method of the FAO-56 was 4.5 mm d^{-1} . There is a good concordance for estimating ET between the gravimetric method and scintilometer, according to the concordance index between estimated and observed values (0.48).

Keywords: *Citrullus lanatus*, *Capsicum annuum*, evapotranspiration, water.

I. INTRODUCCIÓN

En la gestión de recursos hídricos uno de los problemas más urgentes a atender, es la competencia por agua entre usuarios urbanos, industriales, agropecuarios y ecológicos (Bittelli, 2010). A nivel global del 80 al 90% de agua es consumida por la agricultura, con una eficiencia de uso de alrededor del 50% (Hamdy *et al.*, 2003).

La disponibilidad del agua de una región o país depende del balance de agua, esto es, del volumen que se recibe por precipitación y de lo que se pierde por la evaporación de los cuerpos de agua y por la evapotranspiración de la vegetación; en México, el volumen promedio de agua por precipitación anual es de 1,489 km³; de los cuales, alrededor de 1,089 km³ (73%, aproximadamente) se pierden por evapotranspiración (SEMARNAT, 2012).

El volumen de agua concesionado en el país en 2012 fue de 82.7 km³ de los cuales 63.3 km³ pertenecieron al uso agrícola, es decir, el 76.6% (CONAGUA, 2013). En el mismo año en el estado de Sinaloa el volumen concesionado fue 9.26 km³, de ello se destinaron 8.7 km³ al uso agrícola, lo que representa el 93.9%; mientras que para Sonora el volumen concesionado fue 7.28 km³ y se destinaron 6.39 km³ al uso agrícola, equivalente al 87.77% (CONAGUA, 2013).

Para lograr la sostenibilidad del recurso agua y mejorar la productividad, las nuevas estrategias deben ser desarrolladas e implementadas para aumentar la eficiencia de la productividad agrícola (Fererres y Soriano, 2007). Por lo tanto, determinar el momento adecuado y la cantidad de riego es cada vez más importante, lo que nos permite constituir la base fundamental para realizar un manejo eficiente del recurso agua de tal forma que el cultivo no tenga limitaciones o excesos de agua durante su desarrollo (Villanueva-Díaz *et al.*, 2001).

Una forma de cuantificar la demanda de agua de los cultivos, producto de los cambios atmosféricos, es mediante la estimación de la evapotranspiración "ET" (Allen *et al.*, 1989).

La evapotranspiración en hortalizas es poco investigada, específicamente en los cultivos de chile y sandía, debido, al costo que representa el uso de los equipos de medición. Sin embargo, existen diferentes métodos para la determinación de dicha variable, que nos ayudan a establecer la demanda de agua de cada cultivo y con ello ajustar la programación de los riegos, con el objetivo de hacer uso eficiente del agua.

II. PROBLEMA

El método gravimétrico y Penman-Monteith (FAO-56) son ampliamente utilizados para medir y estimar, respectivamente, la evapotranspiración en los cultivos agrícolas. Sin embargo, recientemente surgieron otros métodos con los que se busca mejorar la estimación o medición de la evapotranspiración, tales como el scintilómetro y covarianza de vórtices, que ya fueron utilizados en algunos cultivos de granos y hortalizas, pero se desconoce su eficacia en Chile y sandía.

III. HIPÓTESIS

La estimación y medición de la evapotranspiración por el método scintilómetro y la técnica de covarianza de vórtices comparado con el de Penman-Monteith FAO-56, contribuyen a la determinación más precisa de la evapotranspiración del cultivo de chile (*Capsicum annuum*) y sandía (*Citullus lanatus*).

IV. OBJETIVOS

4.1. Objetivo general

Comparar métodos de evapotranspiración obtenida en los cultivos de chile (*Capsicum annuum*), en el municipio de Navolato, y del cultivo de sandía (*Citrullus lanatus*), en la Costa de Hermosillo.

4.2. Objetivos específicos

Comparar la evapotranspiración obtenida en el cultivo de chile (*Capsicum annuum*) con los métodos de Penman-Monteith (FAO-56), scintilómetro y gravimétrico, en el municipio de Navolato.

Comparar la evapotranspiración obtenida en el cultivo de sandía (*Citullus lanatus*) con la técnica covarianza de vórtices y Penman-Monteith (FAO-56), en la Costa de Hermosillo.

V. REVISIÓN DE LITERATURA

5.1. Importancia del chile en Sinaloa

En el año 2014, en Sinaloa se cosecharon 11,991.24 ha, con una producción de 604,773.6 t y un rendimiento de 50.44 t ha⁻¹ que le permitió ser el segundo estado productor a nivel nacional después de Chihuahua (SIAP, 2015). No obstante, dicha producción representó un ingreso de \$3,263,689,730 que le ubicó en el primer lugar nacional en el rubro económico (SIAP, 2015).

Aun con la tecnología que existe en la actualidad y su aplicación en la agricultura no se ha podido realizar un uso eficiente del agua. El chile es un cultivo de alta demanda de agua, ya que estudios realizados dan a conocer que en campo abierto se aplican de 425 a 450 mm ha⁻¹ en chile pimiento para ciclos de 122 días (SQM, 2007; Gómez *et al.*, 2010), mientras que en invernadero se llegan a aplicar hasta 8000 mm ha⁻¹ (SQM, 2007).

5.1.1. Descripción botánica

Familia: *Solanaceae*.

Especie: *Capsicum annuum*.

Es una planta herbácea perenne con ciclo de cultivo anual, de altura variable de 0.5 m (en determinadas variedades de cultivo al aire libre) a más de 2 m (gran parte de los híbridos cultivados en invernadero); posee un sistema radicular pivotante y profundo (dependiendo de la profundidad y textura del suelo), con numerosas raíces adventicias que horizontalmente pueden alcanzar una longitud comprendida entre 0.5 y 1 m (Infoagro, 2014). El tallo principal es de crecimiento limitado y erecto, con dos a tres ramificaciones (dependiendo de la variedad); la hoja es entera y lanceolada, con un ápice muy pronunciado (acuminado) y un pecíolo largo y poco aparente.; el haz es glabro (liso y suave al tacto) y de color verde más o menos intenso (dependiendo de la variedad) y brillante; el nervio principal parte de la base de la hoja, como una prolongación del pecíolo, del

mismo modo que las nerviaciones secundarias que son pronunciadas y llegan casi al borde de la hoja (Infoagro, 2014).

Las flores aparecen solitarias en cada nudo del tallo, con inserción en las axilas de las hojas; son pequeñas y constan de una corola blanca (Infoagro, 2014). La polinización es autógama, aunque puede presentarse un porcentaje de alogamia que no supera el 10%; el fruto es una baya hueca, semicartilaginosa y deprimida, de color variable (verde, rojo, amarillo, naranja, violeta o blanco); algunas variedades van pasando del verde al anaranjado y al rojo a medida que van madurando; su tamaño es variable, pudiendo pesar desde escasos gramos hasta más de 500 g (Infoagro, 2014).

5.1.2. Exigencias climáticas

El manejo racional de los factores climáticos de forma conjunta es fundamental para el funcionamiento adecuado del cultivo, ya que todos se encuentran estrechamente relacionados y la actuación sobre uno de estos incide sobre el resto (Infoagro, 2014).

La temperatura óptima durante la fase de germinación la temperatura oscila de 20 a 25 °C, en la fase de crecimiento vegetativo durante el día de 20 a 25 °C y durante la noche de 16 a 18 °C; en la fase de floración y fructificación oscila entre 26 y 28 °C en el día y de 18 a 20 °C durante la noche (Infoagro, 2014).

La humedad relativa óptima oscila entre el 50% y el 70%. Humedades relativas muy elevadas favorecen el desarrollo de enfermedades aéreas y dificultan la fecundación. La coincidencia de altas temperaturas y baja humedad relativa puede ocasionar la caída de flores y de frutos recién cuajados (Infoagro, 2014). Es una planta muy exigente en luminosidad, sobre todo en los primeros estados de desarrollo y durante la floración (Infoagro, 2014).

5.2. Importancia de la sandía en Sonora

Sonora es el principal estado productor de sandía a nivel nacional. En 2014, se cosecharon 7011 ha, y se obtuvo una producción de 249,363.71 t, con un

rendimiento de 35.57 t ha⁻¹, y un valor de \$599,250,200 que le alcanzo para ser considerada la cuarta hortaliza más importante del estado (SIAP, 2015).

La sandía es una hortaliza que demanda grandes volúmenes de agua. Algunos estudios realizados muestran que se han aplicado 390 mm ha⁻¹ (Cenobio *et al.*, 2004), hasta 470 mm ha⁻¹ (López-Elías *et al.*, 2011).

5.2.1. Descripción botánica

Familia: Cucurbitaceae

Nombre científico: *Citrullus lanatus*

Es una planta anual herbácea, de porte rastrero o trepador, con un sistema radicular muy ramificado; raíz principal profunda y raíces secundarias distribuidas superficialmente (Infoagro, 2014). Actualmente este órgano carece de importancia, ya que alrededor del 95 % de la sandía se cultiva injertada sobre patrón de *C. máxima* x *C. moschata*, totalmente afín con la sandía; los tallos de desarrollo rastrero; en estado de cinco a ocho hojas bien desarrolladas el tallo principal emite brotes de segundo orden a partir de las axilas de las hojas; en los brotes secundarios se inician los terciarios y así sucesivamente, de forma que la planta llega a cubrir 4 a 5 m². Se trata de tallos herbáceos de color verde, recubiertos de pilosidad que se desarrollan de forma rastrera, pudiendo trepar debido a la presencia de zarcillos bífidios o trífidios, y alcanzando una longitud de hasta 4 o 6 m; la hoja peciolada, pinnado-partida, dividida en tres a cinco lóbulos que a su vez se dividen en segmentos redondeados, presentando profundas entalladuras que no llegan al nervio principal; el haz es suave al tacto y el envés muy áspero y con nervaduras muy pronunciadas; las flores son de color amarillo, solitarias, pedunculadas y axilares, atrayendo a los insectos por su color, aroma y néctar, de forma que la polinización es entomófila; la corola es de simetría regular o actinomorfa, está formada por cinco pétalos unidos en su base; el cáliz está constituido por sépalos libres (dialisépalo o corisépalo) de color verde; existen dos tipos de flores: masculinas o estaminadas y femeninas o pistiladas, coexistiendo los dos sexos en una misma planta, pero en flores distintas (flores unisexuales);

las flores masculinas disponen de ocho estambres que forman cuatro grupos soldados por sus filamentos; las flores femeninas poseen estambres rudimentarios y un ovario ínfero veloso y ovoide que se asemeja en su primer estadio a una sandía del tamaño de un hueso de aceituna (fruto incipiente); el fruto es una baya globosa u oblonga en pepónide formada por tres carpelos fusionados con receptáculo adherido, que dan origen al pericarpio; el ovario presenta placentación central con numerosos óvulos que darán origen a las semillas; su peso oscila entre 2 y 20 kg; el color de la corteza es variable, pudiendo aparecer uniforme (verde oscuro, verde claro o amarillo) o a franjas de color amarillento, grisáceo o verde claro sobre fondos de diversas tonalidades verdes; la pulpa también presenta diferentes colores (rojo, rosado o amarillo) y las semillas pueden estar ausentes (frutos triploides) o mostrar tamaños y colores variables (negro, marrón o blanco), dependiendo del cultivar (Infoagro, 2014).

