



**MINISTERIO DE  
MEDIO AMBIENTE**

DIRECCIÓN GENERAL DE OBRAS HIDRÁULICAS Y CALIDAD  
DE LAS AGUAS

**Q 5017001 H  
CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO**

**OFICINA DE PLANIFICACION HIDROLOGICA**

**TRABAJOS DE CONSULTORIA Y ASISTENCIA**

**PRESUPUESTO DEL  
ORGANISMO**

CLAVE:  
**2003-PH-27-I**

REF. CRONOLOGICA:  
**12/2003**

TIPO:

**ASISTENCIA TÉCNICA**

TITULO:

**CARACTERIZACIÓN ESPACIO-TEMPORAL DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN LA  
ZONA NO SATURADA DEL VASO DE LA LAGUNA DE GALLOCANTA**

PRESUPUESTO DE CONTRATA:

PRESUPUESTO DE ADJUDICACION:

SERVICIO:

**OFICINA DE PLANIFICACIÓN HIDROLÓGICA**

DIRECTOR:

**MIGUEL ÁNGEL GARCÍA VERA**

CONSULTOR:

**CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS (CSIC)**

TOMO:

**TOMO ÚNICO**

EJEMPLAR:

**EJEMPLAR 1 DE 4**

CONTENIDO:

**MEMORIA Y ANEJOS**

NUMERO ARCHIVO O P H:

**OFICINA DE PLANIFICACION HIDROLOGICA**  
**TRABAJOS DE CONSULTORIA Y ASISTENCIA**

---

CLAVE: 2003-PH-27-I

TITULO: CARACTERIZACIÓN ESPACIO-TEMPORAL DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN LA  
ZONA NO SATURADA DEL VASO DE LA LAGUNA DE GALLOCANTA

---

Zaragoza, a 24 de febrero de 2004

El Director de los trabajos

El Consultor:

Fdo.: Miguel. A. García Vera

Fdo.: Antonio Martínez Cob

Examinado:  
El Jefe de la O P H

Fdo.: Antonio Coch Flotats

## RESUMEN

El objetivo del trabajo ha sido la **realización de un análisis sobre la superficie de la laguna de Gallocanta que experimenta el fenómeno de evaporación capilar** mediante la caracterización espacio-temporal del contenido de humedad de la laguna. Para la realización de este objetivo se han realizado las siguientes tareas:

a) *Caracterización de datos meteorológicos.*

Se ha continuado con el mantenimiento y toma de datos de la estación meteorológica automática de Gallocanta. Actualmente, se dispone de datos meteorológicos semihorarios en el periodo de febrero de 2000 a diciembre de 2003. Las variables controladas han sido las siguientes:

- 1) *Precipitación.* La precipitación media de todo el periodo fue de 393 mm año<sup>-1</sup>. El mes más lluvioso fue mayo y los menos lluviosos, febrero y junio. Se han caracterizado las intensidades de precipitación diarias y el número de días con precipitación.
- 2) *Temperatura del aire y del suelo.* La temperatura media anual del aire fue 11.3 °C, siendo julio y agosto los meses más cálidos y diciembre el más frío. La temperatura mínima absoluta registrada fue de -22.0 °C el 22 de diciembre de 2001. Se produjeron heladas (temperatura mínima menor que 0 °C) en el 25 % de los días. La temperatura media mensual del suelo fue mayor que la temperatura del aire. En los meses fríos esta diferencia fue muy reducida y en los meses cálidos, mayor (del orden de 5 °C).
- 3) *Humedad relativa y déficit de presión de vapor.* La humedad relativa media anual del aire fue del 69 % con el máximo valor medio en enero y el mínimo en julio. El promedio del déficit de presión de vapor fue mínimo en invierno (alrededor de 0.2 kPa) y máximo durante el verano (en torno a 1.4 kPa).
- 4) *Radiación solar global, radiación neta y flujo de calor en el suelo.* Los valores menores de la radiación global solar media mensual se registraron en los meses invernales (en torno a 80 W m<sup>-2</sup>), mientras que los mayores se obtuvieron en julio y agosto (alrededor de 300 W m<sup>-2</sup>). El 27 % de los días fueron despejados, el 42 % parcialmente nubosos, el 21 % nubosos y el 10 % muy nubosos. Los promedios mensuales de la radiación neta fueron menores en diciembre (alrededor de 20 W m<sup>-2</sup>) y máximos en junio (valores próximos a los 150 W m<sup>-2</sup>). El flujo medio mensual de calor en el suelo fue menor en noviembre (en torno a -3 W m<sup>-2</sup>) y mayor en mayo, junio y julio (4 W m<sup>-2</sup>).
- 5) *Velocidad y dirección del viento a 2.0 m de altura.* La velocidad media mensual del viento osciló en torno a 3 y 4 m s<sup>-1</sup> y mostró una elevada variabilidad interanual. La racha máxima diaria se registró el 3 de abril de 2003 y fue de 25.6 m s<sup>-1</sup> (92 km h<sup>-1</sup>). De acuerdo con los promedios diarios, los vientos estuvieron en calma en el 2.5 % de los días y fueron flojos en el 23 % de los días, moderados en el 60 % y fuertes en el 14 %.

Los vientos flojos o en calma fueron más frecuentes en horas cercanas al amanecer y los moderados o fuertes, a primeras horas de la tarde. La dirección del viento más frecuente fue la NO (15.1 %) seguida de la NNO (10.4 %). También fue importante la dirección SE (8.2 %).

b) *Estimación de la evapotranspiración real por el método de renovación de la superficie.*

Se ha estimado la evapotranspiración real ( $ETR$ ) en los márgenes de la laguna de Gallocanta mediante el método de renovación de la superficie ( $ET_{sr}$ ) desde febrero de 2000 a diciembre de 2003. Estas estimas se han comparado con la evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ) estimada por el método FAO Penman-Montheith y con la evaporación del suelo completamente desnudo en ausencia de ascenso capilar ( $Evp_{sue}$ ) siguiendo a Allen et al (1998). Los valores totales obtenidos para los cuatro periodos en los que se pudieron realizar los cálculos pertinentes fueron los siguientes:

Periodo	$ET_{sr}$ (mm)	$ET_0$ (mm)	$Evp_{sue}$ (mm)
16 febrero a 27 noviembre de 2000	739	1021	277
21 marzo a 22 julio de 2001	365	571	61
8 diciembre de 2001 a 15 diciembre de 2002	867	1111	343
9 de enero a 31 de diciembre de 2003	836	1041	310

Las principales conclusiones obtenidas de la comparación de la  $ET_{sr}$ , la  $ET_0$  y la  $Evp_{sue}$  fueron:

- 1) El hecho de que los valores de la  $ET_{sr}$  fueran más próximos a los de la  $ET_0$  que a los de la  $Evp_{sue}$  indica que la precipitación directa sobre la superficie del suelo en los márgenes de la laguna no fue la única fuente de agua. La existencia de flujos superficiales y subsuperficiales de agua desde las zonas más elevadas de la cuenca puede justificar los valores de  $ET_{sr}$  calculados.
- 2) Los valores de la  $ET_{sr}$  fueron similares y mostraron un comportamiento semejante a los de la  $ET_0$  durante los meses de octubre a mayo, pero fueron menores que éstos entre junio y septiembre.

c) *Medidas del contenido de humedad en el suelo.*

Para el control del contenido de humedad en la zona no saturada en la playa y márgenes de la laguna de Gallocanta se instalaron nueve tubos de PVC de una profundidad aproximada de entre 0.5 y 1.0 m. En estos tubos se realizaron medidas del contenido volumétrico de agua del suelo ( $\theta$ ) en 13 fechas comprendidas entre el 17 de julio y el 17 de diciembre de 2003.

Para estas medidas, se empleó una sonda de capacitancia modelo Diviner 2000 de la marca Sentek. Para la calibración de la sonda se tomaron muestras de suelo en las que se determinaron la capacidad de campo, el punto de marchitez, la densidad aparente, el contenido volumétrico de agua del suelo, la conductividad eléctrica del extracto de agua del suelo (1:5) y la granulometría.

Las principales conclusiones derivadas del control de la humedad del suelo en los nueve sondeos fueron:

- 1) A partir de los 21 valores obtenidos, se determinó que la *densidad aparente* media del suelo entre 0 y 10 cm de profundidad fue de  $1.23 \text{ g cm}^{-3}$ ; entre 10 y 20 cm,  $1.31 \text{ g cm}^{-3}$ ; y entre 20 y 30 cm,  $1.38 \text{ g cm}^{-3}$ .
- 2) Del total de los 34 valores obtenidos, se determinó que la *capacidad de campo* media fue del 33 % con un mínimo del 19 % y un máximo del 44 %. El *punto de marchitez* medio fue del 23% con un mínimo del 14 % y un máximo del 32 %.
- 3) De las 22 granulometrías analizadas, se obtuvo que las *clases texturales* dominantes fueron la arcillosa (32 %), la arcillo limosa (23 %) y la franco arcillosa y franco arcillo arenosa (14 % cada una). Se observó una tendencia al aumento en el contenido en arcillas con la profundidad.
- 4) La *conductividad eléctrica 1:5* sugirió que, en 6 de los 9 tubos, el perfil de acumulación de sales fue coherente con un ascenso capilar que produjo una acumulación de sales en superficie.
- 5) Sólo en tres de los tubos se obtuvieron curvas de calibración de  $\theta$  realmente adecuadas. Las conclusiones obtenidas de los perfiles de humedad medidos se encuentran sujetas a las incertidumbres de la calibración. En futuras fases del estudio es necesario mejorar la calibración realizada.
- 6) El análisis pormenorizado del contenido de humedad en los distintos perfiles no permitió aportar conclusiones definitivas debido al alto grado de incertidumbre en la calibración motivado por la falta de variabilidad en los valores de frecuencia escalada (medidos por el aparato) y en los contenidos de humedad medidos en laboratorio. A muy grandes rasgos parece que existió una variación del comportamiento del perfil en función de la distancia a la playa humedecida. *La escasa variabilidad temporal y los elevados valores del contenido de humedad indicaron que, al parecer, sí existió un ascenso capilar en algunos puntos de medida.*
- 7) Con el fin de tener una evidencia cualitativa de la existencia de ascenso capilar, se compararon los contenidos de humedad medidos en la capa del suelo de 0 a 10 cm con los calculados a partir de un balance de agua en el suelo suponiendo la ausencia de evaporación capilar y que la precipitación es la única entrada de agua. Los contenidos de humedad medidos fueron significativamente mayores que los calculados ( $\alpha = 0.95$ ). Esta diferencia fue menor en los puntos más alejados al borde de la laguna y mayor en los más próximos. Este hecho es un indicativo más de la existencia del proceso de evaporación capilar. *El déficit medio entre los valores medidos y los calculados fue de  $14.7 \text{ mm día}^{-1}$ , valor que indica la importancia de la evaporación capilar pero que no debe considerarse como correcto cuantitativamente. Se debe mejorar la precisión de este valor a partir de estimaciones basadas en un mayor número de datos y en una mejor calibración.*



# ÍNDICE

RESUMEN.....	i
ÍNDICE .....	v
ÍNDICE DE FIGURAS .....	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
AGRADECIMIENTOS .....	xiii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Estructura del informe .....	1
1.2. Justificación y antecedentes .....	1
1.3. Objetivos .....	2
1.4. Situación geográfica.....	3
2. MATERIAL Y MÉTODOS .....	5
2.1. Caracterización de la humedad de perfiles de suelo .....	5
2.1.1. Sistema de medida de la humedad del suelo.....	5
2.1.2. Calibración de la sonda de humedad del suelo.....	10
2.2. Caracterización meteorológica en la laguna de Gallocanta .....	11
2.3. Determinación de la evapotranspiración en los márgenes de la laguna de Gallocanta.....	13
2.4. Análisis estadísticos.....	16
3. RESULTADOS .....	17
3.1. Medidas de humedad en el suelo .....	17
3.1.1. Muestras de suelo .....	17
3.1.2. Calibración de la sonda de humedad del suelo.....	20
3.1.3. Perfiles de humedad en el suelo .....	24
3.1.4. Evidencia cualitativa de la evaporación capilar .....	35
3.2. Caracterización meteorológica de la laguna de Gallocanta .....	38
3.2.1. Precipitación.....	39
3.2.2. Temperatura del aire y del suelo .....	40
3.2.3. Humedad relativa y déficit de presión de vapor.....	43
3.2.4. Radiación solar global, radiación neta y flujo de calor en el suelo .....	45
3.2.5. Velocidad y dirección del viento .....	48
3.3. Evapotranspiración real en los márgenes de la laguna de Gallocanta .....	52

3.3.1. Comparación con las estimas de evapotranspiración de referencia y de evaporación de un suelo desnudo.....	52
3.3.2. Estimaciones decenales y estacionales de la evapotranspiración real en los márgenes de la laguna de Gallocanta.....	61
4. CONCLUSIONES.....	63
BIBLIOGRAFÍA.....	67
GLOSARIO DE SÍMBOLOS.....	69
ANEJO 1.....	73
ANEJO 2.....	75
ANEJO 3.....	81
ANEJO 4.....	85
ANEJO 5.....	87
ANEJO 6.....	89
ANEJO 7.....	93
ANEJO 8.....	97

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización geográfica de los tubos de acceso de medida de la humedad del suelo y de la estación meteorológica automática de Gallocanta. ....	3
Figura 2. Pantalla (A) y parte trasera (B) del equipo acumulador de datos de un sistema <i>Diviner 2000</i> de humedad del suelo. ....	6
Figura 3. Sonda portátil de un equipo <i>Diviner 2000</i> de humedad del suelo. ....	7
Figura 4. Barrenado del suelo para introducir un tubo de acceso de PVC para la medida de la humedad del suelo (izquierda). Acumulación de agua en el punto de perforación (derecha). ....	9
Figura 5. Contenido volumétrico de agua del suelo (determinado a partir de muestras de suelo) frente a la frecuencia escalada ( <i>SF</i> ) registrada con la sonda <i>Diviner</i> el 29 de julio de 2003. Todos los tubos conjuntamente. ....	22
Figura 6. Contenido volumétrico de agua del suelo (determinado a partir de muestras de suelo) frente a la frecuencia escalada ( <i>SF</i> ) registrada con la sonda <i>Diviner 2000</i> el 29 de julio de 2003. Tubos individuales. ....	23
Figura 7. Evolución de los valores calibrados del contenido volumétrico de agua del suelo en cada una de las distintas profundidades de medida. Julio a diciembre de 2003. Tubos 80 y 81. ....	26
Figura 8. Evolución de los valores calibrados del contenido volumétrico de agua del suelo en cada una de las distintas profundidades de medida. Julio a diciembre de 2003. Tubos 84 y 89. ....	27
Figura 9. Evolución de los valores calibrados del contenido volumétrico de agua del suelo en cada una de las distintas profundidades de medida. Julio a diciembre de 2003. Tubos 90 y 95. ....	28
Figura 10. Evolución de los valores calibrados del contenido volumétrico de agua del suelo en cada una de las distintas profundidades de medida. Julio a diciembre de 2003. Tubo 98. ....	29
Figura 11. Evolución del perfil de los valores calibrados del contenido volumétrico de agua del suelo en cada una de las fechas de medida. Julio a diciembre de 2003. Tubo 80. ....	29
Figura 12. Evolución del perfil de los valores calibrados del contenido volumétrico de agua del suelo en cada una de las fechas de medida. Julio a diciembre de 2003. Tubos 81 y 84. ....	30
Figura 13. Evolución del perfil de los valores calibrados del contenido volumétrico de agua del suelo en cada una de las fechas de medida. Julio a diciembre de 2003. Tubos 89 y 90. ....	31
Figura 14. Evolución del perfil de los valores calibrados del contenido volumétrico de agua del suelo en cada una de las fechas de medida. Julio a diciembre de 2003. Tubos 95 y 98. ....	32

- Figura 15. Evolución de los valores calibrados del contenido volumétrico acumulado de agua entre los 0 y 50 cm en las distintas fechas de medida y en los distintos tubos. Julio a diciembre de 2003. .... 34
- Figura 16. Evolución de las diferencias entre los valores simulados [ecuación (14)] y medidos del contenido volumétrico de agua entre 0 y 10 cm de profundidad en las distintas fechas de medida y en los distintos tubos. Julio a diciembre de 2003. .... 37
- Figura 17. Medias mensuales de las temperaturas medias diarias del aire y del suelo (0.03-0.06 m de profundidad) durante los años 2000 a 2003. .... 43
- Figura 18. Medias mensuales del déficit de presión de vapor medio diario durante los años 2000 a 2003 y el año medio. .... 45
- Figura 19. Medias mensuales de la radiación solar global media diaria durante los años 2000 a 2003 y el año medio. .... 46
- Figura 20. Medias mensuales de la radiación neta media diaria durante los años 2000 a 2003 y el año medio. .... 47
- Figura 21. Medias mensuales del flujo medio diario de calor en el suelo durante los años 2000 a 2003 y el año medio. .... 47
- Figura 22. Evolución de las medias mensuales de la velocidad media diaria del viento a 2.0 m sobre el nivel del suelo durante los años 2000 a 2003 y el año medio. .... 48
- Figura 23. Frecuencias relativas anuales de distintos rangos de velocidad semihoraria del viento a 2.0 m sobre el nivel del suelo (año medio). .... 50
- Figura 24. Medias anuales y mensuales (enero y septiembre) de las velocidades semihorarias del viento a 2.0 m sobre el nivel del suelo (año medio). .... 50
- Figura 25. Rosas de los vientos anuales para todas las categorías de velocidad de viento (menos viento en calma). .... 51
- Figura 26. Estimaciones diarias de evapotranspiración real en los márgenes de la laguna de Gallocanta con el método de renovación de la superficie ( $ET_{sr}$ ), de evapotranspiración de referencia con el método Penman-Monteith ( $ET_0$ ) y de evaporación de agua de un suelo completamente desnudo en ausencia de ascenso capilar ( $Evp_{sue}$ ), y registros diarios de precipitación acumulada ( $PrAcum$ ). Periodos 16 de febrero a 27 de noviembre de 2000 y 21 de marzo a 22 de julio de 2001. .... 53
- Figura 27. Estimaciones diarias de evapotranspiración real en los márgenes de la laguna de Gallocanta con el método de renovación de la superficie ( $ET_{sr}$ ), de evapotranspiración de referencia con el método Penman-Monteith ( $ET_0$ ) y de evaporación de agua de un suelo completamente desnudo en ausencia de ascenso capilar ( $Evp_{sue}$ ), y registros diarios de precipitación acumulada ( $PrAcum$ ). Periodos 8 de diciembre de 2001 a 15 de diciembre de 2002 y 9 de enero a 31 de diciembre de 2003. .... 54
- Figura 28. Medias móviles (5 días) de la diferencia ( $ET_{sr}-ET_0$ ) entre las estimaciones diarias de evapotranspiración obtenidas con los métodos de renovación de la superficie ( $ET_{sr}$ ) y Penman-Monteith ( $ET_0$ ) en los márgenes de la laguna de

Gallocanta, así como de la precipitación acumulada ( $PrAcum$ ). Periodos 8 de diciembre de 2001 a 15 de diciembre de 2002 y 9 de enero a 31 de diciembre de 2003. ....	56
Figura 29. Medias móviles (5 días) de la diferencia ( $ET_{sr}-ET_0$ ) entre las estimas diarias de evapotranspiración obtenidas con los métodos de renovación de la superficie ( $ET_{sr}$ ) y Penman-Monteith ( $ET_0$ ) en los márgenes de la laguna de Gallocanta, así como de la precipitación acumulada ( $PrAcum$ ). Periodos 8 de diciembre de 2001 a 15 de diciembre de 2002 y 9 de enero a 31 de diciembre de 2003. ....	57
Figura 30. Medias mensuales de la diferencia ( $ET_{sr}-ET_0$ ) entre las estimas diarias de evapotranspiración obtenidas con los métodos de renovación de la superficie ( $ET_{sr}$ ) y Penman-Monteith ( $ET_0$ ) en los márgenes de la laguna de Gallocanta. 16 de febrero de 2000 a 31 de diciembre de 2003. ....	59
Figura 31. Medias mensuales de la diferencia ( $Evp_{sue}-ET_0$ ) entre las estimas diarias de evaporación de suelo desnudo en ausencia de evaporación capilar ( $Evp_{sue}$ ) y de evapotranspiración de referencia obtenidas con el método de Penman-Monteith ( $ET_0$ ) en los márgenes de la laguna de Gallocanta. 16 de febrero de 2000 a 31 de diciembre de 2003. ....	59



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas <i>UTM</i> de cada punto de la laguna de Gallocanta en donde se colocó un tubo de acceso de PVC para las lecturas de humedad del suelo. ....	8
Tabla 2. Profundidad máxima de lectura de humedad de suelo en cada punto de la laguna de Gallocanta en que se colocó un tubo de acceso de PVC. ....	9
Tabla 3. Valores de densidad aparente ( $\text{g cm}^{-3}$ ) determinados en siete puntos de la laguna de Gallocanta y tres profundidades. CV, coeficiente de variación. ....	17
Tabla 4. Contenidos volumétricos de agua a $-1/3$ ( <i>capacidad de campo</i> ) y $-15$ atm ( <i>punto de marchitez</i> ) determinados en siete puntos de la laguna de Gallocanta, en cinco profundidades. CV, coeficiente de variación. ....	18
Tabla 5. Granulometría y clase textural (Ministerio de Agricultura de los EE.UU.) obtenidas en cinco puntos de la laguna de Gallocanta y cinco profundidades..	19
Tabla 6. Conductividad eléctrica 1:5 ( $\text{dS m}^{-1}$ ) determinada en nueve puntos de la laguna de Gallocanta y cinco profundidades. ....	20
Tabla 7. Valores de frecuencia escalada ( <i>SF</i> ) y de contenido volumétrico de agua del suelo registrados durante el proceso de calibración en siete puntos de la laguna de Gallocanta a varias profundidades el 29 de julio de 2003. ....	21
Tabla 8. Ecuaciones ajustadas entre los valores de <i>SF</i> (variable <i>x</i> ) y contenido volumétrico de agua del suelo determinado a partir de muestras de suelo (variable <i>y</i> ) en cada tubo individual durante la calibración de la sonda <i>Diviner 2000</i> el 29 de julio de 2003. $R^2$ , coeficiente de determinación. ....	23
Tabla 9. Valores acumulados de precipitación (mayor de $0.2 ET_0$ ), evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ), evaporación de suelo desnudo (en ausencia de vegetación, ascenso capilar y escorrentía, $Ev_{p_{sue}}$ ) y evapotranspiración real determinada con el método de renovación de la superficie ( $ET_{sr}$ ), entre dos fechas consecutivas de lecturas de humedad del suelo con la sonda <i>Diviner 2000</i> . Periodo de julio a diciembre de 2003. ....	25
Tabla 10. Valores de contenido volumétrico de agua simulados con la ecuación (14) ( $\theta_i$ ) y medidos ( $\theta_{obs}$ ) con la sonda <i>Diviner 2000</i> , tras aplicar las correspondientes ecuaciones de calibración (Tabla 8), en la capa de suelo de 0 a 10 cm de profundidad, en los distintos tubos y fechas de medida. Julio a diciembre de 2003. ....	36
Tabla 11. Medias y desviaciones estándar de los valores de $\theta_d$ ( $\bar{x}_d$ y $s_d$ ) para cada uno de los tubos individuales y para el conjunto de tubos, así como los estadísticos <i>t</i> calculados con la ecuación (15) y los valores tabulados $t_{\alpha, n-1}$ . Julio a diciembre de 2003. ....	37
Tabla 12. Precipitación total mensual ( $\text{mm mes}^{-1}$ ) y anual ( $\text{mm año}^{-1}$ ) registradas en la estación de Gallocanta en el periodo de estudio. ....	39
Tabla 13. Distribución de intensidades de precipitación diaria registradas en el periodo de estudio. ....	40

Tabla 14. Número de días con precipitación igual o mayor que 0.2 mm ( $ND0$ ) y 1.0 mm ( $ND1$ ) en el periodo de estudio.....	40
Tabla 15. Valores mensuales de la temperatura del aire registrada con la sonda <i>Vaisala</i> : medias diarias ( $T_{md}$ ), de las máximas ( $T_{xm}$ ) y de las mínimas ( $T_{nm}$ ).41	
Tabla 16. Frecuencias absolutas y relativas de días en que se registraron heladas (temperatura mínima menor de 0 °C) durante el periodo de estudio.....	42
Tabla 17. Frecuencias relativas (%) del número de días con temperatura media del suelo (0.03-0.06 m de profundidad) inferior a la del aire (a 2.0 m de altura). ....	43
Tabla 18. Valores mensuales de la humedad relativa del aire durante el periodo de estudio. $HR_{md}$ , medias diarias; $HR_{mx}$ , medias de las máximas; $HR_{mn}$ , medias de las mínimas. ....	44
Tabla 19. Frecuencias relativas del número de días despejados o casi despejados, parcialmente nubosos, nubosos y muy nubosos. Valores en tanto por ciento. .	46
Tabla 20. Frecuencias absolutas y relativas de distintos rangos de velocidad media diaria y de racha máxima diaria registrados en todo el periodo de estudio. ....	49
Tabla 21. Valores totales de evapotranspiración estimados con los métodos de la renovación de la superficie ( $ET_{sr}$ ) y FAO Penman-Monteith ( $ET_0$ ) y de evaporación de suelo completamente desnudo en ausencia de ascenso capilar ( $Evp_{sue}$ ) en los márgenes de la laguna de Gallocanta. ....	60
Tabla 22. Valores medios decenales de evapotranspiración real diaria ( $\text{mm día}^{-1}$ ) estimados con el método de la renovación de la superficie ( $ET_{sr}$ ) en los márgenes de la laguna de Gallocanta durante el periodo de estudio.....	62

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no hubiera sido posible sin la ayuda de las siguientes personas e instituciones:

- Unidad de Suelos y Riegos (Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentarias, Diputación General de Aragón), por prestar gustosamente la sonda *Diviner 2000* con la que se realizaron las medidas de humedad del suelo.
- Ignacio Clavería, por realizar la casi totalidad de las medidas de humedad de suelo con la sonda *Diviner 2000*, y Olga Pérez, ambos por encargarse durante varios meses del almacenamiento de los datos meteorológicos registrados en la estación de Gallocanta y recopilados mediante telefonía móvil GSM, así como de la actualización de los correspondientes ficheros en formato EXCEL (Microsoft Office 2000).
- Miguel Izquierdo y Enrique Mayoral, por instalar los tubos de acceso para la sonda *Diviner 2000* y tomar las muestras de suelo correspondientes durante esta instalación.
- Teresa Molina y Dolores Naval, por las determinaciones de capacidad de campo, punto de marchitez y salinidad de esas muestras.
- Laboratorio Agroambiental de la Diputación General de Aragón, por las determinaciones de granulometría de las muestras mencionadas.
- Olga Blanco y Judith Ramos, por explicar pacientemente el funcionamiento de la sonda *Diviner 2000* y ayudar en la transferencia de los datos registrados en las primeras fechas de lectura desde el equipo acumulador de datos de este instrumento a un ordenador de sobremesa.
- Rosa Gómez, por la determinación de las coordenadas geográficas de los puntos de instalación de los tubos de acceso para la sonda *Diviner 2000*, y Aurèlie Vincent, ambas por la documentación fotográfica de su instalación y la realización de lecturas con la sonda *Diviner 2000*.
- Carmen Castañeda, Juan Herrero y Nerea Díaz de Arcaya, por su grata compañía en la última visita a Gallocanta.
- Dirección Provincial de Medio Ambiente de Teruel, por autorizar la instalación de los tubos de acceso para la sonda *Diviner 2000* en la laguna de Gallocanta.
- César Lecha y los restantes guardas de la laguna de Gallocanta, por su ayuda en la ubicación de los tubos de acceso antes mencionados.

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Estructura del informe

El presente informe se estructura en un tomo con la memoria y los anejos y un CD-ROM. Este tomo está constituido por cuatro secciones, una lista de referencias bibliográficas, un glosario de símbolos y ocho Anejos. La sección 1 constituye la introducción del estudio, con una breve justificación del interés del mismo y de los antecedentes que existen del problema a analizar, la enumeración de los objetivos y una breve reseña de la situación geográfica de la zona de estudio. En la sección 2 se describen las metodologías y materiales utilizados en la realización de los trabajos. En la sección 3 se presentan y discuten los resultados obtenidos, incluyendo las correspondientes tablas y figuras. En la sección 4 se presentan las conclusiones y recomendaciones del informe. Asimismo, al final del informe se presentan una lista de referencias bibliográficas, un glosario de símbolos y una serie de Anejos, que incluyen los registros de incidencias ocurridas durante el período de estudio, muestras de algunos ficheros de texto separados por comas obtenidos, nombres de algunos ficheros almacenados en el CD-ROM adjunto y algunos de los datos registrados.

El *CD-ROM* adjunto a este informe incluye todos los ficheros *ASCII* y *EXCEL* con los datos y cálculos realizados, así como el texto del presente informe.

Además se incluye una *Información Complementaria* al informe constituida por una única copia del manual de la sonda *Diviner 2000*, instrumento utilizado en este trabajo para medir la humedad del suelo en distintos perfiles.

## 1.2. Justificación y antecedentes

La laguna de Gallocanta es uno de los humedales de la cuenca del Ebro con un mayor interés medioambiental. Sobre ella se han instaurado varias figuras de protección: lista del convenio Ramsar, Zona Especial de Protección para las Aves, Reserva Nacional de Caza, inclusión en la Red de Espacios Naturales Protegidos de Aragón. Recientemente, se ha elaborado un Plan de Ordenación de los Recursos Naturales. Desde hace unos años la Confederación Hidrográfica del Ebro ha realizado varios estudios para mejorar el conocimiento hidrogeológico de la laguna de Gallocanta (García Vera, 1997, 2002) cuyo interés se justifica por la necesidad de disponer de un modelo conceptual hidrogeológico de la cuenca de la laguna como base imprescindible para una gestión y planificación adecuadas de este humedal.

Se ha recopilado abundante información de campo durante el desarrollo de estos trabajos, la cual incluye nuevos datos geológicos, revisión del inventario de puntos de agua, construcción de nuevos sondeos, registro de datos meteorológicos (precipitaciones, temperaturas y otros meteoros) y de caudales en estaciones de aforos, topografía de detalle del fondo de la laguna, medidas de la escala de agua, datos de evapotranspiración real (*ETR*) en el entorno de la laguna y control de las extracciones de agua. Con toda esta nueva información se ha definido un nuevo modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico. Este modelo se ha elaborado con un modelo matemático de flujo subterráneo que ha confirmado su validez y

coherencia con los datos hidrológicos medidos. El modelo conceptual ha constituido el punto de partida para el desarrollo de las competencias propias de la Confederación Hidrográfica del Ebro en la cuenca hidrográfica de Gallocanta.

Con los estudios realizados, el avance del conocimiento hidrogeológico en la laguna de Gallocanta ha sido muy destacado. Sin embargo, se precisa mantener aún varias líneas de trabajo para consolidar el modelo de funcionamiento planteado. Una de ellas es el estudio de uno de las componentes del balance de agua en la laguna, la evaporación capilar (evaporación de agua que por ascenso capilar llega a la superficie del suelo). Se han estimado valores totales de esta variable en la laguna de entre 5.80 y 7.45 hm<sup>3</sup> año<sup>-1</sup> (García Vera, 1997; García Vera, 2002). La medida de la evaporación capilar resulta bastante compleja. Su magnitud se puede aproximar mediante la estimación de la *ETR* en los márgenes de la laguna, que engloba la evaporación de agua desde la superficie del suelo y la transpiración de la vegetación presente en los alrededores inmediatos de la laguna. La evaporación de agua desde la superficie del suelo predomina sobre la transpiración pues una parte importante de la superficie que rodea a la laguna carece de vegetación. El agua de dicha evaporación proviene de la precipitación, escasa en la zona, y sobre todo del ascenso capilar desde capas más profundas del suelo. Desde febrero de 2000, se han realizado medidas micrometeorológicas (método de la renovación de la superficie) para estimar valores diarios de la *ETR* en los márgenes de la laguna (Martínez-Cob, 2000, 2001, 2002). Dicho autor obtuvo valores de *ETR* total de 738 mm (febrero a noviembre de 2000), 365 (marzo a julio de 2001) y 866 mm (diciembre de 2001 a diciembre de 2002). Estas cifras indican la importante magnitud de la *ETR* y, por tanto, de la evaporación capilar ya que son sensiblemente superiores a la precipitación directa en la zona. Aún así, Martínez-Cob (2001, 2002) informó de una incertidumbre en los valores de la *ETR*, entre el 10 y el 20 %. Sería, pues, deseable acotar la incertidumbre de estas determinaciones para realizar una mejor estimación de los recursos hídricos en la cuenca de la laguna de Gallocanta.

La estimación de la evaporación capilar realizada hasta el momento consideró una superficie máxima evaporante de 14.5 km<sup>2</sup> (García Vera, 2002). Esta superficie corresponde a la máxima superficie susceptible de inundación pero no existen datos de campo que permitan predecir la superficie sobre la que se produce evaporación capilar en función del estado de humedad de la laguna de Gallocanta. Para la realización de una evaluación en este sentido es conveniente el control del contenido de humedad en varios perfiles verticales realizados en distintos puntos del vaso de la laguna de Gallocanta. Esta metodología se aplica habitualmente para los estudios del comportamiento de la zona no saturada en estudios agronómicos.

El objetivo principal del presente trabajo fue analizar la evolución de la superficie de la laguna de Gallocanta que sufre el fenómeno de evaporación capilar mediante la caracterización espacio-temporal del contenido de humedad en la playa humedecida y sus alrededores.

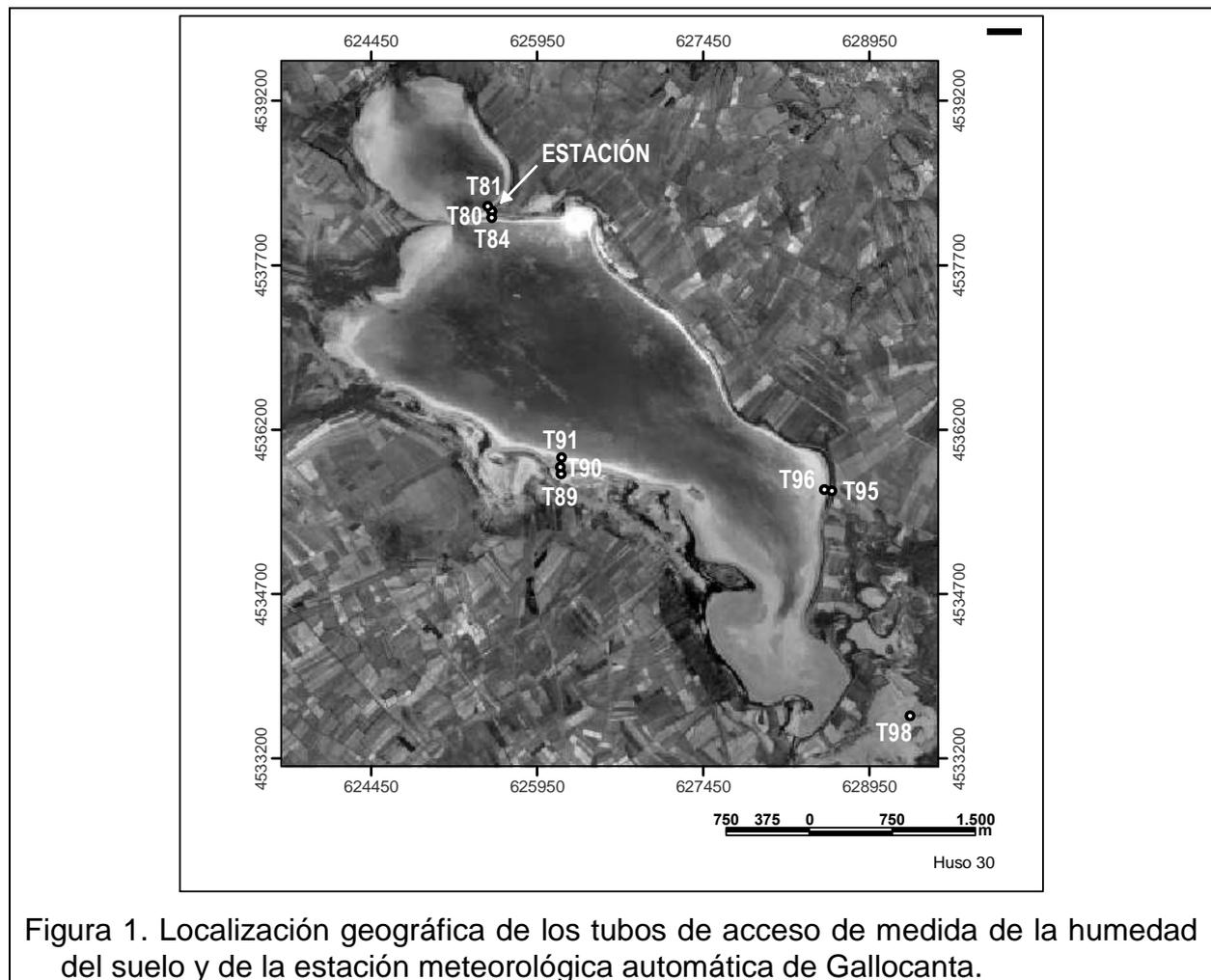
### 1.3. Objetivos

Los objetivos concretos del presente trabajo fueron los siguientes:

1. Caracterización del contenido de humedad del suelo en varios perfiles a lo largo de los límites de la laguna de Gallocanta, a lo largo del tiempo. Estimación cualitativa de la evaporación capilar.
2. Recopilación exhaustiva y precisa de un conjunto de variables meteorológicas que describan las condiciones meteorológicas de la zona durante el periodo de estudio.
3. Cuantificación diaria, decenal y estacional de la evapotranspiración real en los márgenes de la laguna de Gallocanta durante el periodo de estudio.

#### 1.4. Situación geográfica

Este estudio se realizó en los márgenes de la laguna de Gallocanta. Por un lado, se instalaron nueve tubos de acceso de PVC para la medida de la humedad del suelo, en distintos puntos de los bordes del vaso de la laguna (Figura 1). Asimismo, se continuó con la estación meteorológica automática instalada en febrero de 2000 en el término municipal de Gallocanta (Zaragoza), a 40°59'09" de latitud N y 1°30'17" de longitud O respecto al meridiano de Greenwich (Figura 1).





## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

Este trabajo se realizó en los márgenes de la laguna de Gallocanta. A grandes rasgos, en esta zona hay fundamentalmente una mezcla de suelo desnudo y vegetación natural escasa, de porte bajo. Un poco más lejos del vaso de la laguna, la vegetación natural más común consiste en pastizales y formaciones de matorral denso. También existen diversas parcelas de cultivo. Los cultivos de secano predominantes son la cebada, el trigo, otros cereales y forrajes. Entre los cultivos de regadío destacan la patata y la alfalfa (García Vera, 1997).

Según García Prieto (1993), en la zona litoral de la laguna de Gallocanta, se pueden diferenciar tres tipos básicos de suelos:

- a) Playas limo-arenosas con pequeños cantos dispersos, de color pardo claro y que generalmente no contienen sales. Los encharcamientos frecuentes, el carácter limoso del sedimento, su gran contenido en materia orgánica y la presencia esporádica de sales originan fangos negros fétidos, muy comunes en el sector norte y oeste de la laguna.
- b) Suelos limo-arcillosos duros, muy comunes en la llanura sudoeste de la laguna. Son acumulaciones de arcillas y limos, de color pardo-oscuro a gris. Estos suelos son comunes en las áreas más deprimidas y llanas de la playa, próximos a la laguna y están sujetos a inundaciones y desecaciones frecuentes.
- c) Costras y suelos salinos, desarrollados en los extremos noroeste y sudeste de la laguna. Se asocian a zonas muy llanas y próximas a la laguna, aunque no se relacionan con áreas de playa sino con amplias extensiones de pendiente mínima próximas a la orilla. Sufren inundaciones y desecaciones continuas de periodicidad anual. En épocas de sequía forman "salitrales" en los que la sal dominante es la halita.

