

TESIS DEFENDIDA POR  
**José Ismael Velázquez Mendoza**  
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

---

Dr. Edgar Gerardo Pavia López  
*Director del Comité*

---

Dr. Federico Graef Ziehl  
*Miembro del Comité*

---

Dr. Thomas Kretschmar  
*Miembro del Comité*

---

Dr. Antonio González Fernández  
*Coordinador del programa de posgrado  
en Ciencias de la Tierra*

---

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales  
*Director de Estudios de Posgrado*

20 de septiembre de 2010

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR  
DE ENSENADA**



---

**PROGRAMA DE POSGRADO  
EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

---

**Cuantificación y análisis temporal de la evaporación natural en arenas húmedas.**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de  
MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

**JOSÉ ISMAEL VELÁZQUEZ MENDOZA**

Ensenada, Baja California, México, 20 de Septiembre de 2010

**RESUMEN** de la tesis de **José Ismael Velázquez Mendoza**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias de la Tierra con orientación en Geociencias Ambientales, Ensenada, Baja California. 20 de Septiembre del 2010

### **Cuantificación y análisis temporal de la evaporación natural en arenas húmedas.**

Resumen aprobado por:

---

Dr. Edgar Gerardo Pavía López  
Director de Tesis

En este trabajo se pretende determinar experimentalmente la evaporación natural en arenas húmedas y compararla con la evaporación natural del agua simple. Lo anterior con el fin de conocer cuáles son, y de qué manera influyen, las variables ambientales que determinan esta evaporación; así como conocer los detalles de su evolución temporal y las características de este proceso.

Este trabajo es de gran importancia técnica y científica, ya que tiene desde implicaciones básicas (como contribuir a una mejor evaluación del ciclo hidrológico global), hasta aplicaciones prácticas (como optimizar el riego de cultivos en zonas áridas y semiáridas). Sin embargo nuestra motivación original es contribuir a cuantificar el problema ambiental provocado por la extracción de arena en los arroyos locales; ya que al parecer la explotación de materiales pétreos se ha incrementado considerablemente en esta zona en los últimos años.

Los experimentos se llevaron a cabo en el Laboratorio de Pronósticos Meteorológicos del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE) durante 2009 y 2010. Y consistieron básicamente en medir de manera continua el peso de dos bandejas de evaporación, una con agua y la otra con arena húmeda, expuestas al aire libre para que sean afectadas por el medio ambiente. Las bandejas se colocaron cada una sobre una báscula, protegidas del efecto de las aves por una red, y cerca de la estación meteorológica del CICESE. Las series temporales de los pesos medidos en las bandejas se pueden considerar como índices de las tasas de evaporación natural. Este experimento a su vez puede considerarse como un modelo simple del escenario que esperamos encontrar en los arroyos de la región bajo condiciones ambientales comparables.

Los valores experimentales de evaporación de este trabajo son comparables a los valores climatológicos reportados en estaciones cercanas, por lo que podemos considerar nuestros resultados confiables. En general la arena húmeda evaporó más que el agua; sin embargo en condiciones extremas el agua evaporó más que la arena: un comportamiento similar a la relación complementaria (Bouchet 1963), a pesar de que nuestras escalas son más pequeñas que las utilizadas por Bouchet.

**Palabras Clave:** Evaporación natural, Relación complementaria de Bouchet, Tanques de evaporación

**ABSTRACT** of the thesis presented by **José Ismael Velázquez Mendoza** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Earth Science with orientation in Environmental Geosciences. Ensenada, Baja California, México. 20 September, 2010.

### **Quantification and temporal analysis of natural evaporation from wet sand.**

In this work we aim to estimate by experimental means natural evaporation from wet sand and compare it with plain-water's natural evaporation; this in order to find which environmental variables play an important role on this evaporation and how they affect it. We also aim to know their temporal evolution and the details of these processes.

The above is of great technical and scientific importance, since it has implications for basic studies (like the better evaluation of the global hydrological cycle) as well as practical applications (like optimal watering of cropping-fields in arid regions). However our original motivation was to contribute to the better assessment of the environmental problem caused by sand-extraction from local dry riverbeds, which has been increasing in recent years.

The experiments were carried out at CICESE during 2009 and 2010; they basically consist in the continuous weighing of two evaporating trays, one with water and the other with wet sand, exposed to open-air ambient conditions. The bird-guarded trays were placed on electronic balances close to CICESE's weather station. Both time series of weights are considered to be indices of natural evaporation rates. This experiment, in turn, may be considered as a simple model of the local dry riverbed scenarios under similar environmental conditions.

Our experimental natural evaporation estimates are comparable to climatological values reported in nearby climatological stations, so that we can consider these values as reliable. Generally wet sand evaporates more than plain water, nevertheless under extreme dryness conditions water evaporates more than wet sand: a behavior similar to Bouchet's complementary relationship, although our temporal and spatial scales are smaller than the ones used by Bouchet (1963).

**Keywords:** Natural Evaporation, Bouchet's Complementary Relationship, Pan Evaporation

## DEDICATORIAS

A mi papá y mamá porque sin ustedes nunca podría haber realizado esta etapa de mi vida.

A mis hermanos, Teresa y César.

A mis sobrinas Natalia y Danaé.

## AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Edgar Pavia por su inigualable paciencia y su incondicional apoyo.

Al Meteorólogo Santiago Higareda por su constante apoyo.

Al Dr. Federico Graef por las atenciones recibidas.

Al Dr. Thomas Kretzschmar por sus observaciones en la elaboración de este trabajo.

A Mauro Valdés y Héctor Estévez, por su amistad y todo el apoyo proporcionado.

A mis amigos por todo su apoyo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (*CONACYT*) por haberme proporcionado una beca para la elaboración de este trabajo.

## CONTENIDO

	<b>Página</b>
<b>Resumen español</b> .....	I
<b>Resumen inglés</b> .....	II
<b>Dedicatorias</b> .....	III
<b>Agradecimientos</b> .....	IV
<b>Contenido</b> .....	V
<b>Lista de Figuras</b> .....	VI
<b>Lista de Tablas</b> .....	IX
<b>Capítulo I. Introducción</b> .....	1
I.1 Diferencia entre evaporación y evaporación natural.....	3
I.2 Definiciones.....	5
I.3 Importancia.....	6
I.4 Influencia ambiental.....	7
I.5 Medición de la evaporación.....	7
I.6 Estimación de la evaporación.....	10
I.6.1. Método de balance de energía.....	10
I.6.2. Método de transferencia de masa.....	10
I.6.3. Método de Penman.....	11
1.7 Motivación de la investigación.....	11
<b>Capítulo II. Metodología</b> .....	13
<b>Capítulo III. Resultados experimentales</b> .....	17
III.1 Experimento principal.....	17
III.2 Cambio en el protocolo de recarga.....	27
III.3 Otros experimentos.....	33
III.3.1 Experimentos con capas gruesas.....	33
III.3.2 Experimentos durante la lluvia.....	39
III.3.3 Experimentos con protección en paredes laterales.....	42

## CONTENIDO (continuación)

	<b>Página</b>
<b>Capítulo IV. Discusión.....</b>	46
<b>Capítulo V. Conclusiones.....</b>	51
<b>Bibliografía.....</b>	53



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura</b>		<b>Página</b>
1	Demostración esquemática del fenómeno de la evaporación.....	4
2	Variación diurna de la radiación solar. Comparación de días representativos de Invierno y Verano.....	7
3	Esquema básico de un tanque de evaporación.....	9
4	Sitio de extracción de arenas en arroyo El Barbón, mostrando una altura de excavación de 2.3 m el 23 de febrero del 2002 (Grupo de investigación Ojos Negros).....	12
5	Bandeja de evaporación utilizada en el experimento principal.....	13
6	Charolas de evaporación colocadas junto a la estación meteorológica. Arena húmeda (derecha) y agua (izquierda).....	16
7	Periodo del 19 de febrero al 3 de abril del 2009. Panel superior peso de las bandejas. Panel inferior tasas de evaporación.....	18
8	Variaciones diurnas de evaporación. Periodo del 19 de febrero al 3 de abril del 2009.....	19
9	Temperaturas del aire y de las charolas de evaporación. Periodo del 19 de febrero al 3 de abril del 2009.....	20
10	Periodo del 14 de abril al 9 de junio del 2009. Panel superior peso de las bandejas. Panel inferior tasas de evaporación.....	21
11	Malla protectora para evitar que las aves afecten las estimaciones de evaporación.....	22

## LISTA DE FIGURAS (continuación)

<b>Figura</b>		<b>Página</b>
12	Efectos por la llegada de aves. Panel superior aumento del peso en las bandejas. Panel inferior efectos en las estimaciones de $E$ .....	23
13	18 de abril del 2009, evento extremo de evaporación.....	24
14	$R$ y $T_{ia}$ durante el evento extremo de evaporación.....	25
15	Variaciones diurnas de evaporación. Periodo del 14 de abril al 9 de junio del 2009.....	24
16	Temperatura de las superficies de evaporación. Periodo del 14 de abril al 9 de junio del 2009.....	26
17	Periodo del 10 de junio al 16 de julio del 2009. Panel superior peso de las bandejas. Panel inferior tasas de evaporación.....	27
18	Detalle del evento de condensación del 16 de junio del 2009.....	28
19	Variables Meteorológicas durante el evento de condensación del 16 de junio del 2009.....	29
20	Periodo del 7 de agosto al 5 de septiembre del 2009. Panel superior peso de las bandejas. Panel inferior tasas de evaporación.....	30
21	Periodo del 7 de septiembre al 2 de noviembre del 2009. Panel superior peso de las bandejas. Panel inferior tasas de evaporación.....	31
22	Ampliación del evento de condensación del 20 de octubre del 2009...	32
23	Variables Meteorológicas durante el evento de condensación del 20 de octubre del 2009.....	32
24	Charolas empleadas en el experimento de capas gruesas.....	34

## LISTA DE FIGURAS (continuación)

<b>Figura</b>		<b>Página</b>
25	Espesor de la capa de arena húmeda más gruesa (0.03 m).....	35
26	Periodo del 2 al 30 de noviembre del 2009. Panel superior peso de las bandejas. Panel inferior tasas de evaporación.....	36
27	Temperatura de las superficies, periodo del 2 al 30 de noviembre del 2009.....	36
28	Aumento del espesor de la capa de arena a 0.05 m.....	37
29	Periodo del 30 de noviembre al 7 de diciembre 2009. Panel superior peso de las bandejas. Panel inferior tasas de evaporación.....	38
30	Temperaturas de las superficies, periodo del 30 de noviembre al 7 de diciembre.....	38
31	Evaporación durante la temporada de lluvias. Periodo del 3 al 24 de febrero.....	39
32	Evaporación durante la temporada de lluvias. Periodo del 21 de abril al 3 de mayo de 2010.....	40
33	$P$ para el periodo del 3 al 24 de febrero del 2010.....	40
34	$P$ para el periodo de 21 de abril al 3 de mayo de 2010.....	41
35	Panel superior, valores de $E_{i,j}$ durante las lluvias del 2010. Panel inferior $E_{i,j}$ durante el 2009.....	42
36	De lado izquierdo bandeja con protección en las paredes laterales. Lado derecho, bandeja sin protección lateral.....	43
37	Valores de $E_{i,j}$ con protección y sin protección de paredes laterales.....	44

## LISTA DE FIGURAS (continuación)

<b>Figura</b>		<b>Página</b>
38	Evaporación normalizada como función del índice de aridez para el periodo del 14 de abril al 9 de junio del 2009.....	47
39	Series de tiempo de evaporación durante el 25 de mayo del 2009.....	48
40	Evaporación como función del índice de aridez para el 25 de mayo del 2009.....	49
41	Representación esquemática de la relación complementaria propuesta por Bouchet (1963).....	49
42	$T_{ia}$ , $T_{is}$ y $T_{iw}$ para los días 24 – 26 de mayo.....	50
43	$R_i$ y $H_i$ del 21 al 28 de mayo de 2010.....	50

LISTA DE TABLAS

<b>Tabla</b>		<b>Página</b>
I	Estimación de la evaporación diaria promedio. $E_1$ , arena húmeda (este trabajo); $E_2$ , agua (este trabajo); $E_3$ , Ensenada; $E_4$ , El Ciprés; $E_5$ , San Diego.....	45

---

## Capítulo I. Introducción

---

La distribución de los océanos y de los continentes marca la más importante diferencia entre las dos principales fuentes de evaporación. Por un lado tenemos los océanos libres de hielo que abarcan alrededor del 65% de la superficie total del planeta y es ahí donde se lleva a cabo la mayor parte de la evaporación\*, la cual podemos llamar “evaporación oceánica”. Por otro lado el 29% restante de la superficie de la Tierra, aunque no está cubierta de agua, posee importantes fuentes de evaporación localizadas en los cuerpos de agua superficiales (sean perennes o estacionales), en el suelo (y subsuelo), en las plantas (transpiración) y en el resto de la superficie cuando existe precipitación o alguna otra fuente de aporte (por ejemplo, riego o condensación), lo que en su conjunto constituyen lo que podríamos llamar “evaporación terrestre”. El presente trabajo se encuentra limitado a esta última.

Comprender los mecanismos de la evaporación terrestre puede ayudar a cuantificar el problema ambiental de la extracción de arena en los arroyos locales, la cual se ha incrementado considerablemente en los últimos años. Las fuentes de arena se localizan principalmente en los arroyos secos (donde las corrientes superficiales son estacionales); pero el estar continuamente extrayendo arena favorece que capas de mayor profundidad y con mayor humedad sean expuestas a las condiciones ambientales, lo que provoca una constante evaporación de la arena húmeda. Lo anterior puede tener implicaciones mayores, tales como efectos directos en los acuíferos y en los procesos de infiltración y captación de agua, ya que en estas zonas el nivel freático es relativamente somero. Esto podría ser muy importante en el noroeste de Baja California (nuestra región de estudio), debido a su bajo régimen de precipitación anual (menor a 300 mm por año). Este problema es de gran importancia porque los efectos de la extracción de arena se extienden además a otros aspectos, por ejemplo la pérdida de vegetación y fauna en los ecosistemas locales.

---

\* Aproximadamente otro 6% de la superficie total del planeta está cubierta de hielo, pero esta superficie juega un papel mínimo en la evaporación.

Sin embargo para estudiar la evaporación terrestre en esta tesis ha sido necesario investigar problemas más básicos, desde el punto de vista científico, que los ya mencionados. Es decir: nuestra meta es contribuir al estudio del efecto de la extracción de arena en la disponibilidad de agua del subsuelo, pero en este trabajo nos concentraremos solamente en investigar la evaporación de arena húmeda. La idea es que estos estudios arrojen información categórica sobre aspectos no resueltos de la evaporación natural. Por ejemplo sobre la “paradoja de la evaporación” (Brutsaert y Parlange 1998), la “relación complementaria” (Bouchet 1963), y otros temas como las estimaciones en el intercambio de energía tierra-atmósfera, el cálculo del balance hídrico, y mejor comprensión del ciclo hidrológico.

De esta manera la hipótesis de este trabajo es: conocer la evolución temporal de la evaporación natural en arenas húmedas que apoyado por el conocimiento de las actuales teorías permitirán determinar si existe algún efecto negativo en los arroyos locales derivado de la extracción masiva de arena.

La forma más común y aceptada de cuantificar la evaporación es por medio de tanques de evaporación, donde se puede medir de manera precisa la cantidad de agua evaporada, este método es conocido como “evaporación de tanques” (Penman 1948, Roderick 2002, Pavia 2008). Los valores de evaporación de estos contenedores son aceptados como un indicador de la evaporación potencial de manera general, sin embargo estos valores pueden ser mayores a los que se presentan en ambientes naturales.

En este trabajo se pretende cuantificar experimentalmente la evaporación natural en dos medios: arena húmeda y agua simple. Los experimentos consisten en comparar la evaporación natural de la arena húmeda con la cantidad de agua evaporada en un cuerpo de agua con la misma área superficial expuesta al medio ambiente. Lo anterior con el fin de conocer cuáles son, y de qué manera influyen, las variables ambientales que determinan la evaporación natural terrestre; así como conocer los detalles de su evolución temporal y las características de los procesos de evaporación en ambos medios.

Los experimentos se llevaron a cabo en el Laboratorio de Pronósticos Meteorológicos del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE), del 19 de febrero del 2009 al 3 de Mayo del 2010. Estos consisten básicamente en medir de manera continua el peso de dos bandejas de evaporación (una con agua y otra con arena húmeda) que se encontraban aproximadamente a 0.30 m del suelo (cada una sobre una

báscula con capacidad máxima de registro de 10 kg, y protegidas del efecto de las aves por una red). Las series de tiempo de pesos medidos se pueden considerar como índices de sus tasas de evaporación. A su vez este montaje experimental se puede considerar como un modelo simple del escenario de evaporación en los arroyos de la región, ya que las bandejas son colocadas al aire libre para que sean afectadas por el medio ambiente local.

Los pesos de las bandejas fueron muestreados cada 5 minutos de manera sincronizada con las observaciones de una estación meteorológica, localizada a  $\sim 1$  m de las bandejas. Esta estación registra la temperatura del aire, la radiación solar, la humedad relativa, la rapidez y la dirección del viento, además de otras variables meteorológicas. Así como la temperatura de ambos medios: en el caso de la arena húmeda el sensor de temperatura fue enterrado en su totalidad a  $\sim 0.02$  m de profundidad, en el caso del agua fue necesario colocarle al sensor un abrigo para que la radiación solar directa no incidiera en él.

### I.1. Diferencia entre evaporación y evaporación natural

Una aclaración importante que debemos hacer antes de entrar en el tema de la evaporación natural es explicar a qué nos referimos cuando decimos “natural”. En general la evaporación es un proceso puramente físico que requiere de una cierta cantidad de energía para romper la fuerza de atracción de las moléculas del líquido (Figura 1). El ejemplo clásico de evaporación es un contenedor sellado con agua líquida y vapor en equilibrio, de tal forma que éstos no cambian con el tiempo. Bajo este contexto existe evaporación,  $\varepsilon$ , la cual es compensada por la condensación,  $\kappa$ . Por otro lado, la evaporación natural,  $E$ , que depende de las condiciones ambientales, se refiere al flujo neto. Lo que hace a esta  $E$  diferente y más complicada que la evaporación en el contenedor:  $\varepsilon$ . Es decir en un contenedor en equilibrio la evaporación es igual a la condensación ( $\varepsilon = \kappa$ ), pero la evaporación ‘natural’ sería nula ( $E = \varepsilon - \kappa = 0$ ) (Roderick et al. 2009).