5.2.2. Exigencias climáticas

La sandía es menos exigente en temperatura que el melón, siendo los cultivares triploides más exigentes que los normales (diploides), presentando además mayores problemas de germinación (Infoagro, 2014).

Cuando las diferencias de temperatura entre el día y la noche son de 20 a 30 °C, se originan desequilibrios en las plantas: en algunos casos se abre el cuello y los tallos y el polen producido no es viable (Infoagro, 2014).

La temperatura óptima durante la fase de germinación es de 20 °C, para la etapa de floración de 18 a 20 °C, en la fase de desarrollo y maduración de los frutos de 23 a 28 °C (Infoagro, 2014).

La humedad relativa óptima para la sandía se sitúa entre 60 y 80%, siendo un factor determinante durante la floración (Infoagro, 2014).

La sandía no es muy exigente en suelo, aunque le van bien los suelos bien drenados, ricos en materia orgánica y nutrientes; no obstante, la realización de la técnica del enarenado hace que el suelo nos sea un factor limitante para el

cultivo de la sandía, ya que una vez implantado se adecuará la fertirrigación al medio (Infoagro, 2014).

5.3. Evapotranspiración (ET)

La evapotranspiración es la combinación de dos procesos por los que el agua se libera a la atmósfera, a través de la superficie del suelo por evaporación y transpiración de las plantas cultivadas (FAO, 1998).

La evapotranspiración se expresa en milímetros (mm) por unidad de tiempo, la cantidad de agua perdida de una superficie cultivada en unidades de altura de agua o la energía recibida por unidad de área, se refiere a la energía o al calor requerido para vaporizar el agua, conocida como el calor latente de vaporización, que está en función de la radiación, temperatura, velocidad del viento, humedad relativa y presión barométrica; la evapotranspiración expresada en $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ se representa por el flujo de calor latente que expresa la energía requerida para cambiar una masa de unidad de agua líquida a vapor de agua bajo presión y temperatura constante. Cuanto más elevada es la temperatura, mayor será la evaporación (FAO, 1998).

5.3.1. Evapotranspiración del cultivo (ET)

Es la evapotranspiración que define la cantidad de agua que efectivamente utiliza el cultivo, misma que depende de condiciones atmosféricas, humedad del suelo y los requerimientos de los cultivos; se utiliza un coeficiente de cultivo (K_c) que depende de la humedad del suelo y características de cada cultivo, y es multiplicado por la evapotranspiración de referencia (FAO, 1998).

5.3.2. Evapotranspiración de referencia (ET_o)

Está definida por la tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia, que ocurre sin restricciones de agua; la superficie de referencia corresponde a un cultivo hipotético con características específicas; no se recomienda el uso de otras denominaciones como ET potencial, debido a las ambigüedades que se encuentran en su definición (FAO, 1998).

La evapotranspiración de referencia representa la demanda de evapotranspiración de la atmósfera, independientemente del tipo y desarrollo del cultivo, y de las prácticas de manejo; debido a que hay una abundante disponibilidad de agua en la superficie de evapotranspiración de referencia, los factores del suelo no tienen ningún efecto sobre ET (FAO, 1998). Los únicos factores que afectan ETo son los parámetros climáticos, tales como la temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar según el Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (1997), que de acuerdo con Ludlow (1970) son los principales factores que afectan la ET.

5.3.3. Coeficiente de cultivo (Kc)

El Kc es el cociente entre la evapotranspiración del cultivo y la evapotranspiración de referencia, éste representa la fenología del cultivo y de las condiciones específicas de suelo (Densidad, cobertura y altura) y el clima (FAO, 1998).

5.4. Factores que afectan la evapotranspiración (ET)

Los principales factores que afectan la evapotranspiración son las variables climáticas (radiación, temperatura del aire, humedad y velocidad del viento), características del cultivo, factores del suelo (flujo de calor en el suelo y contenido de humedad) y manejo (FAO, 1998).

5.5. Métodos para estimar evapotranspiración (ET)

A continuación se describen algunos métodos más utilizados en la determinación de la evapotranspiración.

5.5.1. Métodos directos

Son aquellos que miden la demanda de agua requerida por los cultivos, utilizando para ello instrumentos para su determinación; entre éstos pueden señalarse, el gravimétrico, lisimétrico (Villaman, 2001), y la técnica de Covarianza de Vórtices (Castañeda, 2013).

5.5.1.1. Método gravimétrico

De todos estos métodos directos el más utilizado en el gravimétrico, mismo que se utiliza como patrón para comparar la ET con métodos indirectos (Rey y Delibaltov, 1982). Dicho método se basa en la determinación en los diferentes valores de humedad registrados en una serie de pesadas en muestras de suelo que se efectúan a través del ciclo vegetativo, obtenidas a una profundidad igual a la que están las raíces de las plantas del cultivo considerado (Radulovich, 2009).

En función de estas diferencias y de las características del suelo, se obtienen las láminas de agua consumidas por evaporación, en un periodo de tiempo determinado, donde la suma total de las láminas consumidas en los intervalos entre riegos, es igual a la lámina total consumida o uso consuntivo del cultivo (Anónimo, 2014).

Se toman muestras de suelo con una barrena tipo Veihmeyer en espesores de suelo de 0.30 m hasta 1.50 m de profundidad y se determina el contenido de humedad expresado en porcentaje; el muestreo se realiza antes de cada riego, y dos, tres o cuatro días después del riego así como dos o tres muestreos entre riegos; la evapotranspiración se obtiene por diferencia de porcentajes para lo cual se aplica la siguiente formula (Radulovich, 2009; Anónimo, 2014):

$$L = \text{Psi} * \text{Da} * \text{Pr}$$

Donde:

L = lamina consumida durante el lapso considerado, cm.

Psi = variación del porcentaje de humedad respecto al peso del suelo seco, antes y después del riego.

Da= densidad aparente del suelo.

Pr = espesor de la capa de muestreo.

5.5.1.2. Método del lisímetro

Un lisímetro consiste en un recipiente enterrado y cerrado lateralmente, de modo que el agua que se drenaría sea captada por un drenaje; se debe tener cuidado de restituir el suelo que se excavó en condiciones similares a las que se encontraba; y próximo a él, se debe colocar un pluviómetro y, la evapotranspiración se calcula a través del balance hídrico, teniendo en cuenta que la evapotranspiración es igual al peso inicial, menos el peso final, más la lluvia, menos el drenaje (Aboukhaled *et al.*, 1982; Allen *et al.*, 1991).

Los lisímetros han sido utilizados en la investigación para la medición directa de la evapotranspiración de un cultivo (Marek *et al.*, 2006).

Se ha reportado el uso de lisímetro como una herramienta estándar en los estudios de pérdida de agua de los cultivos, así como para la calibración de los modelos agrometeorológicos (Campeche, 2002).

Se han realizado estudios con el objetivo de determinar la evapotranspiración y coeficiente de cultivo en sandía en distintas regiones (Miranda *et al.*, 2004; Orgaz *et al.*, 2005; Bastos *et al.*, 2012 y Shulka *et al.*, 2014).

5.5.1.3. La técnica de covarianza de vórtices (EC)

La técnica EC mide los flujos turbulentos que se producen en la atmósfera, como masas de aire que se mueven hacia arriba o hacia abajo transportando verticalmente gases como el dióxido de carbono (CO₂) o el vapor de agua (H₂O). Estos movimientos turbulentos sirven para estimar el intercambio neto de material entre el ecosistema y la atmósfera (Baldocchi, 2003). Los datos generados por la medición de flujos se utilizan para probar y mejorar los algoritmos de los flujos entre tierra y atmósfera utilizado en los modelos climáticos (Bonan *et al.*, 2011).

La ET medida con esta técnica, en conjunto con las mediciones de humedad del suelo y el conocimiento de la cosecha, permiten determinar la demanda de agua de los cultivos; es decir, las tasas de ET pueden proporcionar una medida de la eficiencia del riego por horas, días, meses o años (Burba, 2013).

Rodriguez *et al.* (2012) utilizaron la técnica EC para determinar la evapotranspiración en chile banana en el Valle del Yaqui, la cual fue de 327 mm.

5.5.2. Métodos indirectos

Son aquellos con los cuales se estima el requerimiento de agua de los cultivos, a través de todo el ciclo vegetativo mediante la utilización de fórmulas empíricas; se han clasificado en climatológicos y micrometeorológicos (Villaman, 2001).

5.5.2.1. Método de Penman-Monteith (FAO-56)

Uno de los métodos más aceptados para estimar la evapotranspiración es el de la FAO-56, mismo que depende de datos climáticos (Allen *et al.*, 1998) y, se basa en fórmulas teóricas.

La ecuación de FAO Penman-Monteith es una representación clara, precisa y simple de los factores físicos y fisiológicos que gobiernan el proceso de la evapotranspiración.

$$ET = Kc * ET_o$$

Donde:

ET = evapotranspiración del cultivo (mm día⁻¹)

ET_o = evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹)

Kc es el coeficiente de cultivo

Este método generalmente se usa para determinar la evapotranspiración de referencia y coeficiente de cultivo (Miranda *et al.*, 2004; Orgaz *et al.*, 2005; Bastos *et al.*, 2012 y Shulka *et al.*, 2014).

5.5.2.2. Método del scintilómetro

La evaporación del agua requiere cantidades altas de energía, ya sea en forma de calor sensible o de energía radiante; la evapotranspiración está controlada por el intercambio de energía en la superficie de la vegetación y es limitado por la

cantidad de energía disponible, aplicando el principio de la conservación de la energía, la energía que llega a la superficie debe ser igual a la energía que sale de la superficie en el mismo período de tiempo; el flujo de calor latente representa la fracción de la evapotranspiración que puede ser derivada de la ecuación del balance de energía si se conocen todos los componentes, mientras que la radiación neta y el flujo de calor del suelo pueden ser medidos por parámetros meteorológicos, la determinación del calor sensible incluye mediciones precisas de los gradientes de temperatura por encima de la superficie del suelo (FAO, 1998).

$$R_n - G - \lambda ET - H = 0$$

Donde

R_n = es la radiación neta que llega a la superficie

G = es el flujo de calor del suelo

H = es el flujo de calor sensible

λET = es flujo de calor latente.