Como ya se comentó en la introducción, el presente estudio comprendió dos tipos de trabajos: 1) medidas de perfiles de humedad en el suelo en distintos puntos del vaso de la laguna de Gallocanta; 2) caracterización meteorológica y determinación de la evapotranspiración real (*ETR*) de los márgenes de la laguna de Gallocanta. El estudio abarcó los periodos de julio a diciembre de 2003, en lo que respecta a las determinaciones de perfiles de humedad del suelo, y 16 de febrero de 2000 a 31 de diciembre de 2003, en lo que respecta a la caracterización meteorológica y determinación de la *ETR*. En este último caso, se incluyeron y ampliaron los trabajos de Martínez-Cob (2000, 2001, 2002).

### 2.1. Caracterización de la humedad de perfiles de suelo

#### 2.1.1. Sistema de medida de la humedad del suelo

Existen distintos métodos de medida de la humedad del suelo, cada uno con sus principios físicos, incertidumbres, problemas operacionales, limitaciones y tiempo de vida útil. Varios de esos métodos se basan en las propiedades eléctricas del agua para medir su contenido en un determinado volumen de suelo. Así, con el desarrollo de la microelectrónica, es posible medir las respuestas de sensores de capacitancia dentro de un perfil de suelo y correlacionarlas fuertemente con la

dinámica del contenido volumétrico de agua en el suelo. Por su sencillez de manejo, su rapidez en el registro de datos y su portabilidad, en este trabajo se escogió una sonda de capacitancia para la medida de la humedad en perfiles de suelo de la laguna de Gallocanta. En concreto, se eligió el modelo *Diviner 2000* de la marca *Sentek*. El Tomo 2 de este trabajo incluye el Manual de Uso de dicho modelo.

El modelo *Diviner 2000* es un sistema portátil de medida de la humedad del suelo. Comprende un equipo acumulador de datos con pantalla (Figura 2) y una sonda portátil (Figura 3). El equipo acumulador de datos del modelo *Diviner 2000* puede registrar y almacenar información de hasta 99 perfiles de suelo. En total, puede almacenar hasta 990 lecturas. La Figura 2 muestra la pantalla y la parte trasera de este equipo. Se remite al lector al Tomo 2 del informe para encontrar más información sobre las características, manejo, muestreo y transferencia de datos de este instrumento.

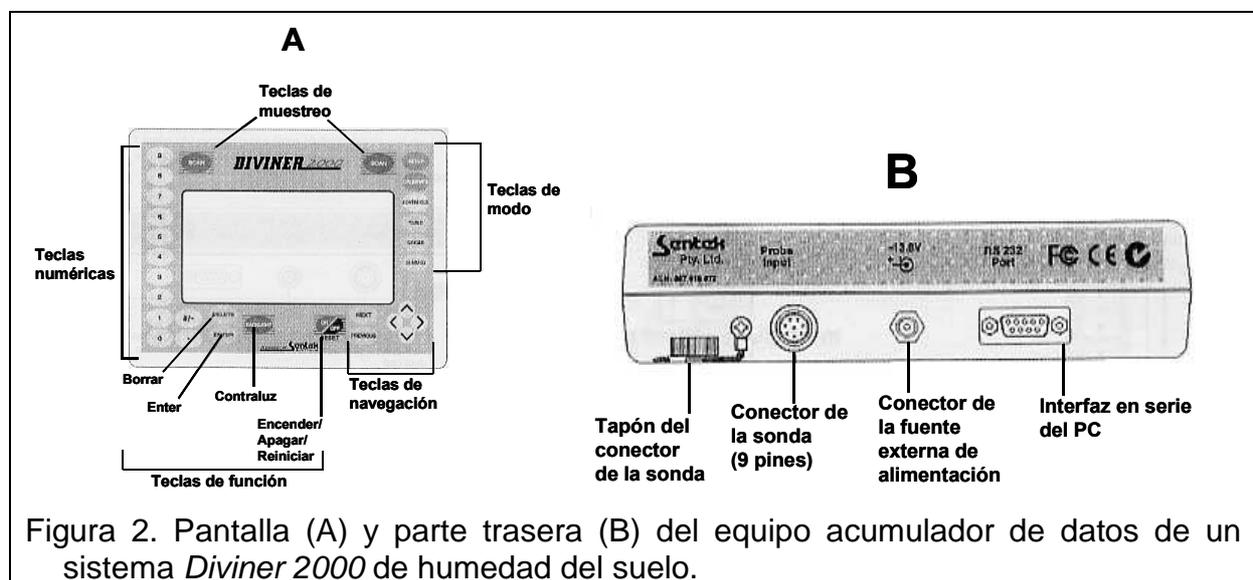


Figura 2. Pantalla (A) y parte trasera (B) del equipo acumulador de datos de un sistema *Diviner 2000* de humedad del suelo.

La sonda portátil tiene un cable con un conector de 9 pines que se conecta a la parte trasera del equipo acumulador de datos. Consta de una barra metálica con una cápsula y un sensor de humedad en su parte inferior (Figura 3). La barra metálica presenta una serie de marcas en centímetros en un lado y en pulgadas en el otro. Cada marca indica la profundidad a la que se encuentra el sensor por debajo de la superficie del suelo cuando dicha marca se alinea con la parte superior de la cápsula de la sonda. La sonda utilizada en este trabajo tiene una barra de 1.0 m de longitud. Por ello, puede medir la humedad del suelo a intervalos regulares de 10 cm desde la superficie del suelo hasta una profundidad de 1.0 m.

Una sonda de capacitancia como la *Diviner 2000* consta de un par de electrodos conectados a un circuito oscilador (Mead et al., 1995). La sonda se inserta en el suelo a través de un tubo de acceso de PVC de 5.7 mm de diámetro exterior, que permanece in situ durante todo el periodo de medidas. Este tubo está cerrado herméticamente en su parte inferior. La sonda rodeada por el suelo actúa como un capacitor, y la capacitancia, o constante dieléctrica, de la matriz del suelo es leída por los sensores insertados en la sonda. A causa de que la constante

dieléctrica del agua es mucho mayor que la del suelo o la del aire, un cambio en el contenido de humedad del suelo tiene una influencia notable sobre el valor medido (Rose et al., 2001). En definitiva, se crea un campo eléctrico de frecuencia alta alrededor del sensor de capacitancia de la sonda. Este sensor registra la frecuencia bruta de este campo. Estas lecturas se normalizan para calcular la denominada *Frecuencia Escalada (SF)*:

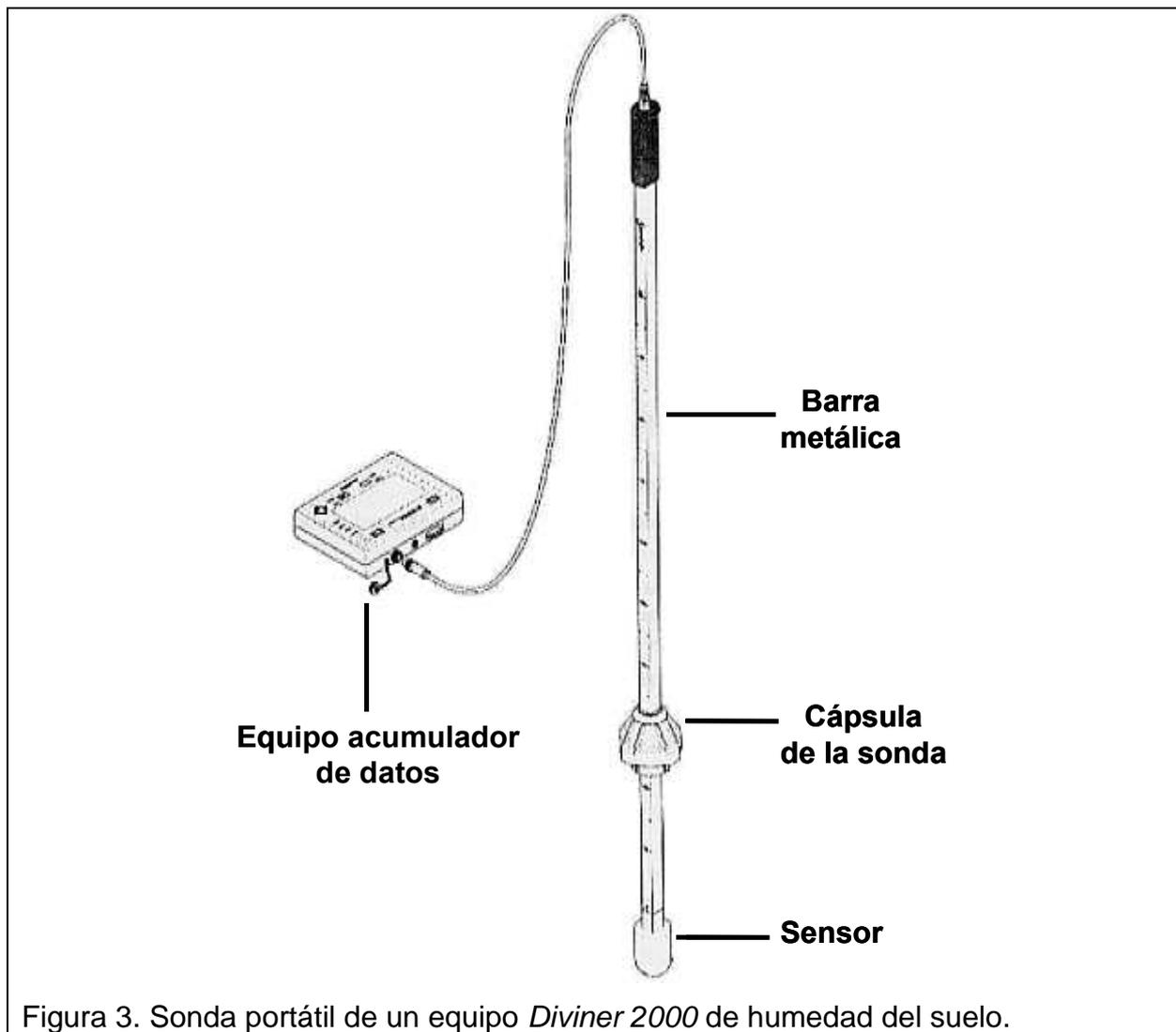


Figura 3. Sonda portátil de un equipo *Diviner 2000* de humedad del suelo.

$$SF = \frac{F_A - F_S}{F_A - F_W} \quad (1)$$

donde:  $F_A$ , lectura de frecuencia en el tubo de acceso de PVC suspendido en el aire;  $F_S$ , lectura de frecuencia en el tubo de acceso de PVC en el suelo; y  $F_W$ , lectura de frecuencia en el tubo de acceso de PVC dentro de un baño de agua. Los valores de  $F_A$  y  $F_W$  se tomaron en el laboratorio al inicio del trabajo y se almacenaron en la memoria del equipo acumulador de datos del equipo *Diviner 2000*. Estos valores fueron de  $F_A = 159250$  y  $F_W = 118950$ , respectivamente. Los valores de  $F_S$  se registraron en cada profundidad de cada perfil de suelo en cada fecha de medida.

Así, en cada uno de estos casos, el equipo acumulador de datos determinó los valores de  $SF$  de cada profundidad y perfil de suelo mediante la ecuación (1), así como el contenido volumétrico de agua ( $\theta$ ) mediante la ecuación de calibración configurada de fábrica:

$$SF = A\theta^B + C \quad (2)$$

donde  $A$ ,  $B$  y  $C$  son los parámetros de calibración;  $A = 0.2746$ ,  $B = 0.3314$ ,  $C = 0$ , y el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) es 0.9985. La ecuación (2) se desarrolló para una combinación de suelos (arenoso, franco arenoso y orgánico). Los parámetros de calibración de este tipo de instrumentos varían en función de la textura del suelo y otros parámetros físicos (Mead et al., 1995; Paltineanu y Starr, 1997; Morgan et al., 1999; Rose et al., 2001). En consecuencia, se realizó una calibración de la sonda *Diviner 2000* para los suelos de la laguna de Gallocanta (secciones 2.1.2 y 3.1.2).

Para este trabajo, se instalaron nueve tubos de acceso de PVC para la sonda *Diviner 2000* en otros tantos puntos de la laguna de Gallocanta (Figura 1). La Tabla 1 lista las coordenadas *UTM* de esos puntos determinadas con un *GPS 315/320* de la marca *Magellan*. Según el fabricante, este *GPS* tiene una precisión horizontal de 100 m y una precisión vertical de 150 m.

Tabla 1. Coordenadas *UTM* de cada punto de la laguna de Gallocanta en donde se colocó un tubo de acceso de PVC para las lecturas de humedad del suelo.

Punto	<i>UTM</i> Este (m)	<i>UTM</i> Norte (m)	Punto	<i>UTM</i> Este (m)	<i>UTM</i> Norte (m)
Tubo 80	625542	4538189	Tubo 91	625124	4536232
Tubo 81	625518	4538222	Tubo 95	628595	4535644
Tubo 84	625542	4538145	Tubo 96	628566	4535648
Tubo 89	626168	4535795	Tubo 98	629319	4533606
Tubo 90	626165	4535830			

Siete de los tubos se instalaron el 17 de julio y los otros dos (tubos 91 y 96), el 6 de noviembre de 2003. En principio, se pensó en insertar cada tubo hasta una profundidad de 1.0 m para así poder realizar 10 lecturas de humedad de suelo por perfil de suelo. No obstante, 2002 y 2003 han sido años relativamente húmedos y la laguna de Gallocanta se ha rellenado parcialmente de agua respecto a la casi falta absoluta de lámina libre de agua en 2001. Durante su colocación, el tubo de PVC se va introduciendo en el suelo a medida que éste se perfora con una barrena (Figura 4). Una vez que se llega hasta la profundidad deseada, se introduce un tapón hasta el fondo para cerrar herméticamente éste de modo que se impida la entrada de agua por la parte inferior del tubo. Pero, durante la instalación de buena parte de los tubos se encontró tal acumulación de agua a cierta profundidad (bien por la presencia del freático, bien por encontrarse el suelo saturado de agua a esa profundidad) que impidió cerrar adecuadamente cada tubo a la profundidad deseada de 1.0 m (Figura 4). Por ello, sólo dos tubos se introdujeron hasta esa profundidad y en ellos se realizaron lecturas hasta 1.0 m. En el resto se realizaron lecturas hasta profundidades menores (Tabla 2). Un problema adicional en los tubos 84 y 98 fue la presencia de gravillas a partir de 0.50 m, incluso más cerca de la superficie del suelo en el caso del tubo 84. Estas gravillas impiden un buen contacto entre el tubo y el

suelo. Por ello, se restringió la instalación de los tubos 84 y 98 a 0.50 m de profundidad.



Figura 4. Barrenado del suelo para introducir un tubo de acceso de PVC para la medida de la humedad del suelo (izquierda). Acumulación de agua en el punto de perforación (derecha).

Tabla 2. Profundidad máxima de lectura de humedad de suelo en cada punto de la laguna de Gallocanta en que se colocó un tubo de acceso de PVC.

Tubo	80	81	84	89	90	91	95	96	98
Profundidad (cm)	100	100	50	90	70	80	90	60	50

En los tubos 80, 81 y 84 se realizaron medidas a partir del 17 de julio de 2003, hasta un total de 13 fechas diferentes. En los tubos 89, 90, 95 y 98 se realizaron medidas de humedad del suelo a partir del 29 de julio, hasta un total de 12 fechas diferentes. Por último, en los tubos 91 y 96, instalados el 6 de noviembre, se realizaron medidas en dos fechas distintas.

Tras cada fecha de medida, los datos almacenados en el equipo acumulador de datos se transfirieron a un ordenador de sobremesa con las utilidades suministradas con el modelo *Diviner 2000*. En esta transferencia, los datos se almacenaron en ficheros de texto separados por coma. Se transfirieron tanto los valores originales de  $SF$  registrados con la ecuación (1) como los valores de  $\theta$  obtenidos con la ecuación (2) usando la calibración configurada de fábrica. El Anejo 1 muestra un ejemplo de fichero originado en esta transferencia. El Anejo 2 recoge

las incidencias ocurridas durante el periodo 17 de julio a 17 de diciembre de 2003 relacionadas con las medidas de humedad del suelo.

### 2.1.2. Calibración de la sonda de humedad del suelo

El 29 de julio de 2003 se realizaron medidas para la calibración del equipo *Diviner 2000* para los suelos de la laguna de Gallocanta. Para ello, se realizaron medidas de *SF* en cada intervalo de 10 cm de profundidad en cada tubo instalado el 17 de julio (todos menos los tubos 91 y 96). Para esas mismas profundidades se tomaron muestras de suelo, a unos 30 cm del tubo, y cada 10 cm de profundidad, para determinar la humedad por técnicas gravimétricas. Estas muestras se almacenaron en latas metálicas para impedir la pérdida de humedad durante el tiempo transcurrido entre la recolección de la muestra y su análisis en el laboratorio. En éste, cada muestra (con su lata) se pesó para registrar el peso húmedo ( $M_h$ ). Luego, todas las muestras (con su lata) se introdujeron en una estufa a 105 °C durante tres días. Posteriormente cada muestra (con su lata) se pesó para determinar el peso seco ( $M_s$ ). De esta forma, la humedad gravimétrica ( $M_w$ ) de cada muestra se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$M_w = \frac{M_h - M_s}{M_s - M_l} \quad (3)$$

donde:  $M_l$ , masa de la lata; para cada lata, esta masa se registró con anterioridad a la realización de los muestreos.  $M_h$ ,  $M_s$  y  $M_l$  se expresan en g;  $M_w$ , en tanto por uno.

Asimismo, los días 17 (tubos 80, 81 y 84) y 29 de julio (tubos 89, 90, 95 y 98) se tomaron muestras de suelo de tres profundidades (0-10, 10-20 y 20-30 cm) para determinar la densidad aparente de los perfiles de suelo estudiados. Se supuso que la densidad aparente es la misma a partir de 20-30 cm de profundidad. Para tomar estas muestras se emplearon dos anillos metálicos que se fueron introduciendo lentamente hasta la profundidad deseada con el fin de evitar la compactación del suelo. El primer anillo se usó para muestrear los cinco primeros cm de cada profundidad y el segundo anillo para los restantes cinco cm. Tras extraer cada anillo, se eliminó toda la tierra sobrante de las dimensiones del mismo. Posteriormente, la muestra de ambos anillos se juntó y almacenó en una lata similar a las usadas en los muestreos de humedad gravimétrica. En el laboratorio, se realizó el mismo proceso para secar estas muestras y determinar sus correspondientes valores de  $M_s$ . De esta forma, la densidad aparente de la muestra se determinó mediante la siguiente expresión:

$$\rho_b = \frac{M_s - M_l}{V_{a1} + V_{a2}} \quad (4)$$

donde:  $\rho_b$ , densidad aparente, g cm<sup>-3</sup>;  $V_{a1}$  y  $V_{a2}$ , volúmenes de los anillos 1 y 2 con los que se recogió la muestra, cm<sup>-3</sup> (72.58 y 75.22 cm<sup>3</sup>, respectivamente).

Por consiguiente, el contenido gravimétrico de humedad del suelo determinado con la ecuación (3) para cada muestra se multiplicó por su correspondiente densidad aparente (o la de la profundidad de 20-30 cm de su perfil para muestras de profundidades mayores) para obtener el contenido volumétrico de agua en cada profundidad y punto de muestreo ( $\theta$ ). Estos valores de  $\theta$  se utilizaron

como variable dependiente ( $y$ ) en los análisis de regresión en los que los valores de  $SF$  se utilizaron como variable independiente ( $x$ ) para proceder a la correspondiente calibración de la sonda para cada perfil estudiado.

Por último, junto a los puntos donde se tomaron las muestras anteriores, se realizó otro muestreo para obtener suelo en las siguientes profundidades: 0-10, 10-20, 20-30, 30-60 y 60-100 cm de profundidad. Este último muestreo se realizó los días 17 (tubos 80, 81 y 84) y 29 de julio (tubos 89, 90, 95 y 98). En el caso de los tubos 91 y 96, las profundidades de muestreo, realizado el 6 de noviembre de 2003, fueron 0-10, 10-20, 20-40, 40-60 y 60-100 cm. En el tubo 84, la profundidad de 60-100 cm no se muestreó debido a la presencia de gravillas. Este último conjunto de muestras se utilizó para determinar: a) contenido gravimétrico de agua a  $-1/3$  y  $-15$  atm (que, tradicionalmente, se consideran los contenidos de agua en el suelo a capacidad de campo y punto de marchitez, respectivamente); b) granulometría (contenido de arena, limo y arcilla); y c) conductividad eléctrica del extracto 1:5. Estos análisis se realizaron siguiendo procedimientos de laboratorio estándar y no se describen en este trabajo.

## 2.2. Caracterización meteorológica en la laguna de Gallocanta

Para la caracterización meteorológica y determinación de la  $ETR$  de los márgenes de la laguna de Gallocanta, el presente estudio se realizó en el sector noroeste de la laguna de Gallocanta, en el paraje conocido como Las Suertes, dentro del término municipal de Gallocanta (Zaragoza). Dicho paraje se encuentra en la estrecha lengua de tierra que penetra en la laguna y separa el lagunazo pequeño del lagunazo grande o central, que forma el cuerpo principal de la laguna (Figura 1). En este lugar se instaló una estación meteorológica automática el 15 de febrero de 2000 (Martínez-Cob, 2000). Las coordenadas geográficas del punto donde se ubica la estación son  $40^{\circ}59'09''$  de latitud N y  $1^{\circ}30'17''$  de longitud O respecto al meridiano de Greenwich. La elevación sobre el nivel del mar es de 1000 m. La elevación del punto más bajo de la laguna de Gallocanta es de 991.2 m según estudios recientes realizados por la CHE, por lo que el desnivel entre este punto y el lugar donde se ubica la estación es de 8.8 m.

La estación se encuentra en un recinto vallado de 10 m x 5 m. La valla es de alambre galvanizado de 2.15 m de alto más dos filas de alambre de espino, con una altura total de alrededor de 2.40 m. En el interior del recinto se encuentran los distintos componentes de la estación. Martínez-Cob (2001, 2002, 2003) describe exhaustivamente la disposición de los elementos de la estación, así como los sensores empleados y las variables registradas. El Anejo 3 recoge las incidencias registradas durante 2003. Los Anejos 4 y 5 listan los ficheros de texto (separados por comas) registrados en los dos equipos acumuladores de la estación, *GALLOCA1* y *GALLOCA2*, durante 2003.

En esta sección, por tanto, sólo se indican algunas diferencias puntuales en el registro de datos meteorológicos durante 2003 con respecto a los años anteriores. En concreto, se indican las diferencias en la medida de la radiación neta y el flujo de calor en el suelo con respecto a lo descrito por Martínez-Cob (2002).

### Radiación neta

El radiómetro neto modelo Q-7 de la casa *REBS* (nº de serie Q99272), instalado en la estación desde febrero de 2000 (Martínez-Cob, 2000), se cambió temporalmente por otro de la marca *Kipp & Zonen*, modelo *NR-Lite* (nº de serie 990293). Este cambio se realizó el 17 de julio de 2003. El 17 de diciembre de 2003, se volvió a quitar el radiómetro *NR-Lite* y se colocó en su lugar un radiómetro neto de la casa *REBS*, modelo Q7.1, una versión avanzada del modelo Q.7 y que se estrenó en la estación de Gallocanta. Estos cambios de radiómetros netos no se motivaron por problemas de funcionamiento de los mismos sino por necesidades de servicio en otras estaciones meteorológicas de las que el autor del informe es responsable en otros proyectos.

El radiómetro neto *NR-Lite* carece de cúpula de protección del viento. Diversos autores han indicado la bondad de las medidas de radiación neta efectuadas con este sensor, aunque estas medidas suelen ser sistemáticamente menores que las registradas por un radiómetro neto Q-7 (Brotzge y Duchon, 2000; Cobos y Baker, 2003). De hecho, en el periodo julio a septiembre de 1999, sobre una superficie de hierba, en la finca experimental del Servicio de Investigación Agroalimentaria del Gobierno de Aragón (en Montañana, Zaragoza), se compararon las lecturas semihorarias de radiación neta registradas con el sensor *NR-Lite* antes indicado y otro sensor Q-7 (nº de serie Q95444), exactamente igual al utilizado en la estación de Gallocanta. Se obtuvo la siguiente ecuación de regresión:

$$Q7 = 14.61 + 1.047 \text{ NRLite} \quad (5)$$

donde:  $Q7$ , radiación neta semihoraria registrada con un sensor Q-7 ( $\text{W m}^{-2}$ );  $\text{NRLite}$ , radiación neta semihoraria registrada con un sensor *NR-Lite* ( $\text{W m}^{-2}$ ). El coeficiente de determinación de la ecuación (5) fue de 0.992. En consecuencia, todos los registros semihorarios de radiación neta efectuados desde el 17 de julio al 17 de diciembre de 2003 se corrigieron con la ecuación (5).

### Flujo de calor en el suelo

Los valores semihorarios de flujo de calor en la superficie del suelo ( $G$ ) se determinaron con la siguiente ecuación (Allen et al., 1996):

$$G = \frac{F1 + F2}{2} + S \quad (6)$$

donde:  $F1$  y  $F2$ , flujo de calor en el suelo medidos con dos placas *HFP01* ( $\text{W m}^{-2}$ ) a 0.08 m de profundidad;  $S$ , calor almacenado en el suelo por encima de las placas ( $\text{W m}^{-2}$ ) y calculado con la siguiente expresión:

$$S = \frac{\Delta T_s}{\Delta t} d_p \rho_b (840 + 4.190 \theta) \quad (7)$$

donde:  $\Delta T_s$ , diferencia de temperatura de suelo entre dos periodos de 30 minutos consecutivos ( $^{\circ}\text{C}$ );  $\Delta t$ , tiempo transcurrido (en este caso, 1800 s);  $d_p$ , profundidad a la que se miden  $F1$  y  $F2$  (0.08 m);  $\rho_b$ , densidad aparente del suelo ( $\text{kg m}^{-3}$ );  $\theta$ , contenido volumétrico de agua en los primeros centímetros del suelo ( $\text{m}^{-3} \text{ m}^{-3}$ ). En

este trabajo se supuso un contenido volumétrico de agua de  $0.20 \text{ m}^{-3} \text{ m}^{-3}$ , valor que, como término medio, puede producirse en buena parte del tiempo en suelos de texturas medias como el existente en el lugar de ubicación de la estación. Asimismo, se supuso una densidad aparente de  $1230 \text{ kg m}^{-3}$ , valor promedio que se obtuvo de las determinaciones de densidad aparente realizadas con las muestras de suelo extraídas en julio de 2003 (secciones 2.1.2 y 3.1.1)<sup>1</sup>. Los valores de  $G$  determinados con las ecuaciones (6) y (7) son poco sensibles a variaciones de  $\theta$ , circunstancia que el autor del informe ha comprobado con los registros obtenidos en Gallocanta.

### **2.3. Determinación de la evapotranspiración en los márgenes de la laguna de Gallocanta**

#### Evapotranspiración real en los márgenes de la laguna de Gallocanta

La evapotranspiración real ( $ETR$ ) en los márgenes de la laguna de Gallocanta se calculó resolviendo la ecuación del balance de energía en la cual la radiación neta se midió, el flujo de calor en el suelo se determinó con las ecuaciones (6) y (7) y el flujo de calor sensible se determinó mediante el método de renovación de la superficie. Martínez-Cob (2000, 2001, 2002) describen detalladamente este método, su calibración y su verificación posterior en las condiciones de la laguna de Gallocanta. Por ello, no se incluyen en esta sección más detalles del cálculo de la  $ETR$  en los márgenes de la laguna de Gallocanta.

#### Evapotranspiración de referencia: método FAO Penman-Monteith

El método FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998) se utilizó para calcular valores semihorarios de la evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ). Esta variable representa el efecto de las condiciones meteorológicas sobre el proceso de evapotranspiración y, por tanto, indica las tasas máximas teóricas de evapotranspiración esperadas en los márgenes de la laguna de Gallocanta si hubiera un suministro adecuado de agua. De esta forma, se puede tener un evaluación cualitativa del método de la renovación de la superficie cuando se compara con la  $ET_0$  y la evaporación de suelo desnudo (ver más adelante), que representan las teóricas tasas máximas y mínimas esperadas en la zona de estudio.

El método FAO Penman-Monteith se aplicó tal como describe Martínez-Cob (2000, 2001, 2002). Se empleó un valor variable de la resistencia aparente de la cubierta vegetal al flujo de vapor de agua, calculado con el método de Todorovic (1999), tal como recomiendan Lecina et al. (2003). Las estimas diarias de  $ET_0$  se obtuvieron a partir de la suma de las correspondientes estimas semihorarias.

#### Evaporación de suelo desnudo

Para todo el periodo de estudio (febrero de 2000 a diciembre de 2003), los valores estimados de  $ET_0$  se utilizaron asimismo para calcular la posible evaporación diaria de suelo desnudo ( $Evp_{sue}$ ,  $\text{mm día}^{-1}$ ) en los márgenes de la laguna de Gallocanta bajo los supuestos de ausencia total de vegetación, ascenso capilar y escorrentía; por tanto, la precipitación se consideró la única fuente de agua. Así,

---

<sup>1</sup> Martínez-Cob (2001, 2002) supuso  $\rho_b = 1300 \text{ kg m}^{-3}$ , un valor apropiado para suelos de textura media.

$Evp_{sue}$  representa un valor mínimo de evaporación de suelo desnudo esperado en la laguna de Gallocanta.  $Evp_{sue}$  se calculó con la expresión (Allen et al., 1998):

$$Evp_{sue} = K_c ET_0 \quad (8)$$

donde  $K_c$  es el denominado coeficiente de cultivo, en este caso de suelo desnudo. Allen et al. (1998) proponen dos alternativas para calcular el  $K_c$ . La más simple es adecuada en situaciones donde sólo se necesitan estimas medias de evaporación en periodos de tiempo largos (semanas, meses). Pero cuando se necesitan estimas diarias de evaporación y que éstas se correspondan con las características meteorológicas particulares de periodos concretos de interés, como ocurre en este trabajo, Allen et al. (1998) sugieren usar la segunda alternativa de cálculo del  $K_c$ , en la que éste se obtiene como la suma de dos componentes:

$$K_c = K_{cb} + K_e \quad (9)$$

donde  $K_{cb}$  es el denominado coeficiente basal y  $K_e$  es el denominado coeficiente de evaporación de agua del suelo. Cuando se trata de cultivos,  $K_{cb}$  representa la transpiración del cultivo. En caso de suelo desnudo, Allen et al. (1998) sugieren usar un valor de  $K_{cb} = 0.15$  para representar la evaporación 'difusiva' del suelo desde profundidades de 0.10 a 0.15 m. No obstante, los mismos autores sugieren que también es razonable considerar  $K_{cb} = 0$  para un suelo completamente desnudo. En este trabajo, se escogió este último valor porque se pretendió que  $Evp_{sue}$  representara la mínima evaporación de agua del suelo que podría haber en los márgenes y playa humedecida de la laguna de Gallocanta si se considera que sólo hay suelo desnudo en estas zonas y que no existe más aporte de agua para la evaporación que la suministrada directamente por la precipitación directa sobre la superficie de interés. Por tanto, en este trabajo se consideró que  $K_c = K_e$ .

Para Allen et al. (1998),  $K_e$  representa la evaporación de agua del suelo desde la capa más superficial. En el caso de cultivos, estos autores sugieren el uso de  $K_e$  para representar la evaporación de agua desde la superficie del suelo no sombreada por el cultivo. Según Allen et al. (1998), esta evaporación se produce sólo en la capa más superficial de suelo, a una profundidad  $Z_e$  máxima de 0.1 m.  $K_e$  se calculó con la siguiente expresión:

$$K_e = K_r (K_{cmax} - K_{cb}) \quad (10)$$

donde  $K_r$  es un coeficiente reductor de la evaporación que depende de la altura acumulada de agua ya evaporada de la capa superficial del suelo;  $K_{cmax}$  representa el máximo valor de  $K_c$  justo después de un evento de precipitación. Allen et al. (1998) propusieron que  $K_{cmax} = 1.2$ .

Para calcular  $K_r$ , Allen et al. (1998) consideran que la capa superficial de suelo ( $Z_e = 0.1$  m) puede almacenar una cantidad máxima de agua que se conoce como el *agua evaporable total* ( $TEW$ , mm). Esta cantidad de agua es función de la diferencia entre los contenidos volumétricos de agua a capacidad de campo ( $\theta_{FC}$ ,  $m^3 m^{-3}$ ) y en el punto de marchitez ( $\theta_{WP}$ ,  $m^3 m^{-3}$ )<sup>2</sup>:

<sup>2</sup> Para  $Z_e=0.1$  m, de acuerdo con la ecuación (11),  $\theta_{FC}$  y  $\theta_{WP}$  se pueden expresar en mm de altura de agua multiplicando por 100 sus valores expresados en  $m^3 m^{-3}$ .

$$TEW = 1.000 (\theta_{FC} - 0,5 \theta_{WP}) Z_e \quad (11)$$

Los promedios de los valores (excluidos los dos extremos) de  $\theta_{FC}$  y  $\theta_{WP}$  obtenidos para la profundidad de 0-10 cm en las muestras de suelo recogidas al lado de cada tubo de acceso de PVC para la sonda de humedad del suelo (secciones 2.1.2 y 3.1.1) se utilizaron en la ecuación (11) para determinar  $TEW$ . Estos valores fueron:  $\theta_{FC} = 0.282 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ,  $\theta_{WP} = 0.190 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  y  $TEW = 18.7 \text{ mm}$ .

Allen et al. (1998) señalan que la evaporación de agua desde la superficie del suelo ocurre en dos etapas: a) etapa 1, limitada por la energía disponible; y b) etapa 2, de tasa decreciente de evaporación. Al inicio de la etapa 1, justo después de un evento suficientemente intenso de precipitación, la capa superficial del suelo se encuentra a capacidad de campo y la cantidad de agua evaporada por evaporación ( $D_e$ , mm) es 0. Durante la etapa 1 del proceso de evaporación, la superficie del suelo permanece húmeda y se supone que la evaporación del suelo expuesto a la atmósfera se produce con una tasa máxima limitada sólo por la disponibilidad de energía en dicha superficie. Por tanto, durante esta etapa,  $K_r = 1.0$ . Esta etapa dura hasta que la altura acumulada de agua ya evaporada ( $D_e$ ) es tal que las propiedades hidráulicas de la capa superior del suelo empiezan a ser limitantes y el agua no puede transportarse a la superficie del suelo a una tasa suficiente para satisfacer la demanda atmosférica. El valor de  $D_e$  al final de la etapa 1 de evaporación se conoce como el *agua fácilmente evaporable (REW)*. En consecuencia, una vez que  $D_e > REW$ , la superficie del suelo empieza a estar seca visiblemente y la evaporación de agua disminuye proporcionalmente a la cantidad de agua que permanece en la capa superficial del suelo. Así, el valor de  $K_r$  en el día  $i$  de la etapa 2 de evaporación se calculó con la siguiente expresión (Allen et al., 1998):

$$K_r = \frac{TEW - D_{eini}}{TEW - REW} \quad \text{para } D_{eini} > REW \quad (12)$$

donde  $D_{eini}$  (mm) es el valor de  $D_e$  al comienzo del día  $i$ . Si  $D_{eini} \leq REW$ ,  $K_r = 1.0$ . Como valor de  $REW$ , se utilizó 9.5 mm, valor medio del rango de valores esperados para suelos con texturas similares a las de los suelos de la laguna de Gallocanta (sección 3.1.1) (Allen et al., 1998).

Cada día  $i$ ,  $D_{eini}$  se calculó con la siguiente expresión:

$$D_{eini} = \text{Max} [(\theta_{FC} - \theta_{i-1}) - Pr_i, 0] \quad (13)$$

donde  $\theta_{FC}$  se expresa en mm;  $\theta_{i-1}$ , contenido volumétrico de agua en el día  $i-1$  (mm);  $Pr_i$ , precipitación del día  $i$  (mm); sólo se contabiliza aquél valor de  $Pr_i > 0.2 ET_{0i}$  (siendo ésta la evapotranspiración de referencia en el día  $i$ ); la ecuación (13) supone que toda la precipitación del día  $i$  ocurre por la mañana. Una vez calculado  $D_{eini}$ , se aplicaron las ecuaciones (12), (10), (9) y (8) para calcular el valor de  $Evp_{sue}$  en el día  $i$  ( $Evp_{suei}$ ). Finalmente, se determinó el contenido volumétrico de agua en el día  $i$  ( $\theta_i$ ) aplicando el siguiente balance simplificado:

$$\theta_i = \theta_{i-1} + Pr_i - Evp_{suei} - PP_i \quad (14)$$

donde:  $PP_i$ , percolación profunda en el día  $i$ ; se calculó con la siguiente expresión:

$$PP_i = \theta_{i-1} + Pr_i - \theta_{FC} \quad \text{para } \theta_{i-1} + Pr_i > \theta_{FC} \quad (15)$$

siendo  $PP_i = 0$  si no se cumple esa condición.

Para realizar estos cálculos se supuso que el valor de  $\theta_i$  el 15 de febrero de 2000 era  $\theta_i = \theta_{FC} - TEW = 9.5$  mm; se usó el promedio de los valores de  $\theta_{FC}$  (excluidos los dos extremos), determinados para las muestras de suelo recogidas en la capa de 0-10 cm de profundidad; el valor de  $TEW$  se obtuvo con la ecuación (11).

Asimismo, las ecuaciones (8) a (15) se aplicaron a partir del 17 (tubos 80, 81 y 84) y 29 de julio de 2003 (tubos 89, 90, 95 y 98) para determinar valores simulados de  $\theta$ . Para ello, se usaron los valores de  $\theta_{FC}$  y  $\theta_{WP}$  determinados para cada tubo en las correspondientes muestras de suelo (secciones 2.1.2 y 3.1.1) y se partió de un valor de  $\theta_i$  igual al valor calibrado de contenido volumétrico de agua del suelo obtenido a los 10 cm de profundidad en el primer día de medidas de cada tubo. Si no existiera evaporación capilar, los valores simulados y medidos de  $\theta_i$  deberían ser parecidos. Pero si los valores medidos fueran superiores significativamente a los simulados, se confirmaría la existencia de evaporación capilar, de modo cualitativo, y sin olvidarse de que parte de las diferencias entre valores medidos y simulados se deberán a la incertidumbre propia de todo proceso de estimación y de las determinaciones obtenidas de las muestras de suelo.

## 2.4. Análisis estadísticos

En este trabajo se utilizaron diversas herramientas estadísticas. Por un lado, se evaluaron diversas funciones de calibración mediante análisis de regresión con ajuste por mínimos cuadrados (Devore y Peck, 1986). Se empleó el paquete informático Microsoft Excel (Office 2000) para realizar estos ajustes. En todos los casos, se eligió la función con la que se obtuvo un mejor coeficiente de determinación  $R^2$ .

Asimismo, para evaluar las diferencias entre los valores simulados y medidos de  $\theta$  (sección 2.3), se utilizó el test de Student de muestras emparejadas. Para cada tubo, se calculó el estadístico  $t$  (Devore y Peck, 1986):

$$t = \frac{\bar{x}_d}{s_d / \sqrt{n}} \quad (16)$$

donde:  $\bar{x}_d$  y  $s_d^2$ , media y varianza, respectivamente, de la variable  $\theta_d = \theta_i - \theta_{obs}$ ;  $\theta_i$  y  $\theta_{obs}$ , valores de  $\theta$  simulados [ecuación (14)] y medidos (tras aplicar la calibración correspondiente, sección 3.1.2) en cada tubo en el día  $i$ , respectivamente;  $n$ , número de pares de valores  $\theta_i$ ,  $\theta_{obs}$ .

Posteriormente, el estadístico  $t$  se comparó con su valor tabulado para un nivel de significación  $\alpha$  de 0.95 y  $n-1$  grados de libertad ( $t_{\alpha, n-1}$ ). Sólo cuando el valor absoluto de  $t$  fue mayor que el valor  $t_{\alpha, n-1}$ , se rechazó la hipótesis nula ( $\theta_d = 0$ ) y se admitió la hipótesis alternativa ( $\theta_d \neq 0$ ).