Esta evaporación natural es una pieza importante del ciclo hidrológico global. En algunos casos la cantidad de agua evaporada depende fuertemente de sólo algunas variables meteorológicas, por ejemplo la radiación solar y la temperatura del aire (Pavia 2008). Algunas otras variables de las que puede depender la evaporación natural son nubosidad, presión atmosférica, composición química del agua y características de la superficie evaporante (tipo



de roca, color de suelo, etc.). En general la evaporación natural es benéfica y necesaria, pero en algunos casos puede ser perjudicial. Por ejemplo cuando existen importantes pérdidas directas de agua (evaporación en lagos, lagunas, ríos, presas), o pérdidas indirectas (indisponibilidad para la infiltración, para la vegetación y la recarga de acuíferos), en regiones donde el agua es un factor limitante.

Por su importancia y ubicuidad la evaporación natural ha sido objeto de especial interés de la comunidad científica; sin embargo desde los primeros trabajos se han encontrado dificultades para su medición y cuantificación. Muchos de los métodos empleados para estimarla se han desarrollado usando formulas empíricas o semiempíricas, los cuales difícilmente son válidos o aplicables en todos los casos o en todas las regiones climáticas (Fox 1968, Horton 1948, McIlroy 1970, Linacre 1994, Penman 1948, Qui et al. 1999).

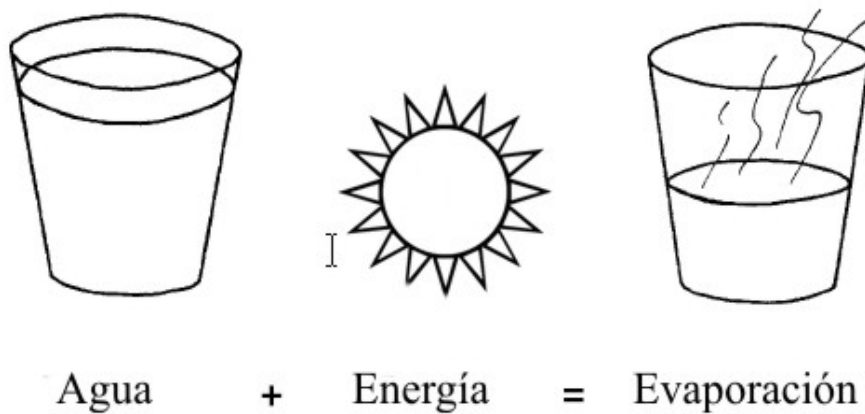


Figura 1. Demostración esquemática del fenómeno de la evaporación.

## I.2. Definiciones

Es importante y conveniente definir los términos más comunes que describen la evaporación, tal y como son utilizados con frecuencia en la literatura:

- Evaporación ( $E$ ) es el proceso por medio del cual el agua cambia de estado líquido al gaseoso incorporándose a la atmósfera en forma de vapor. Dentro de esta definición incluiremos también la evaporación del agua en estado sólido procedente de los hielos y nieve aunque este fenómeno sea conocido como sublimación.
- Transpiración ( $T$ ) es el proceso por medio del cual el agua de la vegetación o cualquier forma de vida pasa a la atmósfera en forma de vapor. Esta definición sólo difiere de la anterior por la fuente de la cual proviene el agua. Pero existe una definición que engloba ambas fuentes.
- Evapotranspiración ( $ET$ ) este término incluye los dos procesos de las definiciones anteriores.
- Evaporación real ( $ER$ ) es la evaporación que sucede en conjunto con la vegetación, suelo, y cualquier superficie que disponga de agua. Este término puede utilizarse como indicativo de “evaporación natural”. De esta manera  $ER$  y evaporación natural algunas veces son utilizados como sinónimos.
- Evaporación potencial ( $EP$ ) se define como la cantidad de agua que se puede evaporar desde una superficie libre de agua considerando que la disponibilidad de agua no es un factor limitante. Las estaciones meteorológicas comúnmente reportan este valor de evaporación.

Las anteriores son las definiciones que se utilizan con mayor frecuencia en la literatura, pero falta la más importante y tema central del presente trabajo: la evaporación natural. Para definir este concepto es necesario mencionar que en sentido estricto el término  $ET$  es incorrecto, a pesar de ser muy empleado, ya que el cambio de fase de líquido a gas es siempre el mismo, y no depende de dónde proviene el agua evaporable. Es decir no importa si el agua proviene del interior de una hoja, del follaje, del suelo, o bien de una superficie libre como un lago, ya que es imposible hacer una distinción entre estas fuentes de evaporación. Entonces la evaporación natural se define como el flujo total de vapor proveniente de agua en estado

líquido e incorporado a la atmósfera bajo condiciones naturales. Para que esto suceda se requiere de determinada energía la cual generalmente es suministrada por la radiación solar y la temperatura ambiental. Sin embargo esta definición no es suficientemente descriptiva, ya que se limita al agua en estado líquido y no considera el agua que se encuentra en cualquier otro estado como la procedente del hielo y la nieve, o bien el agua que es incorporada a la atmósfera procedente de la transpiración del suelo y la vegetación o inclusive de cualquier otra forma de vida. Aunque estas otras fuentes de humedad son minúsculas no deben de despreciarse. En sentido estricto, como ya se mencionó, el agua que pasa del estado sólido al gaseoso es conocido como sublimación; sin embargo para efectos de evaluación del ciclo hidrológico puede considerarse como evaporación. Además en la literatura es común encontrar varios términos relacionados con la evaporación. Algunos de ellos han sido introducidos para tratar de señalar la fuente de evaporación; como en el caso de la *ET*, término que fue generado para indicar la suma de la evaporación procedente de los cuerpos de agua y la evaporación procedente de la transpiración de la vegetación y del suelo.

### I.3. Importancia

La evaporación natural es un proceso esencial del ciclo hidrológico, prácticamente se puede decir que la mayoría de la precipitación en el planeta se debe a la evaporación de los océanos (86%); sin embargo la evaporación terrestre (14%) no es despreciable. Esta última significa una pérdida para los almacenamientos superficiales y sub-superficiales de manera que su estimación es necesaria en los análisis hidrológicos, en los estudios de balance hídrico y en la operación de almacenamientos.

Cuantificar la evaporación terrestre es necesario para conocer cual es la pérdida del recurso hídrico dentro de las cuencas, ya sea por cuerpos superficiales naturales o artificiales, corrientes superficiales, suelo, vegetación, etc. Los valores de evaporación son muy importantes dentro del manejo integral de las cuencas. Desde otro punto de vista, conocer la cantidad de agua perdida por evaporación al irrigar campos agrícolas, o bien conocer la cantidad exacta demandada por cierto cultivo en determinado tipo de suelo, podría reducir la cantidad de agua que se está suministrando, de esta forma se reducirían gastos innecesarios volviendo más eficiente la actividad agropecuaria.

#### I.4. Influencia ambiental

La evaporación depende del número de moléculas de agua que tengan la energía cinética suficiente para vencer las fuerzas de atracción que las retienen en la masa líquida y por la capacidad del aire que rodea a la superficie evaporante para admitir el vapor de agua; esto es conocido como el poder evaporante de la atmósfera. El poder evaporante de la atmósfera se mide por la cantidad de agua que la atmósfera es capaz de absorber, y depende principalmente del valor de la radiación solar le siguen en importancia la temperatura del aire, el viento y la humedad.

La radiación solar define en gran parte la evaporación, por ejemplo durante los días invernales cuando el número de horas de insolación es menor se tendrá menos evaporación que en los días de verano cuando el número de horas de insolación es mayor (ver Figura 2).

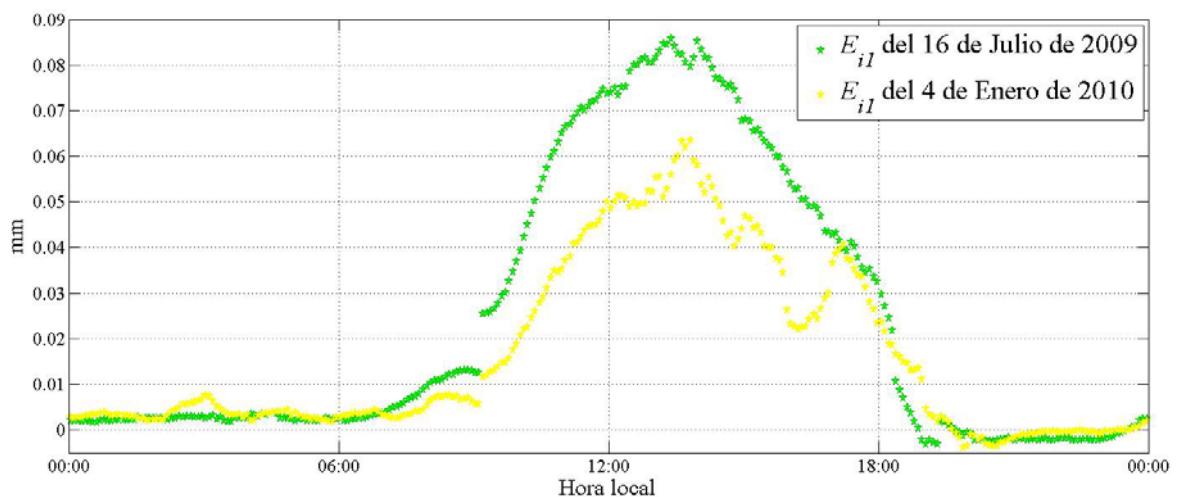


Figura 2. Variación diaria de la evaporación. Comparación de días representativos de invierno y verano.

#### I.5. Medición de la evaporación

Típicamente la evaporación se mide por la diferencia de espesor de la capa de agua entre dos observaciones consecutivas expresada en milímetros (mm). Teniendo en cuenta que una lámina de agua de 1 mm de espesor y de 1 m<sup>2</sup> de extensión equivale a un litro, el mismo número que expresa el agua evaporada en mm representará también la cantidad en litros de

agua evaporada por metro cuadrado de superficie evaporante. En las estaciones meteorológicas el valor de la evaporación es mediante la observación del descenso de nivel de la superficie de agua expuesta al aire libre en un tanque de evaporación (ver Figura 3).

Los tanques de evaporación comúnmente están hechos de hierro galvanizado, zinc y cobre y son generalmente circulares y de varios tamaños. Pueden estar o no pintados y sus superficies pueden o no estar cubiertas con una red o malla para protegerlos de los pájaros. Se pueden ubicar de tres modos: sobre la superficie, enterrados, o elevados de la superficie. Una de las principales causas de las variaciones entre la evaporación de un tanque y la de una masa de agua relativamente profunda es la diferencia en el calor almacenado. Parte del calor recibido en la superficie de un lago o estanque profundo durante la primavera y el verano, sirve para calentar el agua a considerable profundidad y no es inmediatamente utilizable como fuente de energía para la evaporación. Este calor almacenado suministra energía adicional para la evaporación durante el otoño y el invierno. La pequeña cantidad de agua de los tanques tiene poca capacidad para almacenar calor, por lo tanto la evaporación está más relacionada con el calor recibido. Los tanques flotantes se usan a menudo para minimizar esta diferencia (con un lago, por ejemplo) y, aunque sus medidas se consideran como más representativas, también requieren ajuste. Un elemento de desconfianza en la medida de los tanques flotantes es el posible “salpicado” del agua hacia adentro o de adentro hacia afuera por la acción del viento; o bien la alteración de los registros debido al agua que es consumida por las aves de la zona cuando se carece de una malla protectora. Los tanques enterrados eliminan los efectos negativos como la radiación solar directa sobre las paredes laterales y el intercambio de calor entre la atmósfera-tanque. Sin embargo presentan dificultades para la observación, captan fácilmente basura, son difíciles de instalar, limpiar y reparar. Además en caso de presentar algún tipo de fuga suele pasar desapercibida generando errores en los registros; también la vegetación que circunda al tanque puede tener ciertos efectos nocivos y aún peor: puede existir un intercambio apreciable de calor entre el tanque y la tierra adyacente.

Por otro lado los evaporímetros superficiales tienen algunas ventajas que han favorecido su popularidad, tal como facilidad de instalación, operación y mantenimiento. Si bien presentan la desventaja de mantener mayor superficie captadora de radiación directa en las paredes laterales, su uso es bastante frecuente, aunque los valores derivados de estos instrumentos deben tomarse con precaución. La evaporación que registra un tanque claro o galvanizado es menor que la que registra un tanque oscuro.

La proporción entre la evaporación de una gran masa de agua y la de un tanque se conoce con el nombre de coeficiente de calibración del tanque. Éste se usa para estimar la evaporación de un lago, estanque o pantano aplicando las medidas de tanques próximos. El coeficiente de calibración es variable y, por lo general, más alto en invierno que en verano; porque en invierno disminuye la evaporación de los tanques. La influencia de los colores del tanque sobre la proporción de evaporación depende de su relativa absorción calorífica (Campos Aranda 1998).

Un esquema básico de un tanque evaporímetro de superficie es incluido en la Figura 3.

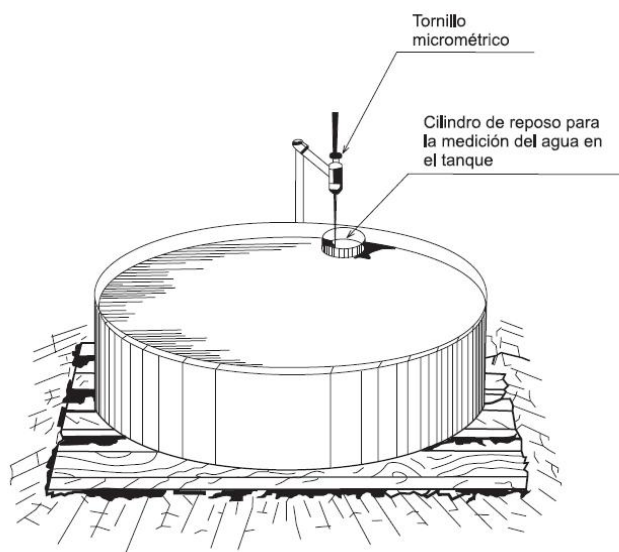


Figura 3. Esquema básico de un tanque de evaporación.

Para obtener los valores de evaporación generalmente se utilizan dos métodos. Uno que consiste en medir los volúmenes de agua que es necesario añadir al tanque para reponer su nivel inicial. El otro método se basa en la medida periódica del nivel de agua en el tanque y

calculando por diferencia de nivel la evaporación habida en el tiempo transcurrido entre dos medidas consecutivas. Estos métodos son los que generalmente se emplean en las estaciones meteorológicas que poseen dichos tanques de evaporación. Sin embargo en el presente trabajo se trabajó con tanques más pequeños para calcular la evaporación por diferencias de peso.

## I.6. Estimación de la evaporación

Se han mencionado los instrumentos que se emplean para obtener los valores de evaporación; en caso de no contar con dicha instrumentación, se han desarrollado varios métodos aplicables en función de la información meteorológica que se disponga. Estos métodos serán brevemente descritos a continuación.

### I.6.1. Método de balance de energía.

Aunque el método de balance de energía es hasta el momento el que da los mejores resultados en un amplio rango de condiciones es muy difícil de aplicar por la complejidad y cantidad de mediciones de campo que son requeridas. Por otra parte, no se considera práctica la aplicación de este método cotidianamente debido a la dificultad para evaluar la variación de los términos de almacenamiento de energía (Campos Aranda 1998).

### I.6.2. Método de transferencia de masa

Este método es también conocido con los nombres de aerodinámico, difusión turbulenta del vapor, y de los gradientes de humedad y velocidad del viento. La teoría básica de las ecuaciones del método es que el transporte de vapor de agua desde la superficie evaporante a la atmósfera es esencialmente un proceso turbulento, en el que el vapor tenderá a pasar de puntos de mayor contenido de humedad a puntos de menor contenido, ayudado por la turbulencia del aire.

### I.6.3. Método de Penman

Penman (1948) combinó la fórmula de Dalton previamente multiplicada por una función de la velocidad del viento, con el método del balance de energía, para obtener una expresión que permite estimar la evaporación desde una superficie de agua sin tener que evaluar algunos términos como la presión de vapor de saturación para la temperatura del agua superficial, debido a que su registro es complicado. Penman fue uno de los primeros en empezar a trabajar el cálculo de la evaporación y definir muchos de los conceptos que en la actualidad están vigentes, aunque como se ha mencionado, la falta de precisión en las definiciones empezó a surgir en esta época. Por ejemplo Thornthwaite (1957) también trabajaba en el cálculo de la evaporación, fue él quien introdujo en la ecuación la influencia de la temperatura y la insolación, pero no considera el tipo de superficie. Pero fue Penman (1948) el primero en desarrollar un método combinado que consideraba tanto las fuentes de energía debidas a la radiación como el transporte turbulento del vapor de agua a partir de una superficie, pero no tenía en cuenta el tipo de superficie. Hay que recordar que la evapotranspiración abarca tanto la evaporación como la transpiración, definición que decidió emplear Thornthwaite (1957), mientras que Penman (1948) le llamó evaporación natural. A partir de estos estudios numerosos métodos fueron surgiendo, cada uno de ellos adaptado a las condiciones ambientales locales o bien a la información meteorológica con la que se contaba. Es importante mencionar que estas estimaciones se basan en fórmulas empíricas o semiempíricas donde las constantes así como sus resultados se encuentran sujetos a muchas críticas por su validez.

### I.7. Motivación de la investigación

La principal motivación de esta tesis es la investigación de los efectos de la extracción de arena de los arroyos secos de la región noroeste de Baja California (Figura 4), la cual ha acarreado una serie de problemas que no sólo se limitan a la evaporación sino que sus implicaciones se extienden a otras áreas. Por un lado tenemos la pérdida de material que mantiene las playas, por otro lado tenemos la pérdida de ecosistemas (observar árbol Figura 4), efectos en la recarga de los acuíferos, mayor exposición de humedad al exponer arena más



profunda. Estas dos últimas se pueden englobar en una sola: pérdida del recurso hídrico, tan importante para las zonas áridas y semiáridas del país como nuestra región de estudio. Si bien el tema de la extracción de arena tiene importantes implicaciones sociales, ecológicas y hasta políticas, nuestro interés es tratar de aportar algo al estudio de la evaporación.

El estudio de la evaporación conlleva numerosos problemas. En primer lugar su observación es complicada y su estimación difícil. Sin embargo, las implicaciones que puede tener en el ciclo hidrológico, y sus efectos de gran escala, forman parte del debate actual sobre el tema y es en esta parte donde nuestros análisis pueden ser de utilidad.



Figura 4. Sitio de extracción de arenas en arroyo El Barbón, mostrando una altura de excavación de 2.3 m el 23 de febrero del 2002 (Grupo de investigación Ojos Negros).

---

## Capítulo II. Metodología

---

En este trabajo se usó el método de tanques de evaporación; sin embargo debido a nuestros intereses particulares hemos diseñado nuestra propia metodología. Por ejemplo se han empleado bandejas rectangulares de plástico transparente cuyas dimensiones en la parte superior son de 0.61 m de largo por 0.40 m de ancho, en la parte inferior se tienen 0.57 m de largo por 0.37 m de ancho, y una altura de 0.08 m. Por lo que consideramos que la superficie expuesta tanto de arena húmeda como de agua es la media de estas dimensiones: 0.59 m por 0.39 m, es decir un área de  $0.23 \text{ m}^2$  (Figura 5).