El scintilómetro está compuesto de un emisor láser (rayo infrarrojo) que apunta a un receptor, las fluctuaciones de temperatura en el aire causa variaciones en la captura de intensidad de luz en el receptor, las cuales son evaluadas por el scintilómetro ofreciendo una gran sensibilidad y precisión sin distorsión de flujo mecánico o cualquier parte móvil (Scintec, 2008).

La cantidad de mediciones de la constante de fluctuaciones del índice de refracción depende de una buena medición; la escala de convección libre requiere buenas medidas; es decir, la propagación del rayo debe ser lo más uniforme posible sin obstrucciones del mismo; por lo que, la altura del receptor y transmisor puede ser de 0.10 a 300 m de altura, esto es necesario para el cálculo correcto de la turbulencia del flujo de calor sensible. A medida que aumenta la longitud de trayectoria, mayor altura de medición (Scintec, 2008).

El scintilómetro es un equipo costoso, el cual estima el flujo de calor sensible sobre la superficie del cultivo y el suelo (turbulencia del rayo de emisor-receptor), en distancias 100 a 10000 m (Watts *et al.*, 2000). Es una herramienta confiable para estimar en área promedio el flujo de calor sensible con un mínimo de instrumentos adicionales a una escala regional, a diferencia de los otros métodos basados solamente en medidas meteorológicas (Allen *et al.*, 1998; Hupet y Vanclooster, 2001). El flujo de calor sensible sobre una zona de suelo y zona de vegetación se obtiene a través de la diferencia entre la temperatura del suelo o de la vegetación según el caso, y la temperatura del aire sobre la zona (Norman *et al.*, 1995; Kustas *et al.*, 1999). El scintilómetro lo mide mediante la relación de Bowen, quien propuso que el flujo de calor latente (λET) y el flujo de calor sensible (H), son los flujos de energía más importantes para determinar el flujo de calor latente de evaporización; mediante esta relación $\beta = \lambda ET/H$ (Bowen, 1926) indicó que para determinar la ET por este método, se considera el balance de energía, la presión atmosférica, las diferencias de temperatura y la concentración de vapor de agua en el aire a dos alturas. La función principal está basada en la modulación de la luz por las fluctuaciones atmosféricas del índice de refracciones en el aire, a este fenómeno se le conoce como cintilación o centelleo. Comparado con otros sensores convencionales, el scintilómetro reúne resultados representativos, con menor dispersión y en más corto tiempo (Meijninger *et al.*, 2002; Beyrich *et al.*, 2005).

Dentro de los parámetros atmosféricos está el flujo de calor del suelo que se debe considerar en todos los términos de balance energético, ya que es la energía que se utiliza para calentar el suelo (Allen *et al.*, 1998).

Sánchez *et al.* (2011), mostró seis métodos empíricos de distintos requerimientos, que han sido aplicados en estaciones meteorológicas que disponen de los datos necesarios; se han hecho otras investigaciones para comparar el método de Penman-Monteith (FAO-56) con los métodos de Thornthwaite-Holzman, aerodinámico, balance de energía y sistema de Bowen, que de acuerdo con Villaman *et al.* (2001), los métodos de FAO-56, el balance de energía (relación de

Bowen), así como el sistema de Bowen proporcionan una mejor predicción de la evapotranspiración.

Conforme pasan los años se han desarrollado modelos que relacionan los flujos de calor con la radiación emitida por la superficie (Kustas y Norman, 1999), basados en la ecuación del balance de energía, donde la ET está controlada por el intercambio de energía en la superficie de la vegetación y es limitada por la cantidad de energía disponible, es decir, la energía que llega a la superficie debe ser igual a la energía que sale de la superficie en el mismo período de tiempo (FAO, 1998).

Diferentes investigadores han probado la larga apertura del scintilómetro para determinar el flujo promedio de superficies heterogéneas (Beyrich *et al.*, 2005) mediante la ecuación del balance de energía (Meijninger *et al.*, 2002; Ezzahar *et al.*, 2007). Hartogensis *et al.* (2003), demostraron la posibilidad de determinar un efectivo manejo del scintilómetro, en superficies no planas, donde se corrige la curvatura de la tierra, que se convierte en interrogante cuando se quiere medir la longitud de trayecto; por ésta razón, el scintilómetro es un cambio atractivo para la validación de estimación por satélite del flujo de calor sensible; para comparar la técnica del scintilómetro con el método de la FAO-56, solo es posible si en el campo experimental se instala una estación meteorológica y la superficie preferentemente sea lo más homogénea posible, cubierto por cultivo todo el campo experimental.

5.5.2.3. Método del tanque evaporímetro

La tasa evaporativa de los tanques de evaporación llenos de agua puede ser fácilmente obtenida. En ausencia de lluvia, la cantidad de agua evaporada durante un período (mm d⁻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 de agua abierta. Aunque el 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. La reflexión de la radiación solar del agua en el tanque puede ser diferente del 23% asumido para el cultivo de referencia. El almacenaje de calor dentro del tanque puede ser apreciable y puede causar una significativa evaporación durante la noche mientras que la mayoría de los cultivos transpiran solamente durante el día (FAO, 1998).

VI. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1. Área de estudio (sandía)

El experimento en sandía fue realizado en la Costa de Hermosillo, en el predio El Águila, localizado geográficamente a 29.00 N y 111.14 O (Figura 1). En esta región, el clima es desértico, caracterizado por una precipitación media anual de 321 mm, evapotranspiración potencial de 2,704 mm, temperatura media anual de 23.1 °C, con temperatura extremas en inviernos y verano de hasta de -3.5 °C y 49 °C, respectivamente (CONAGUA, 2014).

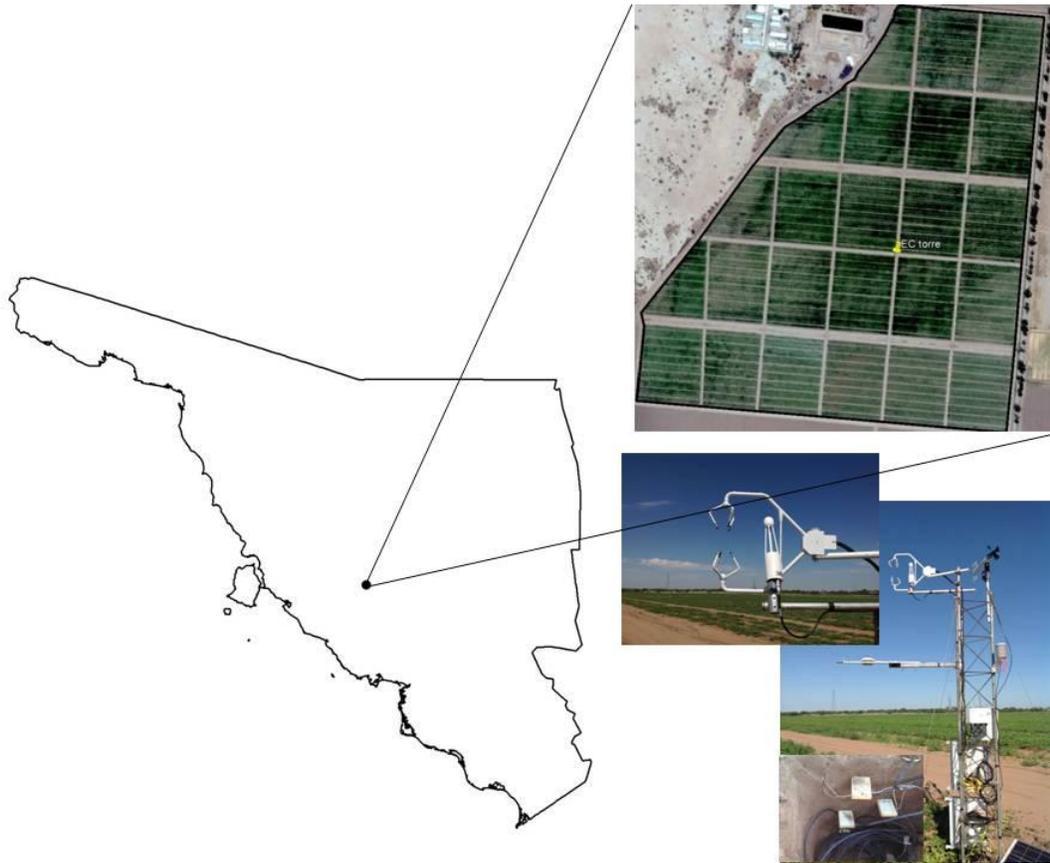


Figura 1. Área de estudio y equipo instalado, predio El Águila, Costa de Hermosillo, México.

6.1.1. Características del sitio experimental

El área experimental se localiza cerca a las márgenes del río Sonora, con suelos predominantes francos, con 49.08% de arena, 32.12% de limo y 18.8% de arcilla, determinado por el método de la probeta; una capacidad de campo (CC) del 20%, punto de marchitez permanente (PMP) de 9% y saturación (S) de 35%, obtenidas con la olla y membrana de presión.

Se estableció el cultivo de sandía (*Citrullus lanatus*) mini triploide cv. Extazy (Hazera Genetics) en una superficie de 60 ha. El trasplante se realizó entre el 8 y 15 de agosto de 2014, con una distancia entre camas de 2 m y una densidad de 12,000 plantas/ha. La cosecha de los frutos inició el 9 de octubre y finalizó el 4 de noviembre. La aportación de agua y fertilizantes se hizo mediante un sistema de riego por goteo, con una distancia entre goteros de 0.41 m y un gasto de 1.3 L h^{-1} .

6.1.2. Mediciones meteorológicas y procesamiento de datos



Figura 2. Instrumentación instalada en el cultivo de sandía.