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Medidas de humedad en el suelo

Esta sección incluye primero los resultados de los análisis de las muestras de suelo recogidas durante la instalación de los tubos de acceso de PVC para la sonda de humedad del suelo. Luego, se discuten los resultados de la calibración de esta sonda. Por último, se presentan los resultados de la humedad registrada en los distintos perfiles de suelo y se discute la posible existencia de evaporación capilar.

##### 3.1.1. Muestras de suelo

La Tabla 3 lista los valores de densidad aparente obtenidos en las muestras de suelo recogidas en siete puntos de la laguna de Gallocanta y tres profundidades. Se observaron algunas diferencias entre los distintos puntos para una misma profundidad y para las diferentes profundidades en un mismo punto. Algunos valores resultaron extraños, como el obtenido en el punto 84 en la profundidad de 20-30 cm. Este valor fue incluso contradictorio con los análisis de granulometría que se discuten más adelante; éstos indican un importante contenido de arena en esa profundidad y punto por lo que se esperaba una densidad aparente bastante menor. De acuerdo con los valores medios para cada profundidad, la densidad aparente aumentó ligeramente con ésta. Los coeficientes de variación fueron relativamente altos cuando se promediaron todos los puntos. Cuando se excluyeron los dos valores más extremos, las medias resultantes no cambiaron, salvo en la profundidad de 20-30 cm, en que descendió algo; pero los coeficientes de variación se redujeron y se aproximaron a un valor 'razonable' del 10 %, particularmente en el caso de esta última profundidad (Tabla 3).

Tabla 3. Valores de densidad aparente ( $\text{g cm}^{-3}$ ) determinados en siete puntos de la laguna de Gallocanta y tres profundidades. CV, coeficiente de variación.

Profundidad (cm)	Punto							Media		CV (%)	
	80	81	84	89	90	95	98	Todos <sup>(a)</sup>	Excl. <sup>(b)</sup>	Todos <sup>(a)</sup>	Excl. <sup>(b)</sup>
0-10	1.31	1.42	1.38	1.26	1.08	1.09	1.05	1.23	1.23	12.5	11.1
10-20	1.20	1.42	1.52	1.25	1.13	1.04	1.60	1.31	1.31	16.0	12.4
20-30	1.15	1.45	1.91	1.37	1.28	1.06	1.43	1.38	1.33	19.8	9.3

<sup>(a)</sup> Todos los puntos; <sup>(b)</sup> excluidos los dos valores extremos.

La Tabla 4 lista los contenidos volumétricos de agua obtenidos a  $-1/3$  (*capacidad de campo*,  $\theta_{FC}$ ) y  $-15$  atm (*punto de marchitez*,  $\theta_{WP}$ ) en las muestras de suelo recogidas en siete puntos de la laguna de Gallocanta y cinco profundidades. Estos valores se obtuvieron multiplicando los valores gravimétricos de cada punto y profundidad, obtenidos en el laboratorio, por sus correspondientes densidades aparentes (Tabla 3), para lo cual en profundidades superiores a 30 cm se aplicaron las de la profundidad de 20-30 cm. No se presentan los resultados obtenidos en los puntos 91 y 96 porque dos de las profundidades muestreadas fueron diferentes (20-40 y 40-60 cm) y, sobre todo, porque en estos puntos no se determinó la densidad aparente. También en estas variables,  $\theta_{FC}$  y  $\theta_{WP}$ , se observaron diferencias

importantes entre puntos para una misma profundidad y entre distintas profundidades para un mismo punto. Parte de esas diferencias pudieron deberse a la utilización de la misma densidad aparente a partir de 20-30 cm. Pero la mayor parte de las diferencias se debieron a las características granulométricas según el punto y profundidad de muestreo. En este trabajo no se investigaron más las causas de esas diferencias y se optó por usar los valores de  $\theta_{FC}$  y  $\theta_{MVP}$  determinados para cada punto y profundidad a la hora de obtener valores de  $TEW$  con el fin de simular el contenido volumétrico de agua en la profundidad de 0-10 cm (sección 2.3).

Tabla 4. Contenidos volumétricos de agua a -1/3 (*capacidad de campo*) y -15 atm (*punto de marchitez*) determinados en siete puntos de la laguna de Gallocanta, en cinco profundidades. CV, coeficiente de variación.

Capacidad de campo ( $m^3 m^{-3}$ )											
Profundidad (cm)	Punto							Medias		CV (%)	
	80	81	84	89	90	95	98	Todos <sup>(a)</sup>	Excl. <sup>(b)</sup>	Todos <sup>(a)</sup>	Excl. <sup>(b)</sup>
0-10	0.293	0.253	0.350	0.273	0.195	0.319	0.270	0.279	0.282	17.7	9.0
10-20	0.346	0.334	0.376	0.318	0.235	0.358	0.370	0.334	0.345	14.4	5.9
20-30	0.422	0.411	0.383	0.324	0.258	0.359	0.347	0.358	0.365	15.7	9.2
30-60	0.353	0.443	0.229	0.344	0.306	0.345	0.329	0.336	0.335	19.0	5.5
60-100	0.307	0.388		0.356	0.313	0.366	0.329	0.343	0.341	9.3	7.1
Punto de marchitez ( $m^3 m^{-3}$ )											
Profundidad (cm)	Punto							Medias		CV (%)	
	80	81	84	89	90	95	98	Todos <sup>(a)</sup>	Excl. <sup>(b)</sup>	Todos <sup>(a)</sup>	Excl. <sup>(b)</sup>
0-10	0.208	0.161	0.246	0.178	0.143	0.219	0.184	0.191	0.190	18.5	12.3
10-20	0.225	0.235	0.282	0.228	0.149	0.240	0.296	0.236	0.242	20.1	9.6
20-30	0.257	0.311	0.273	0.238	0.166	0.259	0.253	0.251	0.256	17.5	4.9
30-60	0.213	0.325	0.145	0.255	0.219	0.260	0.221	0.234	0.234	23.5	9.5
60-100	0.217	0.284		0.263	0.225	0.269	0.179	0.240	0.244	16.5	10.8

<sup>(a)</sup> Todos los puntos; <sup>(b)</sup> excluidos los dos valores extremos.

La Tabla 5 lista las granulometrías determinadas en cinco puntos de la laguna de Gallocanta y cinco profundidades. Los resultados de los restantes puntos no están disponibles en el momento de redactar este informe. La Tabla 5 lista los contenidos de arenas (0.05-2.0 mm), limos (0.05-0.002 mm) y arcillas (< 0.002 mm) y la clase textural (clasificación del Ministerio de Agricultura de los EE.UU.). De nuevo, se observaron diferencias importantes entre puntos para una misma profundidad y entre profundidades para un mismo punto. A grandes rasgos, el contenido de arena se redujo de forma importante al aumentar la profundidad, mientras que se observó un aumento del contenido de arcillas en las capas más profundas, excepto en el punto 84 en donde ocurrió lo contrario.

La Tabla 6 lista las conductividades eléctricas 1:5 determinadas en nueve puntos de la laguna de Gallocanta en varias profundidades. En el caso de los puntos 91 y 96 se muestrearon las profundidades de 20-40 y 40-60 cm. Por ello, en estos dos puntos, los valores listados para la profundidad de 20-30 cm son los de la profundidad muestreada de 20-40 cm; y los listados para la profundidad de 30-60 cm son medias ponderadas de los valores de las profundidades muestreadas de 20-40 y

40-60 cm. En esta variable también se observaron diferencias importantes entre puntos. Resultó complicado valorar estas diferencias porque los muestreos fueron en fechas distintas y la concentración de sales varía en el tiempo según diversos factores (meteorología, nivel de la capa freática, etc.). Aún así, los valores observados en los tubos 80 y 89, que son los más alejados de la playa humedecida de la laguna, junto con el tubo 95, sugirieron un perfil típico de lavado de sales hacia zonas más profundas por la precipitación, de forma que apenas hubo sales en la superficie pero sí cierta acumulación en la parte inferior del perfil del suelo. Es decir, los valores observados de conductividad eléctrica 1:5 en estos dos tubos, 80 y 89, no sugirieron la presencia de ascenso capilar en estos puntos.

Tabla 5. Granulometría y clase textural (Ministerio de Agricultura de los EE.UU.) obtenidas en cinco puntos de la laguna de Gallocanta y cinco profundidades.

Profundidad (cm)	Arena (%)					Limo (%)				
	Punto					Punto				
	80	81	84	89	90	80	81	84	89	90
0-10	45.1	55.1	30.9	30.5	60.5	35.9	25.1	28.0	30.9	16.6
10-20	29.0	34.1	38.1	7.3	43.5	37.7	25.2	54.6	42.3	17.0
20-30	12.8	13.3	49.6	11.2	46.0	26.2	31.4	26.2	41.1	22.1
30-60	23.8	7.8	73.9	11.0		26.6	51.1	10.8	39.8	
60-100	19.9	13.4		6.9		31.0	46.2		42.2	
Profundidad (cm)	Arcilla (%)					Clase textural				
	Punto					Punto				
	80	81	84	89	90	80	81	84	89	90
0-10	19.1	19.8	41.2	38.7	23.0	Franca	Franco arenosa	Arcillosa	Franco arcillosa	Franco arcillo arenosa
10-20	33.3	40.7	7.3	50.4	39.5	Franco arcillosa	Arcillosa	Franco limosa	Arcillo limosa	Franco arcillosa
20-30	61.0	55.4	24.3	47.8	31.9	Arcillosa	Arcillosa	Franco arcillo arenosa	Arcillo limosa	Franco arcillo arenosa
30-60	49.7	41.1	15.3	49.2		Arcillosa	Arcillo limosa	Franco arenosa	Arcillosa	
60-100	49.2	40.4		51.0		Arcillosa	Arcillo limosa		Arcillo limosa	

En el caso del tubo 95, los valores de conductividad eléctrica 1:5 fueron muy similares en todo el perfil aunque el más alto se observó en la superficie (Tabla 6). Sin ser un perfil realmente típico, estos valores sugirieron que en este punto sí existió probablemente un ascenso capilar. No obstante, en principio, la distancia y desnivel de este punto a la playa de la laguna (Figura 1) hicieron suponer en unos resultados más parecidos a los de los tubos 80 y 89. En los demás tubos, los valores de salinidad observados sugirieron la presencia de ascenso capilar por la acumulación detectada de sales en superficie. Estos tubos se colocaron en el borde de la playa humedecida o incluso ya dentro de ésta, como el caso del tubo 91 donde se obtuvieron los valores más altos de salinidad. La capa freática estuvo más cerca

de la superficie en estos puntos. En cualquier caso, estos valores sólo correspondieron a una única fecha en cada caso por lo que sólo sirven como una primera aproximación al objeto de este trabajo.

Tabla 6. Conductividad eléctrica 1:5 ( $\text{dS m}^{-1}$ ) determinada en nueve puntos de la laguna de Gallocanta y cinco profundidades.

Profundidad (cm)	Punto								
	80	81	84	89	90	91	95	96	98
0-10	0.32	11.42	4.78	0.24	6.32	16.80	7.04	8.10	10.54
10-20	0.36	4.51	5.08	0.35	2.57	16.80	6.40	8.10	8.22
20-30	0.72	6.11	4.38	0.42	2.17	15.50	6.38	6.94	7.17
30-60	1.21	8.30	3.65	0.71	2.73	13.03	5.98	9.69	6.63
60-100	3.12	8.89		1.74	2.96	6.42	6.31		5.30

Los resultados de los análisis de las distintas muestras recogidas en la laguna de Gallocanta indicaron que sería conveniente realizar, al menos, otro muestreo adicional exhaustivo posible junto a los tubos ya instalados y en los que se pudieran instalar en 2004 (si fuera posible llegar más adentro en el vaso de la laguna).

### 3.1.2. Calibración de la sonda de humedad del suelo

La Tabla 7 lista los valores de frecuencia escalada ( $SF$ ) registrados por la sonda *Diviner 2000* el 29 de julio de 2003 durante el proceso de calibración en siete puntos de la laguna de Gallocanta a varias profundidades, así como los correspondientes valores de contenido volumétrico de agua ( $\theta$ ) obtenidos a partir de la humedad gravimétrica y la densidad aparente de las muestras de suelo recogidas al efecto. Se observó que el rango de variabilidad de los valores de  $\theta$  fue relativamente alto: de 7.7 % ( $0.077 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) a 51.2 % ( $0.512 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ); el 85.6 % de los valores de  $\theta$  se encontraron en el rango de 15 a 45 %. Por su parte el rango de variabilidad de los valores  $SF$  fue bastante menor: de 0.2 a 1.2, aunque el 85.8 % de estos valores estuvieron en el rango de 0.7 a 1.2. Esta circunstancia sugirió la posibilidad de que el proceso de calibración de la sonda *Diviner 2000* en la laguna de Gallocanta resultara complicada.

La Figura 5 muestra la regresión lineal del tipo  $y = b_0 + b_1 x$  ajustada entre  $\theta$  (variable  $y$ ) y  $SF$  (variable  $x$ ):  $y = 8.643 + 23.934 x$ . El coeficiente de determinación  $R^2$  fue 0.169 (significativo para  $\alpha = 0.95$ ). No obstante, se trató de un valor muy bajo y, por tanto, indicó que la correlación entre ambas variables,  $SF$  y  $\theta$ , fue muy pobre. Por tanto, esa ecuación no constituye una calibración adecuada para el conjunto de los suelos de la laguna de Gallocanta. Este fracaso en la calibración conjunta de la sonda *Diviner 2000* se debió en parte a la comentada falta de variabilidad en los valores de  $SF$ . Probablemente también se debió a las diferentes propiedades físicas de los distintos puntos y profundidades muestreados, sugiriendo la necesidad de realizar una calibración individual para cada tubo.

La Figura 6 muestra los valores de  $\theta$  frente a los de  $SF$  para cada tubo individual. Se probaron distintas funciones de regresión entre ambas variables. En algunos casos, la mejor ecuación ajustada fue la potencial,  $y = a + x^b$ ; en otros, la

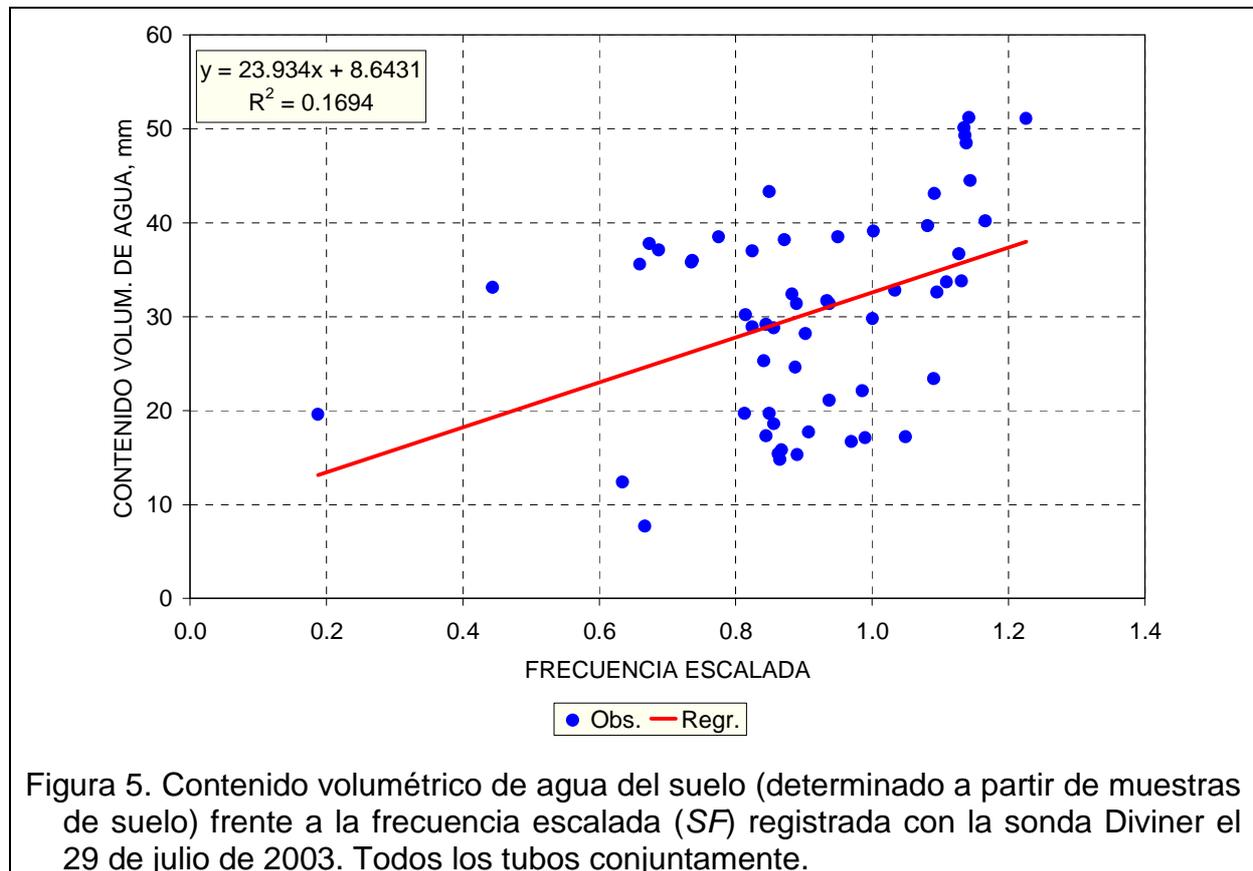
mejor fue la logarítmica  $y = a_0 + a_1 \ln(x)$  ( $SF$ , variable  $x$ ;  $\theta$ , variable  $y$ ). La Tabla 8 lista las funciones ajustadas en cada caso. Según los correspondientes  $R^2$  y la representación gráfica de las funciones ajustadas, las ecuaciones de calibración de los tubos 80, 81 y 89 fueron adecuadas: los valores de  $R^2$  superaron 0.64 y las funciones ajustadas indican un aumento de  $\theta$  al aumentar la variable  $SF$ , dentro del rango de valores utilizado en el ajuste. Rose et al. (2001) ajustaron ecuaciones potenciales en su proceso de calibración de una sonda Diviner, en laboratorio, para diferentes suelos de Inglaterra con una diversidad de texturas.

Tabla 7. Valores de frecuencia escalada ( $SF$ ) y de contenido volumétrico de agua del suelo registrados durante el proceso de calibración en siete puntos de la laguna de Gallocanta a varias profundidades el 29 de julio de 2003.

Contenido volumétrico de agua, mm							
Profundidad (cm)	Tubo 80	Tubo 81	Tubo 84	Tubo 89	Tubo 90	Tubo 95	Tubo 98
0-10	7.7	24.6	29.8	12.4	32.6	29.2	14.8
10-20	15.3	32.4	43.3	19.7	37.0	37.1	28.2
20-30	17.7	39.1	33.1	25.3	38.2	37.8	22.1
30-40	18.6	39.7	19.6	28.9	31.4	35.6	21.1
40-50	17.3	44.5	23.4	30.2	31.4	36.0	19.7
50-60	15.4	48.5		28.8	33.8	35.8	
60-70	15.8	49.3		31.7	36.7	38.5	
70-80	16.7	50.1		32.8		38.5	
80-90	17.1	51.2		33.7		43.1	
90-100	17.2	51.1				40.2	
Frecuencia escalada ( $SF$ )							
Profundidad (cm)	Tubo 80	Tubo 81	Tubo 84	Tubo 89	Tubo 90	Tubo 95	Tubo 98
0-10	0.7	0.9	1.0	0.6	1.1	0.8	0.9
10-20	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.7	0.9
20-30	0.9	1.0	0.4	0.8	0.9	0.7	1.0
30-40	0.9	1.1	0.2	0.8	0.9	0.7	0.9
40-50	0.8	1.1	1.1	0.8	0.9	0.7	0.8
50-60	0.9	1.1		0.9	1.1	0.7	
60-70	0.9	1.1		0.9	1.1	0.8	
70-80	1.0	1.1		1.0		0.9	
80-90	1.0	1.1		1.1		1.1	
90-100	1.0	1.2				1.2	

En los restantes cuatro tubos, los coeficientes de determinación fueron menores de 0.24. En el caso del tubo 90,  $R^2 = 0.036$  (no significativo para  $\alpha = 0.95$ ). En estos cuatro tubos se observó una escasa variabilidad, sobre todo de  $SF$  (en el tubo 90, de  $\theta$ ), lo que condujo a esos pobres resultados. Buena parte de esa falta de variabilidad se debió al pequeño número de puntos disponibles para realizar la calibración. Durante la instalación de los tubos 84 y 98, se observó la presencia de gravillas a partir de 50 cm de profundidad (incluso más superficialmente en el caso del tubo 84). Por ello, estos tubos no se instalaron más profundamente. Además los tubos 81, 84 y 90 se instalaron en el borde de la playa humedecida de la laguna (Figura 1) donde se observó la presencia de un suelo bastante húmedo; al barrenar

el suelo para introducir el tubo, entró agua en el agujero procedente del suelo de alrededor; por ello la instalación del tubo fue bastante complicada para conseguir que no quedara agua libre dentro del tubo. También esta situación llevó a disminuir la profundidad de instalación del tubo. Por contra, los tubos 80, 89 y 95 se instalaron a cierta distancia del vaso de la laguna y no hubo problemas en este proceso.



Otros problemas que pudieron influir en los pobres resultados de la calibración fueron las diferencias en textura, los posibles efectos de la salinidad y errores experimentales, etc. Los resultados de la Tabla 6 no permiten concluir claramente si la salinidad pudo afectar a la precisión de las lecturas ya que estas muestras de salinidad se tomaron en fechas diferentes.

Por consiguiente, las funciones de calibración ajustadas en los siete tubos estudiados (Figura 6 y Tabla 8) se aplicaron en el resto del informe para determinar  $\theta$  en las distintas fechas de lectura en el periodo estudiado a partir de los registros de *SF* obtenidos con la sonda *Diviner 2000*. Aún así, sólo tres de las siete ecuaciones de calibración se consideraron como realmente adecuadas. No se aplicó ninguna calibración en las lecturas de los tubos 91 y 96 porque en estos casos no se tomaron muestras de suelo para proceder a su calibración ya que al inicio de este trabajo se pensó en que sí se podría obtener una calibración única para la laguna de Gallocanta. Por ello, estos dos tubos se excluyeron del resto de análisis.

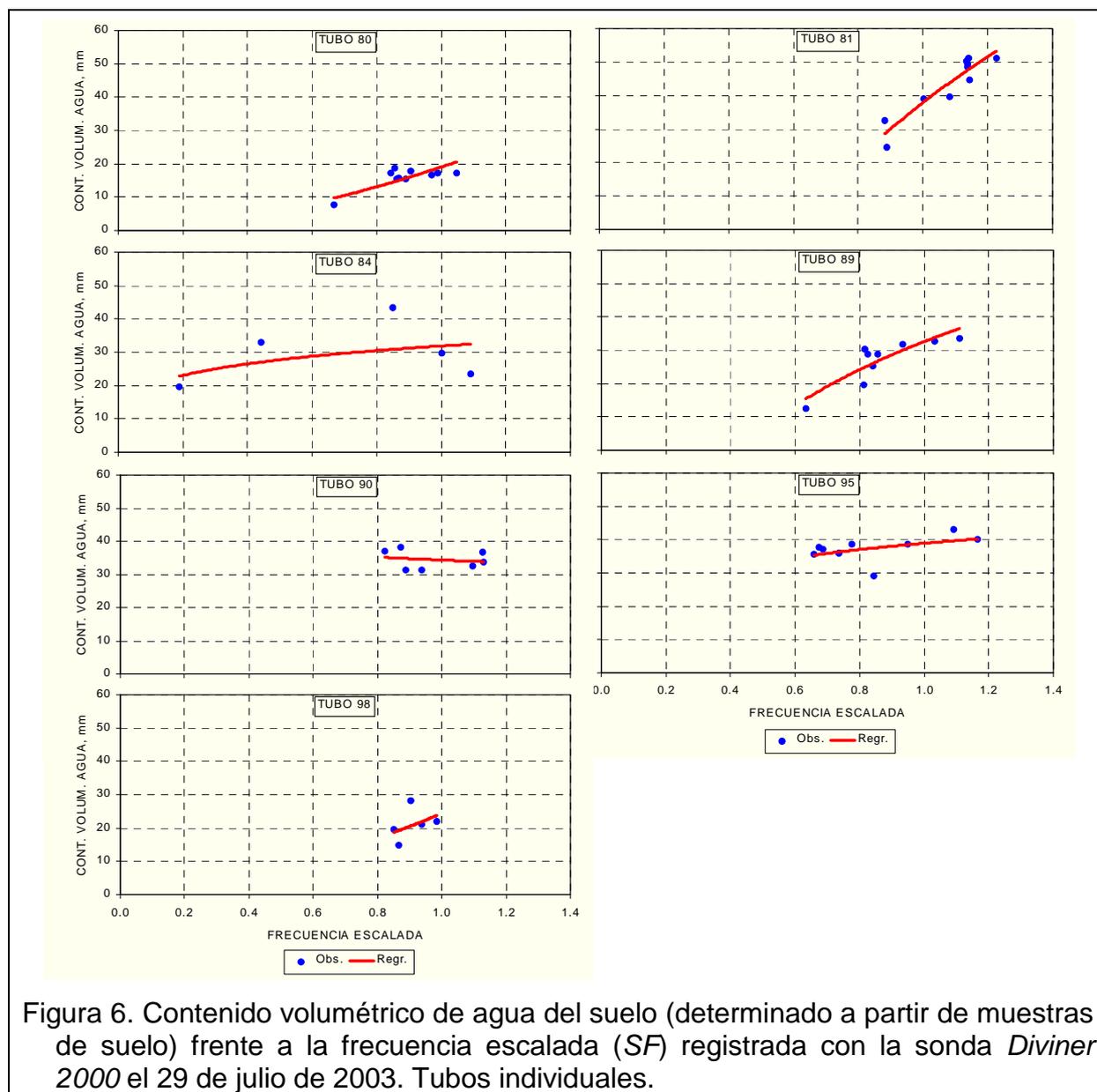


Tabla 8. Ecuaciones ajustadas entre los valores de SF (variable x) y contenido volumétrico de agua del suelo determinado a partir de muestras de suelo (variable y) en cada tubo individual durante la calibración de la sonda *Diviner 2000* el 29 de julio de 2003.  $R^2$ , coeficiente de determinación.

Tubo	Función	$R^2$
80	$y = 19.029 x^{1.67}$	0.649
81	$y = 37.886 + 74.807 \ln(x)$	0.877
84	$y = 31.868 x^{0.2018}$	0.235
89	$y = 32.597 + 37.715 \ln(x)$	0.760
90	$y = 34.339 - 4.0252 \ln(x)$	0.036
95	$y = 38.904 + 8.4705 \ln(x)$	0.227
98	$y = 24.342 x^{1.6318}$	0.322

Resulta evidente que hay que proceder en 2004 a realizar más muestreos de suelo para obtener más puntos con los que proceder a la calibración de la sonda *Diviner 2000*. Sería conveniente muestrear en varias fechas diferentes para tratar de tener distintas condiciones de humedad y salinidad de suelo. Esta última variable deberá controlarse para tratar de ver si tiene algún efecto en las lecturas, aunque el fabricante asegure que han diseñado la microelectrónica del aparato para minimizar el efecto de las sales.

### 3.1.3. Perfiles de humedad en el suelo

El Anejo 6 lista los valores de contenido volumétrico de agua del suelo registrados por la sonda *Diviner 2000* y calculados por ésta utilizando la ecuación de calibración configurada de fábrica [ecuación (2)]. Estos valores sólo se listan con el fin de que figuren en el informe pero no se discuten en el mismo. El Anejo 7 lista los valores de frecuencia escalada (*SF*) registrados con la sonda *Diviner 2000* en los distintos tubos y profundidades y en las diferentes fechas de lectura. Estos valores se utilizaron posteriormente para calcular valores calibrados de  $\theta$  en cada uno de los perfiles de suelo y fechas estudiadas usando las funciones de calibración listadas en la Tabla 8.

El Anejo 8 lista todos los valores de  $\theta$  obtenidos tras aplicar las ecuaciones de calibración en los tubos 80, 81, 84, 89, 90, 95 y 98. No se incluyen los tubos 91 y 96 porque no se determinaron ecuaciones de calibración en estos dos casos. En una primera impresión, los valores calibrados de  $\theta$  fueron en general menores que los listados en el Anejo 6. Aún así, un número importante de valores de  $\theta$  estuvieron fuera del rango ( $\theta_{FC}$ ,  $0.5 \theta_{WP}$ ) que Allen et al. (1998) sugieren para calcular el agua evaporable total de una determinada capa de suelo [ecuación (11)]. Si los valores de la Tabla 4 se consideran bien determinados, habría que suponer que los valores calibrados de  $\theta$  deberían estar dentro de ese rango. No obstante, los valores de  $\theta_{FC}$  y  $\theta_{WP}$  se determinaron en el laboratorio aplicando unas presiones fijas (-1/3 y -15 atm) por lo que estrictamente hablando no son necesariamente lo mismo que capacidad de campo y punto de marchitez que, en un suelo concreto, podrían corresponder a unos potenciales hídricos algo diferentes a los citados. Además, si un suelo está saturado su  $\theta$  supera a  $\theta_{FC}$ . Excepto en los tubos 90 y 80, los valores de  $\theta$  fuera del rango indicado superaron ligeramente los respectivos valores de  $\theta_{FC}$ . En el tubo 90 estas diferencias respecto a  $\theta_{FC}$  fueron algo mayores. En el tubo 80, los valores fuera de rango estuvieron ligeramente por debajo de los respectivos valores de  $\theta_{WP}$ . El tanto por ciento de valores de  $\theta$  fuera de rango fue de 3.8 % (tubo 80), 79.2 % (tubo 81), 21.5 % (tubo 84), 13.2 % (tubo 89), 100 % (tubo 90), 70.4 % (tubo 95) y 0 % (tubo 98). A grandes rasgos, los tubos más alejados de la playa humedecida de la laguna mostraron pocos valores de  $\theta$  fuera del rango ( $\theta_{FC}$ ,  $0.5 \theta_{WP}$ ), aunque el tubo 95 mostró un tanto por ciento elevado de valores en esta situación. En el tubo 90 todos los valores superaron a  $\theta_{FC}$ , lo que sugeriría a priori un suelo saturado de agua. Esto tendría sentido si se considera que este tubo se colocó en el borde de la playa humedecida de la laguna. No obstante, hay que recordar que la calibración obtenida para este tubo no se consideró como correcta porque el coeficiente de determinación no fue significativo (Tabla 8). Por todo ello, las primeras impresiones discutidas en este párrafo sobre los valores de  $\theta$  de los

diferentes perfiles de suelo deben considerarse como muy preliminares y necesitan que los estudios realizados en este trabajo continúen y mejoren en el futuro.

La Tabla 9 lista los valores acumulados, entre dos lecturas consecutivas de  $\theta$ , de la precipitación, de la evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ), de la evaporación de suelo desnudo en ausencia de ascenso capilar [ $Evp_{sue}$ , ecuación (8)] y de la evapotranspiración real determinada con el método de renovación de la superficie ( $ET_{sr}$ ). En el caso de la precipitación, sólo se consideraron los registros diarios mayores que el 20 % de la  $ET_0$  en ese día (Allen et al., 1998). Los valores de la Tabla 9 sólo se listan para mostrar, principalmente, los registros de precipitación por el posible efecto de esta variable sobre la evolución de los registros de  $\theta$ . Cada valor acumulado va desde el día de la lectura  $i-1$  hasta el día anterior a la lectura  $i$ .

Tabla 9. Valores acumulados de precipitación (mayor de 0.2  $ET_0$ ), evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ), evaporación de suelo desnudo (en ausencia de vegetación, ascenso capilar y escorrentía,  $Evp_{sue}$ ) y evapotranspiración real determinada con el método de renovación de la superficie ( $ET_{sr}$ ), entre dos fechas consecutivas de lecturas de humedad del suelo con la sonda *Diviner 2000*. Periodo de julio a diciembre de 2003.

Periodo	Fecha de lectura con sonda <i>Diviner 2000</i>	$ET_0$ (mm)	Precipitación (mm)	$Evp_{sue}$ (mm)	$ET_{sr}$ (mm)
17 a 28 julio	29-julio	73.6	0.0	0.1	39.1
29 julio a 4 agosto	05-agosto	38.5	0.0	0.0	19.8
5 a 11 agosto	12-agosto	36.2	4.0	3.8	20.7
12 a 18 agosto	19-agosto	27.5	5.5	3.5	15.4
19 a 25 agosto	26-agosto	31.4	16.6	18.1	21.4
26 agosto a 1 septiembre	02-septiembre	31.6	0.0	0.7	19.8
2 a 8 septiembre	09-septiembre	21.9	60.6	22.0	18.7
9 a 18 septiembre	19-septiembre	37.0	0.0	4.7	28.7
19 septiembre a 1 octubre	02-octubre	31.2	20.6	12.2	26.7
2 a 22 octubre	23-octubre	40.3	14.7	17.6	35.3
23 octubre a 5 noviembre	06-noviembre	16.7	36.0	17.5	15.9
6 noviembre a 16 diciembre	17-diciembre	34.8	40.6	33.4	35.2

Las Figuras 7 a 10 muestran los valores calibrados de  $\theta$  en las distintas profundidades y tubos estudiados a lo largo del periodo de julio a diciembre de 2003. Por su parte, las Figuras 11 a 14 muestran los perfiles de  $\theta$  obtenidos en cada tubo durante las diferentes fechas de medida.

Los valores calibrados de  $\theta$  en los distintos tubos mostraron, en general, un menor rango de variabilidad que sus equivalentes sin calibrar. En el tubo 80, los valores de  $\theta$  a 10 cm ( $\theta_{10}$ ) aumentaron desde el 17 de julio al 17 de diciembre y aparentemente respondieron a las precipitaciones registradas en ese periodo (Tabla 9). Los valores de  $\theta_{10}$  se mantuvieron hasta el periodo de 19 a 26 de agosto cuando se produjeron precipitaciones de cierta importancia. Posteriormente,  $\theta_{10}$  aumentó con sucesivas lluvias, con leves disminuciones en periodos sin lluvias (Figura 7), y su valor el 17 de diciembre fue superior al valor del 17 de julio.

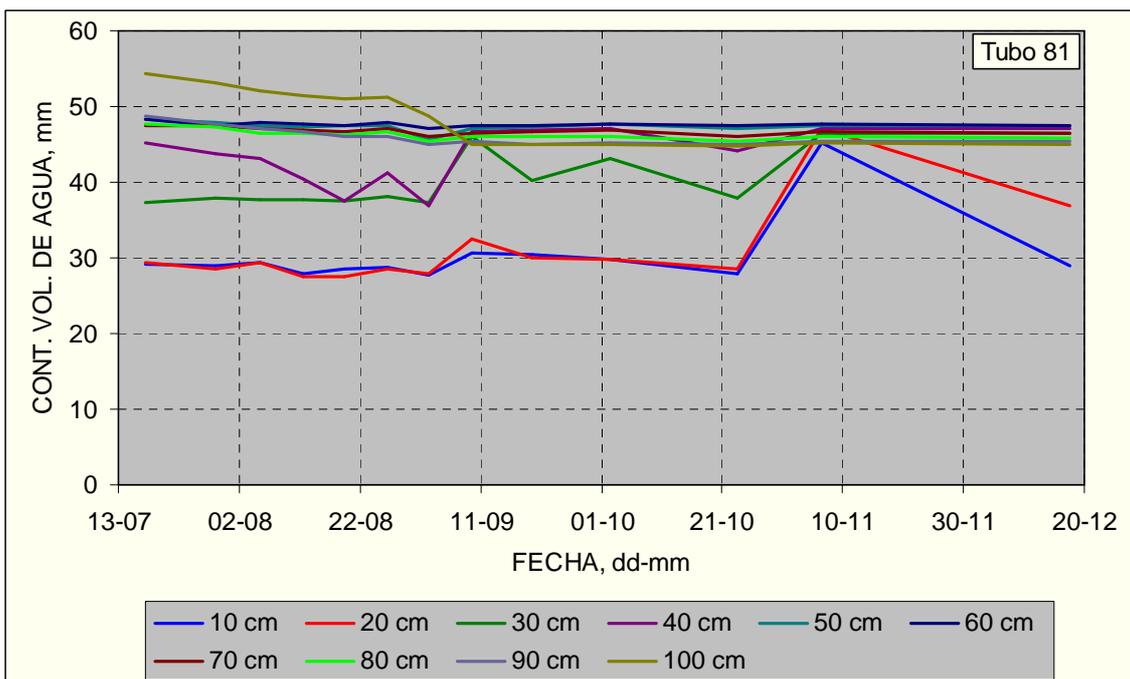
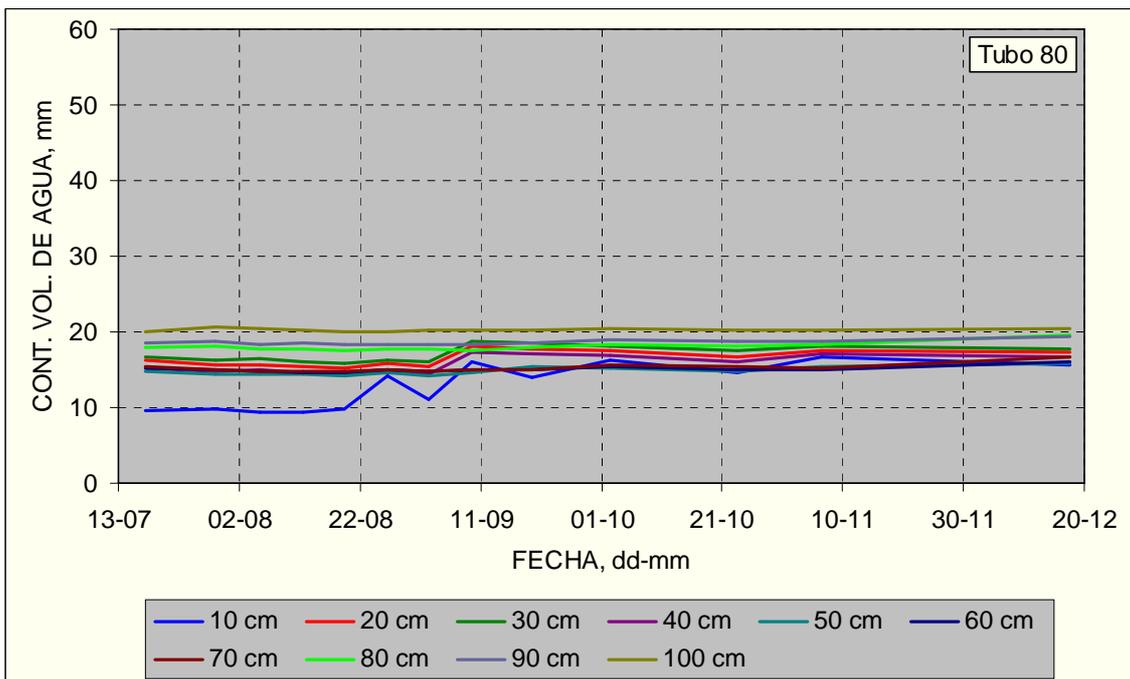


Figura 7. Evolución de los valores calibrados del contenido volumétrico de agua del suelo en cada una de las distintas profundidades de medida. Julio a diciembre de 2003. Tubos 80 y 81.

En el tubo 80, los valores de  $\theta$  a 20, 30 y 40 cm ( $\theta_{20}$ ,  $\theta_{30}$  y  $\theta_{40}$ , respectivamente) apenas variaron hasta el periodo de 2 a 9 de septiembre cuando se produjeron las lluvias más intensas del periodo estudiado. Después,  $\theta_{20}$ ,  $\theta_{30}$  y  $\theta_{40}$  disminuyeron ligeramente y aumentaron en el periodo de 23 de octubre a 6 de noviembre, cuando también se registraron lluvias de importancia. En cualquier caso,

el aumento entre la primera y última lecturas no fue tan importante como en el caso de  $\theta_{10}$ .