Figura 5. Bandeja de evaporación utilizada en el experimento principal.

Además para tener una alta resolución temporal calculamos la evaporación por medio del método de pesos diferenciales. Por lo tanto las bandejas se montaron sobre balanzas electrónicas que llevaban a cabo el monitoreo cada 5 minutos durante las 24 horas del día. La diferencia de peso en kilogramos<sup>†</sup>, dividido entre el área de la superficie evaporante expuesta, en metros cuadrados, nos da la evaporación en milímetros. Por ejemplo:

$$\frac{1 \text{ kg}}{1 \text{ m}^2} \sim \frac{0.001 \text{ m}^3}{1 \text{ m}^2} = 0.001 \text{ m} = 1 \text{ mm}.$$

Las bandejas se colocaron aproximadamente a 0.30 m de la superficie sobre las balanzas que a su vez están sobre una tarima de madera. Esto se debe principalmente a recomendaciones por parte de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) (WMO 1996), para evitar que el calor irradiado por el suelo tenga un efecto sobre la evaporación. Es importante mencionar que nuestras balanzas son de uso comercial, y su precisión es de 0.002 kg, mientras la capacidad máxima de registro es de 10 kg.

Al inicio de los experimentos se agrega agua a las bandejas hasta alcanzar aproximadamente 9.7 kg de peso total, ya que el efecto del viento produce variaciones en el peso, y no podemos registrar pesos mayores a 10 kg. Este efecto del viento es filtrado digitalmente antes de calcular la evaporación.

Este trabajo se enfoca principalmente en conocer cuál es el mecanismo que se lleva a cabo durante la evaporación natural en los arroyos de la región, por lo que fue necesario simular este ambiente. Para lo anterior se colocó en una bandeja una capa de aproximadamente 0.02 m de espesor de arena extraída directamente de un arroyo local. A la bandeja con arena se le agregó diariamente agua. Los horarios en los que se agregaba agua fueron diferentes durante los experimentos. Se empezó saturando de agua la superficie aproximadamente a las 13:00 h tiempo local. Sin embargo durante el procesamiento inicial de los datos observamos que esta hora es cercana a la hora de máxima evaporación y temperatura. Por lo que era muy notorio el efecto en la temperatura de ambos medios disminuyéndolas y disminuyendo, a su vez, la evaporación. Por lo que posteriormente la recarga se llevó a cabo a las 9:00 h para corregir lo anterior. Sin embargo, durante el análisis de la información se observó que en muchos de los

---

<sup>†</sup> Suponiendo que 1 kg de agua ocupa un volumen de 0.001 m<sup>3</sup>.

casos no se alcanzó un nivel necesario de “sequedad” de la arena, condición crítica donde la evaporación de la arena simularía un suelo que evapora completamente diferente a un suelo en condiciones de saturación. Este último punto es de vital importancia porque la relación que lo explica, “relación complementaria” (Bouchet 1963) se ha invocado para proponer una explicación a la paradoja de la evaporación (Brutsaert y Parlange 1998).

Además de la bandeja con arena húmeda se instaló otra bandeja de iguales dimensiones y en iguales condiciones, pero ésta únicamente con agua para tener una estimación de la evaporación potencial, que es la que reportan los evaporímetros estandarizados de las estaciones meteorológicas, y hacer una comparación de los resultados (evaporación de agua y evaporación de arena húmeda).

Aproximadamente a 1 m de las bandejas de evaporación se localiza una estación meteorológica del Laboratorio de Pronóstico Meteorológico del CICESE (ver Figura 6), la cual mantiene un registro cada cinco minutos de las principales variables meteorológicas. La estación meteorológica es Marca Davis (Modelo Wireless Vantage Pro2 Plus), que incluye un conjunto integrado de sensores de temperatura, humedad, presión atmosférica, radiación solar, radiación UV, precipitación y viento.



Figura 6. Charolas de evaporación colocadas junto a la estación meteorológica. Arena húmeda (derecha) y agua (izquierda).

El periodo de observación de los experimentos cubre del 19 de febrero del 2009 al 3 de mayo del 2010. Durante este periodo se modificó varias veces el protocolo de recarga de agua, pero el resto de las características permaneció constante (mismas balanzas, tipo de arena, etc.). Previo a estos experimentos se ha investigado la evaporación exclusivamente diurna bajo condiciones similares (Pavia 2008).

---

## Capítulo III. Resultados experimentales

---

Los valores de evaporación se calcularon con el método de pesos diferenciales, el cual consiste en capturar los pesos ( $w_{i,j}$ ) de las balanzas cada cinco minutos ( $\Delta t = 5$  min) y suavizarlos con un filtro fase cero de 12 valores, es decir: de amplitud de una hora. Después computamos las diferencias ( $\delta w_{i,j} = w_{i,j} - w_{i+1,j}$ ), donde  $i$  es un índice de tiempo, por ejemplo  $i = 1, 2, \dots, 287$  para un día, y  $j = 1$  se refiere a la arena húmeda y  $j = 2$  al agua simple. La tasa de evaporación en mm por  $\Delta t$ , ( $E_{i,j}$ ), es estimada dividiendo  $\delta w_{i,j}$  (en kg) entre el área expuesta de la bandeja ( $0.23 \text{ m}^2$ ).

### III. 1. Experimento principal

El experimento inicial, agregando agua diariamente cerca del medio día con excepción de los fines de semana, se realizó del día 19 de febrero al 9 de junio del 2009. Las series de datos obtenidas en este primer experimento serán divididas en dos partes: la primera parte corresponde a la serie del 19 de febrero al 3 de abril del 2009. En la Figura 7 se muestra en el panel superior los valores de  $w_{i,j}$  y en el panel inferior la serie de  $E_{i,j}$ . Los pesos de las bandejas (entre recargas) descienden mayormente durante el día, mientras que durante la noche descienden poco, nada o aumentan. Consecuentemente las tasas de evaporación muestran un claro comportamiento con valores máximos durante el día hasta  $0.22 \text{ mm}/\Delta t$  para  $E_{i,1}$  y  $0.09 \text{ mm}/\Delta t$  para  $E_{i,2}$ , y mínimos, nulos o negativos (condensación) durante la noche. Los valores medios de evaporación para  $E_{i,j}$  son de  $0.02 \text{ mm}/\Delta t$ .

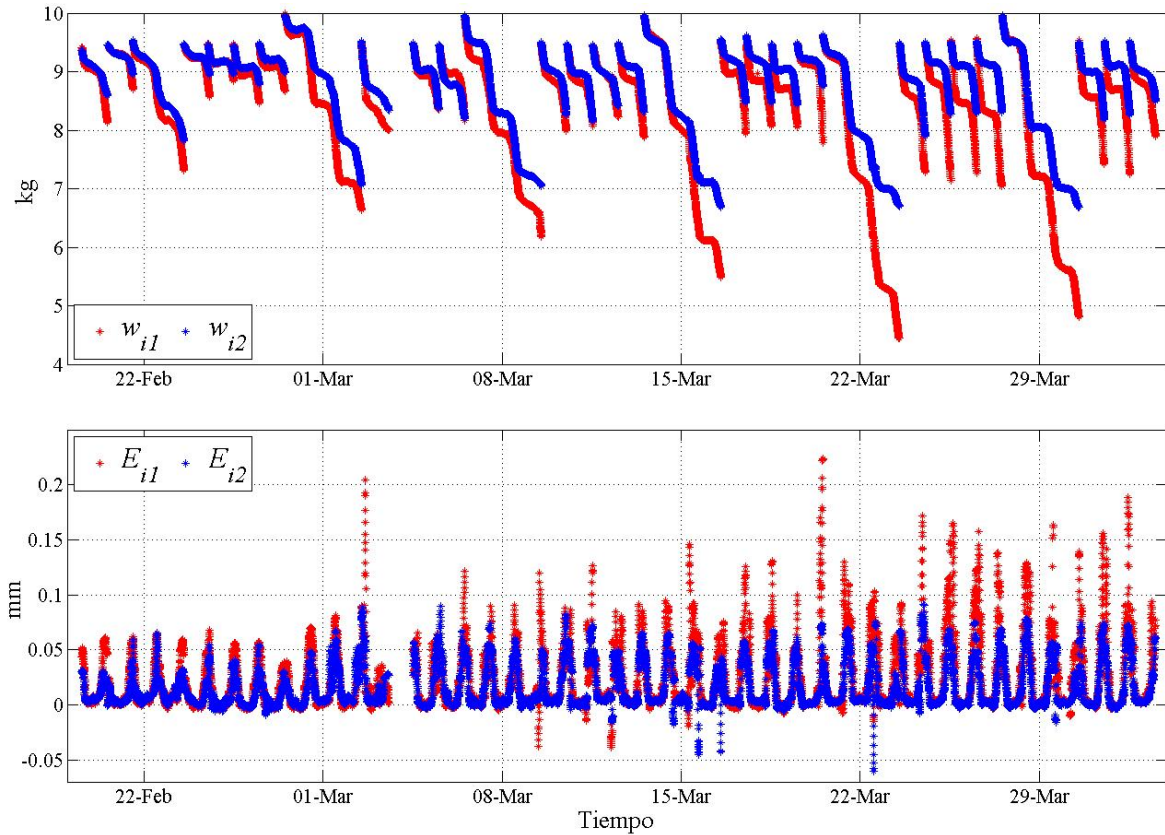


Figura 7. Periodo del 19 de febrero al 3 de abril del 2009. Panel superior: peso de las bandejas. Panel inferior: tasas de evaporación.

Las variaciones diurnas de  $E_{i,j}$ :

$$\bar{E}_{i,j} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (E_{i,j})_k, \quad i = 1, 2, \dots, 287; \quad j = 1, 2; \quad (1)$$

donde  $N = 41$ , es el número de días en este experimento, se muestran en la Figura 8 donde se pueden observar los valores máximos a medio día y mínimos por la noche, así como las diferencias entre la mayor evaporación de la arena húmeda comparada con la evaporación del agua.

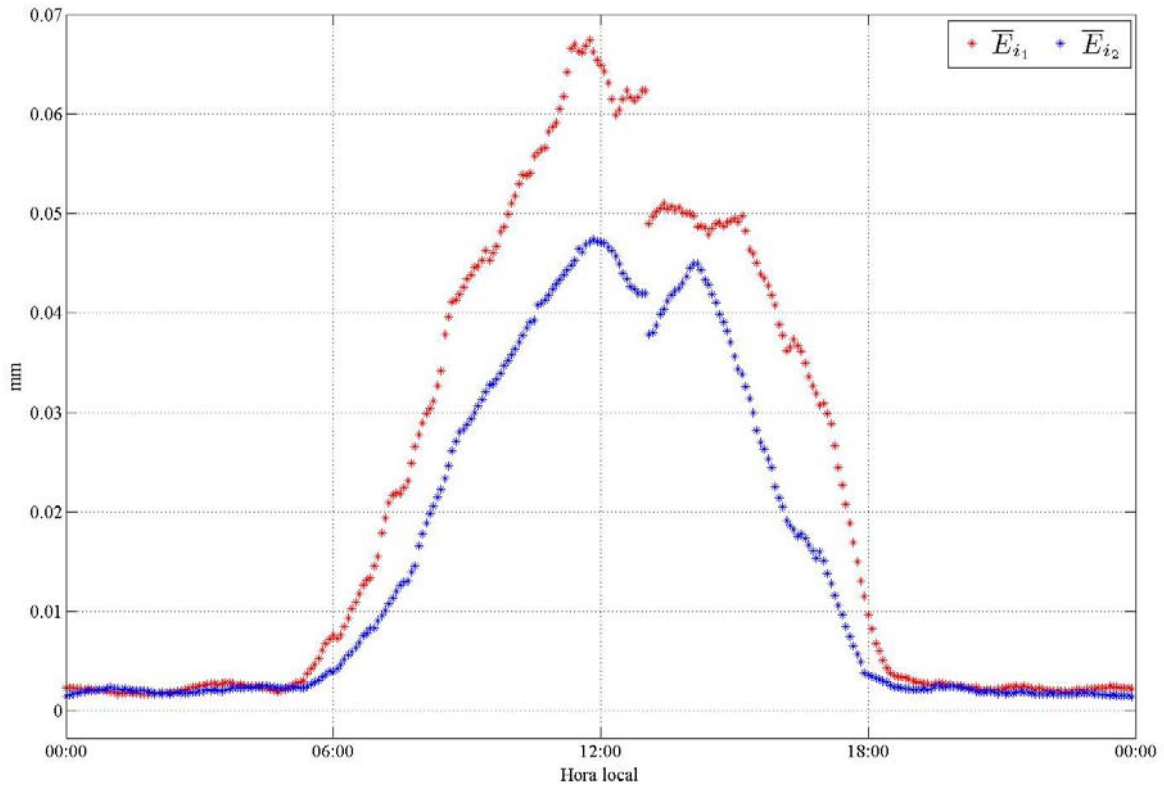


Figura 8. Variaciones diurnas de evaporación. Periodo del 19 de febrero al 3 de abril del 2009.

Otra de las particularidades que se puede apreciar en la Figura 8, es el brinco que se provoca al momento de recargar las bandejas (aproximadamente a las 13:00 h) que genera una disminución en la evaporación. Para estos datos se tiene que las evaporaciones totales diarias promedio:

$$\hat{E}_j = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left( \sum_{i=1}^{287} E_{i,j} \right)_k, \quad j = 1, 2; \quad (2)$$

son para arena húmeda:  $\hat{E}_{j=1} = 6.3$  mm por día, para el agua:  $\hat{E}_{j=2} = 4.4$  mm por día; con máximos de  $0.067$  mm/ $\Delta t$  para  $E_{i,1}$  y  $0.047$  mm/ $\Delta t$  para  $E_{i,2}$ .

En la Figura 9 se muestran las variaciones diurnas de las temperaturas, ambiental,  $\bar{T}_{ia}$ , del agua,  $\bar{T}_{iW}$ , y de la arena húmeda,  $\bar{T}_{iS}$ ; donde se aprecia el descenso de  $\bar{T}_{iW}$ , y  $\bar{T}_{iS}$  debido a que el agua de la recarga seguramente tenía una temperatura inferior a la que en ese momento



tenían ambos medios. El mayor efecto se observa en  $\bar{T}_{is}$ , que desciende casi 2° C. En  $\bar{T}_{iw}$  el descenso es menor a 1° C. También se observa que la amplitud de la variación de  $\bar{T}_{iw}$  es menor comparada con  $\bar{T}_{is}$ .

Las temperaturas medias máximas para  $\bar{T}_{is}$  son de 26° C y para  $\bar{T}_{iw}$  ~20° C, las mínimas son de ~8° C para  $\bar{T}_{is}$  y ~9° C para  $\bar{T}_{iw}$ .

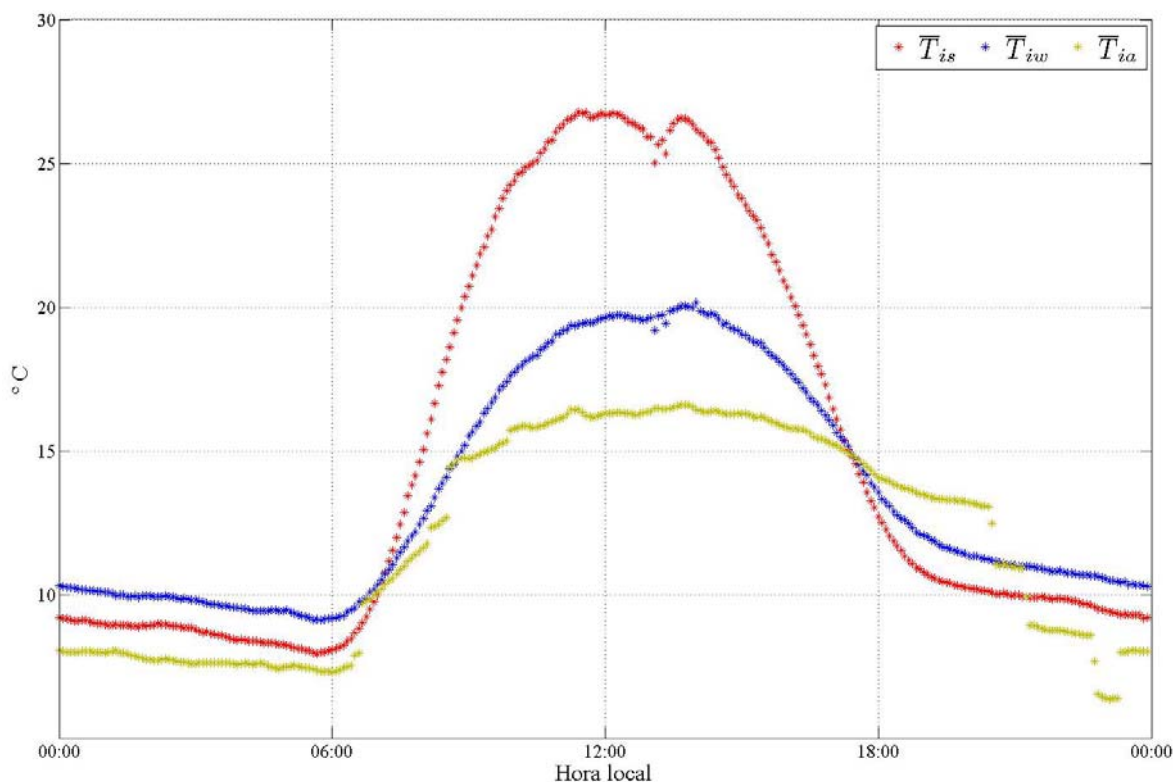


Figura 9. Variación diurna de las temperaturas del aire y de las charolas de evaporación. Periodo del 19 de febrero al 3 de abril del 2009.

La segunda parte del experimento corresponde a la serie del 14 de abril al 9 de junio del 2009 (Figura 10). En este caso se instaló una malla protectora (ver Figura 11) para evitar que las aves beban el agua de las charolas, lo cual puede observarse en la Figura 12. Las tasas de evaporación muestran un claro comportamiento con valores máximos durante el día de hasta 0.15 mm/ $\Delta t$  para  $E_{i,1}$  y 0.13 mm/ $\Delta t$  para  $E_{i,2}$ . Los valores medios de evaporación para ambas series de datos son de 0.016 mm/ $\Delta t$ .