En el centro de esta superficie sembrada con sandia fue instalada una torre para medir las componentes de la ecuación de balance de energía (Radiación neta,

flujo de calor latente y flujo de calor sensible y flujo de calor de suelo) y otras mediciones meteorológicas (temperatura y humedad en el aire, velocidad y dirección de vientos, precipitación, presión barométrica, radiación solar y albedo) y del suelo (tensión, humedad y temperatura) (Figura 2; Cuadro1). Previo a la instrumentación se realizó un análisis de dirección de vientos buscando que la incidencia de los vientos fuera en el mismo sentido en que quedaría colocado el anemómetro sónico y así minimizar la modificación de la velocidad por efectos mecánicos (Figura 3). Los flujos turbulentos (flujo de calor sensible y latente) fueron medidos bajo la técnica de covarianza de vórtices (EC) (Baldocchi, 2003).

El aporte de energía eléctrica estuvo dada por baterías con capacidad de 12 voltios, conectadas a paneles solares (KYOCERA, modelo KC85T) que se recargaban en el día junto con un controlador de corriente (modelo GPC-12-10-km), debido a que los paneles solares tienen capacidad para 19 voltios y este controlador hace bajar la carga a 12 voltios para el aporte de energía eléctrica.

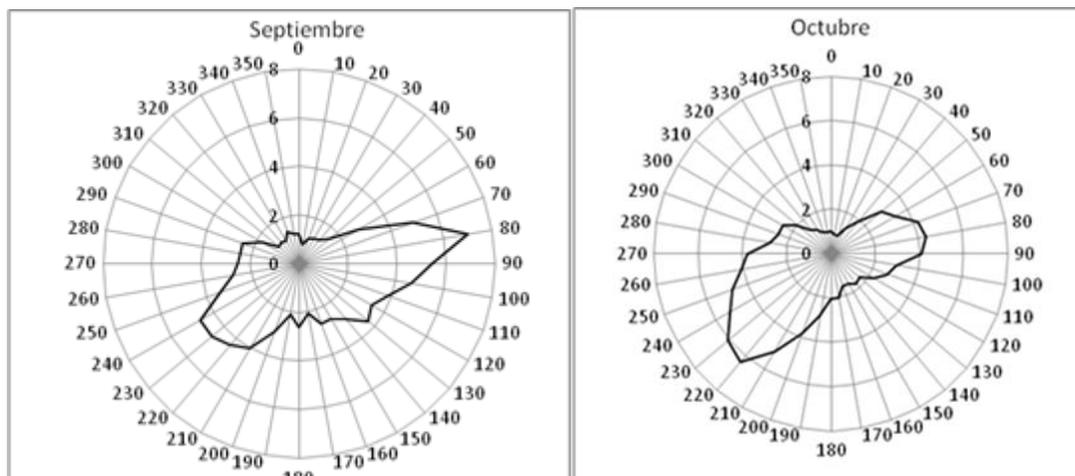


Figura 3. Frecuencia de la dirección de vientos en 2011, datos a 10 minutos, multisensor WXT520, Vaisala, instalado a 2.0 m de altura en de Departamento de Agricultura y Ganadería de la Universidad de Sonora.

Todos los sensores fueron conectados a un adquisidor de datos CR5000 (Campbell, SCI) y los datos almacenados en una tarjeta Compact flashcard de 2 GB de capacidad. Los sensores para determinar los flujos turbulentos fueron

muestreados a 10 Hz y el resto de sensores a 0.1 Hz. Los datos meteorológicos y de suelo fueron promediados a 30 min. Ambas series de datos fueron analizados para obtener valores diarios.

6.1.3. Agua en el suelo

Se colocaron sensores de humedad, tensión y temperatura de suelo para evaluar su comportamiento durante el ciclo del cultivo. También, se tomaron muestras de suelo semanalmente para la determinación de la humedad gravimétrica y corrección de los datos de los sensores de humedad, usando el valor de la densidad aparente (1.6 g cm^{-3}) previamente determinada en el sitio. Durante la determinación de la humedad gravimétrica fue obtenida la humedad volumétrica usando el sensor ML2 (Delta T), considerando que tiene un error del 1% previa corrección en la determinación de humedad volumétrica (Delta T, 1999; Schmutz y Namikas, 2011).

Cuadro 1. Sensores instalados en el cultivo de sandía, predio El Águila, Costa de Hermosillo, México.

Sensor	Variable	Altura (m)
Radiómetro neto (Kipp and Zonen)	Radiación neta	2.00
Analizador gases LI7500 (LICOR)	Concentración de H ₂ O y CO ₂	3.30
Anemómetro sónico CSAT3	Velocidad de viento (x, y, z)	3.30
Albedómetro (Kipp and Zonen)	Radiación solar y albedo	2.00
Higrómetro HMP50 (Vaisala)	Temperatura y humedad en aire	2.90
TDR CS616 (Campbell)	Humedad de suelo	-0.10, -0.20, -0.30 y -0.60
Termómetro 107 (Campbell)	Temperatura de suelo	-0.10, -0.20, -0.30 y -0.60
SHP	Flujo de calor en el suelo	-0.05 y -0.05
Tensiómetro (watermark)	Tensión del agua en el suelo	-0.30 y -0.60
Anemómetro 5103 (Young)	Velocidad y dirección de viento	3.40
Pluviómetro 525 (T. Electronics)	Lluvia	0.90
Adquisidor de datos CR5000		

En la determinación del contenido de agua en el suelo, se tomaron muestras del bulbo de humedecimiento, y fueron colocadas en recipientes de aluminio para pesarlas antes y después del secado en la estufa de convección a 105 °C por 24 h, hasta peso constante, y por diferencia de peso se obtuvo el porcentaje de humedad gravimétrica.

6.2. Área de estudio (chile)

El experimento en chile se realizó en el campo El Cafetal, de la agrícola Tricar, ubicado en el municipio de Navolato, Sinaloa; localizado geográficamente a una - 107.514444 N y 24.598611 O, a una altura de 10 m sobre el nivel del mar.



Figura 4. Área de estudio y equipo instalado, campo El Cafetal, Navolato, México.

6.2.1. Características del sitio experimental

Los suelos predominantes de la región son arcillosos (59.4% de arcilla), profundos, poseen una estructura migajosa con agregados muy estables en seco y pegajosos en húmedo; el porcentaje de limo es de 19.2% y de arena 21.4%, determinados mediante el método de la probeta.

La capacidad de campo se determinó utilizando la olla de presión y la membrana de presión, obteniendo 31.6% y un punto de marchitamiento permanente de 17.8%, y consta de una densidad aparente de 1.26 g cm^{-3} .

Se establecieron 90 ha de chile (*Capsicum annum*) bell papper (“Bunker”, “Revelation”, “Mini Bell” y “Baby Bell”), que se trasplantaron del 2 al 16 de septiembre de 2013.



Figura 5. Instrumentación instalada en el cultivo de chile.

6.2.2. Mediciones meteorológicas

Se utilizó un scintilómetro BLS450 (Scintec) que consta de un emisor y un receptor óptico con un dispositivo de posicionamiento, unidad procesadora de la señal (SPU) y un software (BLSRUN) para el sistema operativo Microsoft Windows. La frecuencia de emisión del láser seleccionada del transmisor fue de 5 Hz. El desnivel entre el emisor-receptor fue de 0.3590 m; es decir una pendiente de 0.0295%.

Se instalaron tres torres de acero, en dos de ellas se colocaron el emisor y receptor del scintilómetro a una distancia de 1,215 m, y en la tercer torre la estación climatológica para medir radiación neta, presión atmosférica, temperatura, humedad relativa, flujo de calor sensible (Cuadro 2).

El aporte de energía eléctrica estuvo dada por baterías con capacidad de 12 voltios, cubiertas con cajas de lámina galvanizada para su protección, las cuales solo trabajaron de noche ya que están conectados paneles solares (KYOCERA, modelo KC85T) que las recargan en el día junto con un controlador de corriente cada uno (modelo GPC-12-10-km).

Cuadro 2. Sensores instalados en el cultivo de chile, campo El Cafetal, Navolato, México, para determinar la evapotranspiración.

Sensor	Variable	Altura (m)
Scintilómetro BLS450 (Scintec)	flujo de calor sensible	6.20
Radiómetro neto (Kipp and Zonen)	Radiación neta	2.00
KFP01SC (Campbell Scientific®)	Flujo de calor en el suelo	-0.05 y -0.10
Anemómetro 5103 (Young)	Velocidad y dirección de viento	6
Barómetro	Presión atmosférica	2
Termómetro DTR503A (Vaisala Humicap)	Temperatura y humedad relativa	3 y 5
Adquisidor CR1000 (Campbell Scientific)		

6.3. Estimación de ET

6.3.1. Método gravimétrico

Se realizaron muestreos de suelo de 0-20 cm, 20-40 cm y 40-60 cm de profundidad, antes y después del riego y se pesaron húmedos en el campo y se llevaron a la estufa para secarlos a 105 °C hasta peso constante.

$$L = \Psi_i * D_a * P_r$$

Donde:

L = lamina consumida durante el lapso considerado, cm.

Psi = variación del porcentaje de humedad respecto al peso del suelo seco, antes y después del riego.

Da= densidad aparente del suelo.

Pr = espesor de la capa de muestreo

6.3.2. Método de la FAO-56

$$ET = Kc * ET_0$$

Donde:

ET = evapotranspiración del cultivo (mm día⁻¹)

ET₀ = evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹)

Kc es el coeficiente de cultivo

6.3.3. Método del scintilómetro

El scintilómetro mide H en la ecuación de balance de energía, los datos se corrieron en el Winlass. Posteriormente teniendo medidos la radiación neta y el calor latente del suelo, se despeja el flujo de calor latente que representa la evapotranspiración del cultivo, y se procede a realizar las operaciones.

$$R_n - G - \lambda ET - H = 0$$

Donde:

R_n = es la radiación neta que llega a la superficie

G = es el flujo de calor del suelo

H = es el flujo de calor sensible

λET = es flujo de calor latente.

6.3.4. Método de covarianza de vórtices (EC)

Con esta técnica se midieron los flujos de calor sensible y calor latente, mismos que fueron procesados para su posterior análisis.

$$R_n - G - \lambda ET - H = 0$$

Donde;

Rn = es la radiación neta que llega a la superficie

G = es el flujo de calor del suelo

H = es el flujo de calor sensible

λET = es flujo de calor latente.

6.5. Evapotranspiración y coeficiente de cultivo.

El cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_0) y Coeficiente de cultivo (K_c) fue realizado utilizando las ecuaciones propuestas por Doorenbos y Pruitt (1977) y Allen *et al.* (1998).