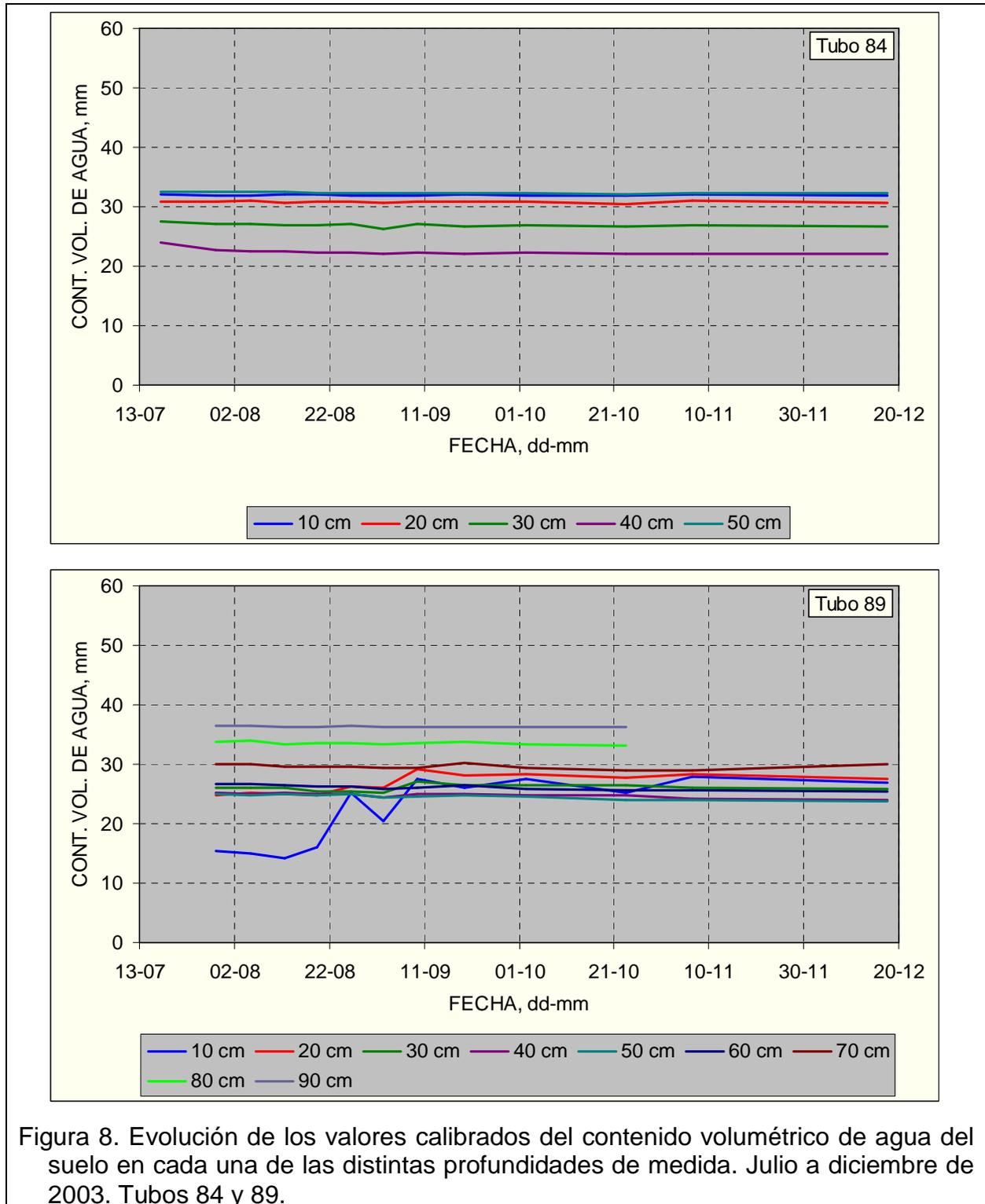


Figura 8. Evolución de los valores calibrados del contenido volumétrico de agua del suelo en cada una de las distintas profundidades de medida. Julio a diciembre de 2003. Tubos 84 y 89.

En las restantes profundidades del tubo 80,  $\theta$  experimentó una ligera subida entre la primera y última lecturas pero la respuesta de estos cambios a la presencia

de precipitaciones no fue apenas perceptible (Figura 7). En general, en las primeras fechas de lectura, la profundidad más seca fue la de 10 cm;  $\theta$  aumentó hasta los 30 cm, disminuyó hasta los 50-70 cm y luego aumentó, de forma que la profundidad de 100 cm fue la más húmeda. En las últimas fechas de lecturas, la forma del perfil fue similar pero ahora las profundidades más secas fueron las de 40-70 cm (Figura 11).

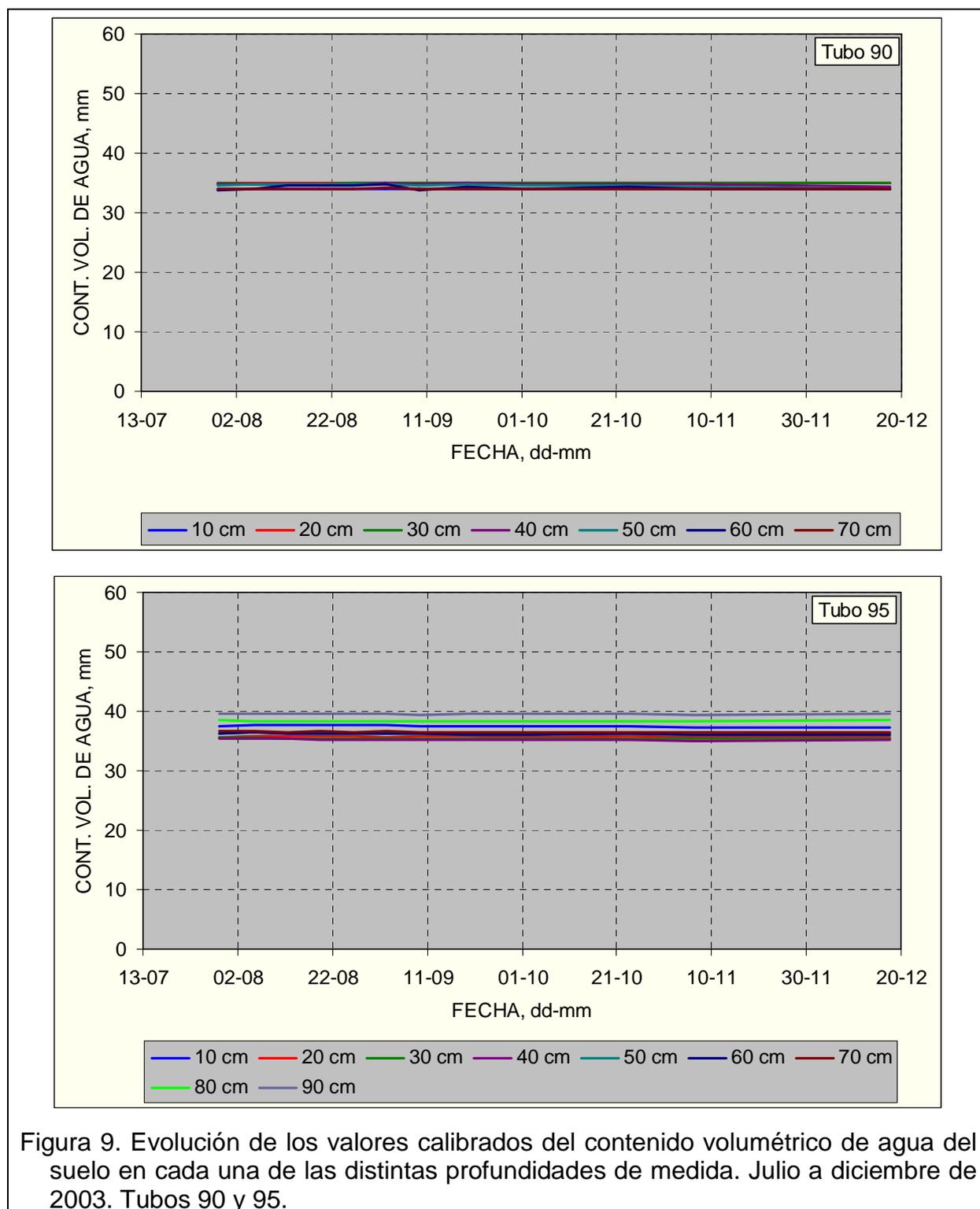


Figura 9. Evolución de los valores calibrados del contenido volumétrico de agua del suelo en cada una de las distintas profundidades de medida. Julio a diciembre de 2003. Tubos 90 y 95.

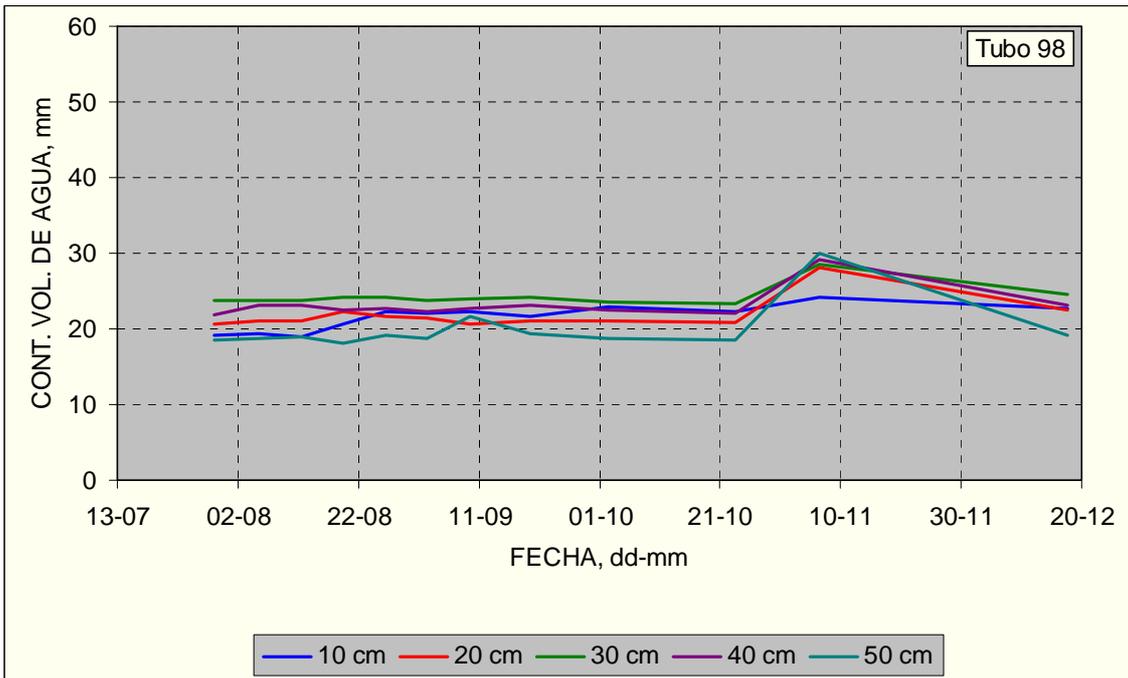


Figura 10. Evolución de los valores calibrados del contenido volumétrico de agua del suelo en cada una de las distintas profundidades de medida. Julio a diciembre de 2003. Tubo 98.

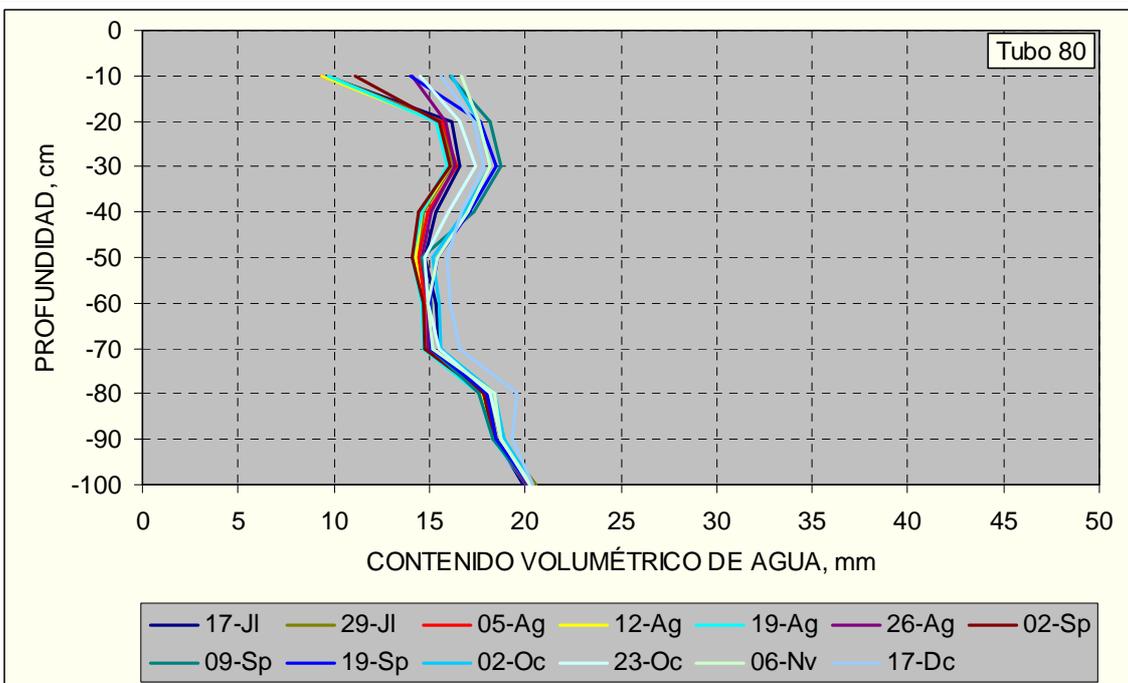


Figura 11. Evolución del perfil de los valores calibrados del contenido volumétrico de agua del suelo en cada una de las fechas de medida. Julio a diciembre de 2003. Tubo 80.

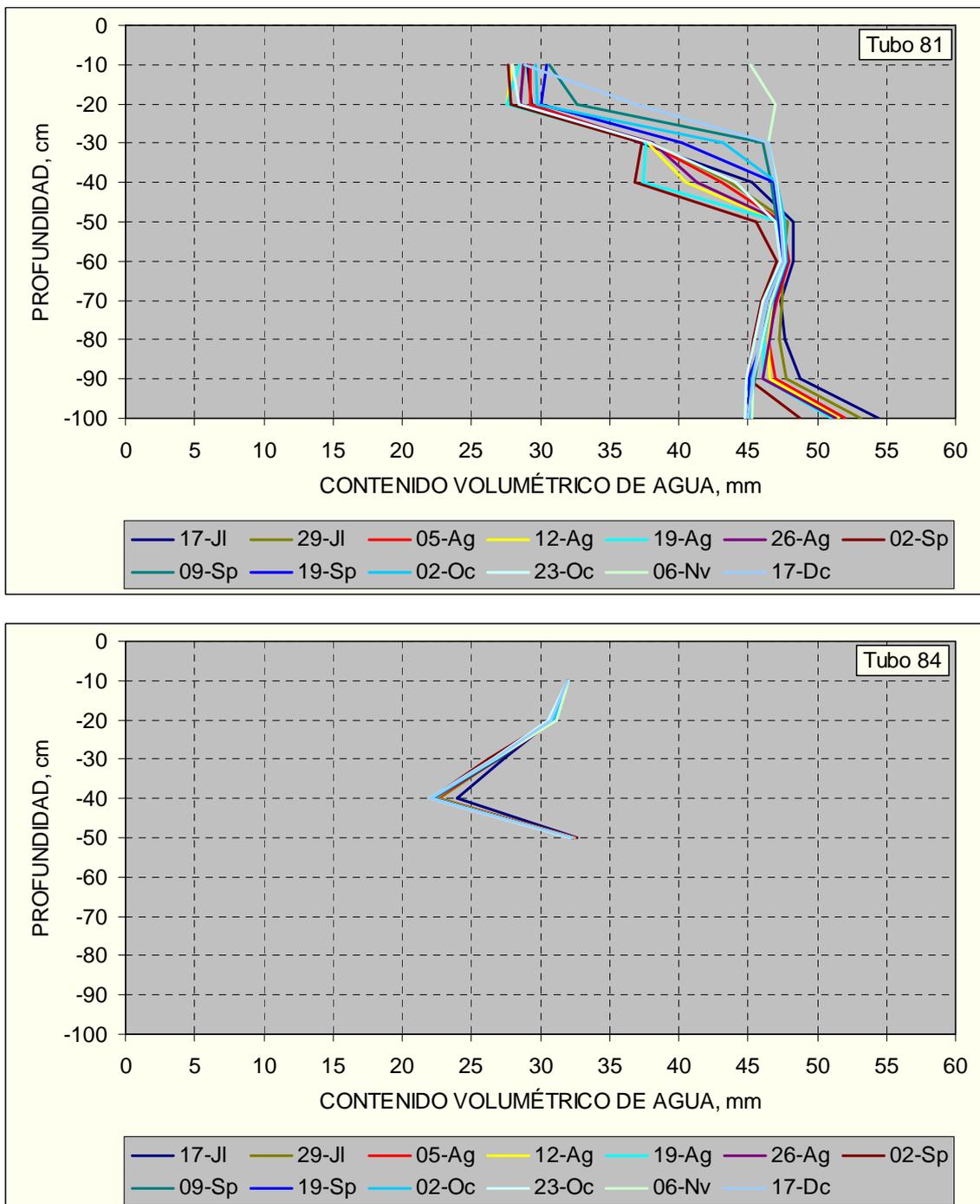


Figura 12. Evolución del perfil de los valores calibrados del contenido volumétrico de agua del suelo en cada una de las fechas de medida. Julio a diciembre de 2003. Tubos 81 y 84.

En el Tubo 81, los valores de  $\theta_{10}$  y  $\theta_{20}$  mostraron ciertas variaciones, aparentemente ligadas a las precipitaciones. El cambio más importante fue la subida en el periodo de 23 de octubre a 6 de noviembre y el posterior descenso hasta el 17 de diciembre (Figura 7). Los valores de  $\theta_{30}$  y  $\theta_{40}$  también fluctuaron aparentemente debido a las sucesivas lluvias y aumentaron de 23 de octubre al 6 de noviembre y

luego no variaron. En el resto de profundidades apenas hubo cambios en  $\theta$  aunque éste bajó en la capa de 100 cm desde la fecha inicial hasta el 9 de septiembre. En general,  $\theta$  aumentó de los 10 a los 50 cm, luego se mantuvo constante o disminuyó ligeramente y aumentó de nuevo de los 90 a 100 cm (Figura 12).

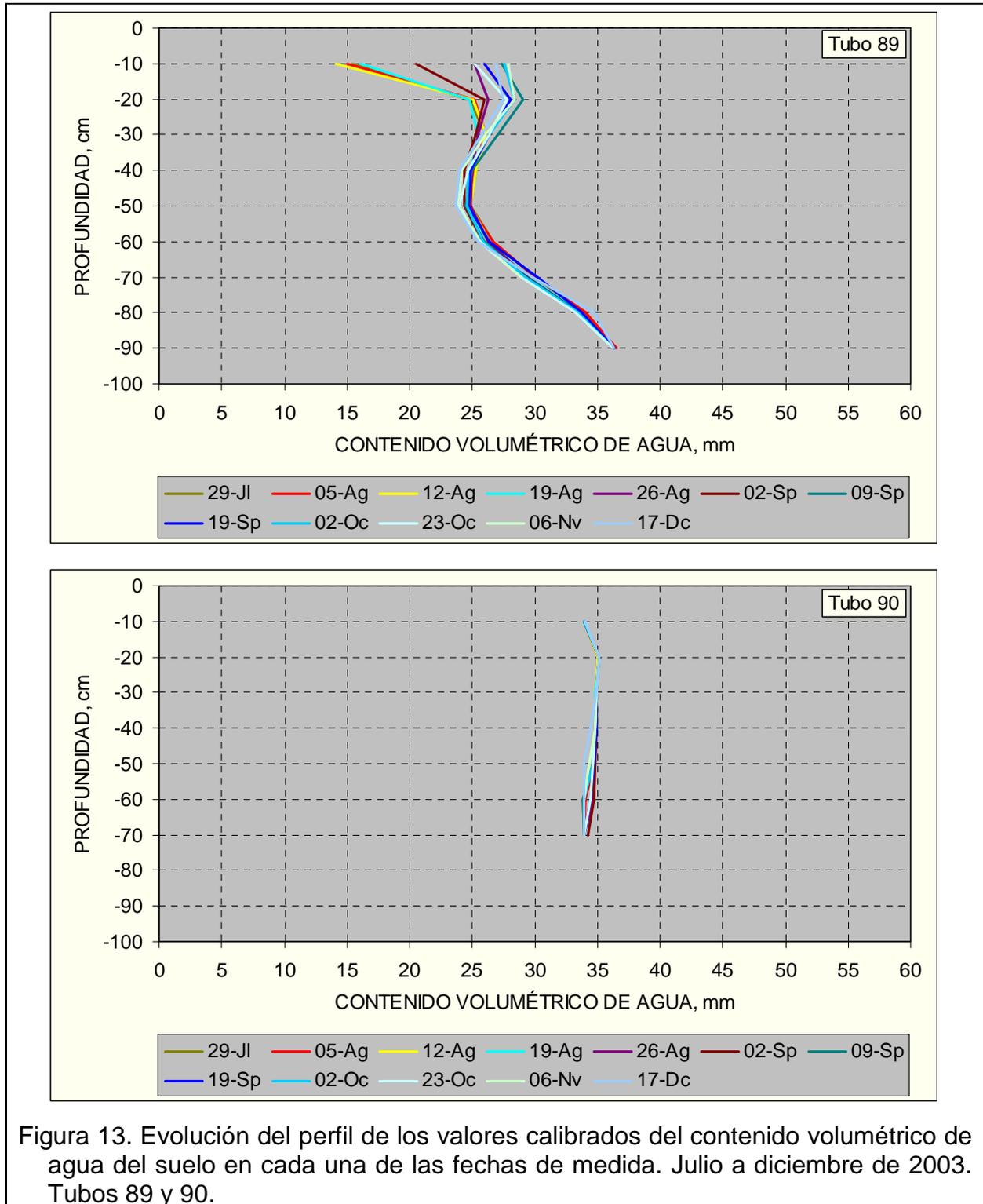


Figura 13. Evolución del perfil de los valores calibrados del contenido volumétrico de agua del suelo en cada una de las fechas de medida. Julio a diciembre de 2003. Tubos 89 y 90.

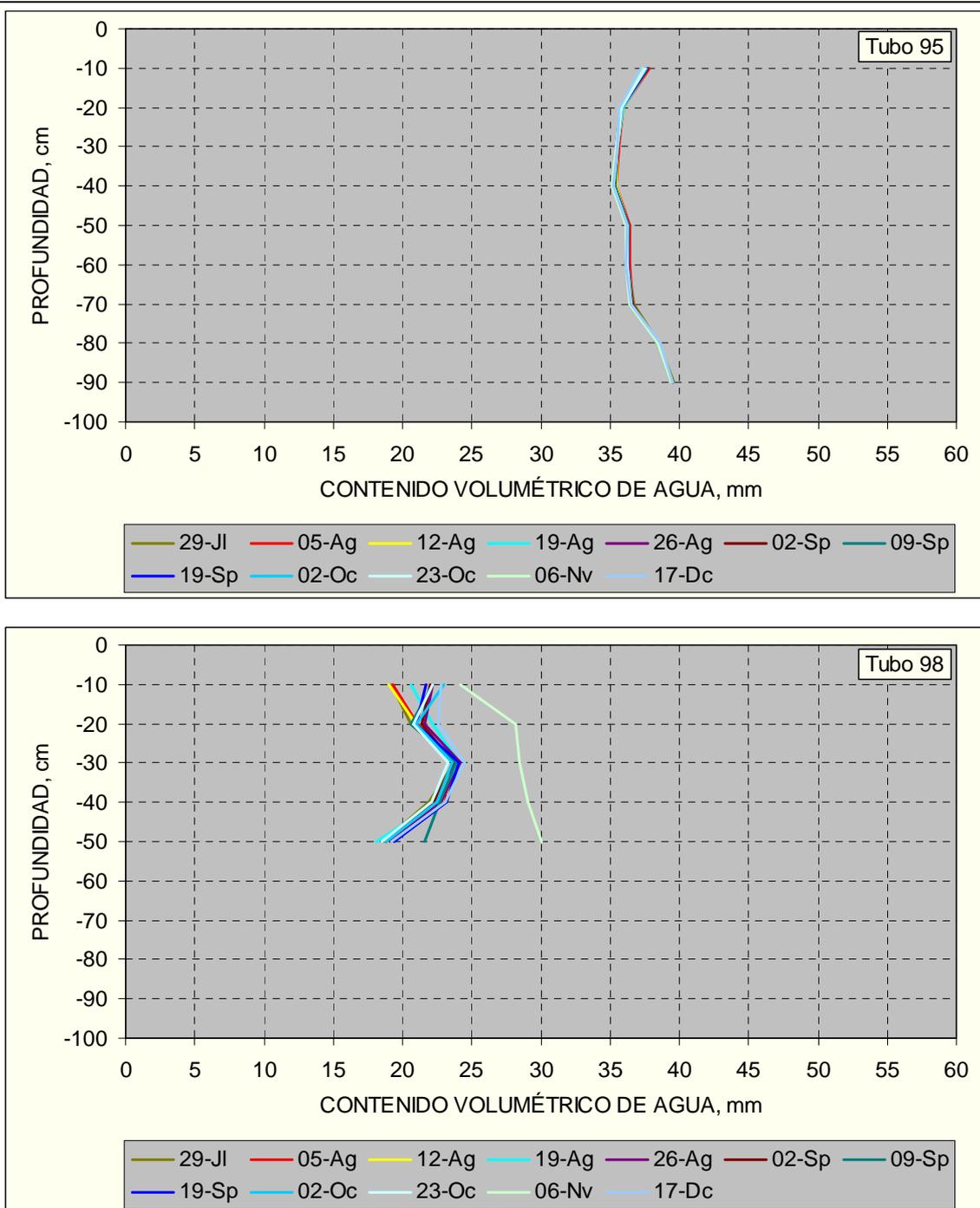


Figura 14. Evolución del perfil de los valores calibrados del contenido volumétrico de agua del suelo en cada una de las fechas de medida. Julio a diciembre de 2003. Tubos 95 y 98.

En el tubo 84,  $\theta$  apenas varió durante todo el periodo de estudio (Figura 8). Además, los valores más altos se obtuvieron a 10 y 50 cm y los más bajos a 40 cm (Figura 12). En el tubo 89,  $\theta$  mostró un comportamiento similar al observado en el tubo 80 (Figura 8), aunque  $\theta_{20}$  y  $\theta_{30}$  aparentemente sólo aumentaron con las lluvias del 2 al 9 de septiembre. Asimismo, la profundidad más seca en las primeras fechas

de lectura fue la de 10 cm;  $\theta$  aumentó hasta los 20 cm, disminuyó hasta los 50 cm y aumentó hasta los 90 cm. En las últimas fechas de lectura,  $\theta$  a 10 cm fue mayor que a 50 cm pero la forma del perfil se mantuvo (Figura 13).

En los Tubos 90 y 95, apenas se observaron cambios en  $\theta$  en las distintas profundidades a lo largo del periodo de estudio (Figura 9) ni cambios importantes en los respectivos perfiles de humedad (Figuras 13 y 14). En el tubo 98,  $\theta_{10}$  aumentó algo del 19 a 26 de agosto y del 23 de octubre a 6 de noviembre (Figura 10). En las restantes profundidades,  $\theta$  no varió apenas hasta el aumento del 23 de octubre a 6 de noviembre y descenso posterior hasta el 17 de diciembre. En general, en las primeras fechas de lectura,  $\theta$  aumentó de los 10 a los 30 cm y después disminuyó. Pero en las últimas fechas de lectura, la humedad disminuyó de los 10 a los 20 cm, aumentó a los 30 cm y después disminuyó. El 6 de noviembre se obtuvo un perfil muy diferente a los restantes. Se desconoce la causa de este comportamiento.

Todos estos resultados de  $\theta$  en las distintas profundidades y perfiles resultaron difíciles de interpretar. No se vieron realmente unos patrones claros. Además, hay que considerar los problemas comentados en la calibración de la sonda *Diviner 2000* (sección 3.1.2) por lo que una parte importante de los valores calibrados de  $\theta$  son cuestionables, sobre todo los de los tubos 84, 95, 98 y, particularmente, los del tubo 90. Aún así, a esperas de que en el año 2004 se pueda mejorar la calibración de la sonda *Diviner 2000* y de que, por tanto, los registros de  $\theta$  mejoren sustancialmente, se podría decir que el comportamiento observado en los tubos 80 y 89 fue bastante similar. Estos dos tubos se colocaron a cierta distancia de la playa humedecida de la laguna y con un ligero desnivel respecto del borde de dicha playa (Figura 1). Por ello, en estas zonas, la capa freática estuvo más alejada de la superficie. En el tubo 95, no obstante, se esperaba un comportamiento similar porque también se colocó a cierta distancia de la playa humedecida y con un ligero desnivel respecto del borde de dicha playa. Pero, los resultados indicaron una escasa variación de  $\theta$ . El comportamiento de esta variable en los tubos 81 y 98 fue relativamente similar. En este caso, el tubo 81 se colocó en el borde de la playa, en una zona evidentemente húmeda a simple vista, al menos en esta campaña, mientras que el tubo 98 se colocó en los lagunazos del sur (Figura 1), que están desconectados de la laguna principal y no mostraron agua libre en su superficie durante la presente campaña. Por ello, la razón de por qué ambos tubos, 81 y 98, mostraron resultados similares no quedó clara.

El comportamiento del tubo 84 pudo deberse al comentado problema de las gravillas presentes en el perfil que condujeron a una supuesta falta de buen contacto entre el suelo y el tubo de acceso de PVC. Finalmente, el tubo 90 se colocó en la zona de la playa humedecida y sus resultados indicaron que en esa zona el suelo estuvo saturado de agua por la proximidad de la capa freática. No obstante, estos resultados pueden ser cuestionables por la comentada falta de calibración adecuada de la sonda *Diviner 2000* en este tubo. Otro problema adicional para interpretar los resultados de  $\theta$  fue la imposibilidad de instalar todos los tubos de acceso de PVC hasta los 100 cm como se pensó en un principio ya que en algunos casos empezó a acumularse agua libre en el agujero abierto para instalar los tubos (Figura 4). Por ello,  $\theta$  no se midió en el mismo número de profundidades en cada tubo.

La Figura 15 muestra la evolución de los valores calibrados de  $\theta$  acumulados de 0 a 50 cm ( $\theta_{0-50}$ ) en las distintas fechas de medida y tubos. En general, el comportamiento de  $\theta_{0-50}$  a lo largo del periodo de medidas fue similar al ya comentado anteriormente para cada una de las profundidades individuales (Figuras 7 a 14). El tubo con un valor menor de  $\theta_{0-50}$  fue el 80, que, como ya se comentó, se colocó dentro del recinto de la estación meteorológica, a unos 50 m a cada lado de la playa humedecida de la laguna (Figura 1); en este lugar, hay un istmo que casi divide en dos el lagunazo (parte norte) del cuerpo principal de la laguna; por ello, en este lugar hay un cierto desnivel respecto del borde de la playa humedecida de la laguna. Probablemente, en el punto donde se ubicó el tubo 80 hubo una mayor distancia de la capa freática a la superficie que en las restantes ubicaciones de tubos.

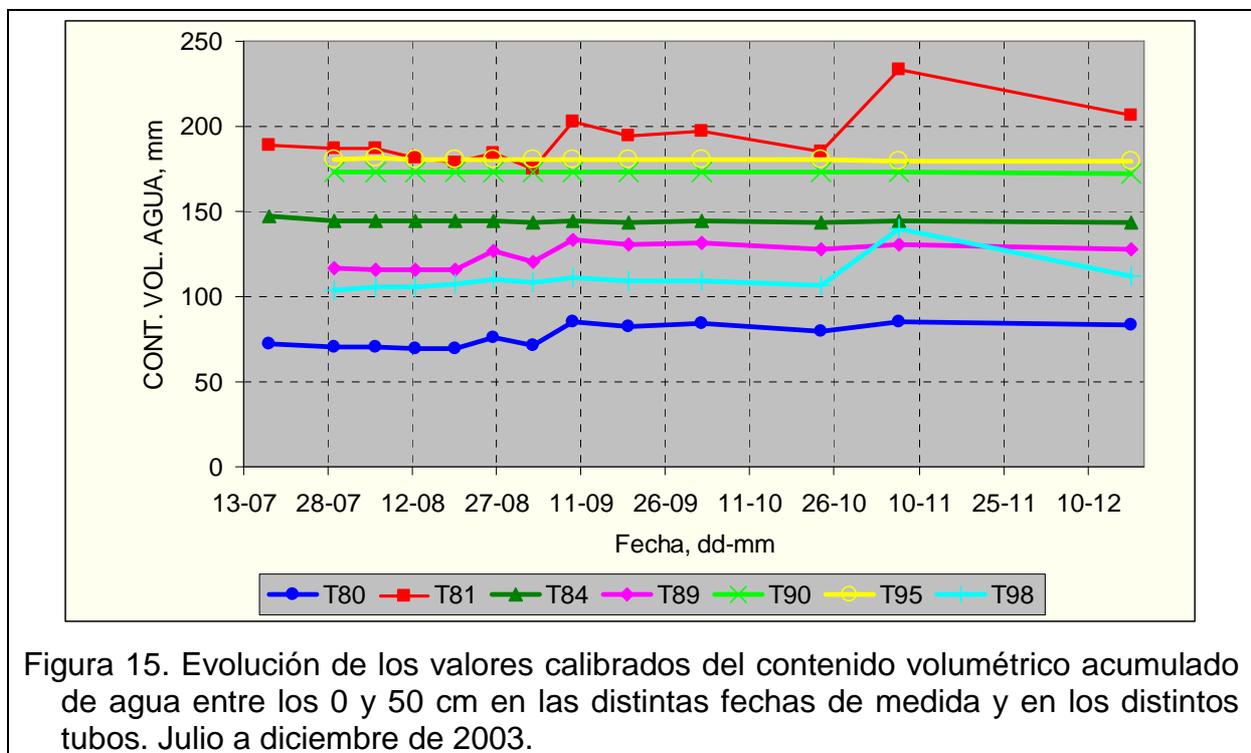


Figura 15. Evolución de los valores calibrados del contenido volumétrico acumulado de agua entre los 0 y 50 cm en las distintas fechas de medida y en los distintos tubos. Julio a diciembre de 2003.

El siguiente tubo con menor  $\theta_{0-50}$  fue el 98. Este tubo se colocó en los lagunazos del sur cuya superficie no está físicamente conectada al resto de la laguna. En el vaso de esta zona no se acumuló lámina libre de agua durante el periodo de medidas. Los valores de  $\theta_{0-50}$  en el tubo 89 fueron ligeramente superiores a los observados en el tubo 98. El tubo 89 se colocó asimismo a cierta distancia de la playa humedecida (Figura 1) por lo que también existió un ligero desnivel respecto a la curva de nivel de ésta. Por ello, se supone que existió una mayor distancia de la capa freática a la superficie en estos dos puntos. Recuérdese que la mayor parte de los valores calibrados de  $\theta$  obtenidos en los tubos 80, 89 y 98 estuvo dentro del rango ( $\theta_{FC}$ ,  $0.5 \theta_{WP}$ ) (Anejo 8). En consecuencia, se puede suponer que en estos puntos, los perfiles de suelo estudiados están lo suficientemente alejados de la capa freática como para que no exista una humedad cercana o igual a la saturación.

En el tubo 84,  $\theta_{0-50}$  apenas varió como ya se comentó anteriormente. En este caso, también la inmensa mayoría de valores de  $\theta$  estuvieron dentro del rango ( $\theta_{FC}$ ,  $0.5 \theta_{WP}$ ). Este tubo se colocó casi en el borde de la zona de playa humedecida (Figura 1). Es posible que su ligeramente mayor cercanía a esta playa hiciera que la capa freática estuviera ligeramente más cerca de la superficie y eso llevó a unos valores de  $\theta$  mayores, muy cercanos a la capacidad de campo (Anejo 8 y Tabla 4).

Los tubos 90 y 95 mostraron valores muy parecidos de  $\theta_{0-50}$ . Resultó curioso el comportamiento del tubo 95. Este tubo se colocó también a cierta distancia y a un ligero desnivel de la playa humedecida (Figura 1) y rodeado de algo de vegetación natural. Por ello, se hubieran esperado unos valores y una evolución de  $\theta$  más parecido a lo observado en los tubos 80 y 89. En el tubo 90, aparte de los extraños valores registrados en los valores de  $\theta$  no calibrados, sobre todo a 10 cm por su enorme diferencia respecto a los de capas inferiores (Anejo 6), se obtuvo una ecuación de calibración no significativa, por lo que los valores de  $\theta$  mostrados en las Figuras 9, 13 y 15 resultaron cuestionables. No obstante, este tubo se colocó también en el borde de la playa humedecida, en una zona en la que siempre se observó humedad en el suelo a simple vista, aunque la distancia a la zona de lámina libre de agua fue algo mayor que en el caso del tubo 81. Por ello, tampoco resultó tan extraño que los valores obtenidos de contenido volumétrico de agua del suelo fueran superiores a la capacidad de campo y, por tanto, que apenas hubiera variaciones de  $\theta$  en todo el periodo de medida. Por último, el tubo 81 se colocó también cerca de la playa humedecida, a escasos metros de donde se observó lámina libre de agua durante el periodo de medidas. Por ello, también resultó lógico, aparentemente, que los valores de  $\theta_{0-50}$  en este punto fueran los más altos y que además resultaran tan afectados por las lluvias que presumiblemente influyeron en la extensión de la lámina libre de agua.

En definitiva, los resultados de  $\theta$  en los distintos tubos no pudieron aportar conclusiones definitivas debido a la gran incertidumbre que existió en las ecuaciones de calibración de la sonda *Diviner 2000*. No obstante, a muy grandes rasgos, los valores de  $\theta$  obtenidos parecieron reflejar las condiciones reales de humedad del suelo, las cuales a su vez se vieron afectadas por la distancia mayor o menor a la playa humedecida y por la presumiblemente mayor o menor cercanía de la capa freática a la superficie del suelo.

### 3.1.4. Evidencia cualitativa de la evaporación capilar

Como se comentó en la sección 2.3, la ecuación (14) se empleó para obtener valores simulados de  $\theta$ , en la capa de suelo de 0-10 cm de profundidad, en cada tubo y en cada uno de los días transcurridos de julio a diciembre de 2003, partiendo de los valores medidos de  $\theta$  el 17 de julio (tubos 80, 81 y 84) o el 29 de julio (tubos 89, 90, 95 y 98), tras aplicar las correspondientes ecuaciones de calibración (Tabla 8). La Tabla 10 lista, para cada tubo y fecha de medida, los valores de  $\theta$  simulados ( $\theta_i$ ) y medidos ( $\theta_{obs}$ ). La Figura 16 muestra la evolución de las diferencias  $\theta_d$  a lo largo del periodo de medidas. Los resultados indican que en todos los tubos, salvo en el tubo 80, los valores de  $\theta_{obs}$  fueron claramente superiores a los de  $\theta_i$ . A medida que el tiempo transcurrió desde la fecha inicial, los respectivos valores absolutos de  $\theta_d$  fueron aumentando, con ligeras fluctuaciones, probablemente debidas al efecto

de las precipitaciones, hasta alcanzar unos valores máximos de entre 13 y 27 mm hacia el 19 de septiembre (Figura 16), excepto en el tubo 80 donde los valores de  $\theta_d$  siempre fueron pequeños. Se observó una disminución posterior de los valores absolutos de  $\theta_d$  debido a las precipitaciones, sobre todo tras las ocurridas entre el 23 de octubre y el 6 de noviembre (Tabla 9), salvo en el tubo 81 (no se tiene explicación a esta excepción). Durante el periodo final del estudio, 6 de noviembre a 17 de diciembre, a pesar de las precipitaciones registradas (pero en el periodo más largo de todos los estudiados), los valores absolutos de  $\theta_d$  volvieron a aumentar hasta valores similares a los observados el 19 de septiembre.