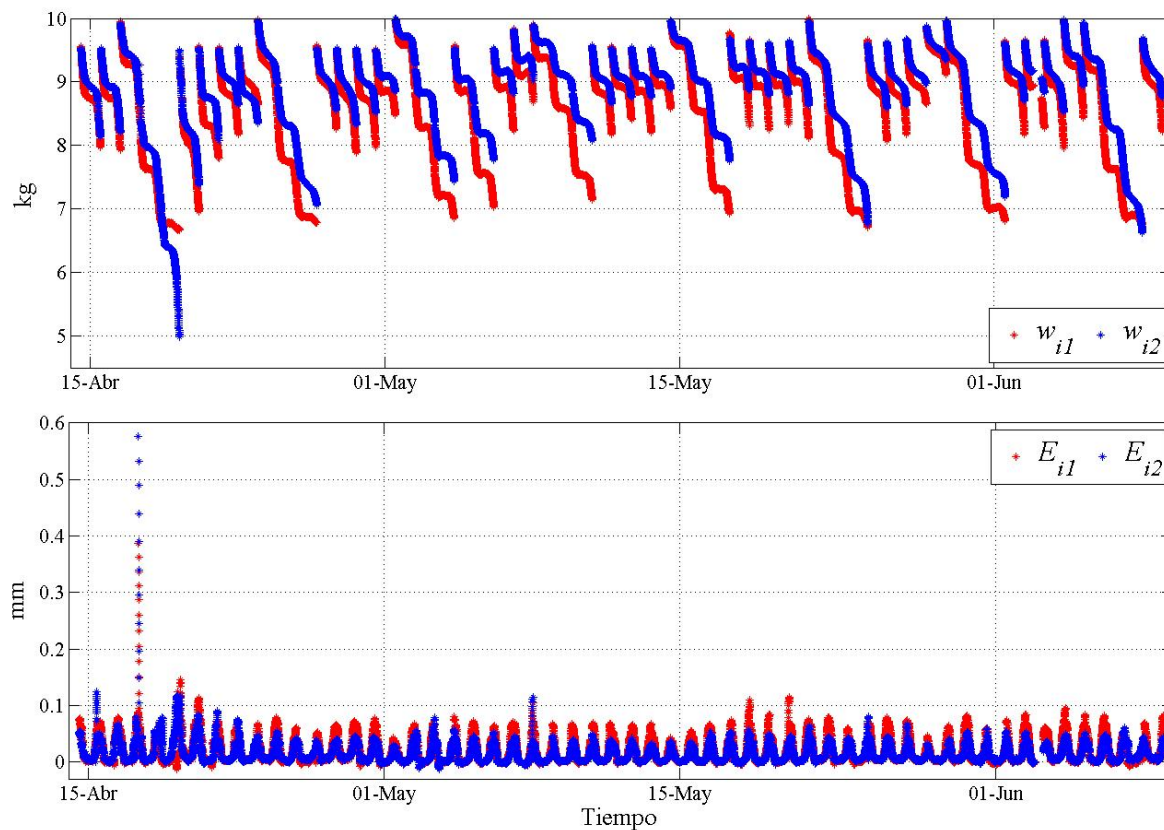


Figura 10. Periodo del 14 de abril al 9 de junio del 2009. Panel superior: peso de las bandejas. Panel inferior: tasas de evaporación.

La Figura 10 muestra en la parte inferior valores extremos  $E_{i,j} > 0.6$  mm, durante el 18 de abril, donde los valores máximos típicos son  $E_{i,j} \sim 0.1$  mm. Estos valores extremos no son erróneos (“outliers”) y se verifican con ambas evoluciones de  $w_{i,j}$  como se observa en la parte superior, así como con la descripción de las condiciones meteorológicas de ese día, las cuales serán presentadas más adelante.



Figura 11. Malla protectora para evitar que las aves afecten las estimaciones de evaporación.

Durante la primera parte de este experimento algunas aves podían llegar y beber de las charolas. Esto fue observado durante el análisis preliminar de los datos. En la Figura 12 (panel superior) se ve claramente que el peso aumenta por la presencia de las aves en las charolas. En este caso los valores de  $E_{ij}$  disminuyen y al retirarse las aves aumentan.

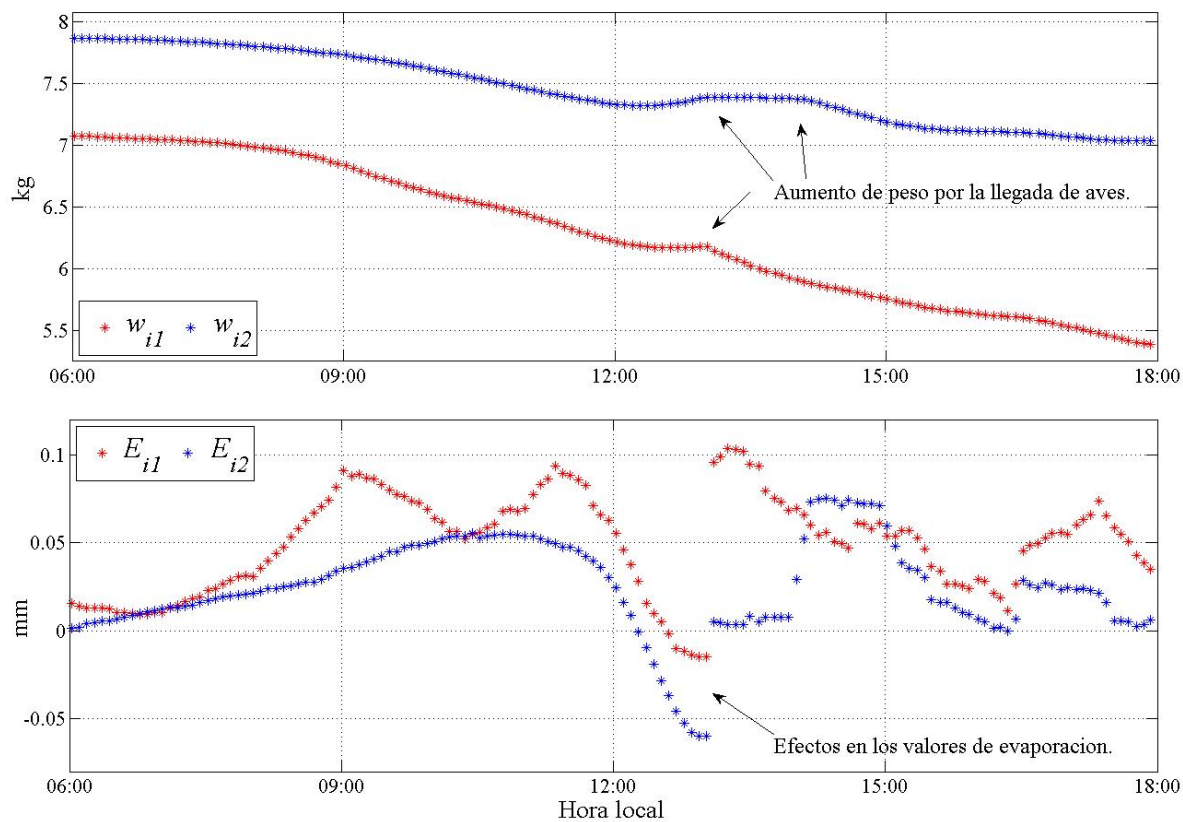


Figura 12. Efectos por la llegada de aves. Panel superior: aumento del peso en las bandejas. Panel inferior: efectos en las estimaciones de  $E$ .

En la Figura 13 se muestran los datos del 18 de abril con mayor detalle, cuando los valores de  $\hat{E}_{j=1}$  y  $\hat{E}_{j=2}$  presentaron aproximadamente el mismo valor: 8.9 mm/d, con el máximo valor aproximadamente a las 13:00 h.

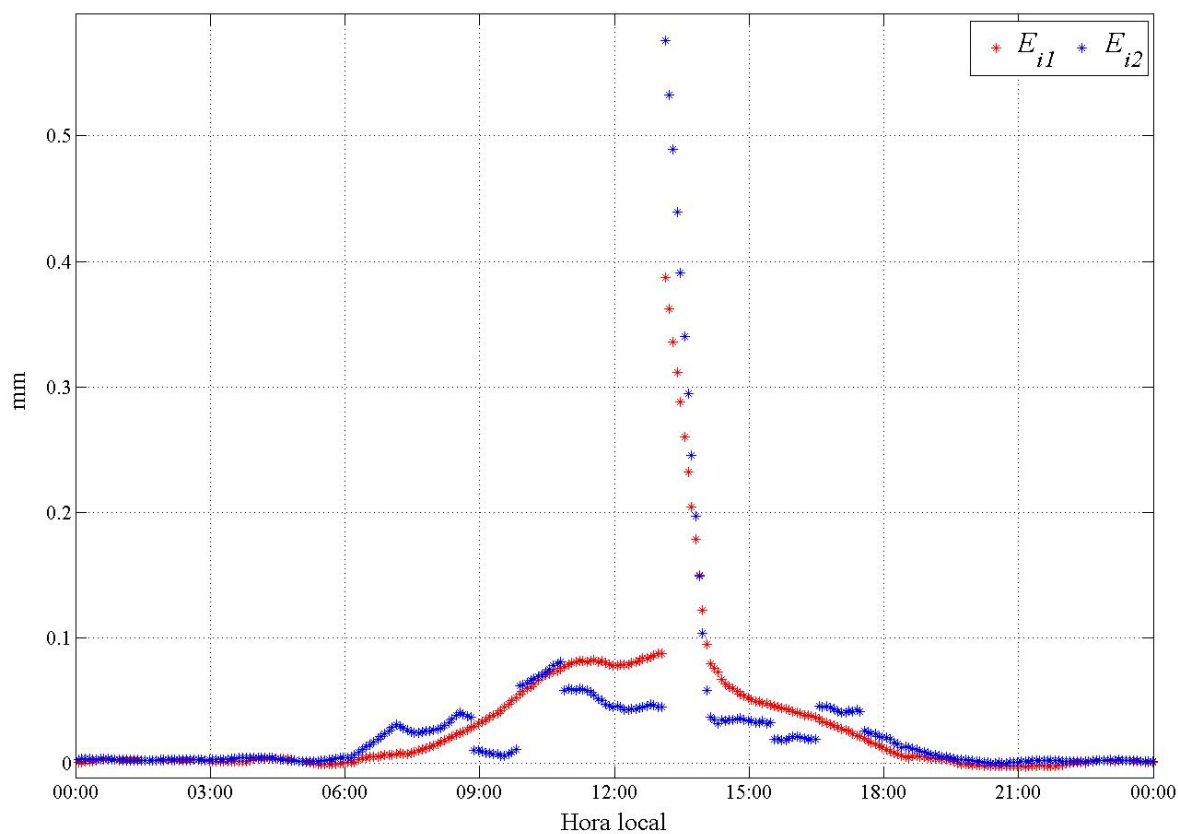


Figura 13. 18 de abril del 2009, evento extremo de evaporación.

En la Figura 14 se muestran la radiación solar,  $R_i$ , y  $T_{ia}$  del 17 al 19 de abril. Durante el día 18 de abril, se observa un aumento de casi  $10^\circ\text{C}$  en  $T_{ia}$ , mientras que  $R_i$  se mantiene comparable con los días previo y posterior.

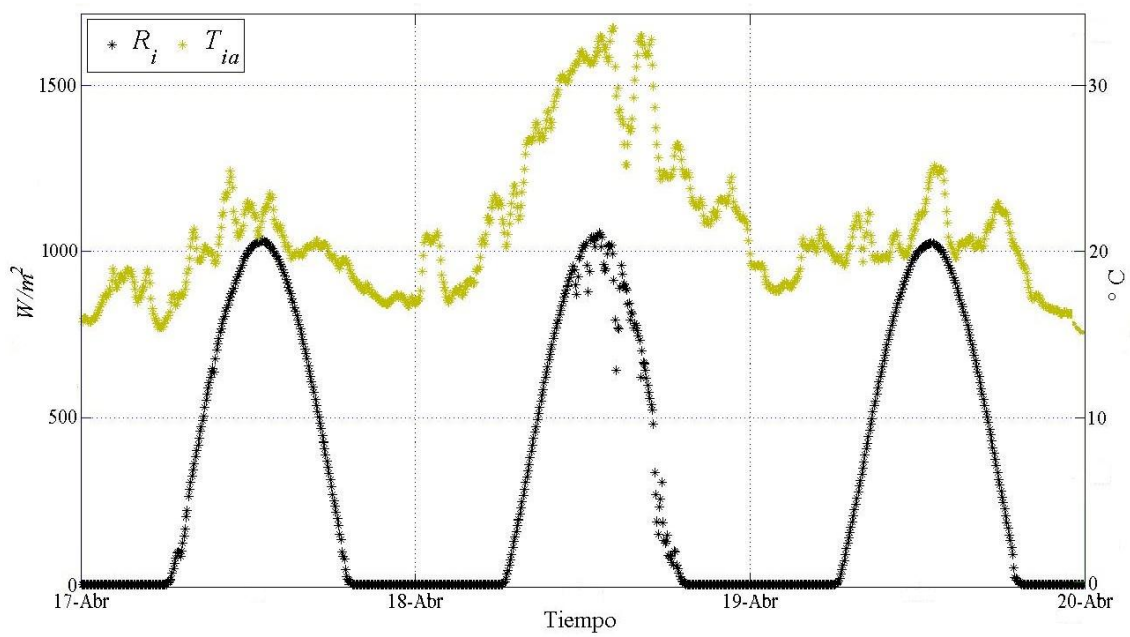


Figura 14.  $R_i$  y  $T_{ia}$  durante el evento extremo de evaporación.

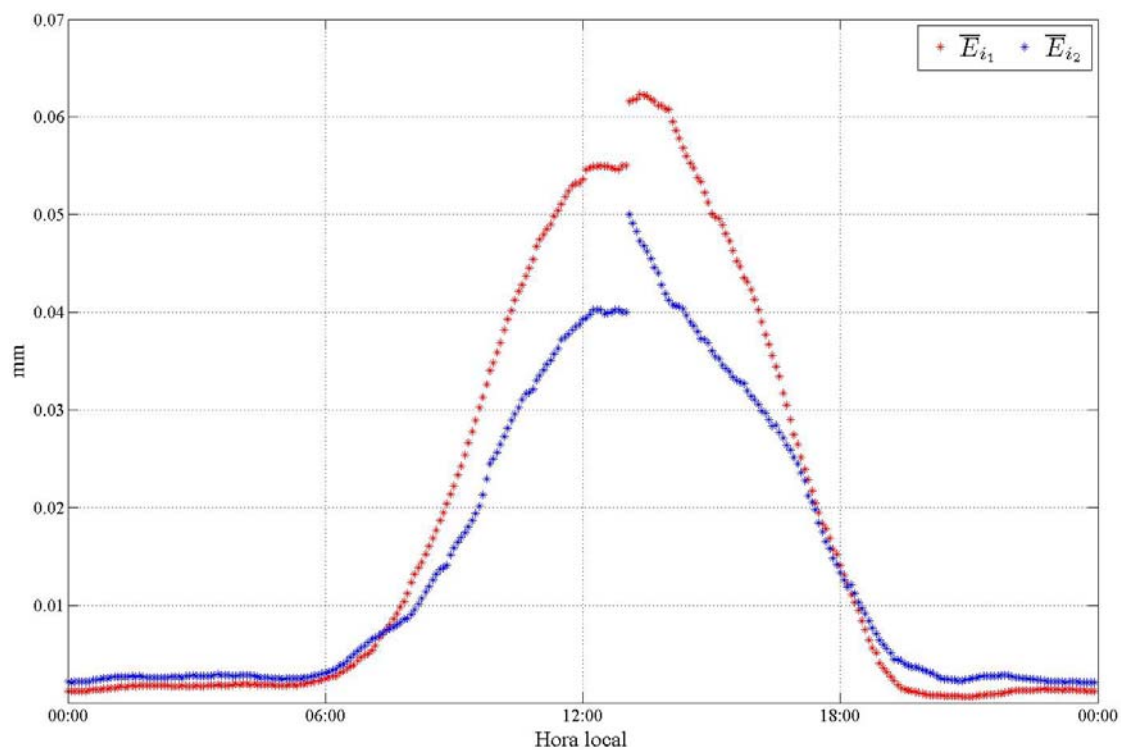


Figura 15. Variaciones diurnas de evaporación. Periodo del 14 de abril al 9 de junio del 2009.

La Figura 15 muestra  $\bar{E}_{i,j}$  para la segunda parte de los datos, en la cual ya se tiene la malla protectora. Los valores medios de evaporación para esta parte resultan un poco inferiores a los reportados en la primera parte, ya que ahora  $\hat{E}_{j=1} = 5.3$  mm y  $\hat{E}_{j=2} = 4.2$  mm, con valores máximos de  $0.062$  mm/ $\Delta t$  para  $E_{i,1}$  y  $\sim 0.05$  mm/ $\Delta t$  para  $E_{i,2}$ .

Al igual que en la primera parte se graficaron los valores de  $\bar{T}_{ia}$ ,  $\bar{T}_{iw}$ , y  $\bar{T}_{is}$  (ver Figura 16). Como se esperaba estos valores son mayores que en la primera parte debido a la diferencia en las épocas del año, con máximos de  $\sim 30^\circ$  C para  $\bar{T}_{is}$ , y  $\sim 23^\circ$  C para  $\bar{T}_{iw}$ , mientras que las mínimas son de  $\sim 14^\circ$  C para ambas superficies.

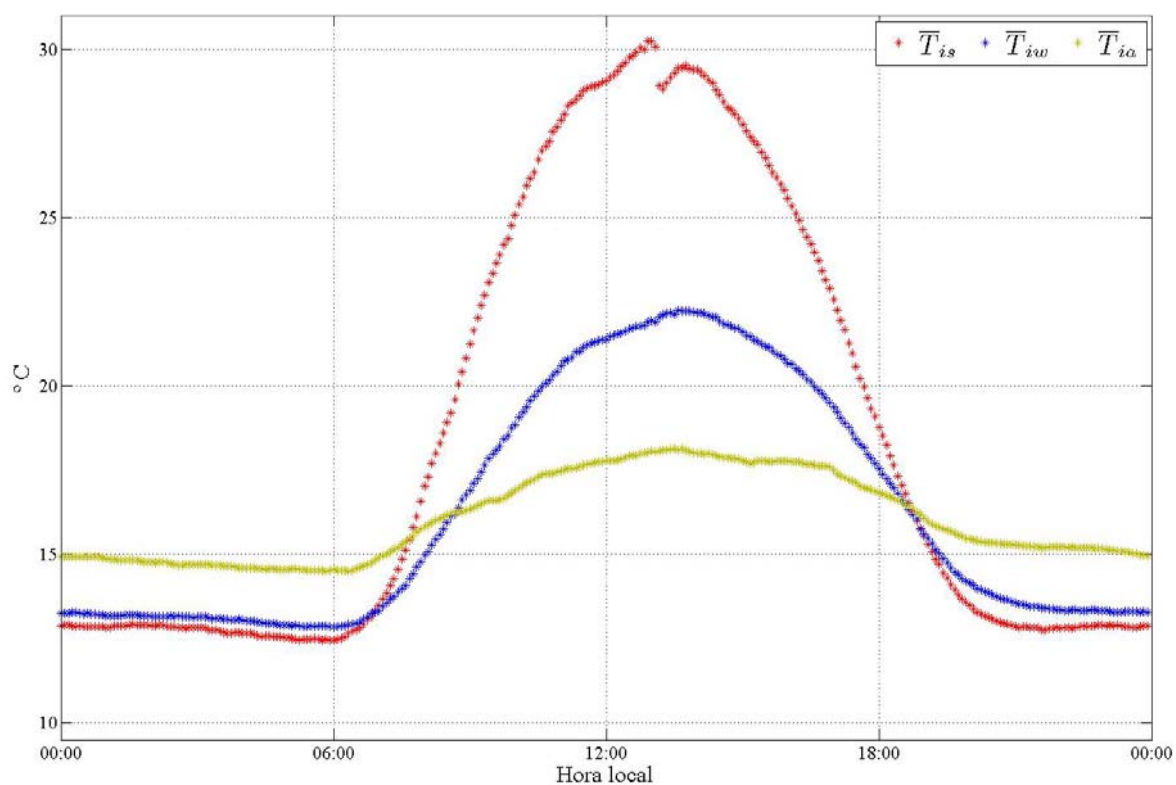


Figura 16. Temperatura de las superficies de evaporación. Periodo del 14 de abril al 9 de junio del 2009.