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{6.2}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)}$$

Donde;

ET_0 es la ET de referencia (mm día^{-1}), R_n es la radiación neta en la superficie del cultivo ($\text{Mj m}^{-2} \text{ día}^{-1}$), G representa el flujo de calor del suelo ($\text{Mj m}^{-2} \text{ día}^{-1}$), T es temperatura media del aire a 4 m de altura ($^{\circ}\text{C}$), U_2 es la velocidad del viento a 6 m de altura (m s^{-1}), e_s es presión de vapor de saturación (kPa), e_a presión real de vapor (kPa), Δ pendiente de la curva de presión de vapor ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$), γ constante psicrométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

$$K_c = K_{cb} * K_s + K_e = \frac{ET_c}{ET_0}$$

Donde;

K_{cb} es la transpiración del cultivo, K_s estrés hídrico, K_e la evaporación del suelo, y ET_c es la evapotranspiración medida (mm d^{-1}).

Considerando que el agua disponible como humedad de suelo para evapotranspirar fue menor al 50% de la diferencia de capacidad de campo y punto de marchitez permanente no se realizó corrección por estrés hídrico (K_s , $K_s=1$),

asimismo, considerando las dificultades técnicas para medir la transpiración y la evaporación por separado, se consideró el K_c como el cociente entre ET_c y ET_o .

6.4. Análisis estadístico

Los datos crudos obtenidos en el cultivo de sandía fueron procesados para obtener promedios cada 30 minutos, usando el programa EdyPro versión 4.1 desarrollado por LICOR (Burba, 2013). Finalmente se hicieron correcciones y particiones necesarias recomendadas por Burba (2013) usando el sitio: http://www.bgcjena.mpg.de/~MDIwork/eddyproc/output/20141205021959/results_ext.php. Considerando que la falta de cierre en la ecuación de balance fue de 10 a 20%, no fue aplicada la corrección de la relación de Bowen sugerida (Twine *et al.*, 2000), para la obtención de los flujos turbulentos.

Mientras que, los resultados obtenidos en el cultivo de chile en la variable de respuesta, fueron sometidos estadísticamente a regresión en Microsoft Excel. Se utilizó el modelo estadístico de Willmott (Willmott *et al.*, 2012), para medir la concordancia de los valores de modelos estimados con valores observados.

VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. Evapotranspiración en el cultivo de sandía

7.1.1. Variables meteorológicas

En la Figura 6, se muestra el comportamiento de las principales variables meteorológicas durante el ciclo de cultivo de la sandía. En ella se observa que durante los primeros ocho días la lluvia acumuló 66.8%, de los 292 mm precipitados durante todo el ciclo de cultivo, lo cual dificultó y retrasó el periodo de trasplante y propició la aparición de malezas de hoja ancha.

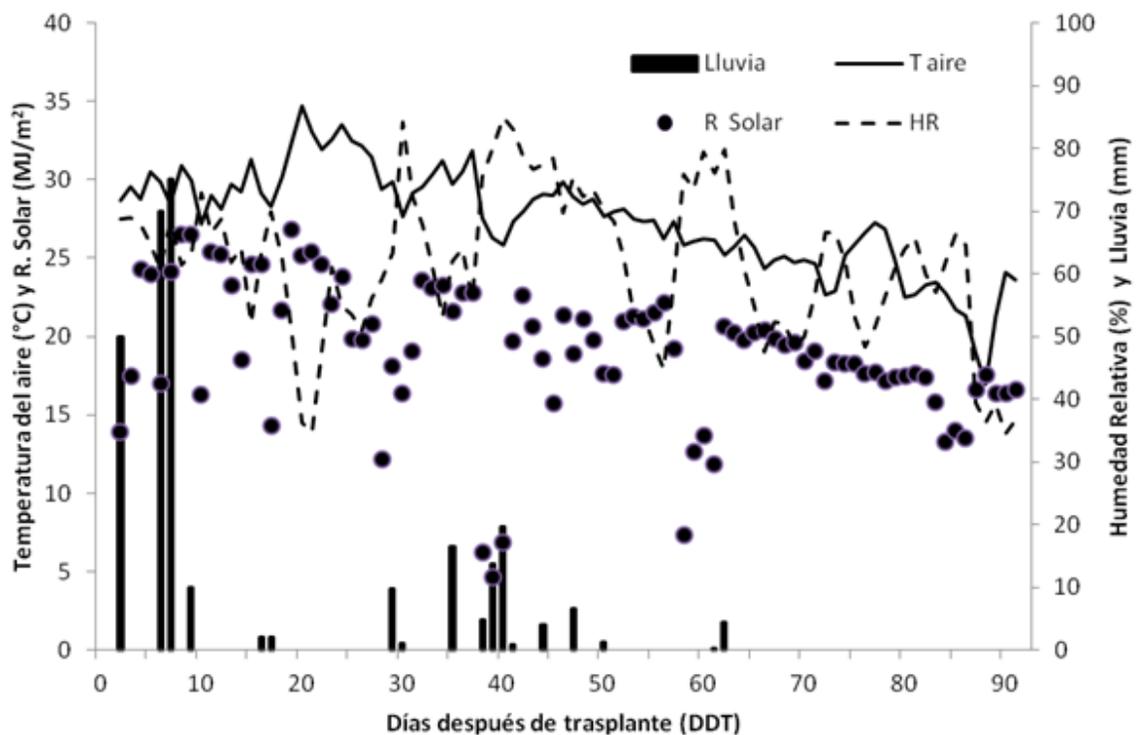


Figura 6. Comportamiento diario de temperatura, humedad relativa y precipitación durante el ciclo de cultivo de sandía en el predio El Águila.

Durante el trasplante ocurrieron tres de los nueve eventos con lluvia superiores a 5 mm. En el caso de la temperatura del aire (T aire), ésta presentó poca variación durante el mes de agosto debido a la importante presencia de precipitación y alta humedad relativa. Al inicio de septiembre la temperatura alcanzó sus máximos

valores para posteriormente disminuir y presentar menores variaciones hasta finalizar el ciclo del cultivo.

La humedad relativa (HR) presentó sus máximos durante y después de las lluvias, con valores superiores al 70% y los mínimos valores entre estos eventos, pero con tendencia a disminuir durante el resto del periodo, alcanzando valores inferiores al 40% en noviembre. La radiación solar (R_{solar}) tendió a decrecer desde la plantación hasta el fin de experimento, con una marcada disminución durante los días nublados, excepto cuando la precipitación fue vespertina o nocturna, como ocurre frecuentemente en la región de monzón mexicano (Douglas *et al.*, 1993).

7.1.2. Riego, humedad y tensión del agua en el suelo

El monitoreo de la humedad volumétrica de suelo (θ_v) inicia 17 días después del trasplante (DDT) y la figura 7 muestra el comportamiento del riego, la humedad (θ_v) y la tensión (ψ) de agua en el suelo. Se observa que durante las dos primeras semanas no se aplicó agua debido al importe por precipitación durante el trasplante. En el caso de la θ_v a 30 cm de profundidad del suelo (-30 cm), esta se mantuvo la mayor parte del ciclo del cultivo de sandía por encima de la capacidad de campo (CC); mientras que la θ_v a 60 cm de profundidad del suelo (-60 cm) inició por debajo de CC, para incrementarse hasta $0.24 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ previo a la cosecha que inició a los 60 DDT para disminuir hasta valores cercanos a $0.19 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ al final del cultivo, valores superiores a los observados por Ertek *et al.* (2006) para cucurbitáceas en suelo franco de características similares al experimento. Durante el periodo de desarrollo de frutos se observó una importante disminución en θ_v , presentando valores ($0.15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) a -30 cm por debajo de la θ_v ($0.17 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) a -60 cm, valor cercano al 50% de la humedad aprovechable, HA ($0.145 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). González *et al.* (2011), menciona que una práctica común entre los productores, es reducir el volumen de agua previo a la cosecha y en otras etapas fenológicas; sin embargo, Erdem y Yuksel (2003), menciona que reducción en el volumen de agua aplicado, principalmente en las etapas sensible reduce el rendimiento; por otra parte otros estudios demostraron que con reducciones del 15 y 33% de la HA maximizan el rendimiento, y en algunos casos hasta el 44% mayor que las

reducciones de 50% en la HA (Miller *et al.*, 2013; Miller *et al.*, 2014; Shulka *et al.*, 2014).

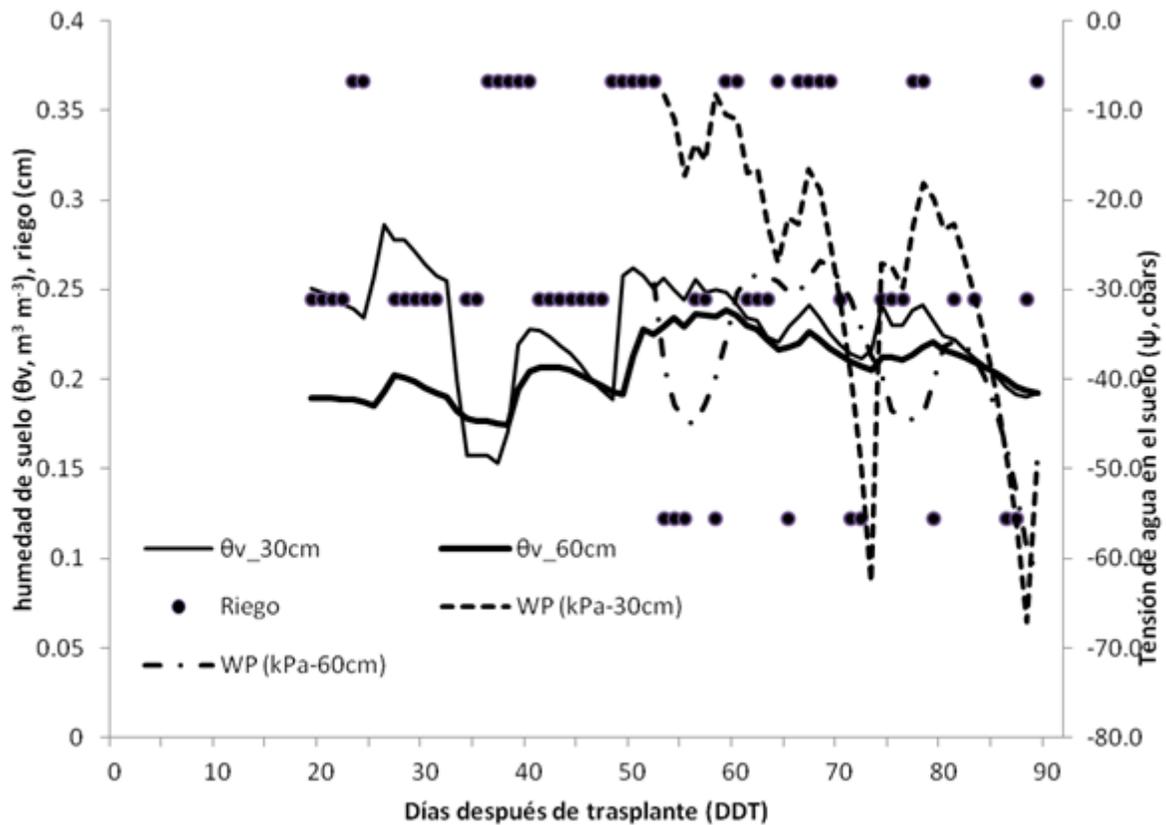


Figura 7. Riego, humedad volumétrica (θ_v) y, tensión del agua (WP) en el suelo en el cultivo de sandía, predio El Águila, Costa de Hermosillo.