Tabla 10. Valores de contenido volumétrico de agua simulados con la ecuación (14) ( $\theta_i$ ) y medidos ( $\theta_{obs}$ ) con la sonda *Diviner 2000*, tras aplicar las correspondientes ecuaciones de calibración (Tabla 8), en la capa de suelo de 0 a 10 cm de profundidad, en los distintos tubos y fechas de medida. Julio a diciembre de 2003.

Fecha	Tubo 80		Tubo 81		Tubo 84		Tubo 89	
	$\theta_i$ (mm)	$\theta_{obs}$ (mm)	$\theta_i$ (mm)	$\theta_{obs}$ (mm)	$\theta_i$ (mm)	$\theta_{obs}$ (mm)	$\theta_i$ (mm)	$\theta_{obs}$ (mm)
17-jul	9.6	9.6	19.6	29.1	26.3	32.0		
29-jul	9.6	9.7	8.1	28.9	12.3	31.9	10.4	15.4
05-ago	9.6	9.4	8.1	29.3	12.3	31.9	8.9	15.0
12-ago	10.5	9.4	8.1	28.0	12.7	32.0	8.9	14.1
19-ago	11.2	9.7	8.4	28.5	14.0	32.0	9.6	16.1
26-ago	10.7	14.1	8.1	28.8	13.6	31.9	9.1	25.2
02-sep	10.4	11.1	8.1	27.7	12.3	31.9	8.9	20.5
09-sep	12.8	16.1	9.3	30.6	17.9	31.9	11.0	27.4
19-sep	10.4	14.0	8.1	30.4	12.4	32.0	8.9	26.0
02-oct	15.3	16.2	12.0	29.7	19.3	31.9	13.5	27.6
23-oct	14.6	14.5	11.4	28.0	18.4	31.9	12.8	25.2
06-nov	24.2	16.7	20.2	45.2	29.9	32.0	22.2	27.9
17-dic	12.6	15.6	9.5	28.9	16.7	31.9	10.9	26.9
Fecha	Tubo 90		Tubo 95		Tubo 98			
	$\theta_i$ (mm)	$\theta_{obs}$ (mm)	$\theta_i$ (mm)	$\theta_{obs}$ (mm)	$\theta_i$ (mm)	$\theta_{obs}$ (mm)		
17-jul								
29-jul	12.7	34.0	25.1	37.5	12.4	19.2		
05-ago	7.2	33.9	11.0	37.8	9.2	19.3		
12-ago	7.2	33.9	11.2	37.7	9.2	19.0		
19-ago	7.2	33.9	12.3	37.7	9.7	20.6		
26-ago	7.2	33.9	11.8	37.7	9.4	22.2		
02-sep	7.2	33.9	11.0	37.7	9.2	22.0		
09-sep	7.2	33.9	15.0	37.5	10.8	22.2		
19-sep	7.2	34.0	11.0	37.6	9.2	21.7		
02-oct	9.2	33.9	17.0	37.6	13.4	23.0		
23-oct	8.2	34.0	16.2	37.5	12.8	22.2		
06-nov	14.4	34.0	26.8	37.3	21.9	24.2		
17-dic	7.4	34.0	14.3	37.2	10.9	22.8		

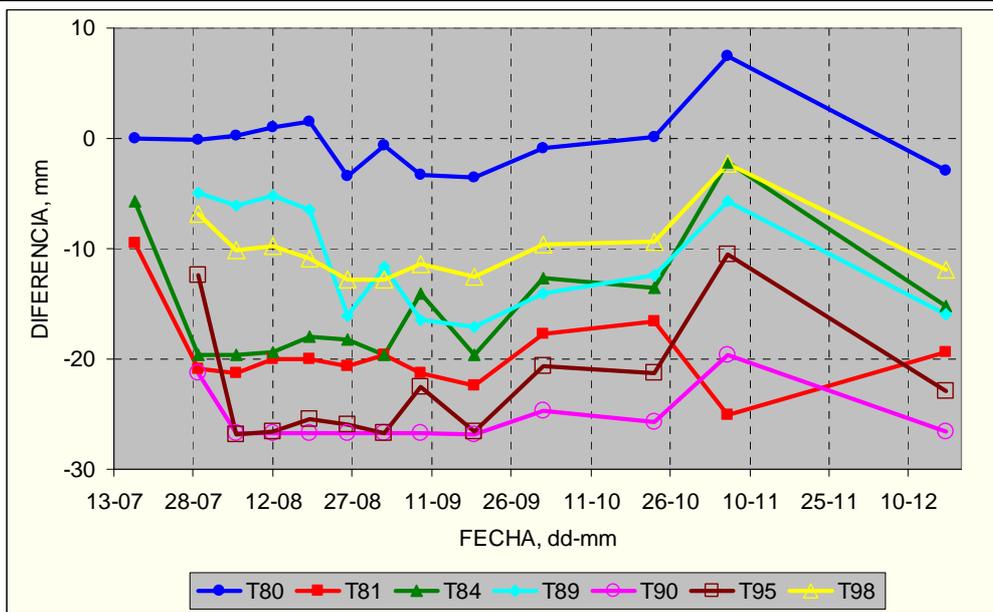


Figura 16. Evolución de las diferencias entre los valores simulados [ecuación (14)] y medidos del contenido volumétrico de agua entre 0 y 10 cm de profundidad en las distintas fechas de medida y en los distintos tubos. Julio a diciembre de 2003.

La Tabla 11 lista las medias y desviaciones estándar de los valores de  $\theta_d$  ( $\bar{x}_d$  y  $s_d$ ) para cada uno de los tubos individuales y para el conjunto de tubos, así como los estadísticos  $t$  calculados con la ecuación (15) y los valores tabulados  $t_{\alpha, n-1}$  (sección 2.4). Todos los valores de  $\bar{x}_d$  fueron negativos y significativamente diferentes de 0 ( $\alpha = 0.95$ ), excepto en el caso del tubo 80. Por tanto, los valores simulados de  $\theta$  fueron significativamente menores que los medidos. Aun con las reservas necesarias por los problemas relacionados con la calibración y la subsiguiente fiabilidad de los datos de  $\theta$  medidos con la sonda Diviner y con la incertidumbre propia de todo proceso de estimación, los resultados de la Tabla 11 constituyen una prueba indirecta de la existencia de ascenso capilar.

Tabla 11. Medias y desviaciones estándar de los valores de  $\theta_d$  ( $\bar{x}_d$  y  $s_d$ ) para cada uno de los tubos individuales y para el conjunto de tubos, así como los estadísticos  $t$  calculados con la ecuación (15) y los valores tabulados  $t_{\alpha, n-1}$ . Julio a diciembre de 2003.

Tubo	$\bar{x}_d$ (mm)	$s_d$ (mm)	$t$	$t_{\alpha, n-1}$
Todos	-14.7	9.0	-15.3	2.01
80	-0.3	2.9	-0.4	2.18
81	-19.6	3.7	-19.3	2.18
84	-15.2	5.7	-9.7	2.18
89	-11.0	5.0	-7.7	2.20
90	-25.4	2.4	-36.2	2.20
95	-22.4	5.6	-13.9	2.20
98	-10.0	3.0	-11.6	2.20

Este ascenso capilar explicaría el hecho de que haya más humedad en la capa de 0-10 cm del suelo que la esperada sólo por precipitación directa en el lugar de medida. Este ascenso capilar sería el responsable de los valores de  $\theta_d$  representados en la Figura 16. Los valores de  $\bar{x}_d$  no fueron iguales en todos los casos. Así, por ejemplo, en el caso del tubo 80, este valor no fue significativamente diferente de 0 lo que indicó que, en este punto, el ascenso capilar es poco o nada importante como ya sugirieron los valores de salinidad registrados (Tabla 6) y la forma y evolución de los perfiles de suelo (Figura 11). Este tubo se colocó en el recinto de la estación meteorológica y en este punto existe un cierto desnivel respecto a la playa humedecida de la laguna lo que hace que la capa freática esté a mayor distancia de la superficie del suelo. En los tubos 84, 89 y 98, los valores de  $\bar{x}_d$  fueron significativos. Aún así, fueron los menores de los obtenidos, exceptuado el tubo 80 (Tabla 11). Estos tubos también se colocaron a cierta distancia y con un ligero desnivel respecto a la playa humedecida de la laguna (Figura 1). Por ello, también se puede suponer que la capa freática en estos puntos esté más cerca de la superficie que en la zona de ubicación del tubo 80, aunque más alejada que en otras ubicaciones.

Las mayores diferencias entre valores simulados y medidos de  $\theta$  se observaron en el tubo 90, que se ubicó en la misma playa humedecida, en su borde, en una zona con menos desnivel entre el exterior y el interior del vaso de la laguna y, por tanto, donde presumiblemente la capa freática se encontró más cerca de la superficie. A priori se esperaba que los valores de  $\bar{x}_d$  en el tubo 95 hubieran sido menores que en el caso del tubo 84 porque aquél se colocó algo más alejado de la playa humedecida de la laguna (Figura 1). No fue así pero, en cualquier caso, los resultados de las Tablas 10 y 11 y de la Figura 16 fueron simplemente una valoración cualitativa e indirecta de la existencia de ascensión capilar y con un grado de incertidumbre importante como ya se ha comentado. La importancia del ascenso capilar dependió, como era lógico de esperar, de la distancia de la capa freática a la superficie. Como esta distancia varió dentro del vaso de laguna y de sus márgenes, la magnitud de dicho ascenso, aunque cuantitativamente resultó difícil de valorar con estos resultados, presentó una variabilidad espacial evidente.

En la sección 3.3 se presentan y discuten los resultados de evapotranspiración real obtenidos con el método de la renovación de la superficie. En esa sección se discute la posible importancia cuantitativa de la evaporación capilar a la vista de los resultados obtenidos con las medidas de  $\theta$  y sus diferencias con los valores simulados y que se acaban de discutir.

### **3.2. Caracterización meteorológica de la laguna de Gallocanta**

La caracterización meteorológica descrita en este trabajo no pretende describir la climatología general de la zona por su corta representatividad temporal, 3 años, 10 meses y 14 días (16 de febrero de 2000 a 31 de diciembre de 2003). Esta caracterización meteorológica sólo debe circunscribirse a dicho periodo. Todos los datos registrados en los dos equipos acumuladores de la estación meteorológica automática se encuentran en el CD-ROM adjunto a este informe (formatos de texto separados por comas y EXCEL).

### 3.2.1. Precipitación

La Tabla 12 lista las precipitaciones medias mensuales registradas en los cuatro años de estudio, así como los valores mensuales del año medio. Tras dos años secos, particularmente 2001, hubo dos años relativamente húmedos, siendo 2002 el año más lluvioso con 501 mm. La precipitación total anual media en estos cuatro años fue 393 mm, lo que indica que la zona se puede considerar como semiárida. El mes de mayo ha sido el más lluvioso en tres de los cuatro años y en el año medio. A grandes rasgos, la Tabla 12 indica que los periodos de abril-junio y septiembre-octubre fueron los más lluviosos, mientras que los meses de febrero y julio fueron los más secos en promedio.

Tabla 12. Precipitación total mensual ( $\text{mm mes}^{-1}$ ) y anual ( $\text{mm año}^{-1}$ ) registradas en la estación de Gallocanta en el periodo de estudio.

Mes	2000	2001	2002	2003	Año medio
Enero		31.9	25.0	16.2	24.4
Febrero		4.6	4.4	28.5	12.5
Marzo	20.6	19.6	28.1	44.2	28.1
Abril	44.0	5.7	39.4	50.5	34.9
Mayo	96.8	38.6	58.8	86.3	70.1
Junio	53.9	9.1	80.0	28.7	42.9
Julio	14.5	9.7	22.0	3.8	12.5
Agosto	5.1	9.1	87.9	27.1	32.3
Septiembre	12.7	25.3	33.5	79.0	37.6
Octubre	74.9	31.3	71.1	48.1	56.4
Noviembre	24.6	6.1	13.3	44.2	22.1
Diciembre	28.7	2.0	37.8	7.3	18.9
Anual <sup>(a)</sup>	375.9	192.9	501.4	463.8	392.7

<sup>(a)</sup> Valor anual de 2000, sólo orientativo por no disponer de datos de enero y de la mitad de febrero.

La Tabla 13 lista la distribución de las intensidades de precipitación diaria registradas en el periodo de estudio. Se registró precipitación en 477 días (33.7 %); pero sólo en 260 días (18.4 %), en los que se midió el 95.2 % de la precipitación total registrada, este registro fue igual o mayor de 1.0 mm. Salvo el 3 de septiembre de 2003 (44.4 mm), el 6 de mayo de 2003 (40.0 mm) y el 10 de octubre de 2002 (32.7 mm), no se obtuvieron registros diarios superiores a 30 mm; en otros 8 días más se superaron los 20 mm diarios; y sólo en el 13.5 % de los 260 días con precipitación mayor o igual a 1,0 mm se registraron más de 10.0 mm.

La Tabla 14 lista el número de días con precipitación igual o mayor que 0.2 y 1.0 mm, respectivamente. En ambos casos, el mayor número total de días con precipitación se registró en 2002 y 2003. En 2000, el mayor número de días con precipitación igual o mayor de 1.0 mm ocurrió en mayo y octubre (11 días); en 2001, en enero (9 días); en 2002, en agosto (13 días); y en 2003, en junio (9 días). La variabilidad entre años fue importante. Así, en agosto sólo se registraron 2 días con precipitación igual o mayor de 1.0 mm en 2000 y 2001, y 13 días en 2002. Para el año medio, mayo y octubre fueron los meses con mayor número de días, en

promedio, con precipitación igual o mayor de 1.0 mm, 7.8 días. El total anual para el año medio fue de 67.2 días con precipitación igual o mayor de 1.0 mm (Tabla 14).

Tabla 13. Distribución de intensidades de precipitación diaria registradas en el periodo de estudio.

Rangos de intensidad (mm)	Frecuencia absoluta	Frecuencia relativa, %
0	938	66.3
0.2 a 1.0	217	15.3
1.0 a 2.0	70	4.9
2.0 a 5.0	101	7.1
5.0 a 10.0	54	3.8
10.0 a 20.0	21	1.5
> 20.0	14	1.0
Total	1415	100.0

Tabla 14. Número de días con precipitación igual o mayor que 0.2 mm (*ND0*) y 1.0 mm (*ND1*) en el periodo de estudio.

Mes	2000		2001		2002		2003		Año medio	
	<i>ND0</i>	<i>ND1</i>								
Enero			20	9	15	6	9	6	14.7	7.0
Febrero			9	2	5	2	11	7	6.5	2.8
Marzo	8	8	12	6	10	6	11	5	10.3	6.3
Abril	15	10	7	2	7	6	11	6	10.0	6.0
Mayo	17	11	10	7	10	6	9	7	11.5	7.8
Junio	8	6	2	2	10	8	10	9	7.5	6.3
Julio	4	2	5	3	5	3	2	1	4.0	2.3
Agosto	5	2	3	2	15	13	7	4	7.5	5.3
Septiembre	7	3	7	6	13	7	11	8	9.5	6.0
Octubre	17	11	11	6	16	6	19	8	15.8	7.8
Noviembre	14	8	9	3	10	5	18	7	12.8	5.8
Diciembre	16	7	6	0	16	6	14	2	13.0	3.8
Año <sup>(a)</sup>	111	68	101	48	132	74	132	70	123.1	67.2

<sup>(a)</sup> Valor anual de 2000, sólo orientativo por no disponer de datos de enero y de la mitad de febrero.

### 3.2.2. Temperatura del aire y del suelo

En esta sección, sólo se discuten los registros de temperatura del aire obtenidos con la sonda *Vaisala*. Martínez-Cob (2001, 2002) presentó una comparación entre las temperaturas del aire registradas con este sensor y las registradas con termopares de hilo fino *TCBR* y concluyó que los registros de la sonda *Vaisala* son más adecuados para caracterizar la temperatura del aire.

La Tabla 15 lista valores medios mensuales de las temperaturas del aire (sonda *Vaisala*) medias diarias, máximas y mínimas. La temperatura media mensual más alta de 2000, 2001 y 2003 se registró en agosto (21.1, 22.0 y 22.3 °C, respectivamente); la de 2002, en julio (19.8 °C). La temperatura media mensual

menor de 2000 y 2001 se registró en diciembre (4.8 y -2.6 °C, respectivamente); la de 2002 y 2003, en enero (2.9 y 2.3 °C, respectivamente). Sólo en diciembre de 2001, la temperatura media mensual fue menor de 0°C. Este mes registró unas fuertes heladas, con una mínima absoluta (día 24) de -22.0 °C. La temperatura máxima media mayor de 2000, 2001 y 2003 se registró en agosto (30.2, 30.9 y 32.0 °C, respectivamente); la de 2002, en julio (28.1 °C). La temperatura mínima media menor de 2000 se registró en febrero (-2.0 °C); la de 2001, en diciembre (-11.7 °C); la de 2002, en enero (-2.7 °C); y la de 2003, en enero y febrero (-1.8 °C). Enero (2002 y 2003), febrero (2000, 2001, 2002 y 2003), marzo (2000), noviembre (2001) y diciembre (2001 y 2003) registraron temperatura mínima media menor de 0 °C. Para el año medio, la temperatura media anual fue 11.3 °C; las medias anuales de las temperaturas máxima y mínima fueron 18.5 y 4.4 °C, respectivamente; y los meses más cálido y frío fueron, respectivamente, agosto (temperatura media diaria, 20.9 °C) y diciembre (temperatura media diaria, 2.8 °C).

Tabla 15. Valores mensuales de la temperatura del aire registrada con la sonda *Vaisala*: medias diarias (*Tmd*), de las máximas (*Txm*) y de las mínimas (*Tnm*).

	Año	Ene	Feb <sup>(a)</sup>	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año <sup>(b)</sup>
<i>Tmd</i> (°C)	2000		6.1	6.4	7.8	14.3	18.4	20.4	21.1	16.7	10.3	5.5	4.8	12.3
	2001	4.3	3.3	9.6	8.7	13.0	19.9	20.8	22.0	14.8	13.1	2.8	-2.6	10.9
	2002	2.9	4.8	7.2	9.1	11.9	19.0	19.8	18.4	15.3	11.4	7.1	5.5	11.1
	2003	2.3	2.4	7.6	9.5	13.5	21.2	22.0	22.3	15.9	10.2	6.9	3.6	11.5
	Año medio	3.2	4.2	7.7	8.8	13.2	19.6	20.7	20.9	15.7	11.3	5.6	2.8	11.3
<i>Txm</i> (°C)	2000		15.4	14.7	13.6	21.9	26.9	28.8	30.2	26.7	16.8	10.2	9.7	19.8
	2001	8.7	10.0	15.5	16.5	20.5	28.9	29.6	30.9	23.6	20.4	9.7	8.1	18.6
	2002	9.3	12.4	13.7	16.1	18.5	27.0	28.1	26.5	23.6	17.8	11.5	9.7	17.9
	2003	6.6	7.1	15.7	16.3	20.9	29.3	30.8	32.0	23.5	15.4	12.5	8.2	18.3
	Año medio	8.2	11.2	14.9	15.6	20.4	28.0	29.3	29.9	24.3	17.6	11.0	8.9	18.5
<i>Tnm</i> (°C)	2000		-2.0	-1.4	2.4	7.4	9.8	11.8	11.6	7.5	4.4	0.7	0.3	5.1
	2001	0.4	-2.5	4.5	0.4	5.4	9.1	11.3	13.2	6.6	6.8	-3.7	-11.7	3.4
	2002	-2.7	-2.6	0.2	1.6	4.6	10.8	11.7	11.4	7.9	5.7	2.8	1.9	4.5
	2003	-1.8	-1.8	0.3	2.6	6.3	13.0	12.7	12.8	8.9	5.6	2.2	-0.7	5.0
	Año medio	-1.4	-2.2	0.9	1.8	6.0	10.7	11.9	12.2	7.7	5.6	0.5	-2.6	4.4

<sup>(a)</sup> Sólo 14 días disponibles en 2000.

<sup>(b)</sup> Valores anuales de 2000, sólo orientativos por carecer de datos de enero y mitad de febrero.

La Tabla 16 lista las frecuencias absolutas y relativas del número de días en los que se registraron heladas. El periodo completamente libre de heladas fue de junio a agosto, aunque en septiembre sólo se registró una helada en 2001. En todo el periodo de estudio, hubo 349 (24.7 %) días con heladas. El mayor número de heladas ocurrió en 2001 (115 días). El mes de diciembre de 2001 fue extraordinariamente frío: se registró la mínima absoluta más baja de todo el periodo de estudio, hubo heladas en 30 de los 31 días del mes y en 18 de esos días (12 a 29 de diciembre) la temperatura mínima fue inferior a -10.0 °C (con la media diaria inferior a 0 °C), mientras que en los restantes meses estudiados no se bajó de este

valor, salvo el 18 de febrero de 2003 (-11.2 °C) y el 28 de noviembre de 2001 (-10.2 °C). También noviembre y febrero de 2001 y enero de 2002 y 2003 fueron muy fríos. Para el año medio, en los meses de noviembre a abril se registraron en promedio más del 28 % de días con heladas, mientras que en mayo y octubre estas cifras sólo fueron del 4 al 7 %. El periodo más largo con heladas fue de 40 días, de 21 de noviembre a 30 de diciembre de 2001.

Tabla 16. Frecuencias absolutas y relativas de días en que se registraron heladas (temperatura mínima menor de 0 °C) durante el periodo de estudio.

Mes	Frecuencia absoluta (días)					Frecuencia relativa (%)				
	2000	2001	2002	2003	Total	2000	2001	2002	2003	Año medio
Enero		16	22	24	62		51.6	71.0	77.4	66.7
Febrero <sup>(a)</sup>	11	22	20	18	71	78.6	78.6	71.4	64.3	72.4
Marzo	18	3	12	15	48	58.1	9.7	38.7	48.4	38.7
Abril	4	15	8	7	34	13.3	50.0	26.7	23.3	28.3
Mayo	0	3	2	0	5	0.0	9.7	6.5	0.0	4.0
Junio	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Julio	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Agosto	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Septiembre	0	1	0	0	1	0.0	3.3	0.0	0.0	0.8
Octubre	3	1	1	4	9	9.7	3.2	3.2	12.9	7.3
Noviembre	12	24	5	9	50	40.0	80.0	16.7	30.0	41.7
Diciembre	13	30	9	17	69	41.9	96.8	29.0	54.8	55.6
Año <sup>(b)</sup>	61	115	79	94	349	19.1	31.5	21.6	25.8	24.7

<sup>(a)</sup> En 2000, sólo 14 días disponibles.

<sup>(b)</sup> Valores anuales de 2000, sólo orientativos por carecer de datos de enero y mitad de febrero.

La Figura 17 muestra las medias mensuales de las temperaturas medias diarias del aire y del suelo. La evolución de ambas variables fue muy similar a lo largo del periodo de estudio. Si las medidas de la temperatura del suelo se realizan cerca de su superficie, como en este caso, la correlación con la temperatura del aire es bastante grande (Martínez-Cob, 2001, 2002). Pero, la temperatura del suelo depende no sólo de la temperatura del aire sino también de las propiedades mineralógicas y texturales y de las condiciones hídricas del suelo. Por ello, a pesar de esa gran correlación, se observó una diferencia significativa e importante entre los valores medios registrados de ambas variables. Así, en todos los meses, la media mensual de la temperatura del suelo fue superior a la de la temperatura del aire (Figura 17). La Tabla 17 lista, por meses, las frecuencias relativas del número de días con temperatura media del suelo inferior a la del aire. Durante los meses cálidos (mayo a septiembre), el suelo a 0.03-0.06 m de profundidad estuvo, en promedio, más caliente que el aire a 2.0 m en prácticamente todos los días. Pero en los meses fríos, el número de días con temperatura de suelo inferior a la del aire aumentó significativamente y superó el 30 % en los tres meses de invierno (diciembre a febrero).

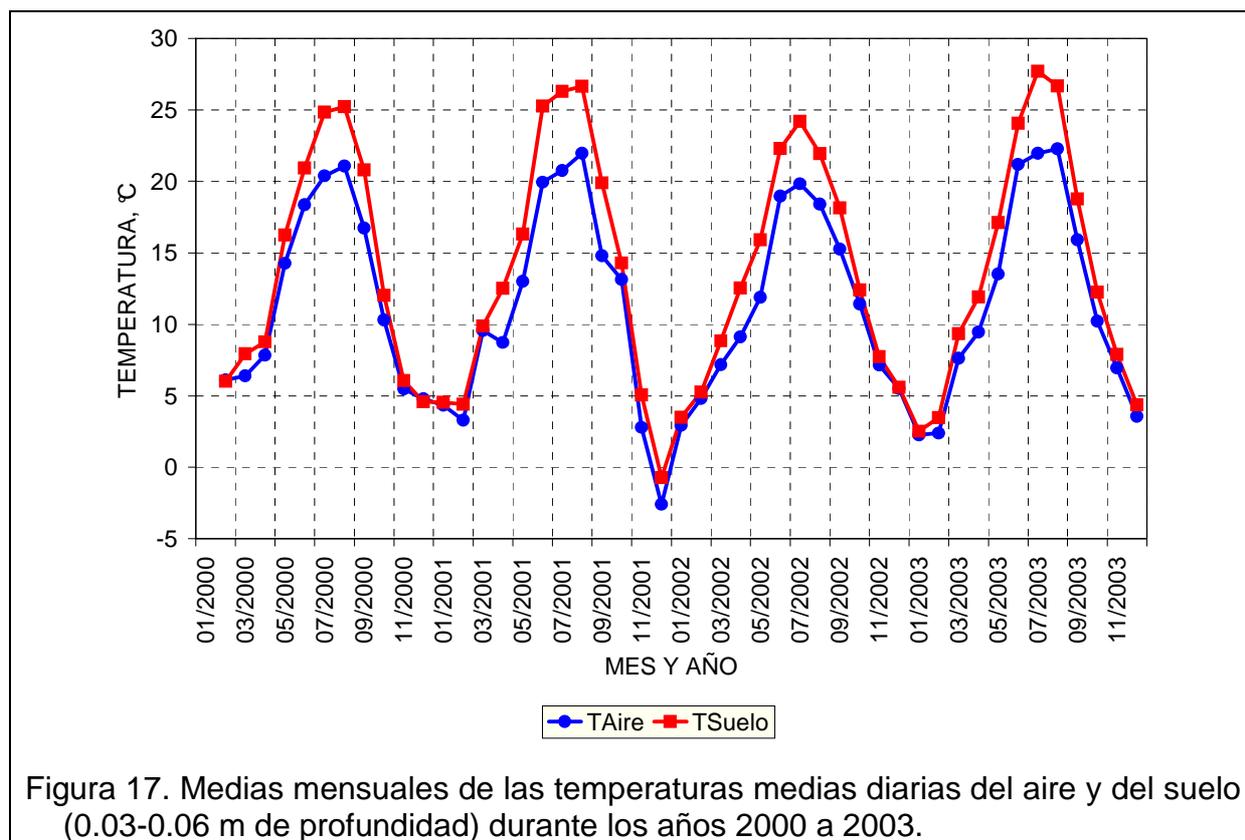


Tabla 17. Frecuencias relativas (%) del número de días con temperatura media del suelo (0.03-0.06 m de profundidad) inferior a la del aire (a 2.0 m de altura).

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año
39.1	30.6	19.4	9.2	2.4	0.0	0.0	1.6	0.0	10.5	20.0	32.3	39.1

### 3.2.3. Humedad relativa y déficit de presión de vapor

La Tabla 18 lista los valores mensuales (medias diarias y medias de las máximas y mínimas) de la humedad relativa del aire. No se observaron grandes diferencias entre los cuatro años estudiados. Los valores menores de humedad relativa se registraron en los meses de verano, mientras que los mayores se registraron en invierno. La humedad relativa máxima media no mostró apenas variación a lo largo del año. No obstante, descendió algo en verano. En agosto de 2000 y junio de 2001 se registraron los valores más pequeños de humedad relativa máxima media (79 %). Por su parte los valores de humedad relativa mínima media descendieron desde 60-70 % en enero a 20-30 % en los meses de verano (junio a agosto). El valor más pequeño de humedad relativa mínima media se registró en junio de 2001 y agosto de 2003 (18 %). En junio de 2001 se registró la media mensual menor de la humedad relativa media diaria (44 %). Para el año medio, la humedad relativa máxima media anual fue 92 %, la humedad relativa mínima media anual fue 40 % y la humedad relativa media anual fue 69 %. Se considera que valores de humedad relativa mínima media mensual de 20-35 % y de humedad relativa media mensual de 45-60 % son típicos de climas áridos o semiáridos (Allen

et al., 1998). Sobre todo en el caso de la humedad relativa mínima media mensual, estos valores se observaron en el 43 % de los meses estudiados.

Tabla 18. Valores mensuales de la humedad relativa del aire durante el periodo de estudio.  $HR_{md}$ , medias diarias;  $HR_{mx}$ , medias de las máximas;  $HR_{mn}$ , medias de las mínimas.

	Año	Ene	Feb <sup>(a)</sup>	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año <sup>(b)</sup>
$HR_{md}$ (%)	2000		67	65	74	73	60	52	47	58	77	85	83	67
	2001	88	80	76	64	67	44	50	52	66	79	82	83	69
	2002	85	66	66	62	64	53	55	63	64	77	79	83	68
	2003	78	80	70	70	70	59	49	51	71	79	84	83	70
	Año medio	84	73	69	67	69	54	51	53	65	78	82	83	69
$HR_{mx}$ (%)	2000		94	90	95	97	92	84	79	88	96	98	98	92
	2001	99	98	96	93	95	79	84	83	93	99	98	100	93
	2002	96	88	86	89	90	83	85	91	91	95	93	94	90
	2003	93	94	94	93	94	88	82	84	94	94	96	95	92
	Año medio	96	94	91	93	94	86	84	84	92	96	96	97	92
$HR_{mn}$ (%)	2000		32	34	45	40	27	23	20	26	50	61	60	38
	2001	68	49	47	32	35	18	22	23	34	48	56	50	40
	2002	62	37	40	33	35	27	25	30	29	48	58	65	41
	2003	56	55	35	38	38	26	20	18	38	53	58	60	41
	Año medio	62	43	39	37	37	25	22	23	32	50	58	58	40

<sup>(a)</sup> En 2000, sólo 14 días disponibles.

<sup>(b)</sup> Valores anuales de 2000, sólo orientativos por carecer de datos de enero y mitad de febrero.

La Figura 18 muestra la evolución anual de las medias mensuales del déficit de presión de vapor de agua ( $DPV$ ) medio diario durante los cuatro años de estudio y el año medio. El  $DPV$  aumentó desde los meses de invierno hasta alcanzar unos valores máximos durante el verano (junio a agosto) y después disminuyó hasta diciembre. Esta evolución indicó que durante los meses de verano, la diferencia entre la cantidad de vapor de agua que la atmósfera puede contener y la que realmente contiene se hizo máxima, respuesta esperada en climas semiáridos como el de la zona de estudio, con niveles altos de radiación solar global. En situaciones de disponibilidad de agua para la evaporación, estos valores tan altos de  $DPV$  promueven dicho proceso evaporativo de forma muy acusada. Los valores medios mensuales del  $DPV$  de 2000 fueron los menores de los observados hasta el mes de julio, indicando un ambiente más seco durante este periodo, para ser los más altos en meses posteriores. En 2001, en que la precipitación fue muy escasa, los valores medios mensuales de  $DPV$  fueron los más altos de todos en los meses de mayo y junio. En 2002, el año más lluvioso, se observó una acusada disminución del  $DPV$  en los meses de junio a agosto, en consonancia con el hecho de que estos meses fueron particularmente lluviosos (Tabla 12). En 2003, el  $DPV$  medio mensual de julio y agosto, meses en los que se produjo una fuerte ola de calor, fue el más alto; en septiembre y octubre, meses relativamente lluviosos, sin embargo, el  $DPV$  medio mensual fue el más bajo de los cuatro años.

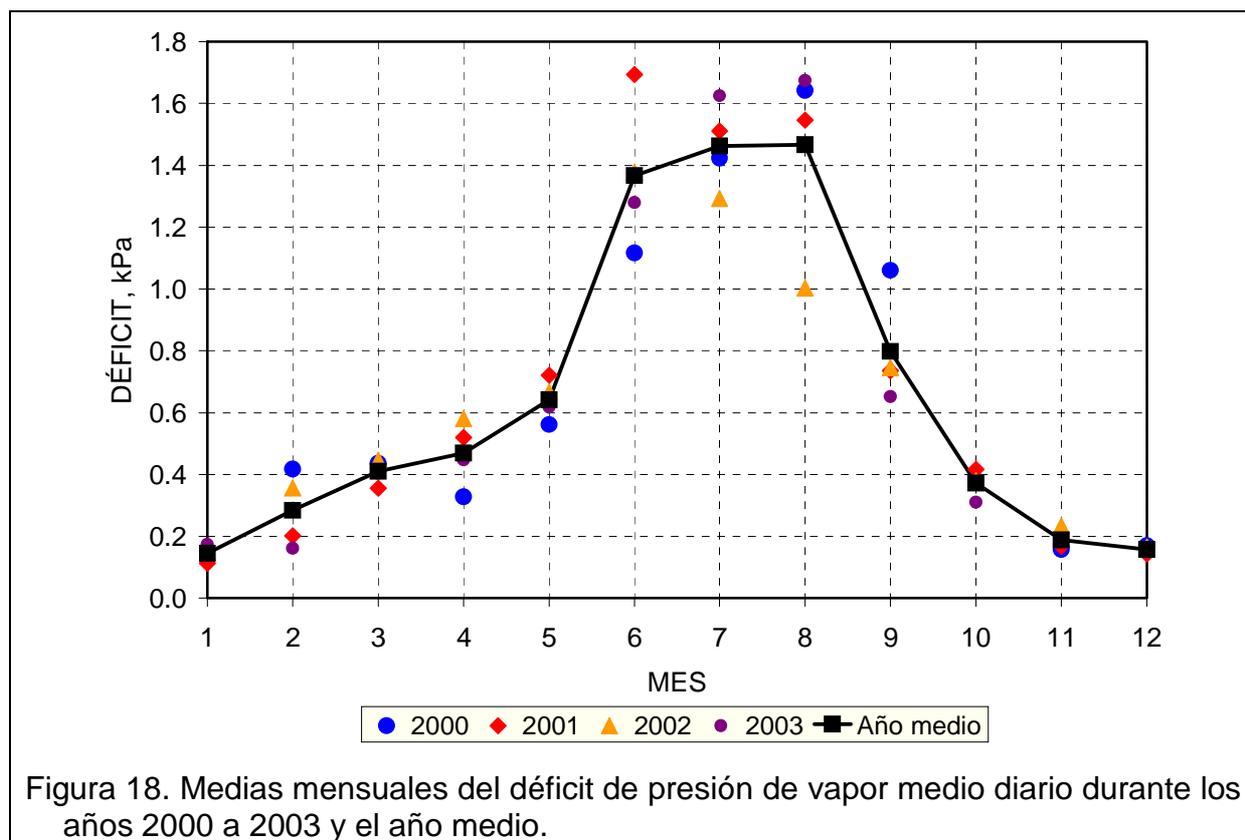


Figura 18. Medias mensuales del déficit de presión de vapor medio diario durante los años 2000 a 2003 y el año medio.

### 3.2.4. Radiación solar global, radiación neta y flujo de calor en el suelo

Las Figuras 19 y 20 muestran las medias mensuales de las medias diarias de la radiación solar global ( $R_{sol}$ ) y la radiación neta para los cuatro años de estudio y el año medio. Estas variables aumentaron desde los meses de invierno hasta los de verano; los promedios más altos correspondieron a junio y, después, julio. No hubo diferencias importantes entre años aunque la radiación neta mostró algo más de variabilidad interanual que la radiación solar global. Las máximas medias mensuales de la radiación solar global ( $323.7 \text{ W m}^{-2}$ ) y la radiación neta medias diarias ( $156.4 \text{ W m}^{-2}$ ) se registraron en junio de 2001 y junio de 2000, respectivamente. El patrón de variabilidad intranual e interanual de la radiación neta fue muy similar al de la radiación solar global, el principal componente del balance de radiación.

De febrero de 2000 a diciembre de 2003, se calculó el cociente diario entre  $R_{sol}$  y la radiación solar en días despejados ( $R_{so}$ , radiación solar máxima posible en un día totalmente sin nubes para una fecha y latitud dadas).  $R_{so}$  se calculó usando el procedimiento descrito en Allen et al. (1998). Los cocientes diarios  $R_{sol}/R_{so}$  se dividieron en cuatro grupos: a) días despejados o casi despejados,  $R_{sol}/R_{so} \leq 0.90$ ; b) días parcialmente nublados,  $0.90 < R_{sol}/R_{so} \leq 0.65$ ; c) días nublados,  $0.65 < R_{sol}/R_{so} \leq 0.40$ ; y d) días muy nublados,  $R_{sol}/R_{so} < 0.40$ . Esta división fue subjetiva y no refleja la categorización de la nubosidad que efectúa el Instituto Nacional de Meteorología. Un 27 % de los días fueron despejados o casi despejados; alrededor del 10 % fueron muy nublados (Tabla 19). Los meses con mayor número de días despejados o casi despejados fueron febrero y septiembre; mayo y agosto, los meses con menor

número. Por su parte, enero y octubre fueron los meses con mayor número de días muy nubosos, y junio a septiembre fueron los meses con menor número.