### III.2. Cambio en el protocolo de recarga

En el segundo experimento que va del 10 de junio al 2 de noviembre del 2009 (Figura 17, 20 y 21) se modificó el horario de la recarga de las bandejas de  $\sim 13:00$  h a  $\sim 9:00$  h (hora local) para evitar afectar las estimaciones de los valores máximos de  $E_{i,j}$ .

Este experimento coincidió con varios eventos de condensación ( $E_{i,j} < 0$ ), por lo que se divide en tres partes. La primera parte va del 10 de junio al 16 de julio (Figura 17) en la que se presentaron eventos de condensación importantes  $E_{i,j} \sim -0.1$  mm.

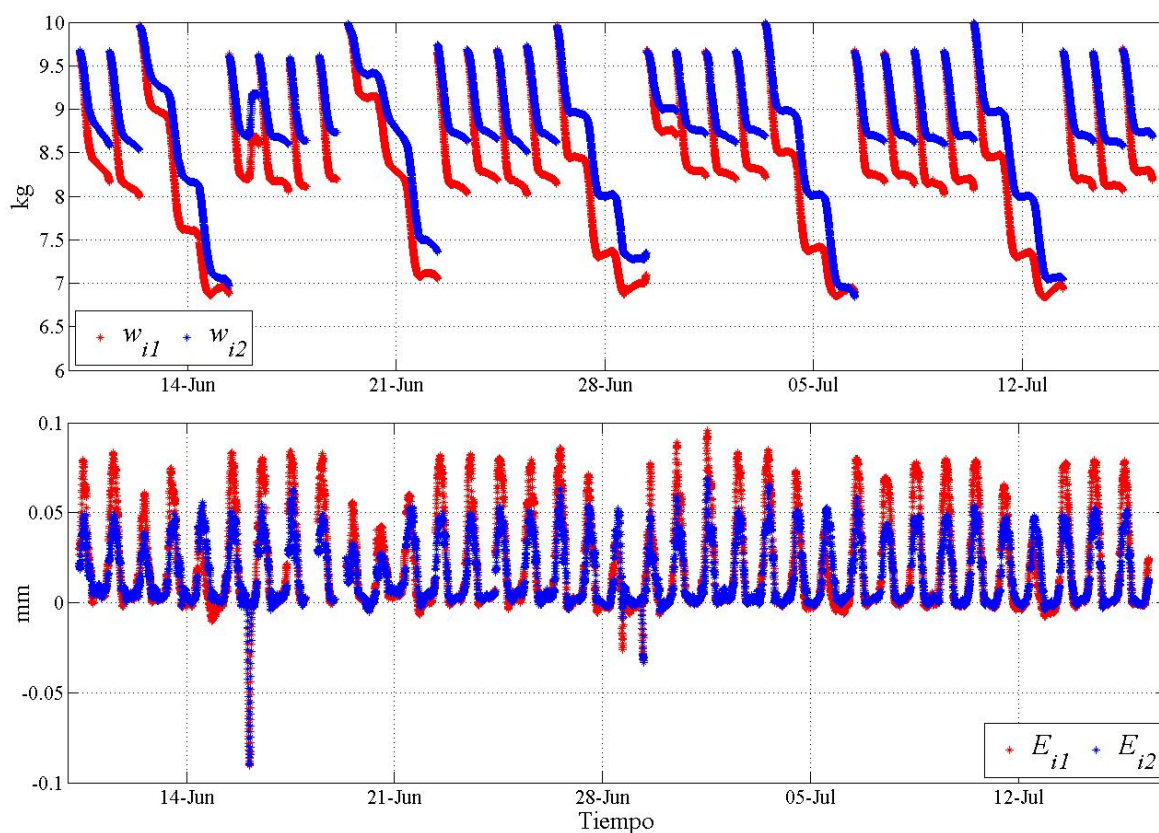


Figura 17. Periodo del 10 de junio al 16 de julio del 2009. Panel superior peso de las bandejas. Panel inferior tasas de evaporación.



Los valores observados en la Figura 17 indican que las evaporaciones máximas para ambas series de datos son de  $\sim 0.1 \text{ mm}/\Delta t$ , con un promedio de  $0.015 \text{ mm}/\Delta t$ .

El total de agua condensada durante este evento (de las 1:00 h a las 4:30 h del día 16 de junio) para la arena húmeda correspondería a 2.11 mm mientras que para el agua correspondería a 2.13 mm, esto representa aproximadamente la mitad de lo que se pierde por evaporación diaria en promedio (ver Figura 18). Otros eventos de condensación se aprecian en la gráfica aunque son de menor magnitud.

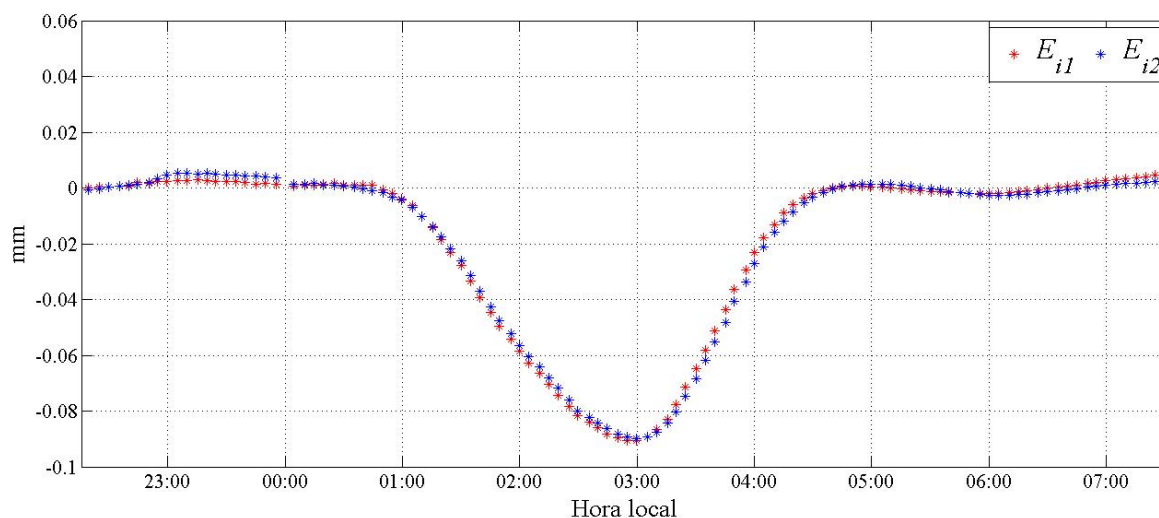


Figura 18. Detalle del evento de condensación del 16 de junio del 2009.

En la Figura 19 se observa que el evento de condensación es derivado de la alta humedad relativa,  $H_i$  (100%), y no del descenso de  $T_{iw}$  y  $T_{is}$  que alcanzan la temperatura del punto de rocío,  $T_{ir}$ , ya que durante la noche anterior y posterior  $T_{ir}$  también es comparable con  $T_{iw}$  y  $T_{is}$ , pero la humedad es baja y no puede condensarse una cantidad similar a la del día 16.

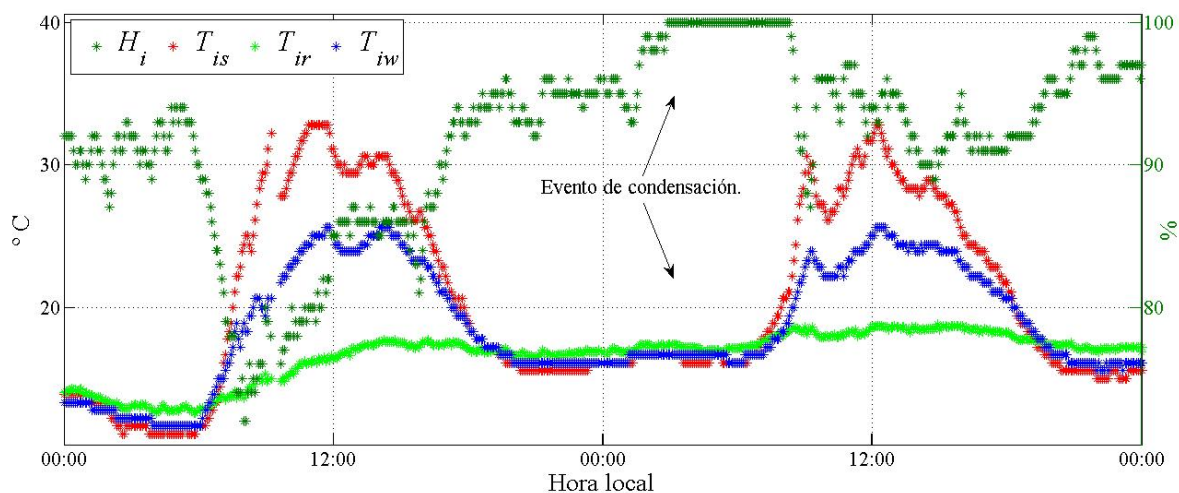


Figura 19. Variables meteorológicas durante el evento de condensación del 16 de junio del 2009.

La segunda parte de este experimento va del 7 de agosto al 5 de septiembre (Figura 20). Aquí la condensación se presentó casi todas las noches, aunque de magnitud pequeña, a diferencia de en el primer experimento.

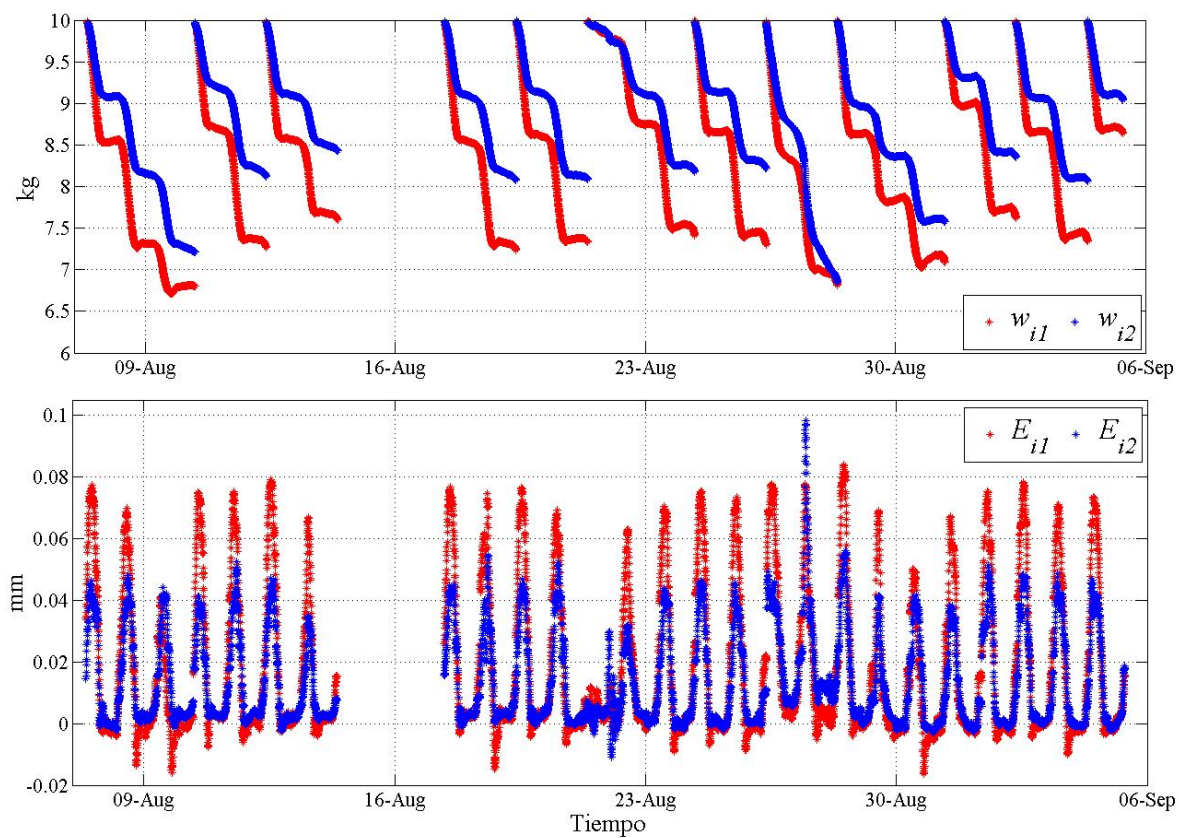


Figura 20. Periodo del 7 de agosto al 5 de septiembre del 2009. Panel superior: peso de las bandejas. Panel inferior: tasas de evaporación.

La tercera parte del experimento va del 7 de septiembre al 2 de noviembre (Figura 21). Los eventos de condensación siguen presentes, inclusive se observa otro fuerte evento durante el 20 de octubre y más notablemente en la arena húmeda.

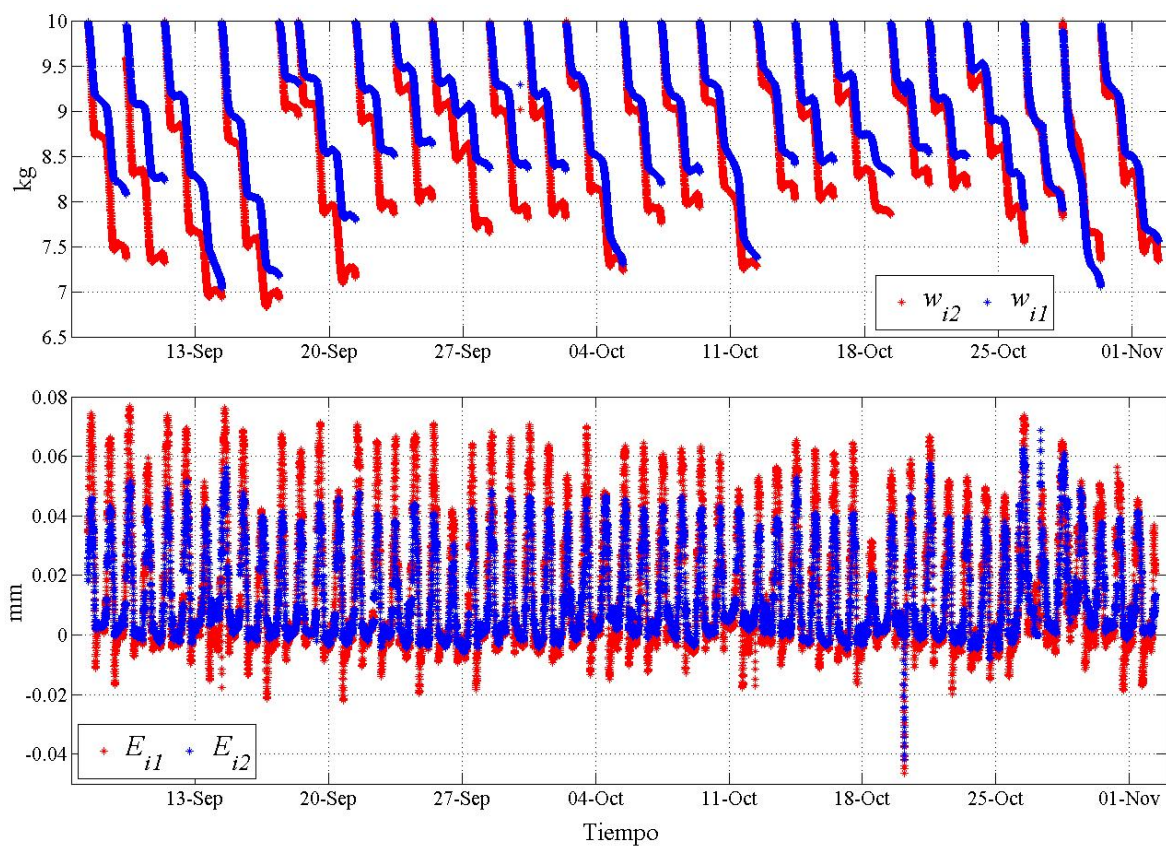


Figura 21. Periodo del 7 de septiembre al 2 de noviembre del 2009. Panel superior: peso de las bandejas. Panel inferior: tasas de evaporación.

El evento de condensación que se observa en las Figuras 22 y 23 presenta una magnitud menor al que se presentó en la Figura 17, del 16 de junio, ya que la arena sólo condensó 0.65 mm y el agua 0.53 mm, o aproximadamente una cuarta parte de la evaporación para un día promedio. Este evento de condensación es derivado del descenso de la temperatura de ambas superficies pues logran alcanzar la temperatura del punto rocío, inclusive el descenso se presenta primero en la arena (ver Figura 23), situación que se refleja en los valores de  $E_{i,1}$  (ver Figura 22).