En la misma figura se observa también la medición de la tensión de agua en el suelo (Ψ), las cuales iniciaron previo a la cosecha y se mantuvieron hasta el final. En ella se observa que previo a la cosecha la Ψ a -30 cm fue de -10 kPa, y -30 kPa a -60 cm de profundidad, tensiones que no producen estrés a la planta. Sin embargo, posterior a la primera cosecha la tensión comenzó a disminuir presentado dos eventos a -62 y -67 kPa que pueden producir estrés. Estos valores en general se observan entre -30 y -10 kPa, los cuales son recomendables para sandía y valores hasta de -75 kPa producen disminución en la biomasa y el rendimiento (González *et al.*, 2011; Bastos *et al.*, 2012); incluso, Sataya *et al.* (2002), sugiere que se aplique riego cuando la Ψ a -30 cm no rebase -41.2 kPa.

7.1.3. Evapotranspiración obtenida mediante el método FAO-56 (ET FAO-56) y la técnica covarianza de vórtices (ET EC) en el cultivo de sandía.

En la Figura 8 se muestra el comportamiento diario de la evapotranspiración (ET), evapotranspiración de referencia (ET_o) y coeficiente de cultivo (K_c). En ella se observa que la ET_o, presentó valores entre los 8 y 10 mm d⁻¹ al inicio del ciclo, para terminar a principios de noviembre con valores cercanos a los 3 mm d⁻¹. Estos últimos son similares a los observados por Rodríguez *et al.* (2011), los cuales son comunes en las zonas áridas calientes. Los decrementos ocurridos durante el periodo de estudio son ocasionados por días nublados o lluvias.

La medición de ET inició al igual que otras mediciones dos semanas después del trasplante. La ET EC y ET FAO-56 presentaron, al inicio de las mediciones, valores de 1 mm d⁻¹, similares a los obtenidos por Bastos *et al.* (2012) en etapas iniciales de desarrollo, para después incrementarse hasta valores de 6.7 y 5.0 mm d⁻¹, respectivamente, después de eventos de lluvia y, presentando valores inferiores a 2 mm d⁻¹ al final del ciclo.

Al inicio se observaron valores de K_c entre 0.10 y 0.20, similares a los obtenidos por Miranda *et al.* (2006) y Bastos *et al.* (2012), que después se incrementaron hasta alrededor de 0.60 durante la etapa de desarrollo (20 a 40 DDT). Durante la etapa intermedia (40 a 60 DDT) los valores mostraron poca variación, entre 0.60 y 0.70, pero fueron inferiores a los obtenidos por Miranda *et al.* (2006), Orgaz *et al.* (2005) y Bastos *et al.* (2012), quienes observaron valores superiores a 1.0, lo cual pudo ser debido al tipo y variedad cultivada, cobertura y estación del año. En la etapa final, considerada desde 60 hasta 90 DDT, se observa un decremento del K_c con valores entre 0.30 y 0.40, similares a los reportados por Bastos *et al.* (2012). Estos valores bajos de K_c pudieron deberse a la baja cobertura, la cual era de alrededor del 50% durante la etapa de desarrollo intermedia.



Figura 8. Evapotranspiración obtenida mediante el método FAO-56 (ET FAO-56) y la técnica covarianza de vórtices (ET EC); evapotranspiración de referencia (ET₀) y coeficiente de cultivo (K_c) de sandía en el predio El Águila, Costa de Hermosillo.

En el Cuadro 3, se muestran los valores lluvia, riego, ET, ET₀ y K_c que semanalmente se presentaron en el cultivo de sandía. En él se observa que la ET₀, para el periodo de 90 días, fue de 498 mm, superior a la estimada por Shulka *et al.* (2014), la cual fue de 384 mm en la región de Florida. La ET EC fue de 214 mm y la ET FAO-56 de 201 mm para el ciclo de 90 días e inferior a la observada por Shulka *et al.* (2014) para un ciclo de 83 días, la cual fue de 245 mm; así como con respecto a la observada por Bastos *et al.* (2012), de 234 mm, para un periodo de 65 días, en la Costa de Piauí, Brasil. En el mismo cuadro se observa que la máxima ET ocurre durante la etapa fenológica intermedia, cuando también se presentan el máximo K_c, la máxima transpiración, y se observa una disminución de la humedad del suelo a -30 y -60 cm (Figura 7), pero sin una disminución del riego y con presencia de lluvia (Figura 6).

Cuadro 3. Resumen semanal de lluvia, riego, evapotranspiración del cultivo (ET), evapotranspiración de referencia (ETo) y coeficiente de cultivo (Kc) de sandía, Costa de Hermosillo.

DDT	Semana	Lluvia	Riego	ET	ETo	Kc
/	/	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	/
0-4	0	50.0	0	-	-	-
5-11	1	155.0	0	16.44	43.21	-
12-18	2	4.0	0	15.69	37.78	-
19-25	3	0.0	17.10	10.09	60.03	0.17
26-32	4	10.7	12.22	19.00	43.32	0.44
33-39	5	54.6	15.88	16.02	36.20	0.44
40-46	6	11.4	19.55	24.77	38.36	0.65
47-53	7	1.3	23.21	24.03	38.98	0.62
54-60	8	0.3	13.44	18.25	38.57	0.47
61-67	9	4.3	19.55	20.42	41.88	0.49
68-74	10	0.0	15.88	15.01	35.67	0.42
75-81	11	0.0	15.88	14.34	34.73	0.41
82-88	12	0.0	7.33	10.49	26.34	0.40
89-95	13	0.0	6.11	9.83	23.21	0.42
<i>Suma</i>		<i>291.5</i>	<i>166.1</i>	<i>214.4</i>	<i>498.3</i>	

DDT = días después del trasplante.

El análisis de regresión ($R^2 = 0.91$) indica un buen ajuste entre la evapotranspiración determinada con la técnica de covarianza de vórtices (ET EC) y ET FAO-56. El índice de concordancia ($dr = 0.4$) muestra que no hay buena concordancia entre los mismos y, el RMSE (1.78) indica que el error es grande, ya que este cuanto más cercano es a cero es mejor.

Cuadro 4. Relación de los datos estimados con el análisis de Willmott (dr), RSME y R^2 , entre los métodos covarianza de vórtices (ET EC) y FAO-56 (ET FAO-56) en sandía cultivada en la Costa de Hermosillo, México.

Relación de datos estimados	RSME	R^2	dr
ET EC - ET FAO-56	1.78	0.91	0.4

7.2. Evapotranspiración en el cultivo de chile

7.2.1. Variables meteorológicas

Los valores de radiación neta (Rn), flujo de calor sensible (H), flujo de calor del suelo (G) y flujo de calor latente (LE), fueron positivas durante el día y, con excepción de Rn, negativos por la noche (Figura 9); misma razón por la cual, conforme la temperatura decrece el calor sensible del aire disminuye (FAO, 2010).

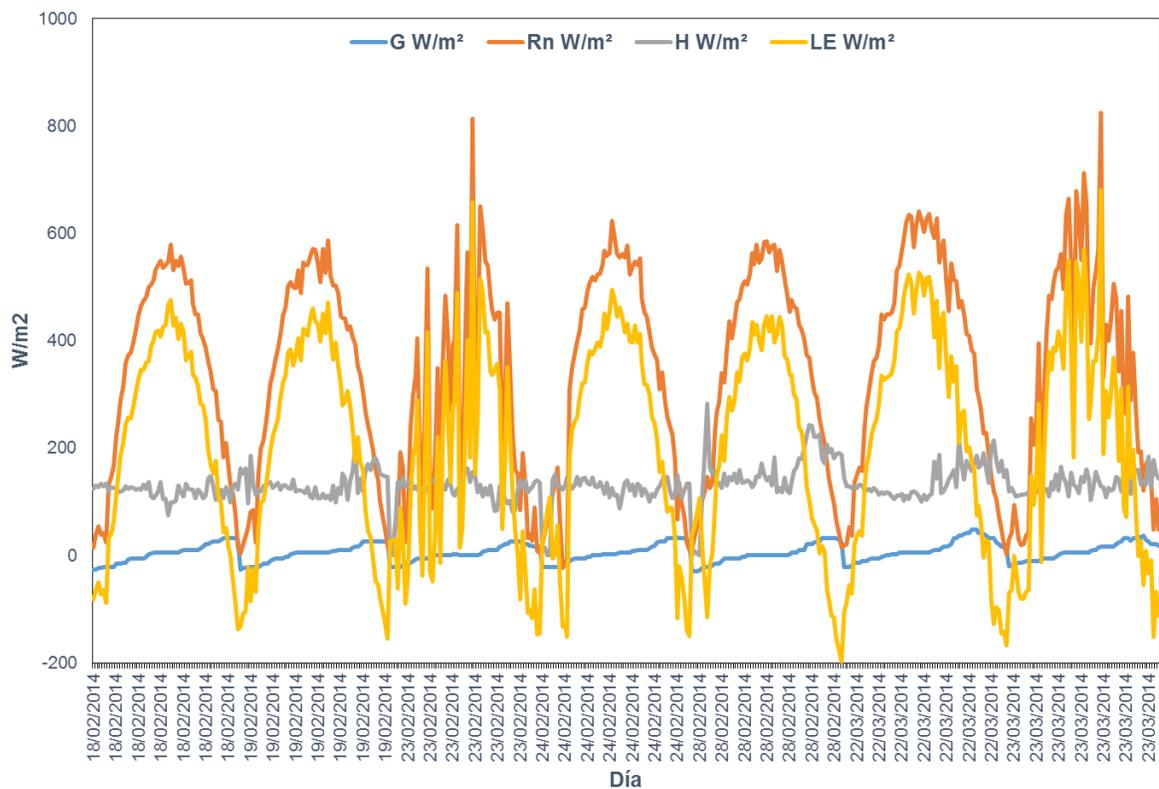


Figura 9. Comportamiento de las variables de energía, radiación neta (Rn), flujo de calor del suelo (G), flujo de calor sensible (H) y flujo de calor latente (LE), en chile cultivado en Navolato, Sinaloa.