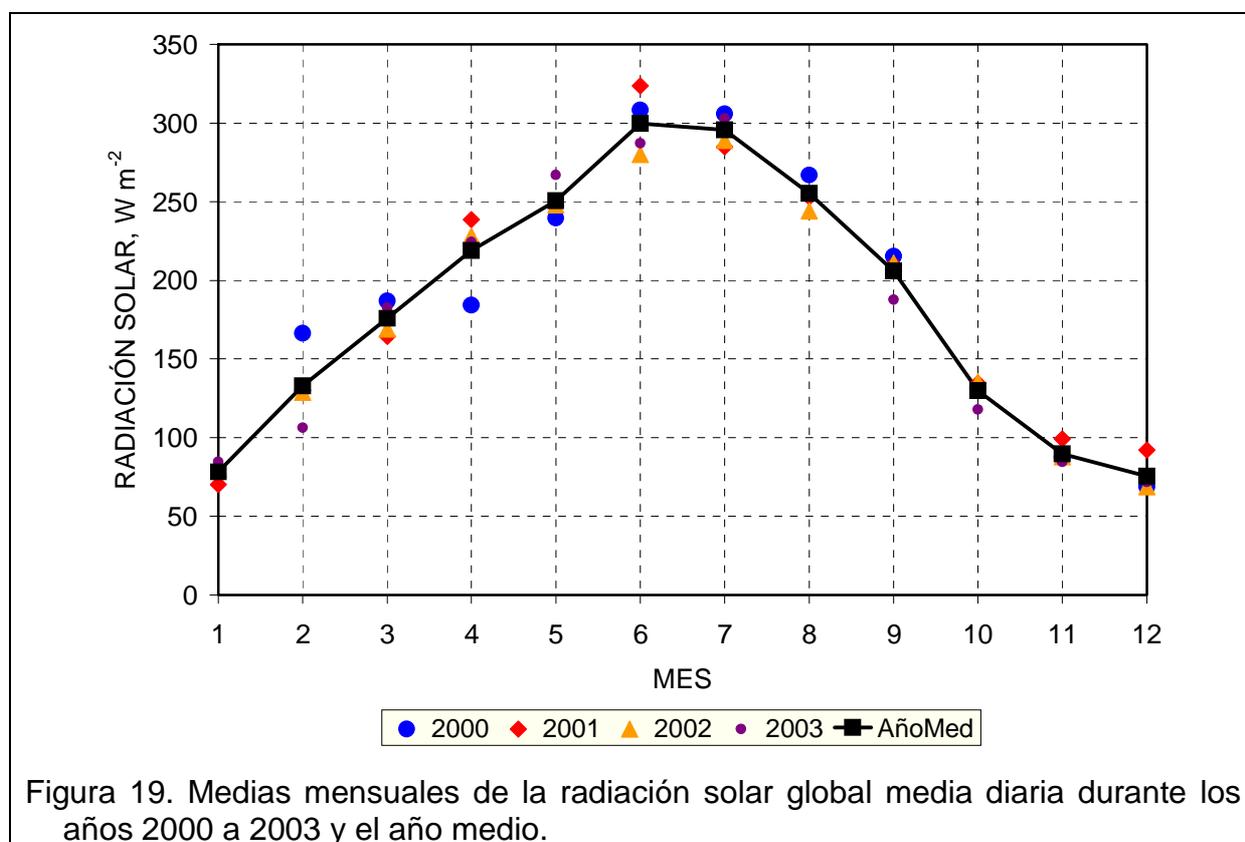


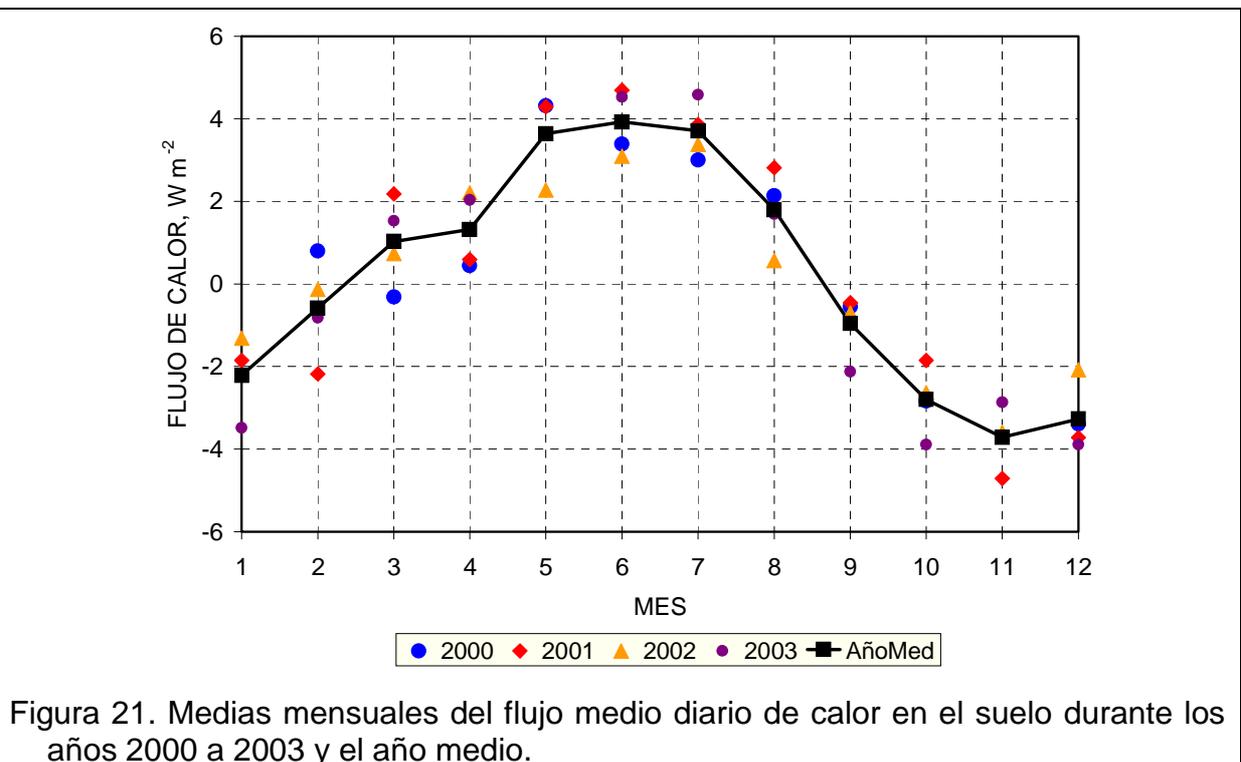
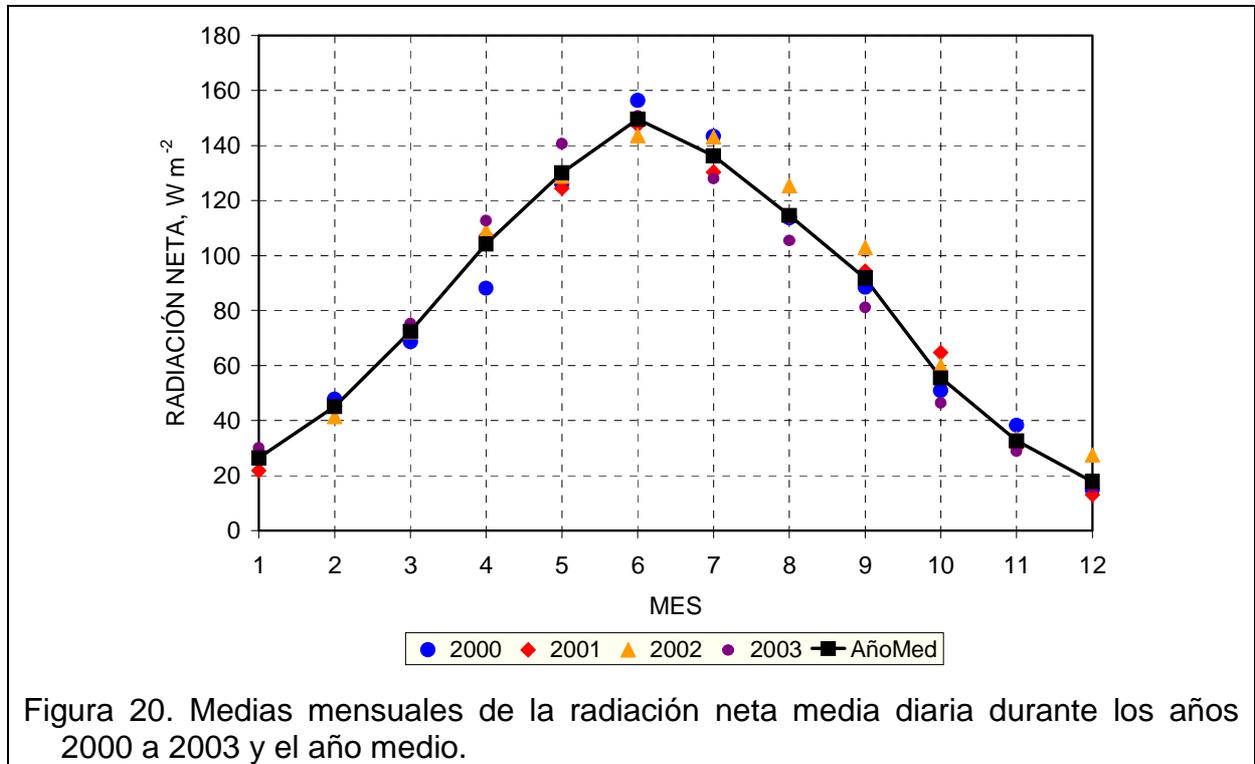
Figura 19. Medias mensuales de la radiación solar global media diaria durante los años 2000 a 2003 y el año medio.

Tabla 19. Frecuencias relativas del número de días despejados o casi despejados, parcialmente nubosos, nubosos y muy nubosos. Valores en tanto por ciento.

Mes	Despejados	Parcialmente nubosos	Nubosos	Muy nubosos
Enero	26.9	21.5	32.3	19.4
Febrero	42.9	30.6	13.3	13.3
Marzo	34.7	30.6	23.4	11.3
Abril	25.0	39.2	25.0	10.8
Mayo	10.5	52.4	24.2	12.9
Junio	20.0	60.8	14.2	5.0
Julio	20.2	63.7	13.7	2.4
Agosto	12.9	66.9	16.1	4.0
Septiembre	41.7	35.8	18.3	4.2
Octubre	30.6	34.7	20.2	14.5
Noviembre	26.7	34.2	26.7	12.5
Diciembre	36.3	26.6	26.6	10.5
Año	27.1	42.0	21.1	9.8

La Figura 21 muestra las medias mensuales de las medias diarias del flujo de calor en el suelo ( $G$ ) para los cuatro años de estudio y para el año medio. A lo largo del año apenas se produjeron variaciones. Los valores fueron siempre pequeños pues  $G$  es un componente relativamente poco importante del balance de energía. No

obstante, hubo una cierta tendencia al calentamiento del suelo durante los meses cálidos (marzo a agosto) y a su enfriamiento durante los meses fríos. Los mayores valores medios mensuales de  $G$  (año medio) se obtuvieron en junio y julio; los menores, en noviembre y diciembre.



### 3.2.5. Velocidad y dirección del viento

La Figura 22 muestra la evolución de las medias mensuales de la velocidad de viento media diaria a 2.0 m sobre el nivel del suelo durante los años 2000 a 2003 y el año medio. Se observó una gran variabilidad interanual; sólo en los meses de junio a octubre los coeficientes de variación fueron menores del 12 %. Según la velocidad media en el periodo marzo a diciembre, el año 2002 fue el más ventoso ( $3.3 \text{ m s}^{-1}$ ) y 2003 el menos ventoso ( $2.9 \text{ m s}^{-1}$ ). A pesar de la gran variabilidad interanual, se observó un cierto patrón en la variabilidad intranual: la velocidad media mensual del viento varió de  $3.5$  a  $3.8 \text{ m s}^{-1}$  de enero a abril,  $2.5$  a  $3.0 \text{ m s}^{-1}$  de mayo a octubre, y  $3.2$  a  $3.5 \text{ m s}^{-1}$  en noviembre y diciembre. Para el año medio, enero y abril fueron los meses más ventosos ( $3.8 \text{ m s}^{-1}$ ); septiembre, el menos ( $2.5 \text{ m s}^{-1}$ ); julio, agosto y octubre, los meses con menor variabilidad. La media anual de esta variable para el año medio fue  $3.2 \text{ m s}^{-1}$ . Por tanto, estas cifras sugieren que, en promedio, la zona de estudio es relativamente ventosa.

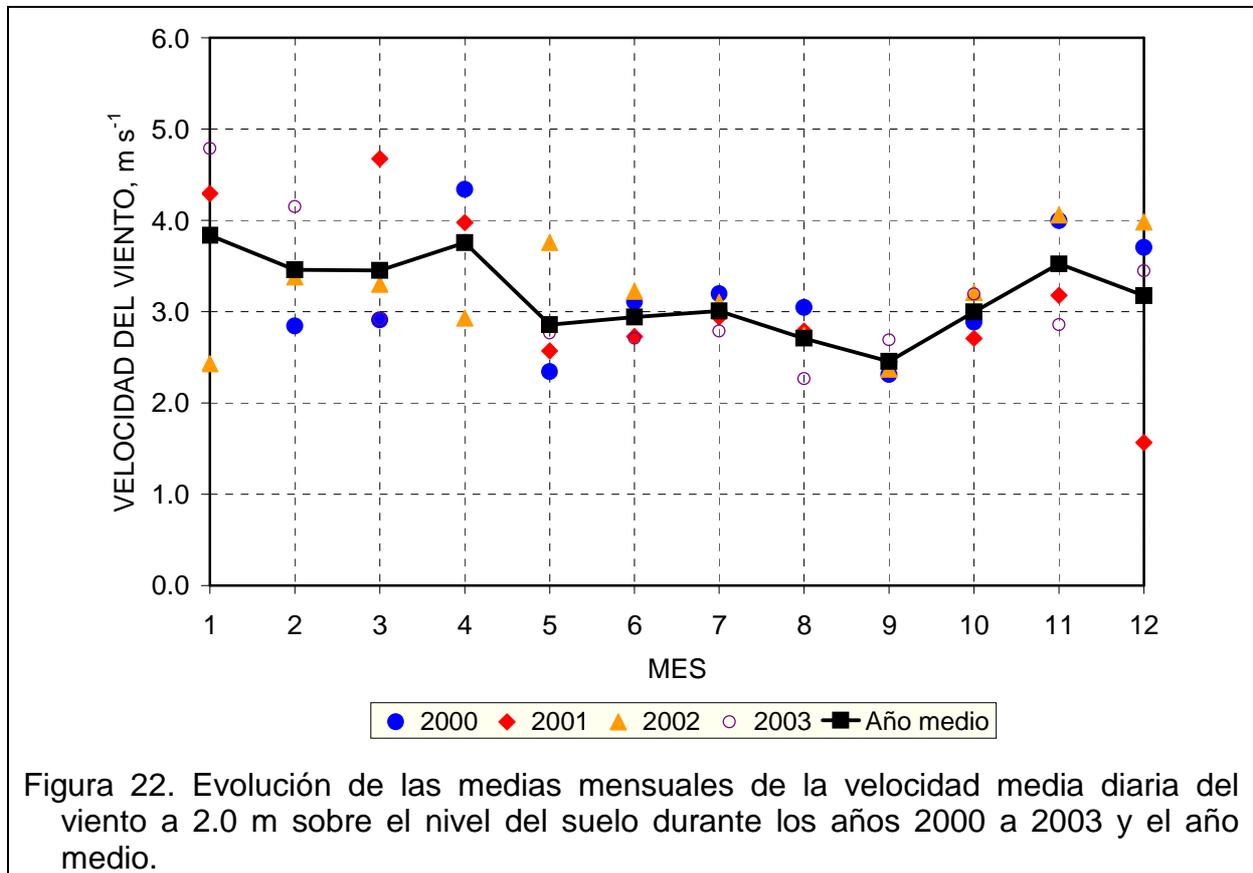


Figura 22. Evolución de las medias mensuales de la velocidad media diaria del viento a 2.0 m sobre el nivel del suelo durante los años 2000 a 2003 y el año medio.

La Tabla 20 lista las frecuencias relativas de distintos rangos de velocidad media ( $U_d$ ) y racha máxima diarias registrados en los cuatro años de estudio. El 2.6 % y el 60.1 % de los registros de velocidades medias diarias se catalogaron, respectivamente, como vientos en calma ( $U_d \leq 1.0 \text{ m s}^{-1}$ ) y vientos moderados ( $2.0 < U_d \leq 5.0 \text{ m s}^{-1}$ ). El 3 de abril de 2003 se registraron la velocidad media ( $13.1 \text{ m s}^{-1}$ ) y la racha máxima diarias de viento ( $25.6 \text{ m s}^{-1}$ )<sup>3</sup> más altas. Sólo el 0.8 % de las

<sup>3</sup>  $92 \text{ km h}^{-1}$  a 2.0 m de altura, unos  $120 \text{ km h}^{-1}$  a 10.0 m de altura

rachas máximas diarias superó los  $20.0 \text{ m s}^{-1}$ , mientras el 57.5 % de esas rachas máximas diarias fue menor o igual a  $10.0 \text{ m s}^{-1}$ .

Tabla 20. Frecuencias absolutas y relativas de distintos rangos de velocidad media diaria y de racha máxima diaria registrados en todo el periodo de estudio.

Velocidad media diaria ( $\text{m s}^{-1}$ )			Rachas máximas ( $\text{m s}^{-1}$ )		
Velocidad	Frecuencia absoluta	Frecuencia relativa (%)	Racha	Frecuencia absoluta	Frecuencia relativa (%)
$\leq 1.0$	35	2.5	$\leq 10.0$	814	57.5
1.0 - 2.0	327	23.1	10.0 – 15.0	500	35.3
2.0 - 5.0	850	60.1	15.0 – 20.0	89	6.3
$> 5.0$	202	14.3	$> 20.0$	12	0.8
Total	1414	100.0	Total	1415	100.0

La Figura 23 muestra las frecuencias relativas anuales (año medio) de distintos rangos de velocidad semihoraria del viento a 2.0 m sobre el nivel del suelo ( $U_{30m}$ ): a) vientos en calma,  $U_{30m} \leq 1.0 \text{ m s}^{-1}$ ; b) vientos flojos,  $1.0 < U_{30m} \leq 2.0 \text{ m s}^{-1}$ ; c) vientos moderados,  $2.0 < U_{30m} \leq 5.0 \text{ m s}^{-1}$ ; d) vientos fuertes,  $U_{30m} > 5.0 \text{ m s}^{-1}$ . La frecuencia de vientos en calma o flojos fue mucho mayor en las horas cercanas al amanecer (de 5:30 a 8:00 GMT, más del 38 %) que en las primeras horas de la tarde (de 13:30 a 17:30 GMT, menos del 4 %). Por contra, los vientos moderados o fuertes fueron poco frecuentes en las horas cercanas al amanecer (de 2:30 a 6:30 GMT, menos del 10 %) pero ocurrieron a menudo en las primeras horas de la tarde (de 14:00 a 16:30 GMT, más del 40 %). Este patrón de variabilidad diaria ocurrió en todos los meses del estudio, aunque con diferentes frecuencias relativas en las distintas categorías de velocidad de viento. En los cuatro años de estudio, los vientos fuertes representaron el 21.7 % de todos los vientos semihorarios medios registrados; los vientos moderados, el 35.0 %; los vientos flojos, el 23.9 %; y los vientos en calma, el 19.3 %.

La Figura 24 muestra las medias anuales y mensuales (meses de enero y septiembre) de las velocidades semihorarias medias del viento. Los meses de enero y septiembre fueron el más y el menos ventoso en promedio para el año medio. En consonancia, con lo indicado en el párrafo anterior, estas medias bajaron desde  $2.3 \text{ m s}^{-1}$  a las 0:30 GMT hasta  $2.0 \text{ m s}^{-1}$  a las 6:00 y 6:30 GMT, subieron hasta  $4.8 \text{ m s}^{-1}$  a las 15:00-16:00 y después bajaron a  $2.3 \text{ m s}^{-1}$  a las 24:00 GMT. De nuevo, esta evolución de la velocidad media semihoraria fue típica de todos los meses estudiados, aunque con las naturales diferencias en cuanto a la magnitud de las medias obtenidas. Por supuesto, las Figuras 23 y 24 corresponden a cifras medias y los correspondientes coeficientes de variación fueron bastante altos como se espera de un meteoro tan variable como es el viento.

La Figura 25 muestra las rosas de los vientos anuales para todas las categorías de velocidad semihoraria media de viento (excepto vientos en calma). Considerando todos los vientos conjuntamente, la dirección más frecuente fue la NO (15.1%), seguida de la NNO (10.4 %). También fue importante la dirección SE (8.2 %). Es decir, los vientos predominantes siguieron aproximadamente la orientación del valle medio del Ebro.

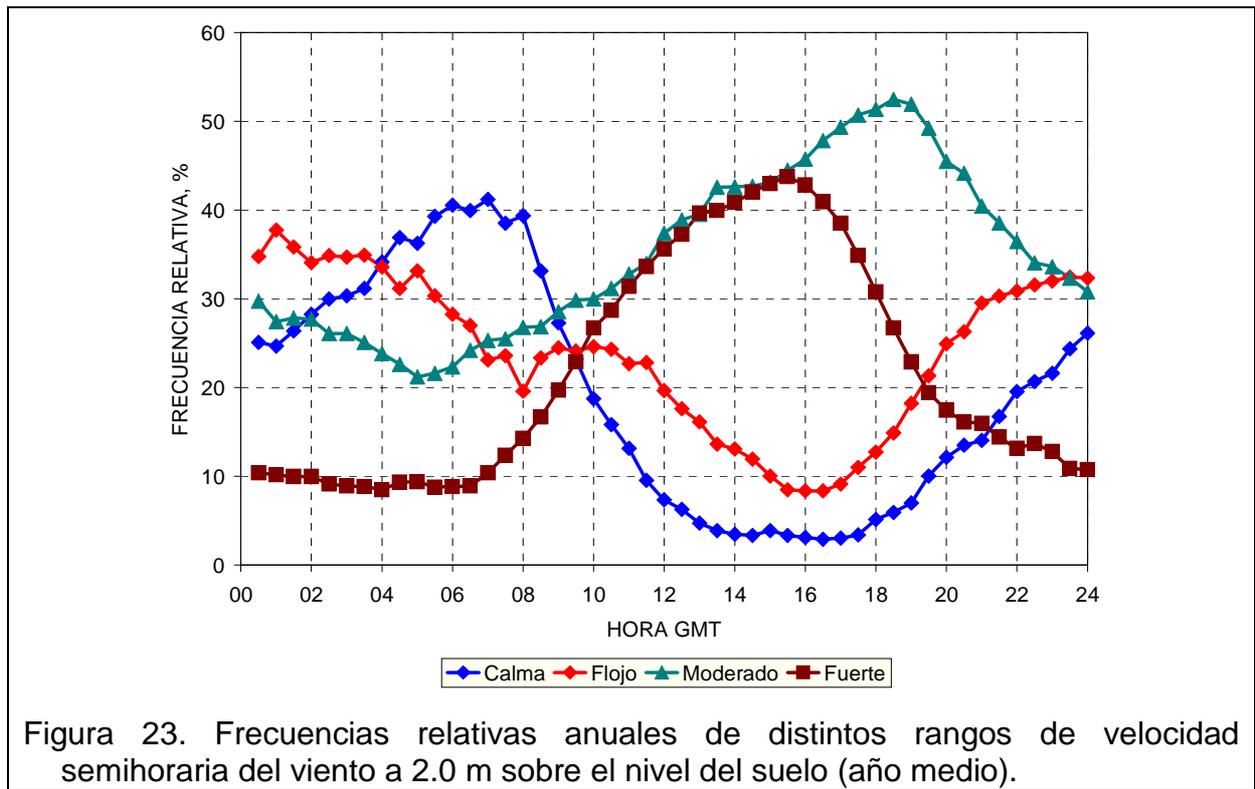


Figura 23. Frecuencias relativas anuales de distintos rangos de velocidad semihoraria del viento a 2.0 m sobre el nivel del suelo (año medio).

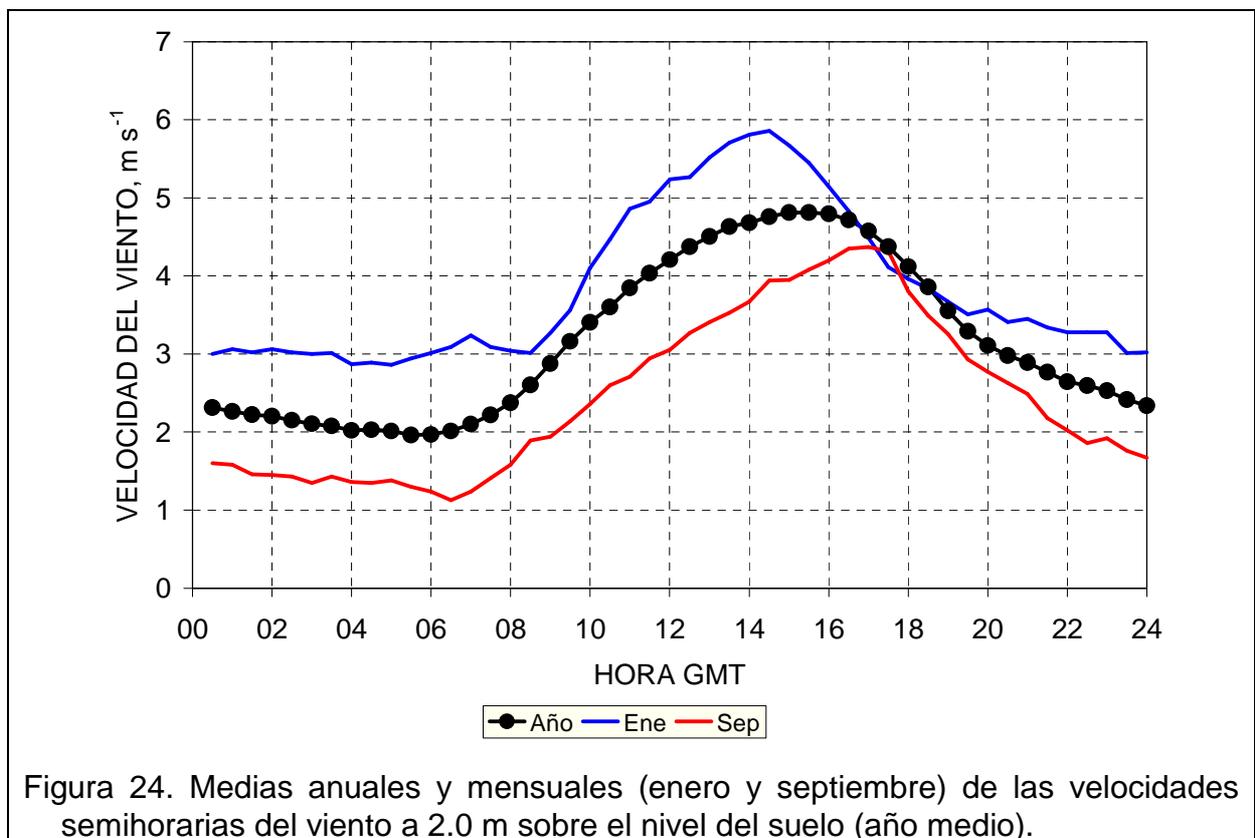


Figura 24. Medias anuales y mensuales (enero y septiembre) de las velocidades semihorarias del viento a 2.0 m sobre el nivel del suelo (año medio).

El mismo patrón se observó para cada categoría de velocidad de viento, aunque más acusadamente en el caso de vientos fuertes. Para este tipo de vientos,

la dirección NO ocurrió en un 19.8 % de los casos, mientras que la dirección NNO ocurrió en un 11.6 % de los casos. Para los vientos flojos, además de las direcciones predominantes NO (12.9 %) y NNO (10.6 %), también fue frecuente la dirección E (11.5 %), que, por ejemplo, sólo se produjo en el 0.3 % de los casos en la categoría de vientos fuertes. Las rosas de los vientos observadas en Gallocanta fueron similares a las que se registran en un número importante de observatorios aragoneses de la red de estaciones del Instituto Nacional de Meteorología (Cuadrat, 1999).

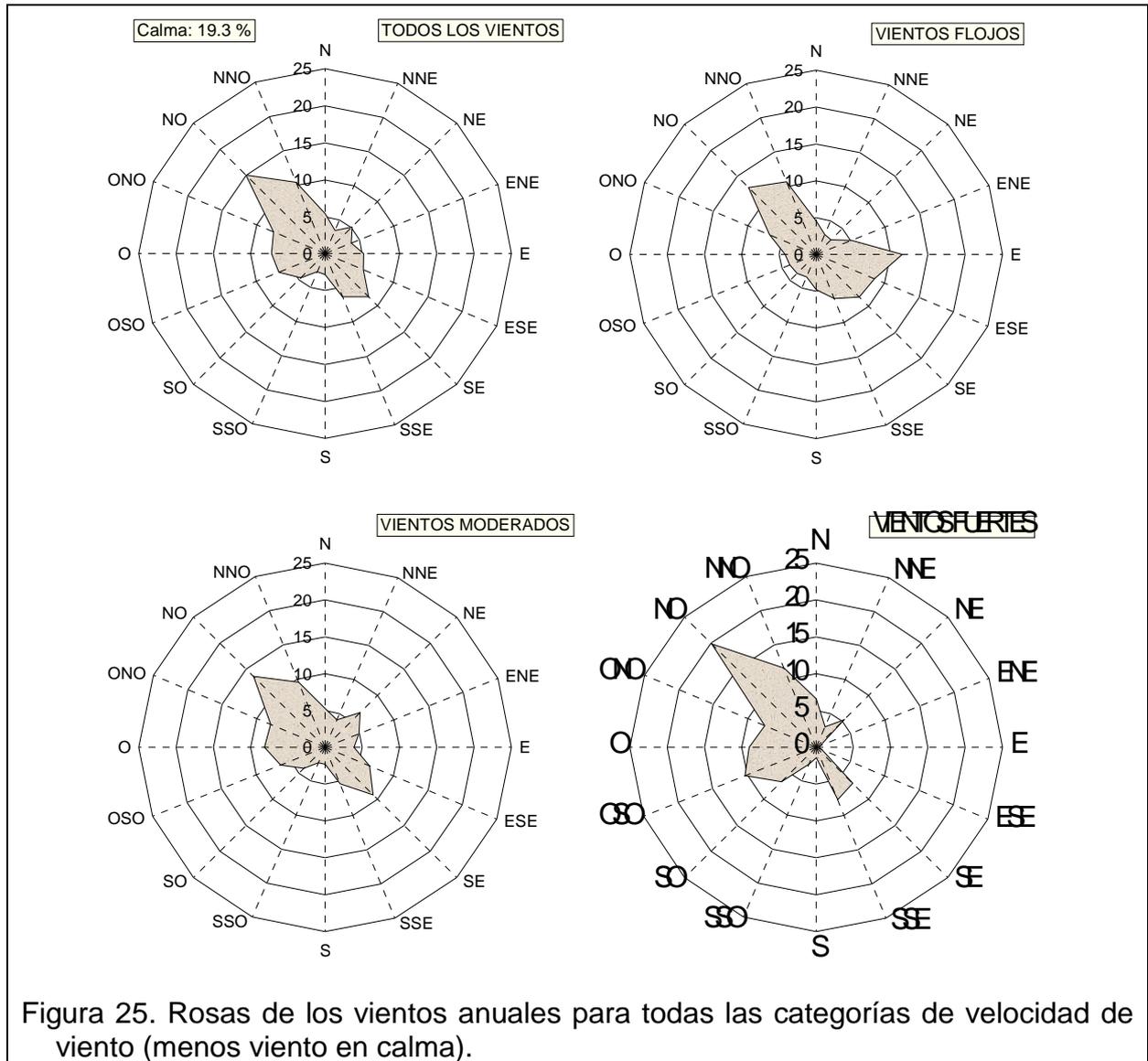


Figura 25. Rosas de los vientos anuales para todas las categorías de velocidad de viento (menos viento en calma).

### 3.3. Evapotranspiración real en los márgenes de la laguna de Gallocanta

#### 3.3.1. Comparación con las estimas de evapotranspiración de referencia y de evaporación de un suelo desnudo

Las Figuras 26 y 27 muestran las estimas diarias de  $ET_{sr}$ ,  $ET_0$  y  $Evp_{sue}$ , así como los valores acumulados de precipitación para los periodos: a) 16 de febrero a 27 de noviembre de 2000; b) 21 de marzo a 22 de julio de 2001; c) 8 de diciembre de 2001 a 15 de diciembre de 2002; y d) 9 de enero a 31 de diciembre de 2003. Todas las estimas mostraron una gran variabilidad durante estos periodos. Los mayores valores fueron los de la  $ET_0$  y los menores los de la  $Evp_{sue}$ , mientras que los de  $ET_{sr}$  se situaron entre medias, con días en que su similitud con las estimas de  $ET_0$  fue bastante alta y otros en que fueron claramente inferiores a éstas. Estos resultados fueron los esperados en términos cualitativos ya que los valores de  $ET_0$  y  $Evp_{sue}$  representan aproximadamente, en principio, los límites máximos y mínimos de la evapotranspiración en la zona. No obstante, conviene matizar que en situaciones en que el agua no es limitante para los procesos de evaporación y evapotranspiración, y dependiendo de la demanda evaporativa de la atmósfera, la evaporación de agua de un suelo desnudo o la evapotranspiración de una superficie vegetal podrían ser mayores que la  $ET_0$  (Allen et al., 1998). Estas circunstancias ocurrieron en los márgenes de la laguna de Gallocanta, sobre todo en términos de evaporación, justo después de precipitaciones fuertes o en aquellas zonas donde la capa freática estuviera bastante cerca de la superficie.

En términos generales, las estimas de  $ET_{sr}$  estuvieron más próximas a las de  $ET_0$  que a las de  $Evp_{sue}$ . Recuérdese que para calcular estas últimas se supuso que el suelo de los márgenes de la laguna de Gallocanta está completamente desnudo, que sólo se evapora agua en los primeros 0.1 m de suelo y que la precipitación directa sobre esos márgenes es el único suministro de agua para la evaporación. Pero es obvio que, aunque poco densa, hay vegetación transpirando en dichos márgenes, que puede evaporarse agua procedente del freático por ascenso capilar y que la precipitación directa sobre la superficie de los márgenes de la laguna no es la única fuente de agua pues existen escorrentías superficiales y flujos subsuperficiales de agua desde zonas más elevadas de la cuenca.

La  $ET_0$  mostró un patrón similar al de diversas variables meteorológicas ya que las estimas máximas correspondieron a los meses de verano, lo cual es lógico ya que esta variable representa el efecto del clima sobre la evapotranspiración. La  $ET_{sr}$  no mostró el mismo comportamiento y las estimas máximas se obtuvieron alrededor de mayo y junio, meses en los que se produjeron las lluvias más importantes (además de octubre, Tabla 12) y en los que la demanda evaporativa fue relativamente importante. Por su parte, la  $Evp_{sue}$  mostró un comportamiento más errático, con periodos de valores nulos o pequeños (aquellos con nula o escasa precipitación) y esporádicos picos correspondientes a periodos de intensas lluvias.

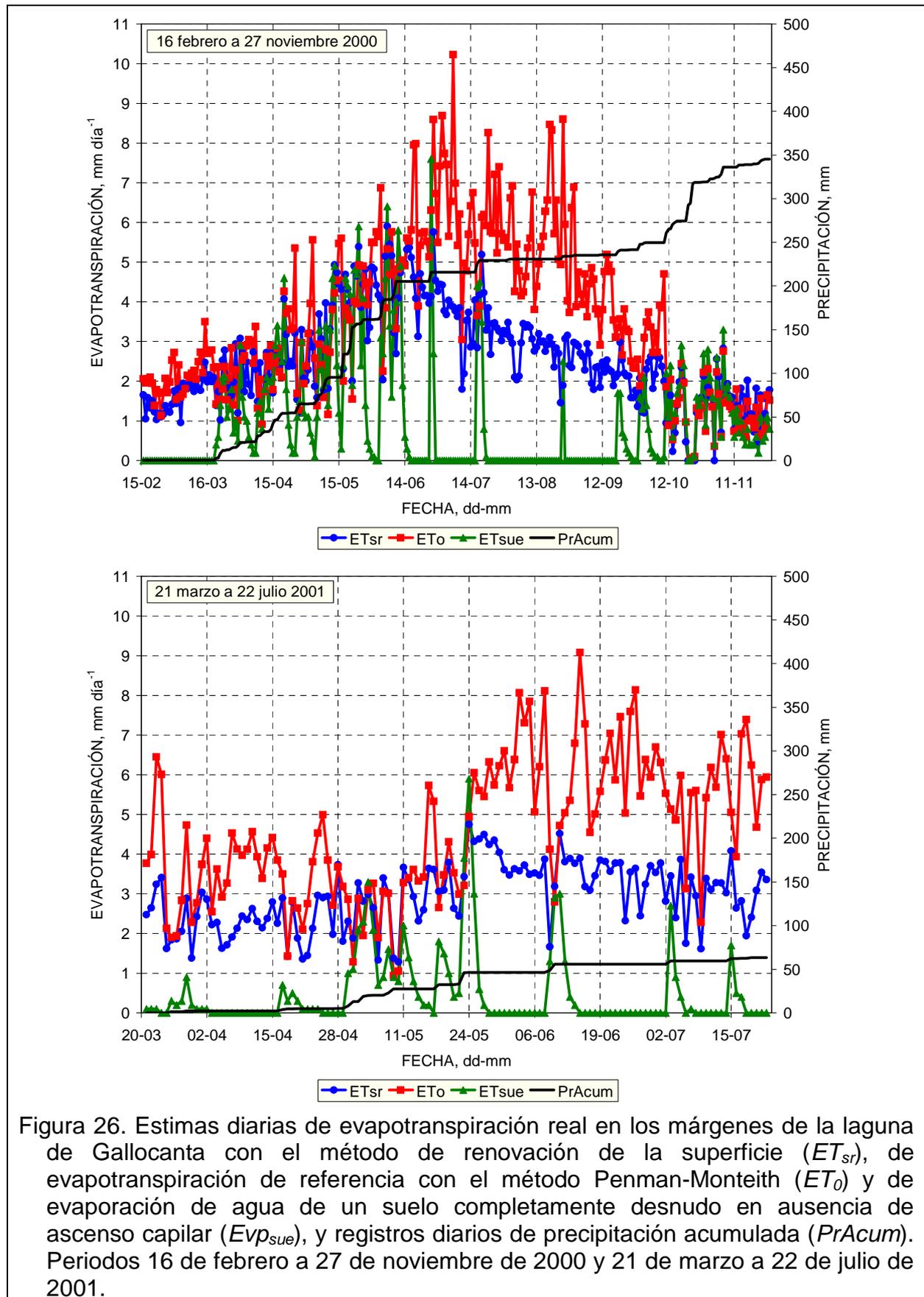
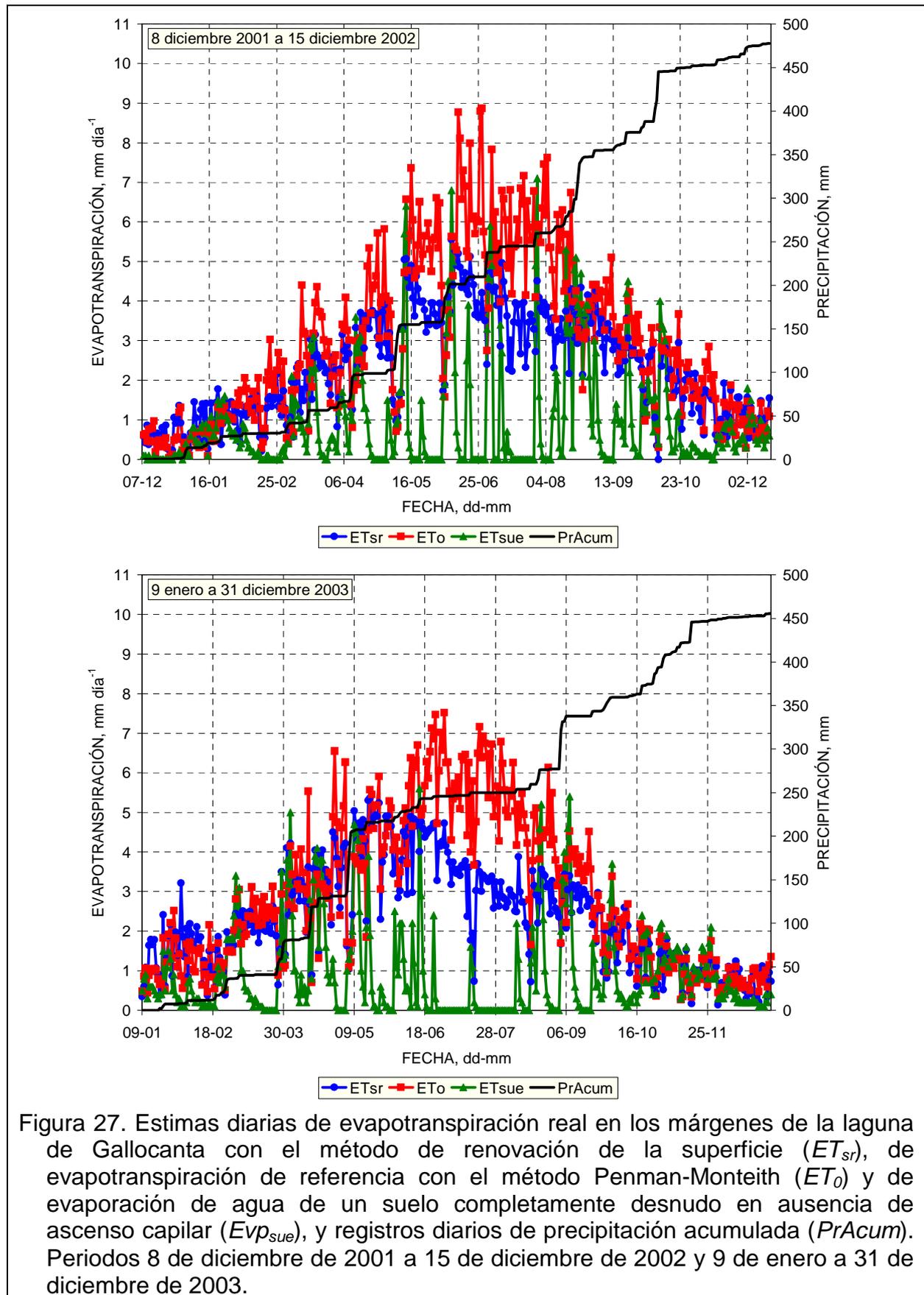


Figura 26. Estimaciones diarias de evapotranspiración real en los márgenes de la laguna de Gallocanta con el método de renovación de la superficie ( $ET_{sr}$ ), de evapotranspiración de referencia con el método Penman-Monteith ( $ET_0$ ) y de evaporación de agua de un suelo completamente desnudo en ausencia de ascenso capilar ( $ET_{sue}$ ), y registros diarios de precipitación acumulada ( $PrAcum$ ). Periodos 16 de febrero a 27 de noviembre de 2000 y 21 de marzo a 22 de julio de 2001.