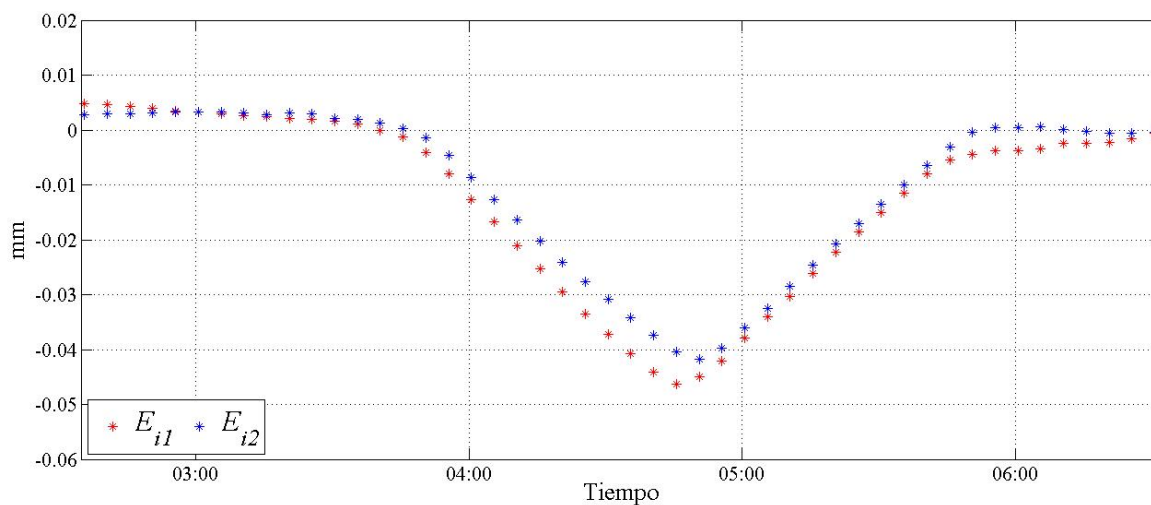


Figura 22. Ampliación del evento de condensación del 20 de octubre del 2009.

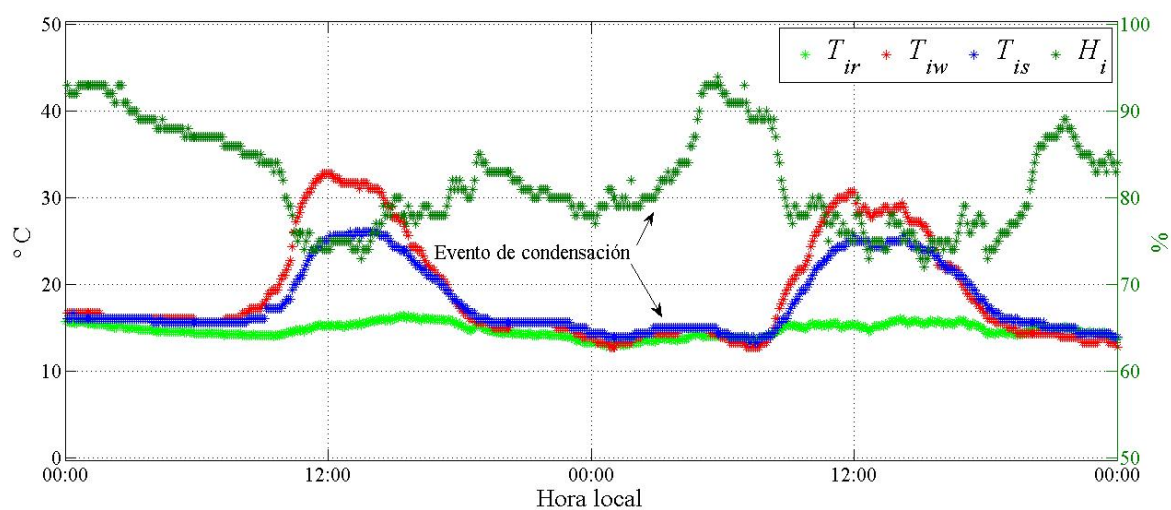


Figura 23. Variables meteorológicas durante el evento de condensación del 20 de octubre del 2009.

### III.3. Otros experimentos

Se realizaron otros experimentos: i) Para ver el efecto del espesor de las capas, principalmente de arena húmeda, se hicieron experimentos con capas de 0.03 m y 0.05 m (además del original con capas de 0.02 m). ii) Para ver el efecto de la recarga natural, se hicieron experimentos durante la lluvia, ya que en los experimentos originales todas las recargas de agua fueron artificiales. iii) Para ver el efecto de la radiación solar directa en las paredes laterales, se realizó un experimento con las paredes de una charola cubiertas y otra con las paredes descubiertas.

#### III.3.1 Experimentos con capas más gruesas

Los experimentos originales se realizaron con capas delgadas de 0.02 m de espesor, por lo que se decidió investigar el comportamiento de la evaporación en capas más gruesas. Los nuevos experimentos se realizaron con bandejas de 0.26 m de largo por 0.20 m de ancho, es decir un área de 0.052 m<sup>2</sup> (comparada con 0.23 m<sup>2</sup> de las anteriores), y de 0.13 m de altura (comparada con 0.08 m de las anteriores), el cambio de bandejas es debido al límite de registro de las basculas (10 kg), aumentar 1 cm o más de arena excedía las capacidades de registro, imposibilitando el experimento; al tener menor área, el peso de la bandeja de arena fue menor; todo lo demás fue similar (ver Figura 24).



Figura 24. Charolas empleadas en el experimento de capas gruesas.

En un primer experimento con capas más gruesas tanto la capa de arena húmeda como la del agua tienen un espesor de 0.03 m (comparada con 0.02 m de las anteriores) (Figura 25). El periodo va del 2 al 30 de noviembre del 2009 (Figura 26).



Figura 25. Espesor de la capa de arena húmeda más gruesa (0.03 m).

Los eventos de condensación son más notorios en estos experimentos que en los anteriores principalmente en la arena húmeda, se observa que en la serie de  $w_{i,1}$ , los pesos aumentan considerablemente durante la mayoría de las noches (ver Figura 26), esto puede ser porque el enfriamiento de la arena durante la noche es mayor que el del agua logrando alcanzar la temperatura del punto de rocío (Figura 27).

Este experimento demostró que una capa de arena húmeda de 0.03 m de espesor, bajo condiciones ambientales comparables, evapora de manera similar que una de 0.02 m, sin embargo, el comportamiento de la condensación es diferente.



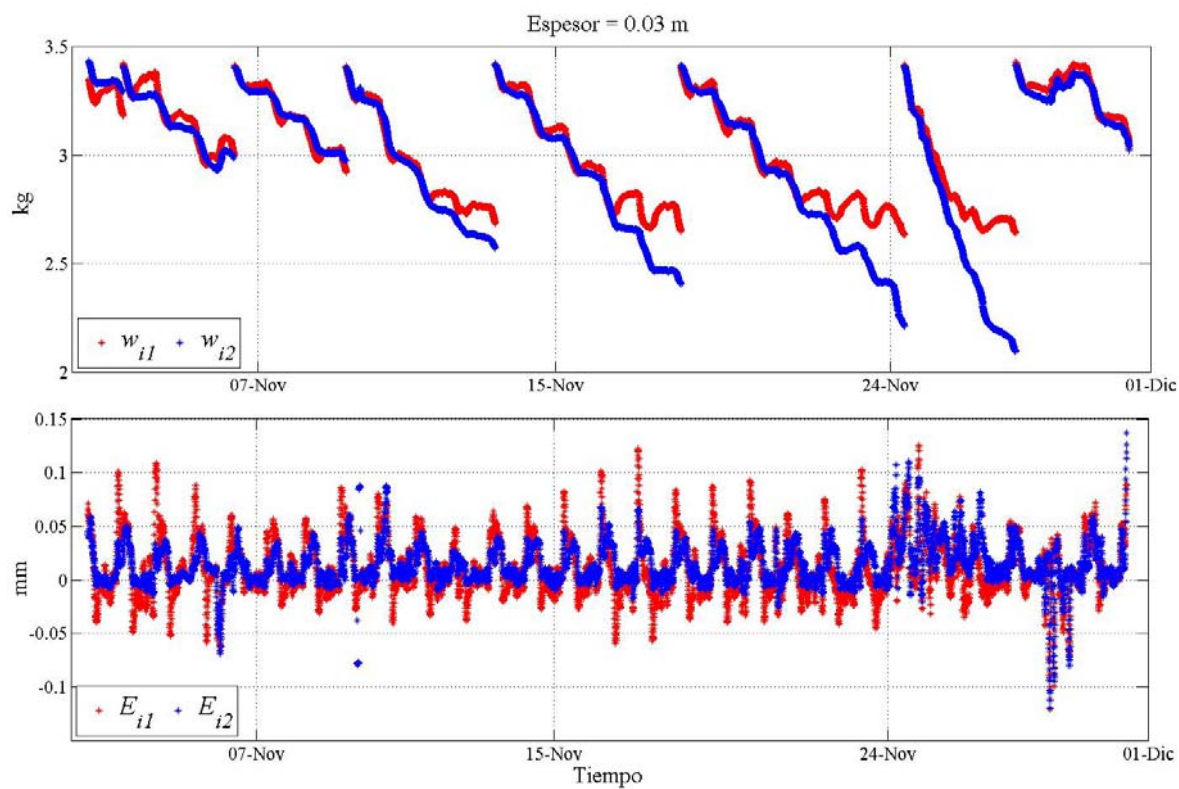


Figura 26. Periodo del 2 al 30 de noviembre del 2009. Panel superior: peso de las bandejas. Panel inferior: tasas de evaporación.

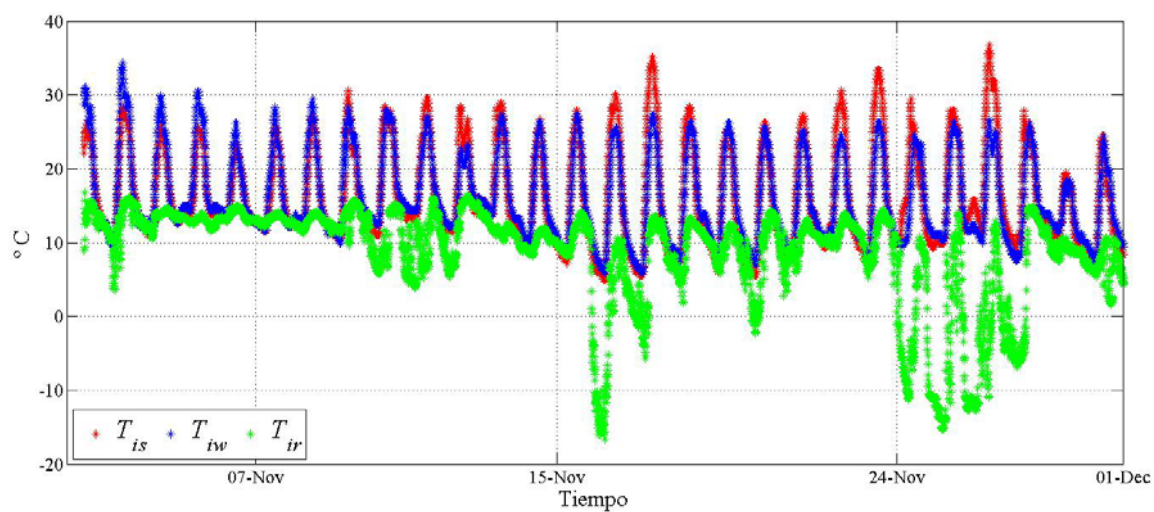


Figura 27. Temperatura de las superficies, periodo del 2 al 30 de noviembre del 2009.

El segundo experimento se realizó con capas aún más gruesas de 0.05 m (comparadas con capas de 0.02 m y 0.03 m) (Figura 28). El periodo va del 30 de noviembre al 7 de diciembre (Figura 29).



Figura 28. Aumento del espesor de la capa de arena a 0.05 m.

En la Figura 29 se observa que la evaporación fue menor (comparada con la presentada en la Figura 26), pero también las temperaturas de las charolas fueron de menor amplitud (Figura 30) que las que se presentaron en el primer experimento (ver Figura 27), esto último justifica que en la mayoría de los días no se logró alcanzar la temperatura del punto de rocío, impidiendo la condensación en este segundo experimento.

En este experimento sólo fue necesario recargar durante 2 veces, el 30 de noviembre y 4 de diciembre, posterior a estas fechas las condiciones ambientales imposibilitaron los experimentos debido a las lluvias y fuertes vientos.

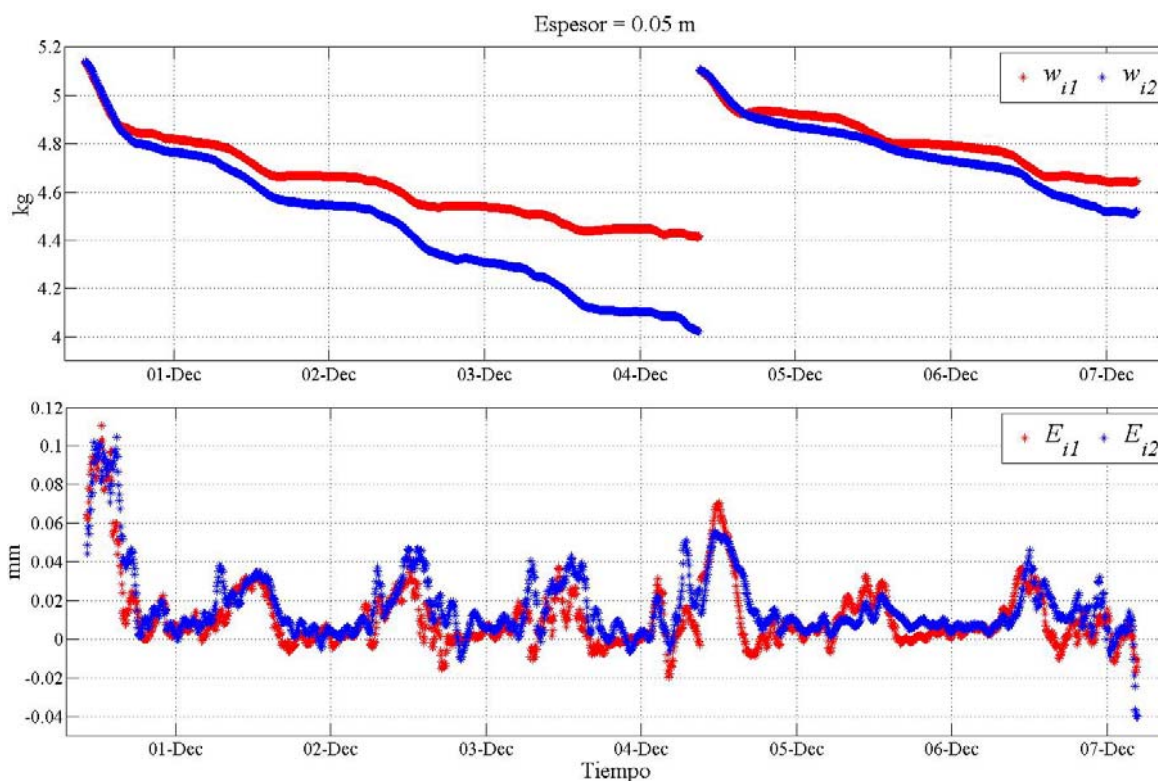


Figura 29. Periodo del 30 de noviembre al 7 de diciembre 2009. Panel superior peso de las bandejas. Panel inferior tasas de evaporación.

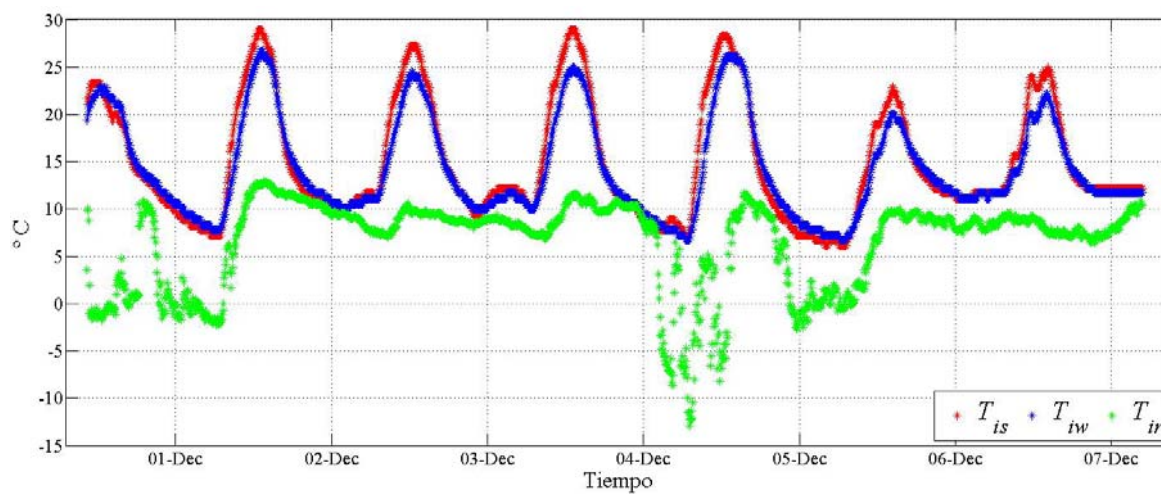


Figura 30. Temperaturas de las superficies, periodo del 30 de noviembre al 7 de diciembre.

Los resultados de este segundo experimento sugieren que una capa de arena húmeda de 0.05 m de espesor, bajo condiciones ambientales comparables, no evapora igual que las de 0.02 m y 0.03 m. Además se pudo comprobar que la capa de arena se mantuvo visiblemente húmeda en la parte inferior, por lo que se decide que la evaporación ya no tiene un efecto en profundidades mayores a 0.05 m.

### III.3.2. Experimentos durante la lluvia

En todos los experimentos anteriores las recargas fueron artificiales, es decir se agregó agua sólo a las bandejas. Las recargas naturales por lluvia implican que las condiciones generales del medio ambiente, además de las bandejas, son más húmedas. Por lo que se aprovecharon los pronósticos de precipitación para investigar la evaporación durante y después de estas recargas naturales. El primer experimento se programó del 3 al 24 de febrero de 2010 (Figura 31), y el segundo del 21 de abril al 3 de mayo de 2010 (Figura 32), ambos basados en los pronósticos locales de lluvia (de los días 2 de febrero y 20 de abril, respectivamente).

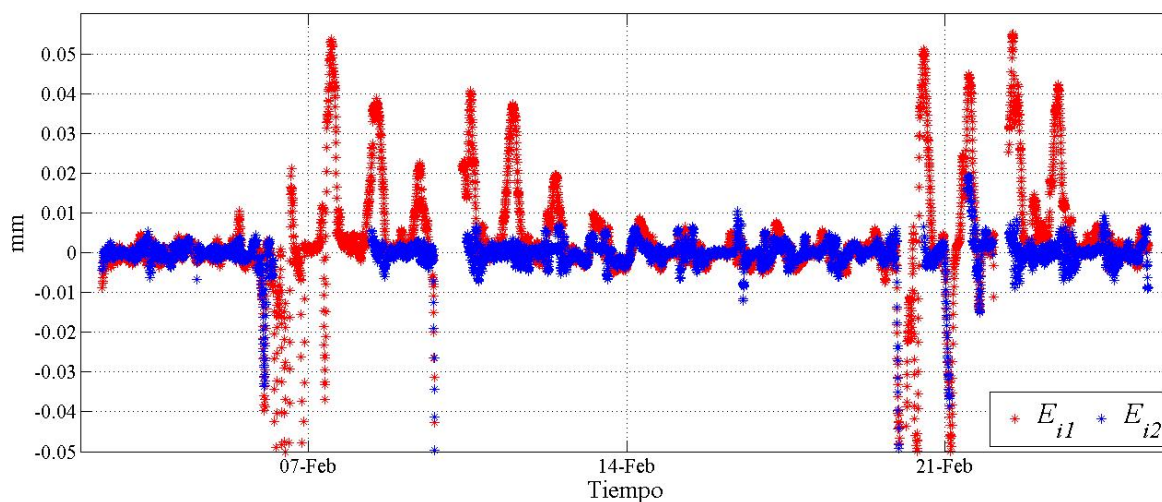


Figura 31. Evaporación durante la temporada de lluvias. Periodo del 3 al 24 de febrero.