7.2.2. Evapotranspiración obtenida mediante los métodos FAO-56 (ET FAO-56), scintilómetro (Scint) y gravimétrico (Grav), evapotranspiración de referencia (ETo) y coeficiente de cultivo (Kc) de chile.

La ET (Figura 10) determinada con el método gravimétrico fue ligeramente mayor a la estimada con el scintilómetro (ecuación de balance de energía); pero menor a la definida con el método FAO-56 (Penman-Monteith). Dicho dato, presentó un comportamiento similar entre el método de FAO-56 y el scintilómetro, durante el periodo de estudio, aunque con diferencias de hasta de 3 mm d⁻¹. Según Rodríguez *et al.* (2011), en un estudio realizado en el Valle del Yaqui la ET del cultivo del chile banana fue de 327 mm durante un ciclo de 120 días.

La ET durante el periodo de estudio, medida con el método gravimétrico, fue de 3.6 mm d⁻¹, con el scintilómetro 3.1 mm d⁻¹, mientras que con el método FAO-56 de 4.5 mm d⁻¹; éste último dato, mayor incluso que la lámina de riego aplicada (4 mm d⁻¹).

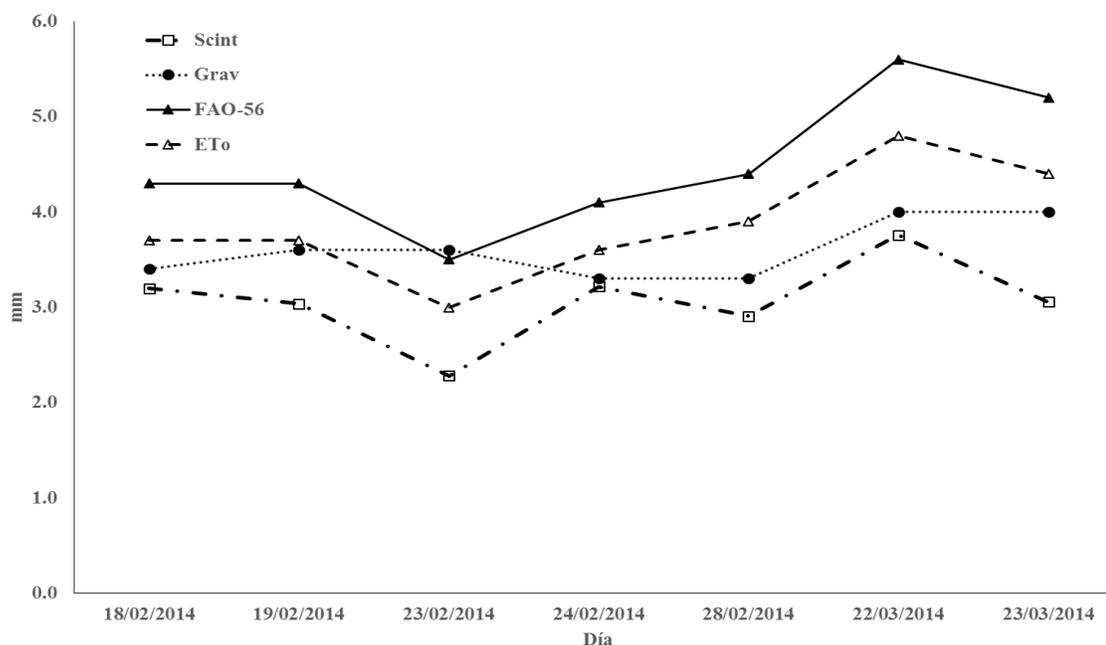


Figura 10. Comportamiento de la evapotranspiración del cultivo (ET) determinada con el método FAO-56, scintilómetro (Scint) y gravimétrico (Grav), y de la evapotranspiración de referencia (ETo) en cultivo de chile en Navolato, Sinaloa.

La evapotranspiración de referencia (ET_o) fue menor que la evapotranspiración del cultivo (ET) durante todo el periodo de estudio, esto debido a que el suelo se encontraba en condiciones óptimas de humedad; contrario a lo encontrado por López *et al.* (2010), donde la ET fue mayor que la ET_o en la etapa de media del cultivo de tomate. La ET_o y la ET serán iguales siempre que la humedad del suelo sea óptima y que exista un buen desarrollo del cultivo (Sánchez, 2010). Se observaron coeficiente del cultivo (K_c), de 1.13 y 1.18 en etapa de producción, superiores a los encontrados por Rodríguez *et al.* (2011) de 0.8 y 0.9 en el Valle del Yaqui.

De acuerdo al valor *dr* obtenido de 0.48 (Cuadro 4), existe una buena concordancia para estimar ET entre los métodos gravimétrico y scintilómetro, lo cual, de acuerdo con el modelo de Willmott, indica que la suma de la magnitud del error, es menor entre el modelo de predicción (gravimétrico) y el de los valores observados (scintilómetro). Un valor *dr* = 0.5 indica que la magnitud del error es la mitad, de la suma de las desviaciones del modelo de predicción y la magnitud de la desviación observada; mientras que un valor *dr* = 0 indica que la magnitud del error, es igual a la desviación del modelo de predicción y la desviación de la magnitud observada (Willmott *et al.*, 2011).

Cuadro 5. Relación de los datos estimados con el análisis de Willmott (*dr*), RSME y R², entre los métodos FAO-56, scintilómetro (Scint) y gravimétrico (Grav) en chile cultivado en Navolato, Sinaloa.

Relación de datos estimados	RSME	R ²	<i>dr</i>
Grav - Scint	0.68	0.10	0.48
Scint - FAO-56	1.48	0.62	0.35
Grav - FAO-56	1.01	0.49	0.45

El mayor ajuste con relación a los métodos utilizados para estimar ET, fue el que se observó entre FAO-56 y scintilómetro (Scint), con un coeficiente de correlación de Pearson (R²) de 0.62.

VIII.CONCLUSIONES

- De acuerdo con los resultados obtenidos la técnica de covarianza de vórtices (EC) es recomendable para determinar ET, la cual fue de 214 mm, por 201 mm estimados con el método FAO-56, durante el ciclo del cultivo. La humedad de suelo (θ_v) con frecuencia estuvo cerca o por encima de CC a profundidades estudiadas, lo que implica que se aplicó más agua de la requerida por la sandía.
- La ET estimada con el método del scintilómetro, tomando como referencia el método gravimétrico, aunque no presentó el mayor coeficiente de determinación (R^2), si mostró el mayor índice de concordancia (dr); por lo que se concluye que es el método más apropiado para determinar la evapotranspiración en el cultivo de chile. La ET promedio del cultivo de chile, estimada con el método FAO-56, fue de 4.5 mm d^{-1} , mayor que la lámina de riego aplicada; por lo que en este trabajo no resultó ser un método preciso para calcular la evapotranspiración.

IX. LITERATURA CITADA

- Aboukhaled, A., Alfaro, A y Smith, M. 1982. Lysimeters. Irrigation and drainage paper 39. FAO, Roma. 68 pp.
- Allen, R. G., Jensen, M. E., Wright, J. L., y Burman, R. D. 1989. Operational estimates of reference evapotranspiration. *Agronomy Journal*. 81: 650-662.
- Allen, R. G., Howell, T. A., Pruitt, W y Jesen, M. E. 1991. Lysimeters for Evapotranspiration an Evironmental Measurement. Amer. Soc. Civil Eng. New York. 444.
- Allen, R.G., Pereira L.S., Raes D. and Smith M. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper No. 56. Rome, Italy. 203 pp.
- Alva, A. K and Fares, A. 1998. A new technique for continuous monitoring of soil water content to improve citrus irrigation. *Proc. Fla. State. Hort. Soc.* 111: 113-117.
- Anónimo, 2014. Curso: diseño de sistemas de riego 1. Facultad de Ingeniería Agrícola. Universidad Nacional del Altiplano Puno. pp: 71. Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/59331500/66/METODOS-PARA-DETERMINAR-LA-EVAPOTRANSPIRACION-POTENCIAL> (Consultado en Enero, 2014).
- Baldocchi, D. D. 2003. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Global Change Biology*. 9: 479-492.
- Bastos, A. E., Silva, R. C., Rodrigues, N. B. H., Andrade JR, S. A y Ibiapina, M. L. M. 2012. Evapotranspiration and crop coeficient of drip irrigated watermelon in Piaui Coastline, Brazil. *Eng. Agric., Jaboticabal*. 32(3): 582-590.
- Beyrich, F., Kouznetsov, R.D., Leps, J. P., Lüdi, A., Meijninger, W.M.L. and Weisensee, U. 2005: Structure parameters for temperature and humidity from simultaneous eddy-covariance and scintillometer measurements. *Meteorolischer Zeitung*. 14: 641-649.
- Bittelli, M. 2010. Measuring Soil Water Potential for Water Management in Agriculture: A Review. *Sustainability*, (2): 1226-1251.

- Bonan, B. G., Lawrence, J. P., Oleson, W. K., Levis, S., Jung, M., Reichstein, M., Lawrence, M. D and Swenson, C. S. 2011. Improving canopy processes in the Community Land Model version 4 (CLM4) using global flux fields empirically inferred from FLUXNET data. *Journal of Geophysical Research*. 116: 1-22.
- Bowen, I. S. 1926. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water superface. *Phys. Rev.* 2: 779-787.
- Burba, G. 2013. Eddy Covariance Method for Scientific, Industrial, Agricultural, and Regulatory Applications. Lincoln, Nebraska USA. 345 pp.
- Castañeda, I., C. R. 2013. Estimación de la evapotranspiración mediante un balance de energía utilizando sensores remotos. Tesis. Colegio de postgraduados. México. 113 pp.
- CAMPBELL SCIENTIFIC, INC. 2012. Model HFP01 Soil Heat Flux Plate.pdf. Disponible en: s.campbellsci.com/documents/us/manuals/hfp01.pdf (consultado en enero del 2014).
- Campeche, L.F.S.M. 2002. Construcción, calibración y análisis del funcionamiento de lisímetros de pesagem para determinación de la evapotranspiración del cultivo de lima ácida 'Tahiti' (*Citrus latifolia Tan.*). 62 f. Tesis (Doctorado) - Escuela Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidad de San Paulo, Piracicaba. 67 pp.
- Cenobio, G. P., Mendoza, M. S. F., Sánchez, C. I. y Inzunza, I. M. A. 2004. Respuesta de la sandía (*Citrullus lanatus T.*) a diferentes colores de acolchado plástico y riego por goteo cintilla. *Rev. Chapingo. Zonas Áridas*. 3: 89-97.
- CONAGUA. 2013. Estadísticas del agua en México. Comisión Nacional del AGUA-SEMARNAT, México DF. 176 pp.
- Delta _T, 1999, *ThetaProbe SOIL MOISTURE*. Manual Sensor. Delta _T, UK.
- Doorenbos J. y W.O. Pruitt, 1975, Guidelines for predicting crop water requirements, Irrigation and drainage paper 24, FAO, Rome, 179 pp.
- Douglas, M.W., Maddox, R.A., Howard, K., 1993. The Mexican monsoon. *Journal of Climate*. 6: 1665–1677.