Las Figuras 28 y 29 muestran las medias móviles (5 días) de la diferencia ( $ET_{sr}-ET_0$ ) entre las estimas diarias de  $ET_{sr}$  y  $ET_0$  para los cuatro periodos considerados. En el periodo de 16 de febrero a 27 de noviembre de 2000, se observó que  $ET_{sr}-ET_0$  fue ligeramente negativa al inicio del periodo cuando en éste no se habían producido precipitaciones aún. Con la llegada de las lluvias en abril y mayo, los valores de  $ET_{sr}-ET_0$  oscilaron alrededor de 0.0 mm. A partir de mediados de junio, con la escasez de precipitaciones, la diferencia  $ET_{sr}-ET_0$  descendió de nuevo y osciló entre -2.0 y -4.0 mm aproximadamente, con valores mínimos de -4.3 mm. En octubre, con el descenso de la demanda evaporativa y las nuevas precipitaciones, la diferencia  $ET_{sr}-ET_0$  aumentó a valores cercanos a 0.0 mm. En el periodo 21 de marzo a 22 de julio de 2001 se observó que la diferencia  $ET_{sr}-ET_0$  osciló entre -0.5 y -2.0 mm durante la época de precipitaciones escasas (marzo y abril), aumentó y osciló alrededor de 0.0 mm durante mayo, mes relativamente lluvioso (Tabla 12) y después osciló entre -1.0 y -3.6 mm cuando las lluvias escasearon en verano, época asimismo de demanda evaporativa alta.

De octubre a diciembre de 2001 no hubo lluvias especialmente intensas pero, al inicio del periodo 8 de diciembre de 2001 a 15 de diciembre de 2002, la diferencia  $ET_{sr}-ET_0$  superó ligeramente el valor de 0.0 mm. La diferencia  $ET_{sr}-ET_0$  descendió en febrero de 2002 pues fue un mes bastante seco (Tabla 12), osciló entre 0.0 y -1.5 mm de marzo a junio, con momentos puntuales en que superó ligeramente los 0.0 mm durante los episodios de lluvia de estos meses. Posteriormente, al escasear las lluvias,  $ET_{sr}-ET_0$  osciló entre -1.0 y -3.0 mm desde finales de junio a mediados de agosto, aumentó de nuevo a partir de finales de agosto y osciló alrededor de valores de 0.3 a -1.0 mm hasta el final del periodo. En 2002, año más lluvioso, la diferencia  $ET_{sr}-ET_0$  apenas bajó de -3.0 mm, a diferencia de 2000 y 2001. En el periodo 9 de enero a 31 de diciembre d 2003, la diferencia  $ET_{sr}-ET_0$  mostró un comportamiento similar al observado en el periodo 8 de diciembre de 2001 a 15 de diciembre de 2002. Aún así, dicha diferencia mostró un número mayor de valores oscilando alrededor de 0.0 mm desde enero a mayo, después hubo un descenso marcado hasta valores de unos -3.5 mm en el periodo de junio a agosto y después la diferencia  $ET_{sr}-ET_0$  aumentó hasta valores próximos a 0.0 mm de septiembre a diciembre. En 2003, las altas temperaturas del verano hicieron que la diferencia  $ET_{sr}-ET_0$  se alejara más de 0.0 mm durante estos meses que en 2002.

La Figura 30 muestra las medias mensuales de la diferencia  $ET_{sr}-ET_0$  calculadas en los cuatro periodos disponibles. Para el año medio, la diferencia  $ET_{sr}-ET_0$  fue ligeramente superior a 0.0 mm en enero. Posteriormente, la diferencia  $ET_{sr}-ET_0$  se mantuvo en valores de -0.3 a -0.5 mm de febrero a mayo. Con la llegada del verano, la demanda evaporativa aumentó considerablemente por lo que la diferencia  $ET_{sr}-ET_0$  disminuyó de junio a julio hasta valores promedios de -2.4 mm. Esta diferencia aumentó de agosto a septiembre donde el valor promedio fue de -0.9 mm, siguió subiendo en octubre y en noviembre y diciembre dicha diferencia fue de 0.0 mm. Como es lógico, en los distintos años individuales la diferencia  $ET_{sr}-ET_0$  mostró cierta variabilidad respecto a los valores para el año medio.

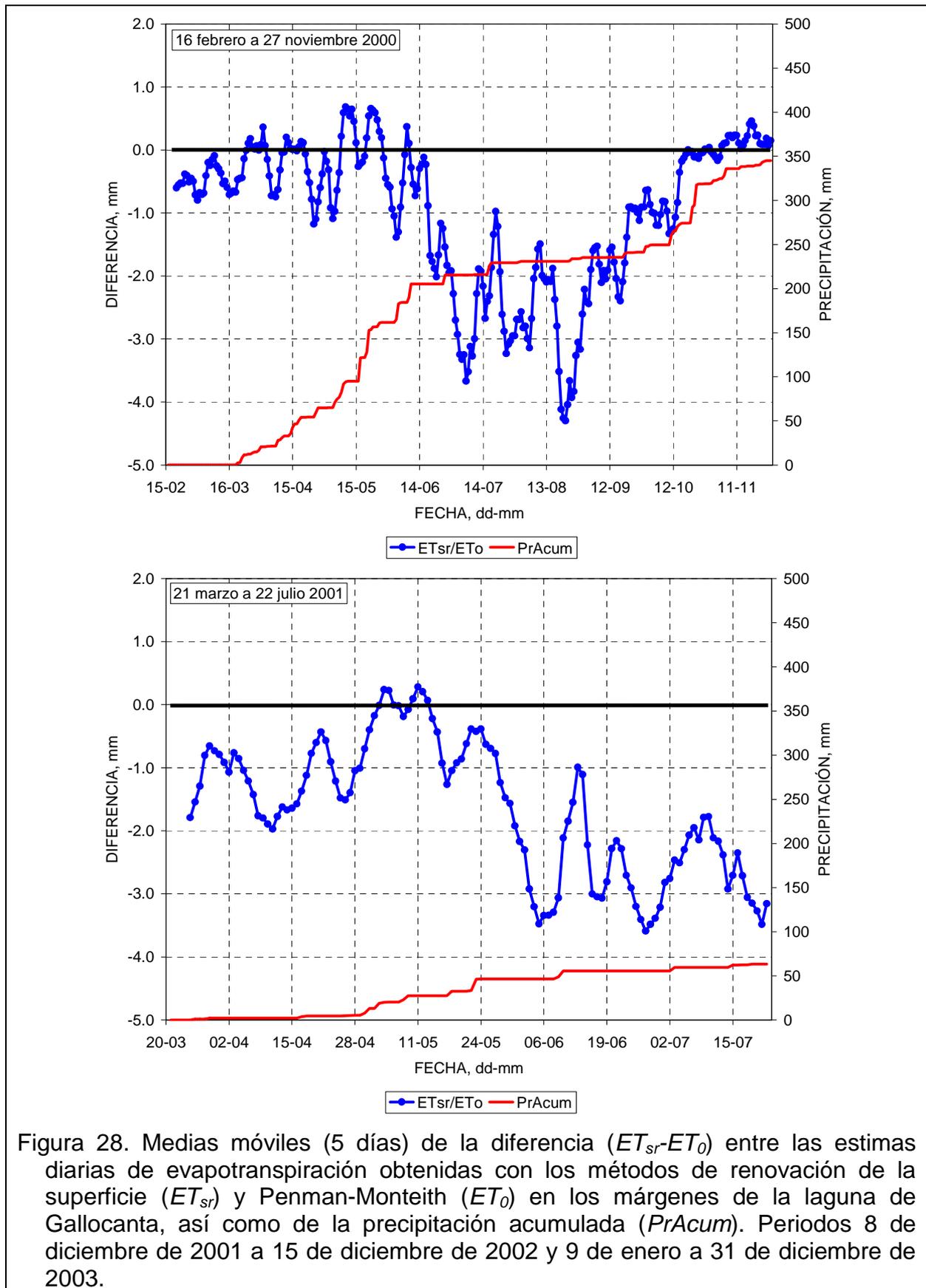


Figura 28. Medias móviles (5 días) de la diferencia ( $ET_{sr} - ET_0$ ) entre las estimas diarias de evapotranspiración obtenidas con los métodos de renovación de la superficie ( $ET_{sr}$ ) y Penman-Monteith ( $ET_0$ ) en los márgenes de la laguna de Gallocanta, así como de la precipitación acumulada ( $PrAcum$ ). Periodos 8 de diciembre de 2001 a 15 de diciembre de 2002 y 9 de enero a 31 de diciembre de 2003.

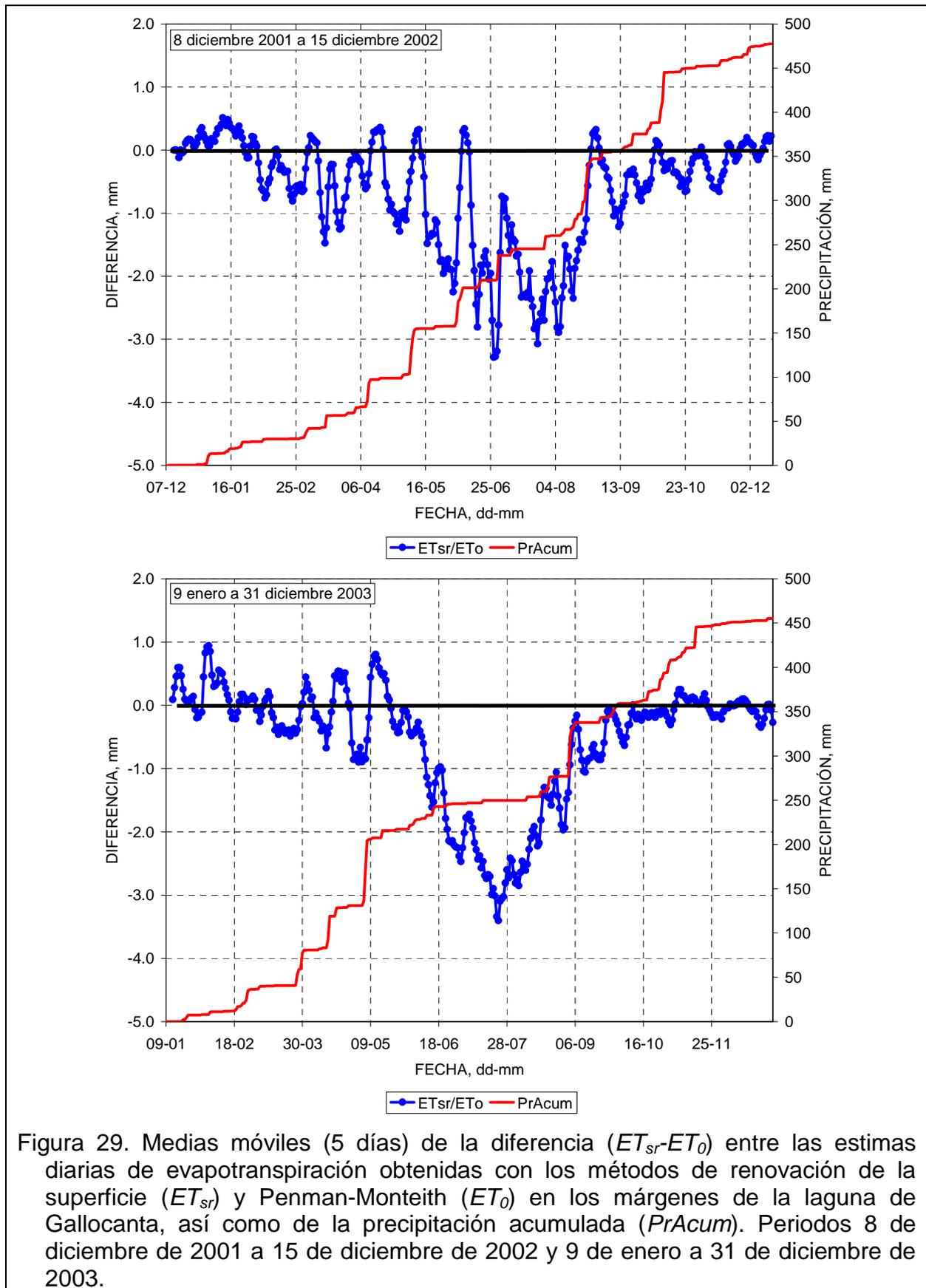


Figura 29. Medias móviles (5 días) de la diferencia ( $ET_{sr} - ET_0$ ) entre las estimas diarias de evapotranspiración obtenidas con los métodos de renovación de la superficie ( $ET_{sr}$ ) y Penman-Monteith ( $ET_0$ ) en los márgenes de la laguna de Gallocanta, así como de la precipitación acumulada ( $PrAcum$ ). Periodos 8 de diciembre de 2001 a 15 de diciembre de 2002 y 9 de enero a 31 de diciembre de 2003.

En general, los valores mensuales más altos de la diferencia  $ET_{sr}-ET_0$  se obtuvieron en 2002 y 2003, años más lluviosos que 2000 y 2001. Los valores más bajos se obtuvieron en 2001, al menos en los meses de marzo a julio que son aquellos en los que la diferencia  $ET_{sr}-ET_0$  se pudo comparar entre los cuatro años. Así, de 21 de marzo a 22 de julio, la media de las diferencias diarias entre  $ET_{sr}$  y  $ET_0$  fue de -0.8 mm en 2000, -1.7 mm en 2001, -1.1 mm en 2002 y -0.8 mm en 2003. En el periodo 16 de febrero a 27 de noviembre, la media de las diferencias diarias entre  $ET_{sr}$  y  $ET_0$  fue de -1.0 mm en 2000, -0.9 mm en 2002 y de -0.7 mm en 2003. La diferencia entre los valores acumulados  $ET_{sr}$  y  $ET_0$  en el periodo 16 de febrero a 27 de noviembre fue de -282 mm en 2000, -249 mm en 2001 y -212 mm en 2003.

La Figura 31 muestra las medias mensuales de la diferencia  $Evp_{sue}-ET_0$  calculadas en los cuatro periodos disponibles. Para el año medio, la diferencia  $Evp_{sue}-ET_0$  bajó paulatinamente de 0.0 mm en enero a -2.6 mm en mayo, experimentó un descenso más acusado hasta -4.6 mm en junio y -5.3 mm en julio, aumentó paulatinamente de agosto a octubre donde dicha diferencia fue en promedio de -0.9 mm y por fin aumentó en los dos últimos meses del año hasta un valor promedio de -0.3 mm. La variabilidad de la diferencia  $Evp_{sue}-ET_0$  en los distintos años individuales fue algo mayor que la de la diferencia  $ET_{sr}-ET_0$  debido a la irregularidad de las precipitaciones. La diferencia entre los valores acumulados de  $Evp_{sue}$  y  $ET_0$  en el periodo 16 de febrero a 27 de noviembre fue de -744 mm en 2000, -737 mm en 2002 y -691 mm en 2003.

Por tanto, los valores estimados de  $ET_{sr}$  se parecieron más a los de  $ET_0$  que los de  $Evp_{sue}$ . Como se comentó antes, en los márgenes y playa humedecida de la laguna de Gallocanta no sólo se produce la evaporación del agua aportada directamente por la precipitación, sino la transpiración de la escasa vegetación presente y la evaporación de agua que, por ascenso capilar, llega a la superficie del suelo. Esta última debe ser con diferencia el principal componente del total de agua evaporada. De ahí que los valores de  $ET_{sr}$  fueran más cercanos a los de  $ET_0$ .

Otra cuestión es hasta qué punto las estimas de  $ET_{sr}$  representan a la evaporación de agua que, por ascenso capilar desde la capa freática, asciende hasta la superficie. Los resultados de la sección 3.1.4 (Tabla 11) indicaron que existió una importante aportación del ascenso capilar a la evaporación de agua en la playa humedecida y los márgenes de la laguna de Gallocanta. Esta evaporación mostró una variabilidad espacial importante. Mientras en algunas zonas de los márgenes de la laguna, esta aportación no fue significativa (tubo 80, Tabla 11), fue mayor a medida que se adentró en la playa humedecida, consecuencia lógica de la cada vez mayor cercanía de la capa freática a la superficie del suelo, pocos centímetros en zonas cercanas a aquellas áreas con lámina libre de agua. En promedio, la diferencia entre los valores simulados y medidos de  $\theta$  fue de 14.7 mm en los 12-13 días disponibles para realizar esta comparación (Tabla 11). Esta diferencia fue muy alta y si se atribuyera en su totalidad al ascenso capilar, las estimaciones de evaporación capilar resultarían sobrestimadas e irreales (basta con multiplicar 14.7 mm por 365 para darse cuenta). Naturalmente, los diversos problemas comentados en relación con las medidas de  $\theta$  cuestionaron de forma importante los resultados de la Tabla 11 y sugieren que, con toda seguridad, el aporte de agua por ascenso capilar fue mucho menor.

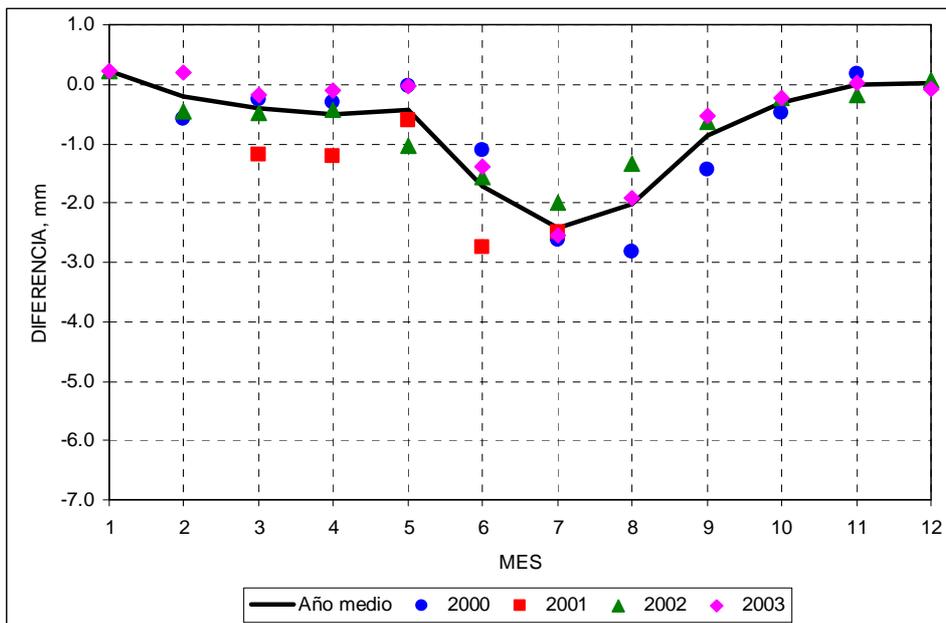


Figura 30. Medias mensuales de la diferencia ( $ET_{sr}-ET_0$ ) entre las estimas diarias de evapotranspiración obtenidas con los métodos de renovación de la superficie ( $ET_{sr}$ ) y Penman-Monteith ( $ET_0$ ) en los márgenes de la laguna de Gallocanta. 16 de febrero de 2000 a 31 de diciembre de 2003.

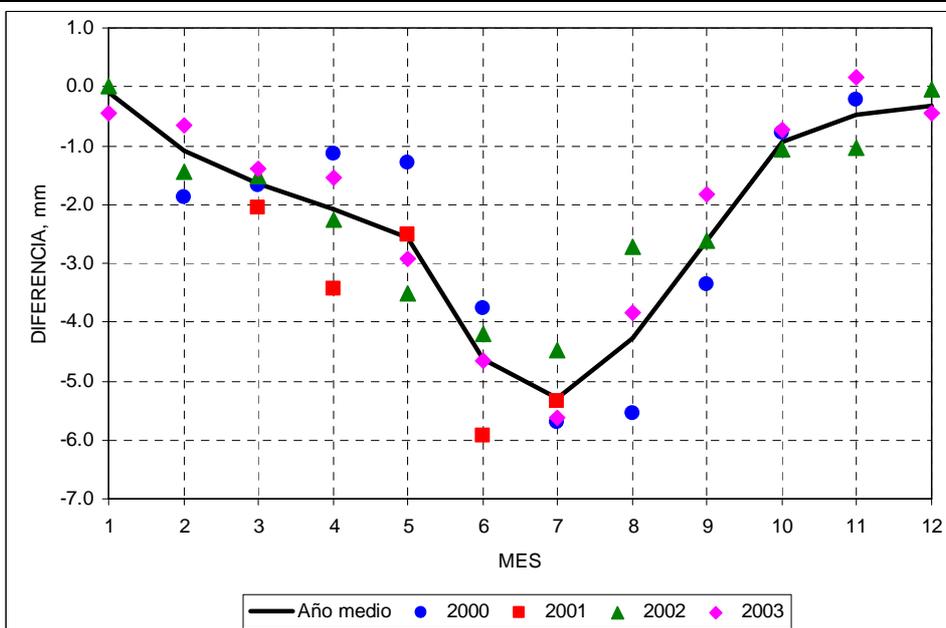


Figura 31. Medias mensuales de la diferencia ( $Evp_{sue}-ET_0$ ) entre las estimas diarias de evaporación de suelo desnudo en ausencia de evaporación capilar ( $Evp_{sue}$ ) y de evapotranspiración de referencia obtenidas con el método de Penman-Monteith ( $ET_0$ ) en los márgenes de la laguna de Gallocanta. 16 de febrero de 2000 a 31 de diciembre de 2003.

Por otra parte, las estimas acumuladas de evapotranspiración real con el método de renovación de la superficie ( $ET_{sr}$ ) en los distintos periodos con datos (Tabla 21) fueron claramente inferiores a ese valor irreal que saldría de multiplicar 14.7 mm por 365. Lo que sí se podría afirmar es que quizás las estimas de  $ET_{sr}$  subestimaron el promedio verdadero de la evaporación de agua en la playa humedecida. Las estimas de  $ET_{sr}$  dependen de su área de representatividad, cuya cuantificación es difícil. En principio, las medidas micrometeorológicas como las de este trabajo, se deben realizar sobre superficies homogéneas y suficientemente extensas para que el régimen turbulento del aire en movimiento esté en equilibrio con la superficie sobre la que se mueve. El espesor de la capa de aire en equilibrio con esta superficie homogénea (la *capa límite*) depende de las dimensiones de dicha superficie. Cuanto mayor sea la misma, mayor será el espesor de la capa límite (Monteith y Unsworth, 1990). Las medidas micrometeorológicas deben realizarse dentro de la capa límite pues aquí los flujos de vapor de agua (evaporación) son constantes con la altura. Pero en el caso de la laguna de Gallocanta, no existe una superficie homogénea. Hay una superficie de lámina libre de agua y otra de playa humedecida cuyas extensiones dependen de las precipitaciones en toda la cuenca de Gallocanta, de las escorrentías superficiales y flujos subsuperficiales de agua hacia la laguna y del nivel de la capa freática. Existe otra superficie, los márgenes de la laguna, que también es heterogénea porque comprende vegetación natural dispersa, con importantes zonas de suelo desnudo y especies diferentes, vegetación agrícola.

Tabla 21. Valores totales de evapotranspiración estimados con los métodos de la renovación de la superficie ( $ET_{sr}$ ) y FAO Penman-Monteith ( $ET_0$ ) y de evaporación de suelo completamente desnudo en ausencia de ascenso capilar ( $Evp_{sue}$ ) en los márgenes de la laguna de Gallocanta.

Periodo	$ET_{sr}$ (mm)	$ET_0$ (mm)	$Evp_{sue}$ (mm)
16 febrero a 27 noviembre de 2000	738.8	1021.0	276.7
21 marzo a 22 julio de 2001	364.6	570.9	61.3
8 diciembre de 2001 a 15 diciembre de 2002	866.6	1111.2	342.8
9 de enero a 31 de diciembre de 2003	836.2	1040.8	310.5

Cuando se realizan medidas micrometeorológicas, el efecto de los flujos de vapor de agua justo al lado del lugar de medición es relativamente pequeño, aumenta con la distancia a sotavento desde el punto de medida, alcanza un máximo y después disminuye (Schmid, 2002). La distancia en que se alcanza ese máximo depende de la homogeneidad de la superficie y de las condiciones meteorológicas imperantes en cada momento (la dirección de viento predominante, estabilidad atmosférica, etc.). Por tanto, la cuestión de que a que área representan las estimas de  $ET_{sr}$  es casi imposible de responder porque esa representatividad varía con diversos factores. La estación micrometeorológica se ubica fuera de la playa humedecida pero a menos de 50 m de ésta. Por ello, sí se podría afirmar que, para las condiciones en que se ha desarrollado este trabajo, las estimas de  $ET_{sr}$  representarían a una zona donde la evaporación de agua por ascenso capilar no es importante (la estación y sus alrededores más inmediatos) pero también a una zona donde esa evaporación es significativa y cuantitativamente importante, a medida que

se acerca y adentra en la playa humedecida. Casi con toda seguridad, los flujos de vapor de agua existentes en los primeros metros de la playa humedecida también fueron detectados por las medidas micrometeorológicas y por ello los valores estimados de  $ET_{sr}$  fueron apreciablemente mayores que los de  $Evp_{sue}$ . Pero las estimas de  $ET_{sr}$  habrían sido mayores si las medidas micrometeorológicas se hubieran realizado, por ejemplo, en la misma playa humedecida. En otras palabras, los resultados de este trabajo sugieren que existe una variabilidad en la evaporación capilar que depende de la ubicación que se considere en relación con el borde que separa los márgenes de la laguna de Gallocanta y su playa humedecida.

### **3.3.2. Estimaciones decenales y estacionales de la evapotranspiración real en los márgenes de la laguna de Gallocanta**

La Tabla 21 lista los valores totales acumulados de  $ET_{sr}$  estimados para los márgenes de la laguna de Gallocanta: 739 mm (de 16 de febrero a 27 de noviembre de 2000), 365 mm (de 21 de marzo a 22 de julio de 2001), 867 mm (de 8 de diciembre de 2001 a 15 de diciembre de 2002) y 836 mm (de 9 de enero a 31 de diciembre de 2003). La Tabla 22 lista las medias decenales de la  $ET_{sr}$  en los años 2000, 2001, 2002 y 2003, en los periodos en que se dispuso de datos. Para el año medio, las medias decenales de  $ET_{sr}$  aumentaron de alrededor de 1.0 mm día<sup>-1</sup> (enero) a 4.0-4.4 mm día<sup>-1</sup> (mayo y junio) y disminuyeron progresivamente a 0.7-0.8 mm día<sup>-1</sup> (diciembre). Se observó cierta variabilidad interanual en estos valores. El máximo valor medio decenal de  $ET_{sr}$  se obtuvo en la segunda decena de junio de 2002 (4.7 mm día<sup>-1</sup>). Todos las medias decenales de  $ET_{sr}$  superiores a 4.0 mm día<sup>-1</sup> se obtuvieron en mayo y junio, excepto el valor de 4.3 mm día<sup>-1</sup> observado en la primera decena de julio de 2002.

Tabla 22. Valores medios decenales de evapotranspiración real diaria ( $\text{mm día}^{-1}$ ) estimados con el método de la renovación de la superficie ( $ET_{sr}$ ) en los márgenes de la laguna de Gallocanta durante el periodo de estudio.

Mes	Decena	2000	2001	2002	2003	Año medio
Enero	1			0.7		0.6
Enero	2			1.0	1.1	1.1
Enero	3			1.2	1.7	1.5
Febrero	1			1.1	1.7	1.4
Febrero	2			1.0	1.1	1.1
Febrero	3	1.2		1.5	1.4	1.4
Marzo	1	1.7		1.5	2.1	1.8
Marzo	2	2.0		1.9	2.1	2.0
Marzo	3	2.1	2.3	2.3	1.9	2.2
Abril	1	2.0	2.3	2.2	3.2	2.4
Abril	2	2.6	2.3	2.9	2.8	2.7
Abril	3	2.4	2.4	3.4	3.5	2.9
Mayo	1	2.6	2.4	2.0	3.1	2.5
Mayo	2	4.1	3.2	4.4	4.4	4.0
Mayo	3	4.2	3.9	3.7	4.3	4.0
Junio	1	4.2	3.4	3.5	3.9	3.8
Junio	2	4.6	3.7	4.7	4.4	4.4
Junio	3	4.4	3.4	3.8	4.3	4.0
Julio	1	3.7	2.9	4.3	3.6	3.6
Julio	2	3.6	3.0	3.3	2.7	3.1
Julio	3	3.3		3.5	3.1	3.3
Agosto	1	2.9		3.4	2.9	3.1
Agosto	2	3.0		3.4	2.4	2.9
Agosto	3	2.6		3.4	3.0	3.0
Septiembre	1	2.5		3.3	2.7	2.8
Septiembre	2	2.3		2.8	2.9	2.6
Septiembre	3	1.9		2.8	1.9	2.2
Octubre	1	2.2		1.7	2.0	2.0
Octubre	2	1.3		2.3	1.4	1.7
Octubre	3	0.9		1.9	1.0	1.3
Noviembre	1	1.6		1.5	1.3	1.5
Noviembre	2	1.2		1.0	0.8	1.0
Noviembre	3			1.2	1.0	1.1
Diciembre	1			0.9	0.7	0.8
Diciembre	2		0.5		0.7	0.7
Diciembre	3		0.7		0.7	0.7

## 4. CONCLUSIONES

Este informe presenta los resultados de las actividades realizadas en la estación meteorológica de Gallocanta, ubicada junto a la laguna del mismo nombre, durante el periodo de 16 de febrero de 2000 a 31 de diciembre de 2003. Estas actividades comprendieron dos tipos de trabajos: a) caracterización del contenido volumétrico de agua en diferentes perfiles de suelo y evaluación cualitativa de la evaporación capilar; y b) caracterización meteorológica y estimación de la evapotranspiración real en los márgenes de la laguna de Gallocanta.

Dentro de las actividades del primer tipo de trabajos, realizados de julio a diciembre de 2003, se instalaron tubos de acceso de PVC en distintos puntos de los márgenes y del comienzo de la playa humedecida de la laguna. En estos tubos se realizaron medidas de contenido volumétrico de agua del suelo ( $\theta$ ) en distintas profundidades con una sonda *Diviner 2000*. Durante la instalación de los tubos, se recogieron diferentes muestras de suelo a distintas profundidades con el fin de caracterizar parcialmente los suelos de la zona. Los resultados de granulometría indicaron que el contenido de arenas es importante en la superficie y disminuye fuertemente en profundidad donde predominan las arcillas. Se obtuvieron también valores de contenido volumétrico a capacidad de campo ( $\theta_{FC}$ ) y en el punto de marchitez ( $\theta_{WP}$ ) y de salinidad (conductividad eléctrica 1:5). Los resultados de salinidad indicaron que existe ascenso capilar de agua en aquellos puntos situados en la misma playa humedecida o justo en el borde de separación entre ésta y los márgenes de la laguna con presencia de vegetación, mientras que en puntos más alejados ese ascenso capilar no parece existir.

Se recogieron muestras para calibrar la sonda *Diviner 2000* para los suelos de la laguna de Gallocanta pero las ecuaciones de regresión obtenidas fueron en general poco adecuadas con coeficientes de determinación muy bajos e incluso no significativos, excepto en las ecuaciones obtenidas para tres tubos individuales, 80, 81 y 89. Principalmente, el problema debió ser la falta de variabilidad en los valores de frecuencia escalada ( $SF$ ) y, en algún caso, de  $\theta$  usados en la calibración. Se recomienda que se continúe en 2004 con la labor de calibración de este instrumento recogiendo más muestras de suelo a distintas profundidades y en distintas fechas.

A pesar de las pobres ecuaciones de calibración obtenidas en general para cada tubo individual, los registros de  $SF$  se convirtieron en valores medidos de  $\theta$  usando las respectivas ecuaciones de calibración (Tabla 8). Se analizó la evolución de los valores de  $\theta$  obtenidos en cada profundidad a lo largo del ciclo de medidas (julio a diciembre de 2003), así como de los respectivos perfiles de suelo. Los diferentes resultados indicaron la posible existencia de ascenso capilar en algunos puntos de medida por la escasa variabilidad observada en las distintas fechas de medida y los altos valores de  $\theta$ , incluso superiores a capacidad de campo, registrados durante las mismas. En otros puntos, sin embargo, los resultados de  $\theta$  sugirieron que ese ascenso capilar no fue tan importante en esas zonas.

Con el fin de tener una evidencia cualitativa más fuerte de la existencia de ascenso capilar, se calcularon valores simulados de  $\theta$  considerando que la única fuente de agua para la evaporación fue la precipitación. Esta simulación supuso que

la evaporación sólo se produce en los primeros 10 cm de suelo. Se partió de los valores de  $\theta$  inicialmente medidos en cada tubo de acceso. Esos valores simulados se compararon con los valores medidos en la profundidad de 0-10 cm en cada fecha de medida. Excepto en el tubo 80, en todos los demás casos, las diferencias entre valores simulados y medidos de  $\theta$  fueron significativas ( $\alpha = 0.95$ ). Estos resultados indicaron que los valores simulados de  $\theta$  fueron menores que los valores medidos. Con todas las reservas que se deben tener por la incertidumbre de los valores medidos de  $\theta$  (a causa de los problemas de calibración) y de cualquier proceso de estimación, estos resultados indicaron que, efectivamente, existió un ascenso capilar de agua que contribuyó de forma importante a la evaporación de agua de suelo desnudo en la playa humedecida de la laguna de Gallocanta. Esta contribución del ascenso capilar mostró asimismo una variabilidad espacial y fue aparentemente mayor en aquellos puntos de medida colocados en la misma playa humedecida. En promedio, la diferencia entre los valores medidos y simulados de  $\theta$  fue de 14.7 mm lo que sugiere la importancia cuantitativa del ascenso capilar en su contribución a la evaporación de agua de la superficie del suelo.

Sería conveniente seguir realizando medidas de  $\theta$  en sucesivas fechas de 2004. Además sería conveniente analizar las muestras de suelo que se pudieran recoger para obtener curvas características de presión frente a  $\theta$ . Estas curvas permitirían cuantificar la conductividad hidráulica de los suelos de la laguna de Gallocanta. Si además se conociera con detalle el nivel de la capa freática, se podría estimar la evaporación capilar a partir de los datos de  $\theta$  y de la profundidad de dicha capa freática (Hanks, 1992). Probablemente, ayudaría también la realización, en algún punto, de medidas continuas de  $\theta$  con sondas de capacitancia de registro continuo y conectadas a equipos acumuladores de datos. Otro aspecto que se debe estudiar es la posible influencia de la salinidad en las medidas para lo cual sería conveniente realizar medidas de salinidad en distintas fechas de medida.

Dentro de las actividades del segundo grupo de trabajos, se registraron una serie de variables meteorológicas (temperatura y humedad relativa del aire, radiación solar global y neta, velocidad y dirección de viento, temperatura de suelo, flujo de calor en el suelo y precipitación) en periodos semihorarios y diarios. Los resultados descritos en este trabajo sugieren que el funcionamiento de la estación fue el idóneo, con tan sólo algún problema puntual y esporádico, y que los registros obtenidos son de gran calidad.

El periodo de estudio no llegó a los 4 años completos por lo que la caracterización meteorológica realizada en este trabajo sólo representa al periodo de estudio y no puede, aún, utilizarse para caracterizar adecuadamente la climatología de la zona de estudio. No obstante, los registros de precipitación y humedad relativa sugieren la aridez de Gallocanta. Así, la precipitación media anual fue de 393 mm aunque hubo una gran variabilidad interanual: de 193 mm en 2001 a 501 mm en 2002. En promedio se registraron 67 días con precipitación mayor o igual a 1.0 mm. Por su parte, el promedio anual de la humedad relativa mínima del aire fue de sólo 40 %. Los registros de radiación solar global indicaron que aproximadamente el 27 % de los días fueron despejados o casi despejados, el 42 %, parcialmente nubosos, el 21 %, nubosos, y el 10 %, muy nubosos. Los promedios anuales de las temperaturas media, máxima y mínima del aire fueron, respectivamente, 11.3, 18.5 y

4.4 °C. Sólo en los meses de junio a agosto no se registraron heladas. Por contra, en los meses de noviembre a febrero hubo entre un 42 y un 72 % de días con heladas, respectivamente. En promedio, los meses de enero y abril fueron los más ventosos ( $3.8 \text{ m s}^{-1}$ ) y septiembre el menos ventoso ( $2.5 \text{ m s}^{-1}$ ), siendo la velocidad media anual del viento de  $3.2 \text{ m s}^{-1}$ . Aproximadamente, el 60 % de las velocidades medias diarias del viento estuvieron entre  $2.0$  y  $5.0 \text{ m s}^{-1}$ .

Asimismo, se registraron valores de temperatura del aire de alta frecuencia con termopares de hilo fino, en periodos semihorarios, con el fin de emplear el método de la renovación de la superficie para estimar valores semihorarios y diarios de la evapotranspiración real ( $ET_{sr}$ ) en los márgenes y la playa humedecida de la laguna de Gallocanta. Estos valores de  $ET_{sr}$  se compararon con estimas diarias de evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ) y de evaporación de suelo completamente desnudo en ausencia de ascenso capilar ( $Evp_{sue}$ ). Las estimas de  $ET_{sr}$  estuvieron comprendidas entre las de  $ET_0$  y  $Evp_{sue}$ , que representan unos límites teóricos (aunque no siempre cumplidos), máximo y mínimo, de la evapotranspiración y evaporación que se esperan en los márgenes de la laguna de Gallocanta, dadas las condiciones meteorológicas de la zona. Las estimas de  $ET_{sr}$  mostraron un comportamiento cualitativo adecuado en respuesta a la presencia o ausencia de precipitaciones. En periodos de falta de lluvias, las estimas de  $ET_{sr}$  disminuyeron bastante por debajo de las de  $ET_0$ , mientras que en periodos con lluvias relativamente frecuentes, fueron similares a las mismas. En general, la mayor similitud entre las estimas diarias de  $ET_{sr}$  y las de  $ET_0$  se produjo en mayo-junio (meses relativamente lluviosos) y en los meses fríos, de baja demanda evaporativa (noviembre a enero). Los promedios decenales máximos de  $ET_{sr}$  se estimaron en unos  $4.0$ - $4.4 \text{ mm día}^{-1}$  en mayo y junio.

Los valores totales de  $ET_{sr}$  estimados fueron los siguientes: a) periodo de 15 de febrero a 27 de noviembre de 2000, 739 mm; b) periodo de 21 de marzo a 22 de julio de 2001, 365 mm; c) periodo de 8 de diciembre de 2001 a 15 de diciembre de 2002, 867 mm; y d) periodo de 9 de enero a 31 de diciembre de 2003, 836 mm. Martínez-Cob (2002) concluyó que la incertidumbre de estas estimas fue de alrededor de un 10 %. No obstante, esta incertidumbre depende también del área de los márgenes y playa humedecida de la laguna a la que esas estimas representen. La representatividad de estas estimas es difícil de cuantificar porque en la zona existen, al menos, tres tipos de superficies cuyas dimensiones presentan importantes variaciones con el tiempo: la lámina libre de agua, la playa humedecida y los márgenes y alrededores de la laguna (con vegetación natural dispersa y agrícola). En cualquier caso, los registros medidos de humedad del suelo indicaron que, probablemente, las estimas de  $ET_{sr}$  representan en parte a los márgenes de la laguna y en parte a la playa humedecida, por lo que podrían incluso subestimar la evaporación de agua de suelo desnudo (agua de precipitación más agua del ascenso capilar) promedio de toda la playa humedecida de la laguna. Si se hubieran realizado medidas micrometeorológicas dentro de la misma playa humedecida, las estimas de  $ET_{sr}$  podrían haber sido mayores.