En la Figura 32 sólo se incluye  $E_{i,l}$  debido a que durante estos días se realizaba el experimento sobre el efecto de la radiación solar directa en las paredes de la bandeja de tal manera que la bandeja con agua tenía arena y protección en la paredes laterales.

La cantidad de precipitación,  $P_i$ , registrada durante el primer experimento se muestra en la Figura 33, con un total de 24.7 mm y durante el segundo experimento en la Figura 34 con un total de 28 mm.

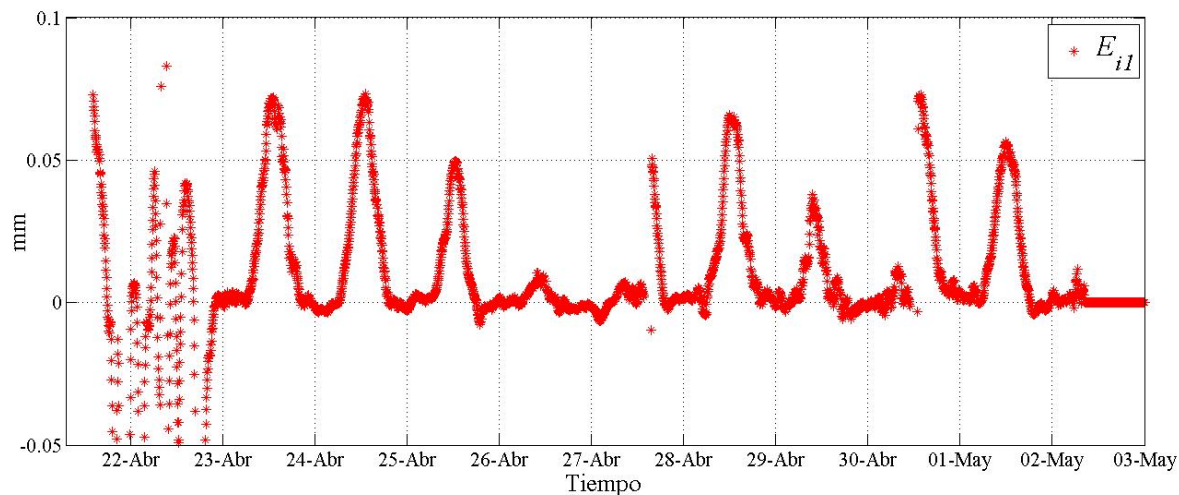


Figura 32. Evaporación durante la temporada de lluvias. Periodo del 21 de abril al 3 de mayo de 2010.

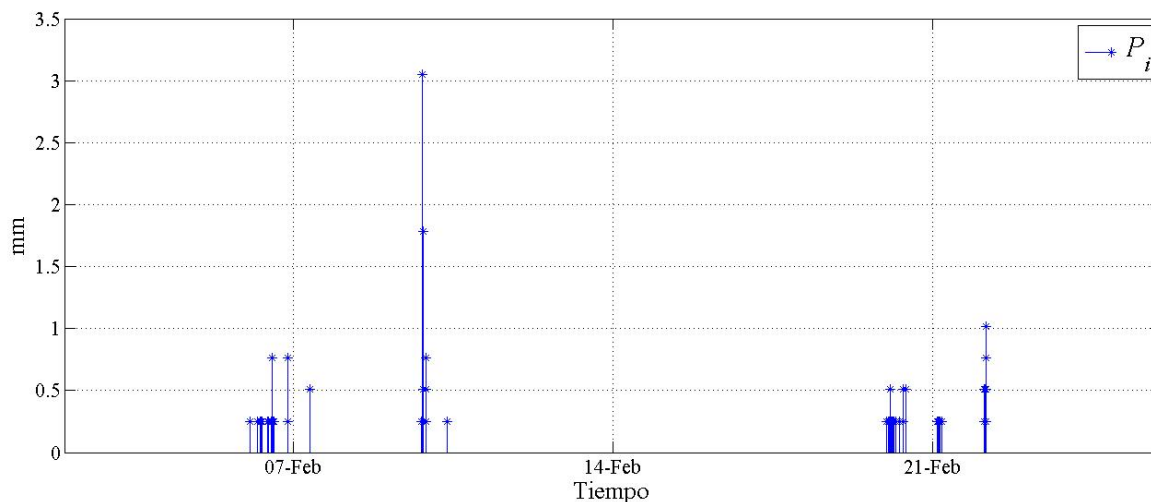


Figura 33.  $P$  para el periodo del 3 al 24 de febrero del 2010.



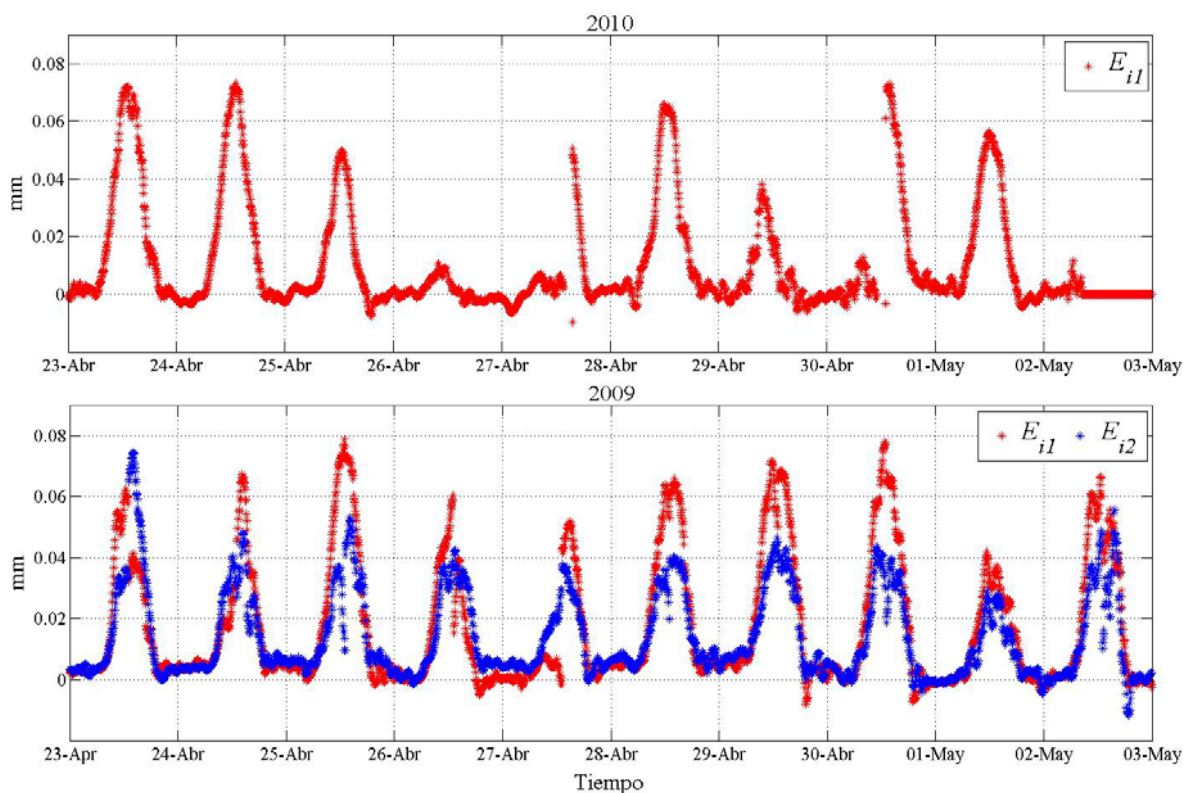


Figura 35. Panel superior: valores de  $E_{i,1}$  durante las lluvias del 2010 (este experimento no incluyó  $E_{i,2}$ ). Panel inferior:  $E_{i,j}$  durante el mismo periodo de 2009.

### III.3.3 Experimentos con protección en paredes laterales.

En los experimentos anteriores se ha considerado que la influencia de la radiación solar directa en las paredes de las charolas es mínima, ya que contienen capas de arena delgadas cuya área lateral de exposición no puede influir en los valores de evaporación. Para corroborar lo anterior se realizó un experimento del 23 de abril al 3 de mayo del 2010 donde se colocó una bandeja con las paredes laterales cubiertas con cinta adhesiva color blanco y otra bandeja tal y como se empleó en los experimentos anteriores (ver Figura 36).



Figura 36. Del lado izquierdo bandeja con protección en las paredes laterales. Del lado derecho bandeja sin protección lateral.

En la Figura 37 se muestra los valores de  $E_{i,l}$  para ambos casos de este experimento; donde podemos observar que las tasas de evaporación con paredes descubiertas son comparables a las tasas con paredes cubiertas. Lo anterior se corrobora con los valores de evaporación total diaria promedio de la arena húmeda:  $\hat{E}_l \sim 5.3$  mm (experimentos con paredes descubiertas) y  $\hat{E}_l \sim 5.4$  mm (experimentos con paredes cubiertas), de llegar a obtener valores muy diferentes entre si, se hubiera concluido que el efecto de la radiación solar en las paredes tendría una influencia directa en los valores de evaporación.



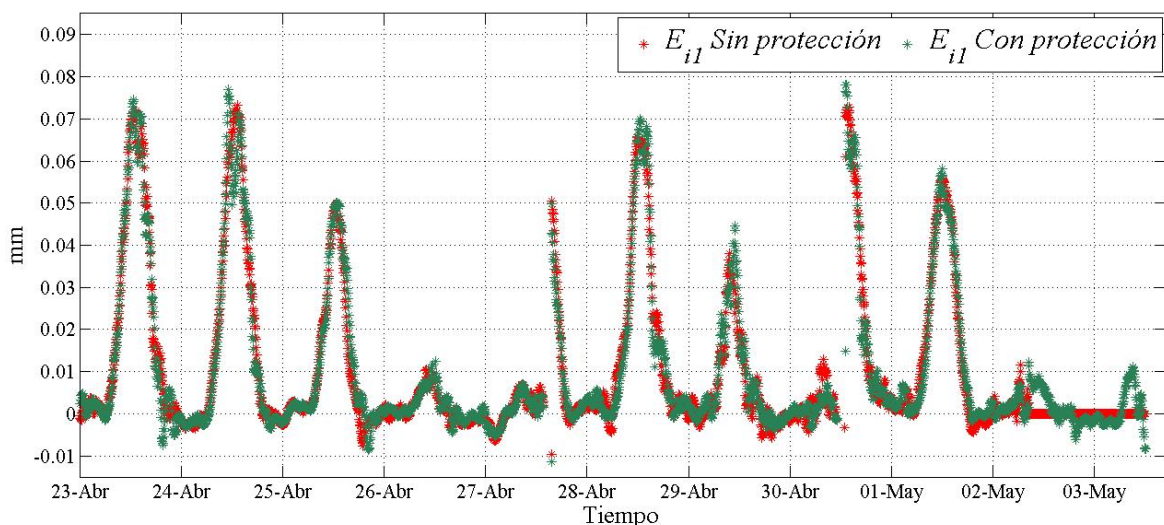


Figura 37. Valores de  $E_{i,l}$  con protección y sin protección de paredes laterales.

Finalmente, para investigar el grado de confiabilidad de nuestros resultados como representativos de la evaporación de la región de estudio, se calcularon valores medios diarios por mes (con los datos disponibles) de ambos medios ( $E_I$ ,  $E_{II}$ ). Estos valores son comparables a los de tres estaciones cercanas (calculados dividiendo los datos climatológicos mensuales entre el número de días de cada mes) (ver Tabla I). En esta tesis consideramos evaporación de arena húmeda,  $E_I$ , y de agua sola,  $E_{II}$ , en la estación CICESE ( $31^\circ 52.15' N$ ,  $116^\circ 39.86' W$ ); los datos de evaporación de agua,  $E_{III}$ , de la estación Ensenada ( $31^\circ 53.75' N$ ,  $115^\circ 35.83' W$ ); los datos de evaporación de agua,  $E_{IV}$ , de la estación El Ciprés ( $31^\circ 47.41' N$ ,  $115^\circ 35.28' W$ ); y los datos de evaporación de agua,  $E_V$ , de la estación San Diego ( $32^\circ 34.33' N$ ,  $116^\circ 58.76' W$ ).

Tabla I. Estimación de la evaporación diaria promedio.  $E_I$ , arena húmeda (este trabajo);  $E_{II}$ , agua (este trabajo);  $E_{III}$ , Ensenada;  $E_{IV}$ , El Ciprés;  $E_V$ , San Diego.

Mes	Evaporación diaria promedio (mm)				
	2009-2010*		1971-2000		**
	$E_I$	$E_{II}$	$E_{III}$	$E_{IV}$	$E_V$
Enero	2.7	2.8	2.4	2.0	3.2
Febrero	4.5	3.1	2.7	2.3	3.4
Marzo	7.0	4.9	3.2	2.7	4.7
Abril	6.4	5.7	4.0	3.7	6.1
Mayo	5.0	3.6	4.4	4.1	6.4
Junio	5.6	4.3	4.9	4.6	5.6
Julio	5.8	4.4	5.3	4.5	6.8
Agosto	5.4	4.0	5.2	4.5	6.7
Septiembre	4.7	3.6	4.6	4.2	5.8
Octubre	4.2	3.6	3.7	3.1	4.9
Noviembre	4.1	4.0	2.9	2.6	3.8
Diciembre	4.3	3.0	2.2	2.0	3.3
<b>Promedio</b>	<b>5.0</b>	<b>3.9</b>	<b>3.8</b>	<b>3.4</b>	<b>5.1</b>

\* Calculados con los datos disponibles de estos experimentos.

\*\* Estimados mediante la ecuación de Penman a partir de datos meteorológicos.

Los valores promedio de  $E_{III}$  y  $E_{IV}$  muestran gran similitud a los valores promedio de  $E_{II}$ , ya que las diferencias,  $E_{II} - E_{III} = 0.1$  y  $E_{II} - E_{IV} = 0.5$  mm, son un orden de magnitud menores a  $E_{II}$ . En el caso de  $E_V$ , aunque se trata de valores estimados mediante la ecuación de Penman, se puede observar una situación similar al compararlos con la evaporación de arena húmeda:  $E_I - E_V = -0.1$  mm.

---

## Capítulo IV. Discusión

---

Como se mencionó en la Introducción de esta tesis, la motivación inicial de este trabajo se derivó del constante saqueo de arena de los arroyos locales, lo que provoca la evaporación de capas de arena húmeda que normalmente no estarían expuestas a las condiciones ambientales. Inmediatamente después se apreció que las observaciones de la evaporación en nuestro país son pocas, y que por lo tanto hay pocos estudios sobre el tema. Posteriormente durante la búsqueda bibliográfica y el análisis preliminar de la información se encontró que existen muchos problemas por resolver en este tema. Uno de ellos es la “paradoja de la evaporación” que se originó por las diferencias entre los resultados esperados y los datos observados. Es decir: los estudios indican que en los últimos 50 años la temperatura media de la superficie de la Tierra ha aumentado (IPCC 2007) lo que supondría una mayor evaporación; sin embargo las observaciones a nivel mundial muestran que durante el mismo periodo la evaporación ha disminuido (Brutsaert 2006, Hobbins 2004, Roderick et al. 2002). Este resultado inesperado es, a grandes rasgos, la paradoja de la evaporación (Brutsaert 1998, Hobbins et al. 2004).

Para proponer una explicación a esta paradoja se ha invocado la hipótesis de Bouchet (1963), quien propone una relación complementaria entre los valores de evaporación real y potencial. Esta hipótesis fue postulada para conocer las necesidades básicas de los cultivos a partir de la estimación de la evapotranspiración; suponiendo grandes superficies homogéneas con intercambios mínimos de calor y humedad y bajo condiciones de radiación constante. Numerosos trabajos se han centrado en conocer mejor esta hipótesis (Brutsaert y Parlange 1998, Ramírez y Hobbins 2005, Khaler y Brutsaert 2006, JingJie et al. 2009).

Los experimentos de esta tesis han reproducido patrones muy similares a los encontrados por Bouchet (1963), a pesar de que nuestros experimentos tienen escalas temporales y espaciales menores a las usadas en experimentos previos. La relación complementaria parece observarse principalmente cuando la bandeja con arena húmeda llega a un punto crítico de sequedad. Para apreciar mejor esta situación se ha propuesto un índice de aridez ( $D_{ws}$ ), el cual va de 0 a 1 (0 cuando la bandeja se encuentra a su máximo de humedad, y 1 cuando la bandeja está completamente seca).

La Figura 38 muestra la evaporación normalizada,  $(E_{ij})_N \equiv E_{ij} / \max(E_{ij})$ , como función de  $D_{ws}$ .

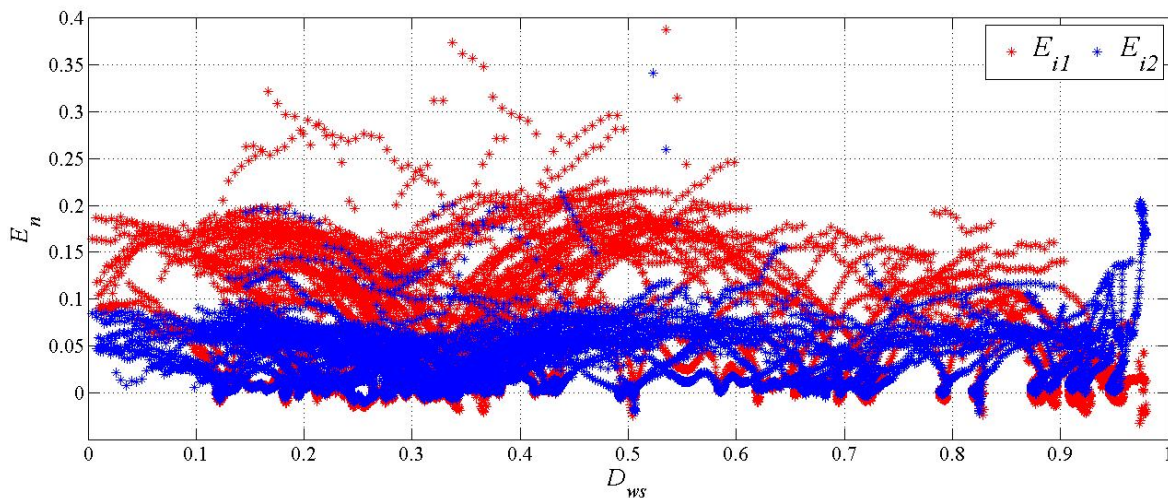


Figura 38. Evaporación normalizada como función del índice de aridez para el periodo del 14 de abril al 9 de junio del 2009.