- Erdem, Y and Nedim, Y. A. 2003. Yield response of watermelon to irrigation shortage. *Scientia Horticulturae* 98: 365–383.
- Ertek A., S. Sensoy., I. Gedik, and C. Kucukyumuk .2006. Irrigation scheduling based on pan evaporation values for cucumber (*Cucumis sativus* L.) grown under field conditions. *Agricultural Water Management*. 81:159–172.
- Ezzahar, J., Chehbouni, A., Hoedjes, J. C. B., Chehbouni, A., 2007. On the application of scintillometry over heterogeneous surfaces. *J. Hydrol.* 34: 493-501.
- FAO, 2010. Protección contra las heladas: fundamentos, práctica y economía. Capítulo 3: Mecanismos de transferencia de energía. 45-71. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/012/y7223s/y7223s04.pdf> (Consultado el 20 de Agosto 2014).
- FAO. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. 1-15 pp.
- Fereres, E and Soriano, M. A. 2007. Deficit Irrigation for Reducing Agricultural Water Use. *Journal of Experimental Botany*. 58: 147-159.
- Gomez, E. A., Rojas, P. H., Vallejo, C. F. A., Ivan, E. E. 2010. Determinación del requerimiento hídrico del pimenton en el municipio de Candelaria, departamento del Valle de Cauca. *Acta agronómica*. 59 (4): 442-448.
- Gonzalez A. M., S. Bonachela, and M. D. Fernandez. 2011. Regulated deficit irrigation in green bean and watermelon greenhouse crops. *Scientia Horticultura*. 122: 527–531.
- Hamdy, A., Ragab, R and Scarascia-Mugnozza, E. 2003. Coping with water scarcity: water saving and increasing water productivity. *Irrig. Drain*, 1: 3–20.
- Hartogensis, O. K., Watts, C. J., Rodríguez, J. C., and De Bruin, H. A. R. 2003. Derivation of an effective height for scintillometers: La Poza experiment in northwest Mexico. *J. Hydrometeor.* 4: 915-928.
- Hoedjes, J. C. B., Zuurbier, R. M., and Watts, C. J. 2002. Large aperture scintillometer used over a homogeneous irrigated area, partly affected by regional advection. *Bound.-Layer Meteor.* 105: 99-117.

- Hupet, F. Y Vanclooster, M. 2001. Effect of the sampling frequency of meteorological variables on the estimation of the reference evapotranspiration. *J. Hydrology*, 243: 192-204.
- Kustas, W. P. Y Norman, J. M. 1999. Evolution of soil and vegetation heat flux predictions using a simple two-source model with radiometric temperatures for partial canopy cover. *Agr, and forest met.*, 94: 13-29.
- KYOSERA, 2013. Solar panels. Disponible en: <http://www.kyocerasolar.com/residential-solutions/solar-panels/current-products.htm>. (Consultado en Diciembre, 2013).
- López, L. R., Arteaga, R. R., Vázquez, P. M. A., López, C. I. L., Sánchez, C. I. 2010. Evapotranspiración del cultivo de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.) estimada mediante el potencial mátrico del suelo. *Rev. Fitotecnia Mexicana*. 33 (2): 157-168.
- Ludlow, M. M. 1970. Effect of oxygen concentration on leaf photosynthesis and resistances to carbon dioxide diffusion. *Plant*. 91 (4): 285-290.
- Marek, T.; Piccinni, G.; Schneider, A.; Howell, T.; Jett, M.; Dusek, D. 2006. Weighing lysimeters for the determination of crop water requirements and crop coefficients. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, St. Joseph. 22 (6):851-856.
- Meijninger, W.M.L., Hartogensis, O.K., Kohsiek, W., Hoedjes, J.C.B., Zuurbier, R.M. and DeBruin, H.A.R. 2002: Determination of the area-averaged sensible heat fluxes with a large aperture scintillometer over a heterogeneous surface, *Boundary-Layer Meteorology*. 105: 37-62.
- Miller G., A. Khalilian, J. W. Adelberg, H. J. Farahani, R. L. Hassell, C. E. Wells. 2013. Grafted Watermelon Root Length Density and Distribution under Different Soil Moisture Treatments. *HORTSCIENCE*. 48(8):1021–1026.
- Miller G.A., Farahani, H.J., Hassell, R. L., Khalilian, A. Adelberg, J.W and Wells, C. E. 2014. Field evaluation and performance of capacitance probes for automated drip irrigation of watermelons. *Agricultural Water Management*. 131:124– 134.

- Miranda, F. R., Goncalves, O. J. J.G and Souza, F. 2004. Evapotranspiração máxima e coeficiente de cultivo para a cultura da melancia. *Revista Ciencia Agronómica*. 35: 36-43.
- Norman, J., Kustas, W. y Humes, K. 1995. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperatures. *Agr. And forest Met.*, 77: 263-293.
- Orgaz, F., Fernandez, M. D., Bonachela, S., Gallardo, M., Fereres, E., 2005. Evapotranspiration of horticultural crops in an unheated plastic greenhouse. *Agric. WaterManage*. 72 (2): 81–96.
- Radulovich, R. 2009. Método gravimétrico para determinar in situ la humedad volumétrica del suelo. *Agronomía costarricense* 33 (1): 121-124.
- Rey, García, A. R. y Delibaltov, G. Y. 1982: Metodología para pronosticar el momento óptimo de riego en los cultivos agrícolas cubanos. Método bioclimático, Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje, Ministerio de la Agricultura, Cuba. 8 pp.
- Rodríguez, J. C., Watts, C., Garatuza-Payan, J., Rivera, M. A., Lizárraga-Celaya, C., López-Elias, J., Ochoa-Meza, A., Moreno-Salazar, S. F. y Renteria-Martinez, M. E. 2011. Evapotranspiración y coeficiente de cultivo en chile banana (*Capsicum annum* L.) en el Valle del Yaqui, Mexico. *BIO tecnia*. Vol. 13 (3). 28-35.
- Sánchez, S R. F. J. (2010). Concepto de Evapotranspiración. *Evapotranspiración*. Dpto. Geología, Universidad Salamanca: 1-8 pp.
- Sánchez, M. M., L. Carvacho, B. 2011. Comparación de ecuaciones empíricas para el cálculo de la evapotranspiración de referencia en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*. Instituto de Geografía. 50: 171-186.
- Sataya, D. J. M., Carrillo, A. E., Palacios, V. O. L., Aceves, N. L. A. y Juárez, L. J. F. 2002. Respuesta del cultivo de sandía (*Citrullus vulgaris* schrad) al potencial de agua en el suelo. *Rev. Fitotecnia Mexicana*. 25 (3): 127-133.

- Scintec, 2008. Scintec Boundary Layer Scintillometer. User Manual. Disponible en: www.wittich.nl/NL/PDF/.../BLS_Manual_1_49.pdf (Consultado en Octubre, 2013).
- Servicio de conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. 1997. Capítulo 2, parte 623. Requerimientos de agua para riego. Traducido por la Comisión Nacional del Agua y el Colegio de Postgraduados. Distrito Federal México.
- SEMARNAT, 2012. Informe de la situación del medio ambiente en México. Capítulo 6. Agua. Disponible en: http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/06_agua/cap6_2.html (consultado el 6 de Octubre de 2013).
- Shukla, S., Shrestha, K. N., Jaber, H. F., Srivastava, S., Obreza, A. T and Boman, J. B. 2014. Evapotranspiration and crop coefficient for watermelon grown under plastic mulched conditions in sub-tropical Florida. *Agricultural Water Management*, 132: 1– 9.
- Schmutz, P. P. and Namikas, S. L. 2011. Utility of the Delta-T Theta Probe for Obtaining Surface Moisture Measurements from Beaches. *Journal of Coastal Research*, 27(3):478-484.
- SIAP, 2015. Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera. México. www.siap.com.mx (consultado en Junio de 2015).
- SQM, 2007. CropKit. Guía de manejo de nutrición vegetal de especialidad: Pimiento. Disponible en: http://www.sqm.com/Portals/0/pdf/cropKits/SQM-Crop_Kit_Pepper_L-ES.pdf (Consultado en Junio, 2015).
- Twine T.E., W.P. Kustas, J.M. Norman, D.R. Cook, P.R. Houser, T.P. Meyers, J.H. Prueger, P.J. Starks y M.L. Wesely, 2000. Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland, *Agric. For. Meteorol.* 103: 279-300.
- VAISALA, 2013. Meteorología. Productos: instrumentos meteorológicos. Disponible en: <http://es.vaisala.com/sp/meteorology/products/Pages/default.aspx> (consultado en Septiembre de 2013).

- Villaman, P. R., Tijerina C. L., Quevedo N. A., Crespo, P. G. (2001). Comparación de algunos métodos micrometeorológicos para estimar la evapotranspiración en el área de Montecillo, México. *Terra Latinoamericana*. 19 (3): 281-291.
- Villanueva-Díaz, J., Loredó-osti, C., Hernández-Reyna, A. 2001. Requerimientos hídricos de especies anuales y perennes en las zonas media y altiplano de San Luis Potosí. Num.12. 31 pp.
- Watts, C.J., Chehbouni, A., Rodríguez, J. C., Y.H. Kerr, Hartogensis. O., De Bruin, H. A. R. 2000. Comparison of sensible heat flux estimates using AVHRR with scintillometer in northwest Mexico. *Agric. For. Meteorol.* 105: 81-89.
- Willmott, C. J., Robeson, S. M. and Matsuura, K. 2011. A refined index of model performance. *International Journal of Climatology*. DOI: 10.1002/joc.2419.
- YOUNG, 2013. Anemómetro Wind Monitor. Disponible en: <http://www.ambimet.cl/equipos-cientificos/equipos/anemometro.html> (Consultado en Octubre, 2013).