De acuerdo a la hipótesis de Bouchet (1963) nos enfocaremos en la región posterior al punto crítico de sequedad, que en este caso (Figura 38) se encuentra aproximadamente en  $D_{ws} = 0.91$ . El punto crítico se da cuando la evaporación de la arena húmeda disminuye (a pesar de las condiciones ambientales favorables) y la evaporación del agua aumenta (debido a las mismas condiciones favorables). De acuerdo a la hipótesis de Bouchet (1963) este comportamiento resulta debido a que la energía no utilizada por la arena (que disminuyó su evaporación) la “otorga” al agua. Supuestamente es por esto que, conforme más se seca la arena, ésta evapora menos y otorga más energía al agua, la cual aumenta su evaporación (Figura 41).

En nuestra serie de tiempo se utilizó como ejemplo el día 25 de Mayo del 2009 (Figura 39). Se observa que aproximadamente a las 9:00 h las tasas de evaporación para la charola de arena y para la charola de agua empiezan a divergir, y su tendencia es la contraria a la que presentan de manera normal (agua aumenta la evaporación y arena la disminuye) y alrededor de las 13:00 h llegan a su máxima separación.

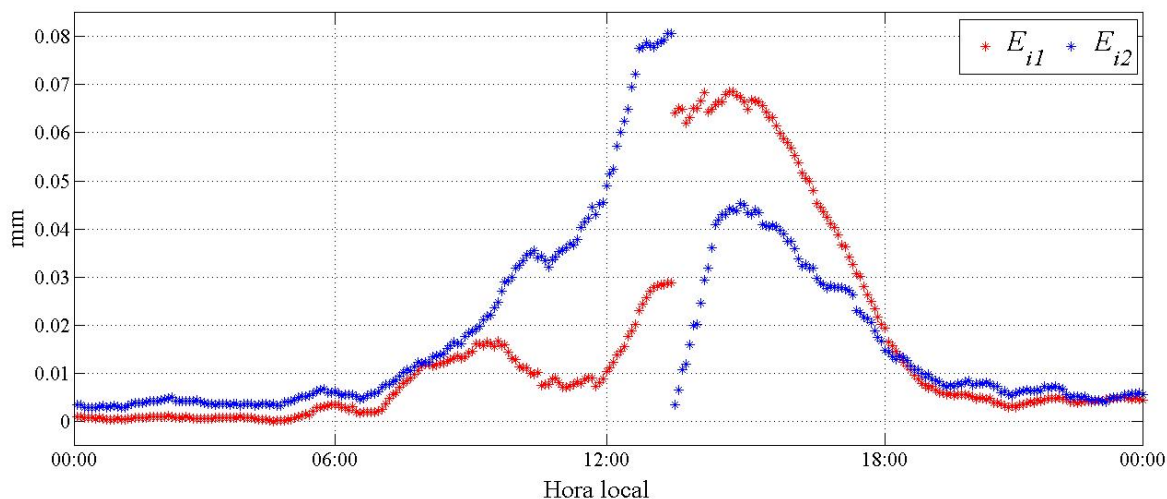


Figura 39. Series de tiempo de evaporación durante el 25 de mayo del 2009.

Enfocándonos en el índice de aridez para este día (Figura 40) también se aprecia esta separación además de observar un patrón similar al encontrado por Bouchet (1963) (Figura 41), lo que sugiere que nuestras escalas diferentes no fueron una limitante para encontrar el mismo comportamiento. Es importante mencionar que Bouchet (1963), Kahler y Brutsaert (2006) utilizan un índice de humedad (y nosotros un índice de aridez) por lo que el patrón mostrado en la Figura 40 es una imagen especular de la de Bouchet (ver Figura 41).

La hipótesis de Bouchet (1963) sugiere que después del punto crítico (a mayor humedad) las evaporaciones real y potencial deberían ser iguales independientemente de la humedad (Figura 41); sin embargo nuestros resultados indican que el comportamiento de ambas evaporaciones antes del punto crítico (también a mayor humedad) es mucho más complicado (Figura 38). Esta configuración presentada con mayor humedad no se había reportado con anterioridad.

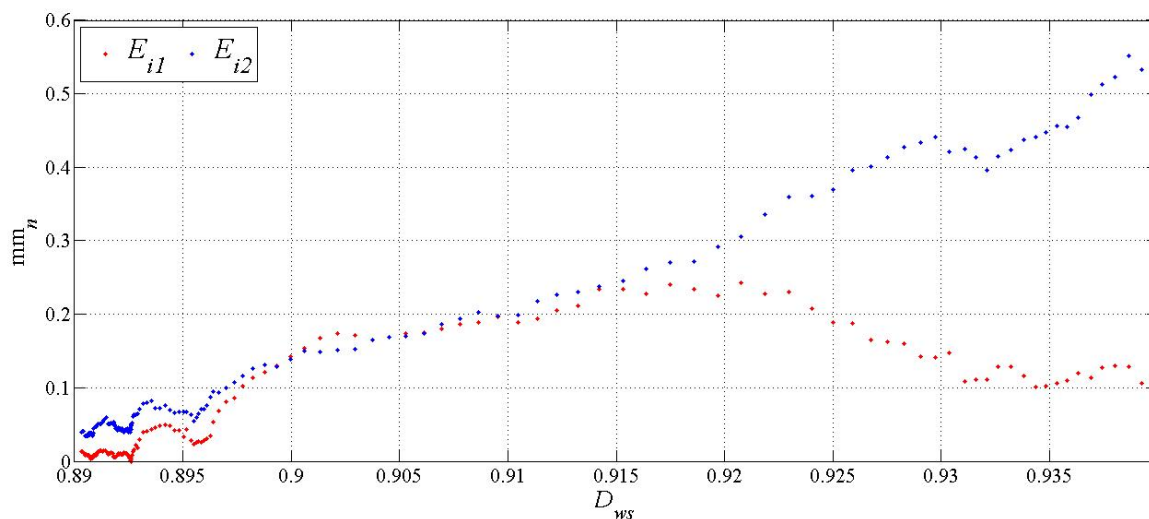


Figura 40. Evaporación como función del índice de aridez para el 25 de mayo del 2009.

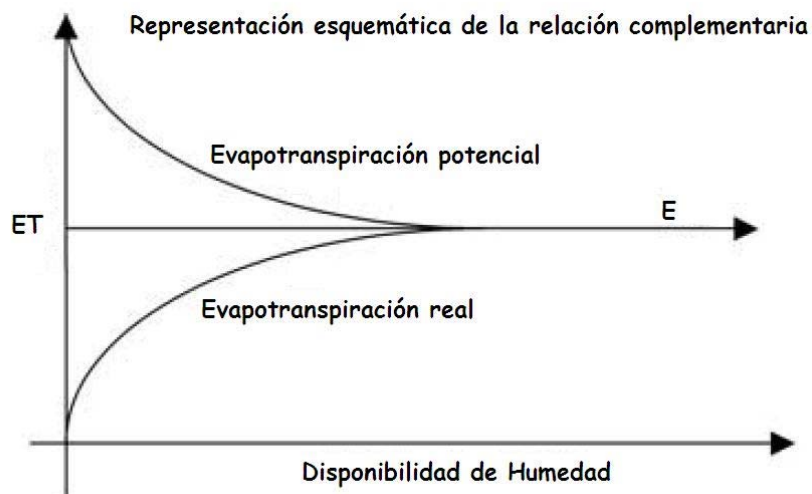


Figura 41. Representación esquemática de la relación complementaria propuesta por Bouchet (1963).

Este comportamiento se debe a las condiciones ambientales favorables. Por un lado se presentaron temperaturas relativamente altas, superiores a  $40^{\circ}\text{C}$  para la arena (Figura 42), y la humedad fue menor en comparación con los días anteriores y posteriores (Figura 43). Además la disponibilidad de agua en la charola de arena era mínima pues la última recarga se había realizado el 22 de mayo.

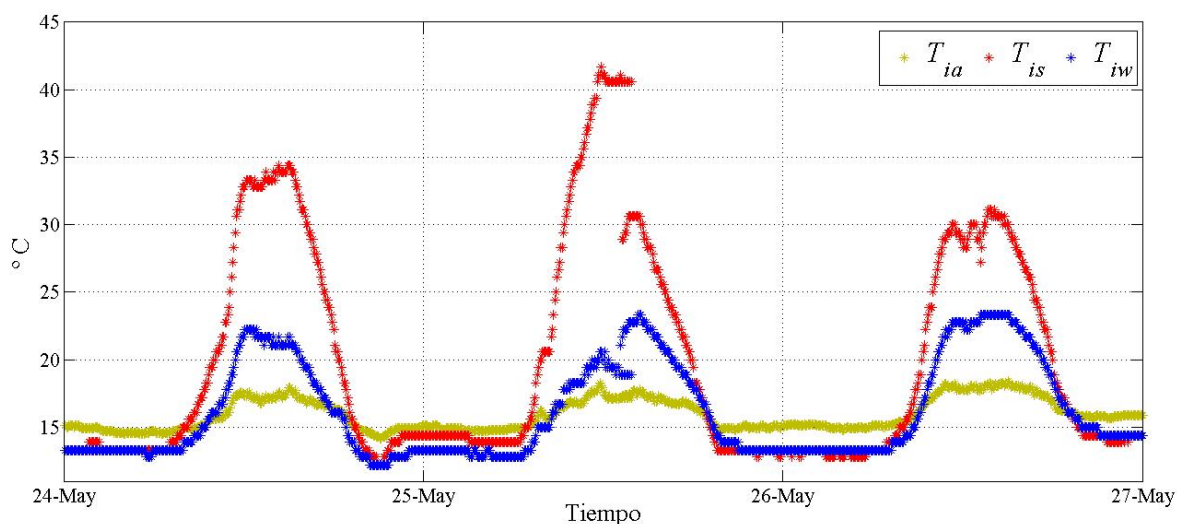


Figura 42.  $T_{ia}$ ,  $T_{is}$  y  $T_{iw}$  para los días 24-26 de mayo.

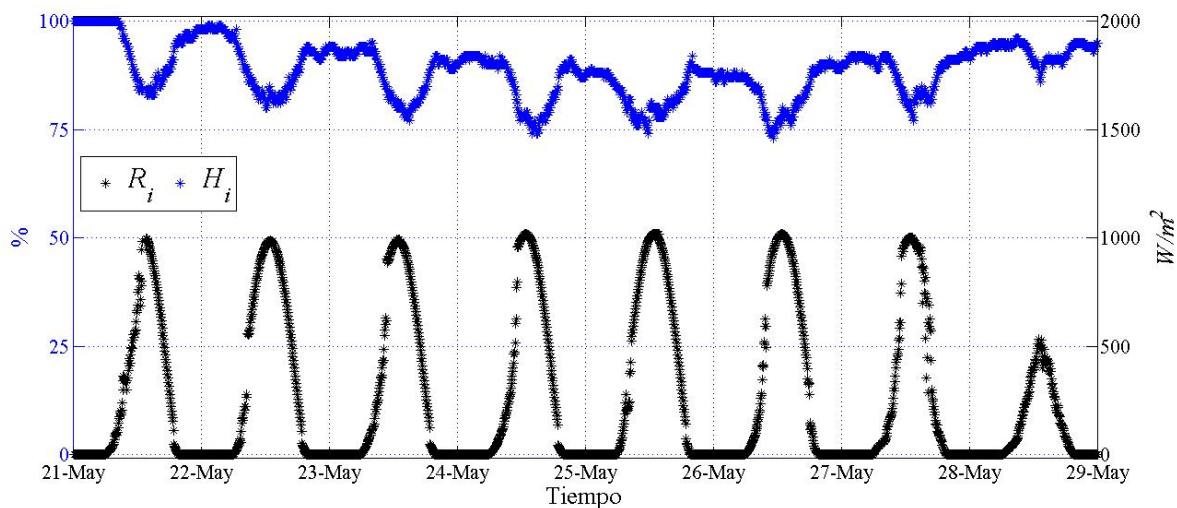


Figura 43.  $R_i$  y  $H_i$  del 21 al 28 de mayo de 2010.

---

## Capítulo V. Conclusiones

---

Las estimaciones de evaporación obtenidas en este trabajo son comparables a mediciones independientes realizadas en estaciones cercanas (ver Tabla I), a pesar de las diferencias en escalas, metodología y periodo de observación, por lo que concluyo que éstas son representativas de la evaporación natural en la región.

Las estimaciones de este trabajo, además, describen detalladamente la evolución temporal de este proceso por primera vez (Figuras 10, 17, 20, 21, 26, 29, 32).

La principal variable meteorológica que determina la evaporación es la radiación solar (ver, por ejemplo, Figura 14); sin embargo, en casos particulares, también las temperaturas (del aire y de las charolas), y la humedad juegan un papel importante en la evaporación (ver Figuras 19 y 23).

La condensación como posible fuente de agua es importante y, al parecer este fenómeno no había sido tomado en cuenta en los anteriores estudios de evaporación (ver Figuras 18 y 22).

Los valores de evaporación de los experimentos con recarga natural (lluvia) son comparables a los de los experimentos con recarga artificial (Figura 35), por lo que se concluye que la humedad generalizada del ambiente influye poco en la evaporación de las bandejas y, por lo tanto, nuestros experimentos son un buen modelo de la situación real.

De los experimentos con protección de las paredes concluyo que la radiación solar incidente en las paredes tiene un efecto mínimo en la evaporación cuando se trata de capas de área delgadas (ver Figura 37).

De manera general se puede concluir que la extracción masiva de arena sí representa un daño potencial a las zonas, pues los bajos niveles de humedad provocados por la evaporación causan la pérdida del recurso hídrico a una mayor velocidad.

Finalmente, durante nuestros experimentos se encontró un comportamiento semejante a la relación complementaria propuesta por Bouchet (1963) (Figura 41), por lo que se concluye que esta relación puede ser observada a escalas menores a las que han sido utilizadas anteriormente (Khaliq y Brutsaert 2006, JingJie et al. 2009, Ramírez y Hobbins 2005). Es decir: la evaporación de las bandejas con recarga artificial parece ser comparable a la



evaporación a mayores escalas con recargas naturales. Lo anterior implica que tanto la hipótesis de evaporación de Bouchet (1963) (relación complementaria) como la explicación de las discrepancias entre evaporación esperada y observada de Brutsaert y Parlange (1998) (paradoja de la evaporación) deben aún ser investigadas. En otras palabras, no se ha encontrado ninguna complementariedad debido a que cada bandeja mantiene de manera individual su tasa de evaporación y la única limitante en el caso de la bandeja con arena húmeda es la disponibilidad de agua; contrario a la hipótesis de Bouchet donde se menciona que la energía no aprovechada para la evaporación de la arena húmeda es otorgada a la evaporación del agua justificando la divergencia.

---

**Bibliografía.**

---

- Bouchet, R. J. (1963). Evapotranspiration réelle, évapotranspiration potentielle, et production agricole. *Annales Agronomiques*, **14**: 743-824.
- Brutsaert, W. (1982). *Evaporation into the Atmosphere. Theory, History and Applications*. Environmental Fluid Mechanics Series. Kluwer Academic Publishers. 316 pp.
- Brutsaert, W. (2006). Indications of increasing land surface evaporation during the second half of the 20th century. *Geophysical Research Letters*, **33**: L20403.
- Brutsaert, W. y Parlange, M. B. (1998). Hydrologic cycle explains the evaporation paradox. *Nature*, **396**: 30.
- Campos Aranda, D. F. (1998). *Procesos del Ciclo Hidrológico*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí Facultad de Ingeniería. Tercera edición. México 260 pp.
- Fox, M. J. (1968). A technique to determine evaporation from dry stream beds. *Journal of Applied Meteorology*, **7**: 697-701.
- Hobbins, M. T., Ramírez, J. A., Brown T. C. (2004). Trends in pan evaporation and actual evapotranspiration across the conterminous U.S.: Paradoxical or complementary? *Geophysical Research Letters*, **31**: L13503.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007). *Cambio climático 2007: Informe de síntesis*. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 pp.

- JingJie, Y., YongQiang, Z., ChangMing, L. (2009). Validity of the Bouchet's complementary relationship at 102 observatories across China. *Science in China Series D: Earth Sciences Springer*, **52**: 708 -713.
- Kahler, D. M. y Brutsaert, W. (2006). Complementary relationship between daily evaporation in the environment and pan evaporation. *Water Resources Reseaerch*, **42**: W05413.
- Maderey Rascón, L. E. (2005). Principios de Hidrogeografía. Estudio del Ciclo Hidrológico. *Serie Textos Universitarios, Núm. 1*. UNAM, México, D.F. 100 pp.
- Monsalve Sáenz G. (1999). *Hidrología en la Ingeniería*. Grupo ALFAOMEGA. Segunda Edición, México D.F. 359 pp.
- Mcllroy I. C. (1970). An instrument for continuous recording of natural evaporation. *Agricultural Meteorology*, **9**: 93-100.
- Mcllroy I. C. (1984). Terminology and concepts in Natural Evaporation. *Agricultural Water Management. Elsevier Science Publishers*, **8**: 77-98.
- Linacre E. T. (1994). Estimating U.S. Class A pan evaporation from few climate data. *Water International*, **19**: 5-14.
- Linacre E. T. (2004). Evaporation trends. *Theoretical and Applied Climatology*, **79**: 11- 21.
- Organización Meteorológica Mundial (WMO) (1996). *Guía de Instrumentación y Observaciones Meteorológicas*. Ginebra, Suiza.
- Pavia, E. G. (2008). Evaporation from a thin layer of wet sand. *Geophysical Research Letters*, **35**: L08401.
- Penman, H. L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical sciences*, **193**: 120-145.

- Qiu, G. Y., Ben-Asher, J., Yano, T., Momii, K. (1999). Estimation of soil evaporation using the differential temperature method. *Soil Science Society of America Journal*, **63**: 1608-1614.
- Ramírez, J. A. y Hobbins M. T. (2005). Observational evidence of the complementary relationship in regional evaporation lends strong support for Bouchet's hypothesis. *Geophysical Research Letters*, **32**: L15401.
- Roderick, M. L. y Farquhar, G. D. (2002). The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years. *Science*, **298**: 1410-1411.
- Roderick, M. L., Hobbins M. T., Farquhar G. D. (2009). Pan evaporation trends and the terrestrial water balance. I. Principles and Observations. *Geography Compass*, **3/2**: 746-760.
- Roderick, M. L., Hobbins M. T., Farquhar G. D. (2009). Pan evaporation trends and the terrestrial water balance. II. Energy Balance and Interpretation. *Geography Compass*, **3/2**: 760-780.