## BIBLIOGRAFÍA

- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Roma, 299 p.
- Allen R.G., Pruitt W.O., Businger J.A., Fritschen L.J., Jensen M.E., Quinn F.H. 1996. Evaporation and Transpiration. En: Hydrology Handbook (2<sup>nd</sup> ed.). ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 28. 125-252. American Society of Civil Engineers. Nueva York, EE.UU.
- Brotzge J.A., Duchon C.E. 2000. A field comparison among a domeless net radiometer, two four-component net radiometers, and a domed net radiometer. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 17: 1569-1582.
- Cobos D.R., Baker J.M. 2003. Evaluation and modification of a domeless net radiometer. *Agronomy Journal*. 95: 177-183.
- Cuadrat J.M. 1999. El clima de Aragón. Publicación no. 80-13. Caja de Ahorros de la Inmaculada. Zaragoza, España. 109 pp.
- Devore J., Peck R. 1986. Statistics, the exploration and analysis of data. West Publishing Co. St. Paul, MN, EE.UU. 699 pp.
- García Prieto F.J. 1993. Fisiografía de la laguna de Gallocanta y su cuenca. *Xiloca*. 11: 177-204.
- García Vera M.A. 1997. Balance de la unidad hidrogeológica de Gallocanta. Informe 97-PH-24-I. Confederación Hidrográfica del Ebro. Zaragoza. Informe inédito.
- García Vera M.A. 2002. Balance en la laguna de Gallocanta en el periodo 1/1970 – 12/2001. Oficina de Planificación Hidrológica, Confederación Hidrográfica del Ebro. Zaragoza, España. 137 pp + anejos. Informe inédito.
- Hanks R. J. 1992. Applied soil physics. Springer-Verlag. Nueva York, EE.UU. 176 pp.
- Lecina S., Martínez-Cob A., Pérez P.J., Villalobos F.J., Baselga J.J. 2003. Fixed versus variable bulk canopy resistance for reference evapotranspiration estimation using the Penman-Monteith equation under semiarid conditions. *Agricultural Water Management*. 60: 181-198.
- Martínez-Cob A. 2000. Evaluación metodológica para la estimación de la evaporación capilar en la laguna de Gallocanta. Informe 1999-PH-31-I. Confederación Hidrográfica del Ebro. Zaragoza. Informe inédito.
- Martínez-Cob A. 2001. La evapotranspiración en los márgenes de la laguna de Gallocanta: comparación de métodos. Informe 2001-PH-02. Confederación Hidrográfica del Ebro. Zaragoza. Informe inédito.
- Martínez-Cob A. 2002. Aplicación del método de renovación de superficie para el cálculo de la ETr en humedales: aplicación a la laguna de Gallocanta. Informe 2002-PH-04-I. Confederación Hidrográfica del Ebro. Zaragoza. Informe inédito.

- Mead R.M., Ayars J.E., Liu J. 1995. Evaluating the influence of soil texture, bulk density and soil water salinity on a capacitance probe calibration. 1995 ASAE Summer Meeting. Paper No 95-3264.
- Monteith J.L., Unsworth M.H. Principles of environmental physics. Edward Arnold, London, Nueva York, Melbourne, Auckland. 291 pp.
- Morgan K.T., Parsons L.R., Wheaton T.A., Pitts D.J., Obreza T.A. 1999. Field calibration of a capacitance water content probe in fine sands. Soil Science Society of America Journal. 63: 987-989.
- Paltineanu I.C., Starr J.L. 1997. Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: laboratory calibration. Soil Science Society of America Journal. 61 (6): 1576-1585.
- Rose S., Groves S., Bailey R. 2001. Calibration of a capacitance sensor for soil water measurement. UK Irrigation. 29: 17-19.
- Schmid H.P. 2002. Footprint modeling for vegetation atmosphere exchange studies: a review and perspective. Agricultural and Forest Meteorology. 113: 159-183.
- Todorovic M. 1999. Single-layer evapotranspiration model with variable canopy resistance. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 125 (5): 235-245.

## GLOSARIO DE SÍMBOLOS

A continuación se listan los símbolos utilizados para representar las distintas variables empleadas en los distintos cálculos realizados.

### Alfabeto latino (mayúsculas)

$A$	=	parámetro de la ecuación de calibración de fábrica de la sonda <i>Diviner 2000</i> .
$B$	=	parámetro de la ecuación de calibración de fábrica de la sonda <i>Diviner 2000</i> .
$C$	=	parámetro de la ecuación de calibración de fábrica de la sonda <i>Diviner 2000</i> .
$CV$	=	coeficiente de variación, %.
$D_e$	=	altura acumulada de agua evaporada de la capa más superficial del suelo durante el proceso de evaporación, mm.
$D_{eini}$	=	valor de $D_e$ al comienzo del día $i$ .
$DPV$	=	déficit de presión de vapor, kPa.
$ETR$	=	evapotranspiración real, mm por unidad de tiempo.
$ET_{sr}$	=	evapotranspiración real determinada con el método de renovación de la superficie, mm por unidad de tiempo.
$ET_0$	=	evapotranspiración de referencia, mm por unidad de tiempo.
$ET_{0i}$	=	evapotranspiración de referencia el día $i$ , mm día <sup>-1</sup> .
$Evp_{sue}$	=	evaporación de agua en suelo desnudo bajo los supuestos de ausencia de vegetación, ascenso capilar y escorrentía, mm por unidad de tiempo.
$Evp_{suei}$	=	evaporación de agua en suelo desnudo ( $Evp_{sue}$ ) en el día $i$ , mm día <sup>-1</sup> .
$F_A$	=	frecuencia leída con la sonda <i>Diviner 2000</i> con el tubo de acceso de PVC suspendido en el aire.
$F_S$	=	frecuencia leída con la sonda <i>Diviner 2000</i> con el tubo de acceso de PVC en el suelo.
$F_W$	=	frecuencia leída con la sonda <i>Diviner 2000</i> con el tubo de acceso de PVC dentro de un baño de agua.
$F1, F2$	=	flujo de calor en el suelo medidos con dos placas <i>HFP01</i> (W m <sup>-2</sup> ) a 0.08 m de profundidad.
$G$	=	flujo de calor en la superficie del suelo, W m <sup>-2</sup> .
$HR_{md}$	=	media mensual de la humedad relativa media diaria del aire, %.
$HR_{mx}$	=	media mensual de la humedad relativa máxima diaria del aire, %.
$HR_{mn}$	=	media mensual de la humedad relativa mínima diaria del aire, %.
$K_c$	=	coeficiente de cultivo; en este caso, de suelo desnudo.
$K_{cb}$	=	coeficiente de cultivo basal.
$K_{cmax}$	=	valor máximo de $K_c$ justo después de un evento de precipitación.
$K_e$	=	coeficiente de evaporación de agua del suelo.

$K_r$	=	coeficiente de reducción de la evaporación dependiente de la altura acumulada de agua ya evaporada desde la superficie del suelo.
$M_h$	=	masa húmeda de una muestra de suelo (incluyendo la masa de la lata donde se almacena), g.
$M_l$	=	masa de la lata donde se almacena una muestra de suelo para determinar su humedad gravimétrica, g.
$M_s$	=	masa seca de una muestra de suelo (incluyendo la masa de la lata donde se almacena), g.
$M_w$	=	humedad gravimétrica de una muestra de suelo, tanto por uno.
$NRLite$	=	radiación neta medida con un sensor <i>NR-Lite</i> de la marca <i>Kipp &amp; Zonen</i> , $W m^{-2}$ .
$ND0$	=	número de días con precipitación igual o mayor que 0.2 mm.
$ND1$	=	número de días con precipitación igual o mayor que 1.0 mm.
$PP_i$	=	percolación profunda en el día $i$ , mm.
$Pr_i$	=	precipitación registrada en el día $i$ , mm.
$Q7$	=	radiación neta medida con un sensor <i>Q-7</i> de la marca <i>REBS</i> , $W m^{-2}$ .
$REW$	=	agua fácilmente evaporable de una capa de suelo, mm.
$R_{so}$	=	radiación solar global en días despejados máxima posible, $W m^{-2}$ .
$R_{sol}$	=	radiación solar global registrada, $W m^{-2}$ .
$R^2$	=	coeficiente de determinación de una ecuación de regresión.
$S$	=	calor almacenado en el suelo por encima de las placas de flujo de calor, $W m^{-2}$ .
$SF$	=	frecuencia escalada obtenida con la ecuación (1) a partir de las lecturas brutas ( $F_s$ ) de la sonda <i>Diviner 2000</i> .
$TEW$	=	agua evaporable total de una capa de suelo, mm.
$Tmd$	=	media mensual de la temperatura media diaria, °C.
$Tnm$	=	media mensual de la temperatura mínima diaria, °C.
$Txm$	=	media mensual de la temperatura máxima diaria, °C.
$U_d$	=	velocidad media diaria del viento a 2 m de altura, $m s^{-1}$ .
$U_{30m}$	=	velocidad media semihoraria del viento a 2 m de altura, $m s^{-1}$ .
$V_{a1}, V_{a2}$	=	volumen de los anillos con los que se recogen muestras de suelo para determinar su densidad aparente, $cm^3$ .
$Z_e$	=	profundidad de suelo en la que se produce evaporación de suelo, m.

### Alfabeto latino (minúsculas)

$a$	=	factor de la ecuación potencial $y = a + x^b$ .
$a_0$	=	ordenada en el origen de la ecuación logarítmica $y = a_0 + a_1 \ln(x)$ .
$a_1$	=	pendiente de la ecuación logarítmica $y = a_0 + a_1 \ln(x)$ .
$b$	=	exponente de la ecuación potencial $y = a + x^b$ .
$b_0$	=	ordenada en el origen de la ecuación de regresión $y = b_0 + b_1 x$ .
$b_1$	=	pendiente de la ecuación de regresión $y = b_0 + b_1 x$ .

$d_p$	=	profundidad a la que se miden $F1$ y $F2$ , 0.08 m.
$n$	=	número de pares de valores $\theta_i$ , $\theta_{obs}$ .
$s_d$	=	desviación estándar de la diferencia entre los valores simulados y medidos de $\theta$ , mm.
$s_d^2$	=	varianza de la diferencia entre los valores simulados y medidos de $\theta$ , mm <sup>2</sup> .
$t$	=	estadístico $t$ para la evaluación de la hipótesis nula, $\theta_d = 0$ .
$t_{\alpha, n-1}$	=	valor tabulado del estadístico $t$ para un nivel de significación $\alpha = 0.95$ y $n-1$ grados de libertad.
$x$	=	variable independiente de una ecuación de regresión.
$\bar{x}_d$	=	media de la diferencia entre los valores simulados y medidos de $\theta$ , mm.
$y$	=	variable dependiente de una ecuación de regresión.

### Alfabeto griego (mayúsculas)

$\Delta t$	=	tiempo transcurrido entre dos períodos consecutivos de medida de temperatura de suelo, s.
$\Delta T_s$	=	diferencia de temperatura de suelo entre dos períodos de 30 minutos consecutivos, °C.
$\theta$	=	contenido volumétrico de agua, m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> .
$\theta_d$	=	diferencia entre el contenido volumétrico de agua simulado y el medido en el día $i$ , m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> .
$\theta_{FC}$	=	contenido volumétrico a capacidad de campo, m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> .
$\theta_i$	=	contenido volumétrico de agua simulado en el día $i$ , m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> .
$\theta_{i-1}$	=	contenido volumétrico de agua simulado en el día $i-1$ , m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> .
$\theta_{obs}$	=	contenido volumétrico medido (tras aplicar la calibración correspondiente, Tabla 8) en el día $i$ , m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> .
$\theta_{WP}$	=	contenido volumétrico en el punto de marchitez, m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> .
$\theta_{0-50}$	=	contenido volumétrico de agua acumulado de 0 a 50 cm de profundidad, m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> .
$\theta_{10}$	=	contenido volumétrico de agua a 10 cm de profundidad, m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> .
$\theta_{20}$	=	contenido volumétrico de agua a 20 cm de profundidad, m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> .
$\theta_{30}$	=	contenido volumétrico de agua a 30 cm de profundidad, m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> .
$\theta_{40}$	=	contenido volumétrico de agua a 40 cm de profundidad, m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> .

### Alfabeto griego (minúsculas)

$\alpha$	=	nivel de significación en un test estadístico, tanto por uno.
$\rho_b$	=	densidad aparente de una muestra de suelo, g cm <sup>-3</sup> (o kg m <sup>-3</sup> ).



## ANEJO 1

### EJEMPLO DE UN FICHERO DE TEXTO (SEPARADO POR COMAS) REGISTRADO CON LA SONDA DE HUMEDAD DEL SUELO

El equipo acumulador de datos de la sonda de humedad del suelo registra un fichero por cada tubo de acceso o perfil que se desea medir. Las sucesivas lecturas (fechas) efectuadas en ese tubo se almacenan en el fichero correspondiente a ese tubo. Al transmitir los datos desde el acumulador de datos a un ordenador de sobremesa, el software de transferencia permite que los datos de un determinado tubo se vuelquen como: 1) valores de *Frecuencia Escalada (SF)*, lecturas originales de la sonda de humedad del suelo; o 2) valores de humedad del suelo, obtenidos a partir de los valores de *SF* con la correspondiente ecuación de calibración, en este caso, la almacenada de fábrica. A continuación, se lista, a modo de ejemplo, el fichero de texto (separado por comas) correspondiente al tubo 80 con valores de humedad del suelo; el fichero con valores de *SF* es igual a éste. Cada línea de datos contiene las lecturas tomadas en las distintas profundidades en una determinada fecha de lectura. Como se han instalado nueve tubos, de momento, hay nueve ficheros de texto, uno por tubo, con valores de humedad del suelo, y otros nueve con valores de *SF*.

Site#:80,,,,,,,,,  
Depths:, 10 - 100cm,,,,,,,,,

Calibration, 10cm, 20cm, 30cm, 40cm, 50cm, 60cm, 70cm, 80cm, 90cm, 100cm

A:, Error, Error, Error, Error, Error, Error, Error, Error, Error, Error

B:, Error, Error, Error, Error, Error, Error, Error, Error, Error, Error

C:, Error, Error, Error, Error, Error, Error, Error, Error, Error, Error

Calibrated Moisture Readings,,,,,,,,,

Time, 10cm, 20cm, 30cm, 40cm, 50cm, 60cm, 70cm, 80cm, 90cm, 100cm

17/07/03

10:47,14.340202,36.429169,38.787212,32.613064,29.478258,30.811691,31.67515,42.917461,44.944588,50.11927

17/07/03

13:15,17.076469,37.095833,38.6506,33.245682,31.303667,33.372883,34.012474,44.725346,46.939342,53.470055

05/08/03

12:09,13.76657,34.917648,37.83569,31.923948,29.899422,31.551062,31.303667,43.492294,46.566994,55.783253

12/08/03

11:50,13.726084,33.564156,36.429169,30.506102,29.538219,30.445173,31.241961,43.492294,46.864761,55.301163

19/08/03

12:05,14.548117,33.118683,35.768265,30.506102,28.703863,30.750435,31.057217,43.060841,46.121925,54.581455

26/08/03

11:58,28.585621,35.309021,37.229839,32.361652,30.445173,31.737261,31.799454,43.78101,46.492683,54.581455

02/09/03

11:46,18.610441,34.141087,36.495571,29.959805,28.763086,30.934322,31.551062,43.636543,46.49  
2683,55.301163

09/09/03

12:31,36.695171,45.752525,48.064354,41.636967,30.628145,32.424412,32.361652,42.845901,45.97  
4037,55.140881

19/09/03

11:46,28.291094,43.492294,46.864761,40.723274,33.564156,32.048729,32.613064,44.652378,46.86  
4761,54.900833

02/10/03

11:34,36.761803,42.774319,45.678818,39.542576,33.055264,34.076771,34.593052,46.41843,48.820  
965,56.186359

23/10/03

12:07,30.323456,38.787212,42.203896,36.296543,31.365425,31.613075,34.205479,45.678818,47.76  
3195,55.221035

06/11/03

14:02,38.924034,42.989143,45.605141,40.096188,33.755955,31.923948,32.739109,46.270065,47.91  
3654,55.702778

17/12/03

14:33:51,34.399033,41.636967,43.853333,39.198395,35.83408,36.495571,38.514229,52.133945,50.  
658237,56.02499

## ANEJO 2

### REGISTRO DE LAS INCIDENCIAS OCURRIDAS DURANTE LAS MEDIDAS DE HUMEDAD DEL SUELO

Se listan las incidencias ocurridas durante el periodo 17 de julio a 17 de diciembre de 2002 durante la realización de las medidas de humedad de perfiles de suelo en los márgenes de la laguna de Gallocanta.

#### 17 de julio de 2003

Se fue a la laguna de Gallocanta con la intención de colocar tubos de acceso para la medida de la humedad del suelo (volumétrica) mediante sonda *Diviner 2000*. Tras conversaciones con Miguel Ángel García Vera, se escogieron 20 posibles ubicaciones alrededor de toda la laguna. Debido al agua acumulada en el vaso de la laguna, se decidió que sólo se instalarían tubos en aquellas ubicaciones en las que ya no hubiera lámina libre de agua. Más adelante, si la laguna se vuelve a secar se instalarán más tubos hasta completar 20 si puede llegarse a este extremo. Como la sonda *Diviner 2000* funciona a base de definir perfiles de suelo en los que se realizarán medidas a lo largo de fechas sucesivas, y como cada perfil se identifica con un número, se decidió que en nuestro caso se utilizarían los números 80 a 99 para representar nuestros perfiles. Por tanto, nuestros 20 tubos se numerarán del 80 al 99.

El tubo 80 se instaló en el medio de la estación meteorológica. Aquí se perforó el suelo para instalar un tubo de acceso de 1.5 m. El proceso de instalación fue el habitual en estos casos y que Miguel Izquierdo conoce tan bien. Junto al tubo se hicieron dos perforaciones con el fin de: a) sacar muestras de suelo de 0-10, 10-20, 20-30, 30-60 y 60-100 cm de profundidad para determinar conductividad eléctrica y textura; b) sacar muestras de suelo de 0-10, 10-20 y 20-30 para determinar densidad aparente. Con el equipo acumulador de datos de la *Diviner 2000*, se definió el perfil 80 y se realizaron medidas de humedad volumétrica de suelo para proceder a la calibración de la sonda para los suelos de Gallocanta.

El tubo 81 se instaló muy cerca de la orilla sur del lagunazo, es decir, del lado norte del istmo donde se ubica la estación. Aquí se siguió el mismo procedimiento que en el caso del tubo 80. Hacia el metro de profundidad, se encontró mucha agua. No obstante, la instalación del tubo parece que fue correcta y que el tapón de cierre de la parte inferior del tubo quedó bien colocado. Se sacaron muestras de suelo también en dos perforaciones cercanas al tubo a las mismas profundidades y con los mismos fines. Con el equipo acumulador de datos de la *Diviner 2000*, se definió el perfil 81 y se realizaron medidas de humedad volumétrica de suelo con el mismo fin que en el caso anterior. Se observó que los valores obtenidos fueron más altos que en el caso del tubo 80, lo que parece lógico ya que las muestras de suelo estaban mucho más húmedas. La mayor humedad se obtuvo en las profundidades mayores.

A continuación, se intentó instalar un tubo en la orilla norte de la laguna grande, es decir en el lado sur del istmo donde se ubica la estación. El proceso de instalación seguido fue el mismo de siempre. Se encontró agua hacia 50-70 cm. Se

decidió, pues, colocar, el tubo sólo hasta 40-50 cm. Se tapó la abertura inferior del tubo, aparentemente bien. Al hacer la perforación se encontró gravilla pequeña en casi todo el perfil. Una vez instalado el tubo y extraídas las muestras de suelo correspondientes, tal como se hizo en los tubos 80 y 81, se procedió a la lectura con la *Diviner 2000* del perfil 84. Los valores registrados fueron muy extraños; primero de todo, sólo se llegaba a medir humedad hasta los 40 cm de profundidad. Pero además, algunos valores de esta variable eran ridículos, cercanos a 0. Se volvió a medir humedad en los perfiles 80 y 81 y se obtuvieron resultados similares a los obtenidos previamente en estos tubos. Se volvió a leer en el perfil 84 y de nuevo, valores extraños, sin sentido. Se pensó que quizás el tubo no se había colocado bien y se volvió a instalar un tubo de acceso a escasos m del anterior, paralelo más o menos a la orilla de la laguna. Se pudo perforar algo más hondo y con la *Diviner 2000* se pudo leer hasta 60 cm de profundidad. Pero de nuevo, las lecturas eran extrañas, ridículas. En fin, ahora se pensó que quizás la existencia de gravilla impide el buen contacto entre suelo y tubo. Ya veremos en sucesivas lecturas. Pero de momento, se dejó aquí la ubicación del tubo 84 (y muy cerca se dejó un tubo sin numerar, no operativo). Aparentemente, y a pesar de la proximidad de agua libre, el tapón inferior de cierre del tubo quedó bien colocado. Por todos los problemas citados, en este tubo no se extrajo muestra de suelo a 60-100 cm de profundidad.

En este momento, y debido a la lentitud del proceso de colocación de tubos y muestreo de suelos y debido a los problemas que hay en estos suelos (gravillas, freático, etc.) se decidió que en el día de hoy se continuaría colocando tubos pero sin extraer muestras de suelo y sin lecturas con la sonda *Diviner 2000*. Este muestreo de suelos y nuevas lecturas de la *Diviner 2000* se harán en una próxima visita a Gallocanta.

Ahora se buscó la ubicación del tubo 95. En este caso, se fue hacia el lado este de la laguna, más o menos enfrente de Berrueco y también enfrente de la escala que marca el punto más hondo de la laguna. Aquí se intentó colocar un tubo relativamente cerca de la orilla pero se observó que el agua empezaba a entrar por el tubo y no hubo manera de colocar el tape inferior del tubo ya que la ventosa de cierre resbala con el agüilla y barro que había entrado. Al final, se decidió que el tubo 95 se colocaría a cierta distancia de la orilla, en una zona algo más alta. Aquí sí se logró colocar el tubo y el tape inferior de cierre. En esta zona, pues, se dejaron el tubo 95 y otro no operativo.

Posteriormente, se fue a los lagunazos del sur de la laguna y que se encuentran generalmente secos y no comunicados directamente con la laguna (de hecho hay cultivos separando la laguna y estos lagunazos). Aquí se colocó el tubo 98. Aquí se encontró de nuevo gravilla fina que dificultaba la perforación del suelo. Se intentó de hecho pinchar el suelo en varios lugares con resultados similares. Por todo ello, se decidió que en esta zona sólo se pondría un tubo y que de momento el tubo 99 quedará totalmente excluido de su instalación futura.

Por fin, se fue a la orilla oeste de la laguna, cerca de un barranco que hay más o menos perpendicular a la zona de separación entre Teruel y Zaragoza. Aquí se colocaron los tubos 89 y 90, el 89 a cierta distancia del agua y el 90 a unos 40 m hacia el interior. Pero se decidió alejar ambos tubos de la orilla para evitar problemas de encharcamiento de agua.

En definitiva, se colocaron los tubos 80, 81, 84, 89, 90, 95 y 98. Además, se dejaron colocados dos tubos (cerca de los tubos 84 y 95) no operativos por problemas de cierre del tape inferior los tubos. Y además un tubo se rompió durante su instalación. Así se gastaron los 10 tubos transportados a Gallocanta.

Además, se obtuvieron lecturas con la *Diviner 2000* y muestras de suelo en los tubos 80, 81 y 84.

Recorrido para llegar a los tubos: se viene por la carretera que va de Daroca a Santed, se pasa la intersección de la carretera de Gallocanta y se llega a la gasolinera de Las Cuerlas. Aquí se gira a la izquierda en dirección a este pueblo, que se atraviesa y se sigue hasta que se ve el cartel que anuncia la comarca del Jiloca. Aquí se gira a la izquierda y se toma un camino de tierra. Se pasa junto a una granja donde suele haber algún perro, se pasa junto a otra edificación rural, se sigue por el camino (dando tumbos por los baches), se pasa junto a una pequeña balsa, el camino hace un hondo bastante profundo y tras una suave curva, se ve un pequeño montón de piedras junto al camino; girar a la izquierda y se empieza a ir campo a través, en línea recta más o menos hacia la laguna; los tubos se ven a partir de donde se acaba la vegetación y empieza el vaso de la laguna.

Después, se dirige uno hacia el tubo 98. Se vuelve por donde se ha venido hasta llegar otra vez a la carretera que va de Las Cuerlas a Bello. Se atraviesa este pueblo y se va en dirección a Tornos. Se pasa junto al Centro de Interpretación. Algo después, se verá una caseta a mano derecha y un poste de la luz a mano izquierda. Girar aquí para coger otro camino rural, seguir recto sin coger un primer desvío a la izquierda; tras unos minutos se verán que el camino se divide en dos que se empiezan a separar; coger el de la izquierda; y tras un rato se ve que se acaba la vegetación y hay una zona de suelo desnudo; aquí está el tubo.

Luego, se vuelve por donde se ha venido y se vuelve otra vez a la carretera hacia Tornos. Poco después de salir a la carretera, se ve un camino de tierra rojiza que es casi la continuación en línea recta de la carretera pues ésta gira suavemente a la derecha. En el camino hay dos señales de tráfico, una de 50 km h<sup>-1</sup> y otra de 16 t. Poco después se pasa junto a algún árbol y se gira a la izquierda; se sigue por otro camino de tierra rojiza; algo después, dos caminos, seguir por el de la izquierda; más adelante, la tierra del camino vuelve a ser blanca y se empieza a ver carteles del camino del Cid. Seguir y en un momento dado se llega casi a la laguna y a un camino (con cartel de la ruta del Cid) que te obliga a ir a la derecha o a casi dar media vuelta a la izquierda; hacer esto último (normalmente en dos maniobras); poco más adelante, se verá como una pequeña senda (rodadas de coche) que bajan un pequeño desnivel para llegar junto al vaso de la laguna donde están los tubos 95 y 96.

Luego, se vuelve a subir al camino último que hemos dejado para bajar el desnivel antes citado y vamos en dirección contraria a la que hemos cogido para llegar al tubo 95. Llegamos al sitio donde antes hemos dado casi una media vuelta pero ahora seguimos adelante, vamos por algunos caminos de la ruta del Cid y, tras un rato, volvemos a la carretera, esta vez la que va de Berrueco a Gallocanta; salimos a la carretera ya cerca de Gallocanta; andamos escasísimos metros por la carretera y veremos un pequeño quitamiedos; antes de llegar aquí, giramos a la izquierda por otro camino, seguimos por este camino y poco más adelante, giramos

a la derecha por otro camino que llega a la estación meteorológica; aquí están los tubos 80, 81 y 84.

### 29 de julio de 2003

Se tomaron muestras de suelo en los tubos 80, 81, 84, 89, 90, 95 y 98 instalados el pasado 17 de julio. La finalidad de estos muestreos fue, en principio, la de tener datos para calibrar la sonda *Diviner 2000*. En teoría, debido al pequeño radio de acción del sensor de la sonda *Diviner 2000* (unos 10 cm), las muestras de suelo se deben tomar junto al tubo de acceso de la sonda. Sin embargo, en nuestras circunstancias, los tubos instalados son los que se van a usar para la recogida sistemática de perfiles de humedad (en campos agrícolas se pueden usar tubos sólo de calibración). Por ello, el hacer un agujero para sacar muestras de suelo junto al tubo de acceso es un riesgo muy importante de crear un punto de flujo preferencial de agua por el que se cuele agua y origine lecturas erróneas de humedad. Se supuso que en nuestro caso, la humedad junto al tubo se muy similar a la obtenida a unos 30 cm del tubo. Y a esta distancia, pues, se muestrearon los suelos.

Se extrajeron muestras para: a) determinar humedad gravimétrica cada 10 cm hasta la profundidad máxima del tubo (100 cm en algún caso y poco más de 50 cm en otros casos); b) determinar salinidad (1:5) a 0-10, 10-20, 20-30, 30-60 y 60-100 cm de profundidad; c) determinar densidad aparente a 0-10, 10-20 y 20-30 cm de profundidad. En los tubos 80, 81 y 84 sólo se sacaron muestras para determinar humedad gravimétrica porque para estos análisis pueden valer las muestras extraídas el pasado 17 de julio. Para el tubo 89, la muestra sacada para gravimetría se utilizará también para determinar densidad aparente en tres profundidades, 0-10, 10-20 y 20-30 cm de profundidad.

En cada tubo se tomaron medidas manuales con la sonda *Diviner 2000*. Según el manual de la *Diviner 2000*, para la calibración se deben registrar manualmente los *conteos brutos* a cada profundidad de interés. Para ello, en cada tubo se metió la sonda a la profundidad deseada: 10, 20, 30 cm, etc. Y entonces, con el modo 'Continuous', se tomaron las lecturas de los *conteos brutos* y las *frecuencias escaladas (SF)*. Y estos valores se anotaron manualmente en una Psion. Se observó mucha inestabilidad en las lecturas de los *conteos brutos* pero lo contrario en las de *SF*. Para comprender el significado de los *conteos brutos* y *SF*, se debe leer el manual de la sonda *Diviner 2000*.

Las muestras de suelo se analizarán, además de por gravimetría y densidad aparente, por textura, salinidad (1:5), capacidad de campo y punto de marchitez. Estas muestras han sido registradas por Lola Naval, en el Laboratorio de la Unidad de Suelos y Riegos del SIA (Zaragoza). Los números de registro son los siguientes: a) para las muestras del 17 de julio, 64358 a 64371; b) para las muestras de 29 de julio, 64637 a 64656.

Como aún no se ha acabado la calibración de la sonda, los registros obtenidos en los tubos 80, 81 y 84 el pasado 17 de julio y los que se obtengan en agosto serán valores de humedad calculados con la calibración del aparato definida por defecto (manual, página 6, figura 16). Es la ecuación (2).

### 6 de noviembre de 2003

Se instalaron dos tubos más, los números 91 y 96. El tubo 91 se instaló a unos 50-60 m hacia el interior de la laguna, cerca del tubo 90. Se tomaron muestras de suelo de 0-20, 20-40 y 40-60 cm. El suelo estaba muy húmedo. De hecho al perforar para instalar el tubo, el agujero se llenó enseguida de agua. Aun así, se cree que el tubo ha quedado bien instalado. El tubo 96 se instaló cerca del tubo 95, pero ya dentro del vaso de la laguna, cerca de donde acaba la vegetación. En la instalación pasó algo parecido al caso del tubo 91. Se sacaron muestras de suelo de 0-20, 30-40, 40-60 y 60-100 cm. Se tomaron medidas en los siete tubos instalados anteriormente y en estos dos nuevos.

### 17 de diciembre de 2003

Se fue a la laguna a leer datos de humedad del suelo con la sonda *Diviner 2000*. Se leyeron los 8 tubos instalados hasta la fecha.

A continuación se describe muy brevemente los alrededores de los tubos:

- a) Los tubos 89 y 90 tienen algo de vegetación rala y de porte bajo alrededor, sobre todo el tubo 89 ya que el 90 está justo al lado de la playa.
- b) El tubo 91 está ya en la playa, sin nada de vegetación alrededor. Se observa que el suelo está muy blando y húmedo. Cuando se estaba cerrando el tape, se observó que el tubo giraba; es decir, no se ha quedado plenamente sujeto al suelo. Se observó algo de agua en el fondo y algo de humedad en las paredes. El 'invento' para secar prácticamente no secó nada. A pesar de eso, se tomaron lecturas y, aparentemente, todo fue bien. La sonda *Diviner 2000* no dio aviso de presencia de agua. Debido a que el agua estaba muy al fondo del tubo y a que la capa freática debe estar bastante más cerca de la superficie ya que había agua en la laguna a escasos metros del tubo, todo apunta a que por alguna razón se condensa agua en el interior del tubo y este agua ha goteado hasta el fondo hasta formar un pequeño charco.
- c) El tubo 98 está en una parte del sur de la laguna no conectada superficialmente con el resto de la laguna. En esta zona no hay vegetación alrededor del tubo.
- d) El tubo 95 está rodeado de vegetación rala y de porte bajo.
- e) El tubo 96 está al comienzo de la playa justo donde se acaba la vegetación; esta vegetación es algo más alta y densa que la que rodea al tubo 96. En este tubo y en el 95 había algo de agua condensada en las paredes interiores.
- f) El tubo 84 está prácticamente en la playa y hay algo de vegetación cerca. Pero está instalado en una zona con gravillas y parece que el contacto con el suelo es pobre pues las lecturas son totalmente extrañas.
- g) El tubo 81 está en la playa, cerca de donde empieza ésta.
- h) El tubo 80 está en la estación y, por tanto, rodeado de algo de vegetación.



## ANEJO 3

### REGISTRO DE LAS INCIDENCIAS OCURRIDAS EN LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA AUTOMÁTICA DE GALLOCANTA

Se listan las incidencias ocurridas en la estación meteorológica automática de Gallocanta durante 2003. Las incidencias ocurridas en años anteriores se pueden encontrar en Martínez-Cob (2001, 2002). Salvo que se indique lo contrario, el observador de las diversas incidencias anotadas en este registro es el autor de este informe, Antonio Martínez-Cob.

#### Estación de Gallocanta:

Término municipal: Gallocanta (Zaragoza)

Paraje: Las Suertes

#### Datos cartográficos:

Fuente: Cartografía Militar de España  
Mapa general, serie L.  
Escala 1:50.000  
Plano: Calamocha 26-19 (491)

Latitud: 40° 59'09" N

Longitud: 1° 30'17" W (Greenwich)

Coordenada UTM Norte-Sur: 4538.325 km

Coordenada UTM Este-Oeste: 625.775 km

Elevación sobre el nivel del mar (m): 1000.

Declinación magnética a 1 enero de 1978: 5° 24'

Variación anual de la declinación: -5'07"; por tanto, en 22 años, -1°52'34"

Declinación magnética a 1 de enero de 2000: 3°31'26"

En definitiva, norte verdadero:

$$360^\circ - 3^\circ 31' 26'' = 356^\circ 28' 34''$$

Como norte verdadero, se debería escoger el valor de  $\approx 356^\circ 30'$  leído con la brújula.

#### 8 enero 2003

Tras casi un mes sin hacerlo, se ha vuelto a importar los datos de los ficheros de texto (separados por comas) en ficheros EXCEL. En GALLOCA2, se observó que el día 348 (14 de diciembre de 2002) a las 0:10 se registró un valor más de los debidos; de hecho las sumas sexta y séptima de las 12 que se tienen que registrar en el bloque 380 de GALLOCA2 fueron muy distintas de las sumas 6 y 7 registradas en el resto de periodos. Y las sumas 8 a 13 parecían estar desplazadas una posición (serían, pues, las sumas 7 a 12). Al usar *Surfraux2* para obtener *H*, se volvió a encontrar que desde el día 16 de diciembre a las 0:30 hasta el día 8 de enero a las

9:00, los valores de  $H$  estimados eran prácticamente constantes e iguales a 0 (de hecho, sí muestran una fluctuación 'normal' a lo largo del día pero como si la escala de variación se hubiera reducido por lo que los valores 'máximos' no superan los  $8 \text{ W m}^{-2}$  y los mínimos un valor similar pero negativo) Por tanto, ha vuelto a ocurrir el extraño problema ocurrido de noviembre de 2000 a marzo de 2001 y de julio a diciembre de 2001. Aunque no se ha comprobado, se supone que, como en esos periodos, ahora también los valores semihorarios de  $\sum (T_i - T_{i-j})^n$  registrados en GALLOCA2 en el periodo 16 diciembre 2002 (0:30) a 8 enero 2003 (9:00) fueron bastante menores de lo que deberían ser.

De nuevo, este problema surgió tras realizarse una llamada de telefonía móvil. Se desconoce qué puede ocurrir para que dichas llamadas en ocasiones produzcan una alteración en el registro de datos de GALLOCA2. En cualquier caso, el 8 de enero a las 9:00 se volcaron los datos de GALLOCA1 y GALLOCA2 y se volvió a programar de nuevo esta última estación con el mismo programa operativo desde el 15 de marzo de 2002, la versión 1.4 de GALLOCA2 (Martínez-Cob, 2002).

### **13 de enero de 2003**

Se volcaron los datos de los dos equipos acumuladores de datos. Se realizaron los cálculos pertinentes de  $H$  con el método de renovación de la superficie y se comprobó que de nuevo los registros de GALLOCA2 usados para calcular los momentos de las diferencias de temperatura son adecuados. Por tanto, el problema mencionado en la nota del 8 de enero de 2003 se ha solucionado. Lo extraño y desconcertante es que ya ha ocurrido tres veces.

### **12 de febrero de 2003**

Visita de Olga Pérez a Gallocanta para efectuar labores de mantenimiento. Se ha encontrado la cúpula del radiómetro neto con cortes (¿quizás picoteos de aves?). Se cambiaron las cúpulas hacia las 13:30 GMT. Ya hace algunos días (a finales de enero) se había sospechado que, de acuerdo con los datos registrados, podía haber una rotura de dichas cúpulas. Análisis gráficos y de regresión sugirieron que sólo los datos de 31 de enero, 1 y 2 de febrero eran erróneos.

Se ha limpiado todo. El equipo de registro de altura de agua del tanque evaporímetro más alejado de la puerta estaba tumbado. Se ha puesto otra vez en posición vertical pero no se puede asegurar que esté funcionando.

### **13 de mayo de 2003**

Visita de Antonio Martínez Cob a la estación. Hacia las 9:30 GMT se cambió el módem *Wavecom* 1 con otro *Wavecom* 2. Hacia las 9:40 GMT se cambiaron los dos termopares *TCBR* y se puso otros dos limpios.

Se limpió el pluviómetro por lo que se habrá producido un registro de "lluvia" hacia las 10:30 GMT.

Todo lo demás parece en orden.

La laguna está llena de agua. En la escala que está en el istmo de la laguna se marcan 0.99 m de profundidad de la laguna. La vegetación en la estación cubre más del 50 % del suelo (yo creo que más). Los alrededores parecen estar muy verdes. Este año no hay cultivo (cebada) junto a la estación.

Los tanques de evaporación necesitan limpieza. Las entradas al interior del aparato están casi taponadas de incrustaciones calcáreas (parecen).

### **29 de mayo de 2003**

Poco después de las 10:00 GMT se reprogramaron ambas estaciones, *GALLOCA1* y *GALLOCA2*. Las nuevas versiones de los programas cambian los periodos en que los módem Wavecom están activos. A partir de ahora, ambos módem se activan cada hora durante 15 minutos (entre las hh:00 y las hh:15).

### **24 de junio de 2003**

Limpieza de la estación. Posible lluvia artificial (9:30 ó 10:00) debido a la limpieza del pluviómetro.

### **17 de julio de 2003**

Se visita la estación. Se quitó el radiómetro neto Q-7 hacia las 8:30. El domo superior estaba totalmente chafado y roto. Se colocó en su lugar un radiómetro neto *NR-Lite* (hacia las 9:22). La estación Galloca1 se reprogramó para registrar datos con el *NR-Lite* en vez del Q-7. Hacia las 9:22. Las gráficas correspondientes no indican que los datos registrados desde 24 de junio a 17 de julio estén mal, no obstante.

En la estación se instaló un tubo de acceso para lecturas de humedad del suelo con sonda *Diviner 2000*.

### **29 de julio de 2003**

Se visitó la estación pero sólo se explicó brevemente a la estudiante francesa en prácticas Aurèlie Vincent. La visita a la laguna fue principalmente para tomar muestras de suelo y tomar lecturas manuales con la sonda *Diviner 2000* para proceder a su calibración, en los 7 tubos ya instalados en los alrededores de la laguna. La laguna se ha secado bastante en relación con el nivel de agua observado el 17 de julio.

### **17 de diciembre de 2003**

Visita a la estación. Se desconectó el radiómetro neto *NR Lite* colocado el 17 de julio pasado y en su lugar se colocó un radiómetro neto *Q7.1* nuevo adquirido en agosto de este año y aún sin estrenar. Consecuentemente, el equipo acumulador de datos *GALLOCANTA1* se volvió a programar poco antes de las 13:00 GMT. Se limpió el piranómetro. Se limpió a fondo el pluviómetro y se colocaron una rejilla y un tapón de goma en el tubo colector. En consecuencia, se provocó artificialmente un registro de lluvia a las 13:30. Poco antes de esta hora se cambiaron los dos termopares *TCBR* por otros limpios.



## ANEJO 4

### LISTA DE FICHEROS EN FORMATO DE TEXTO (SEPARADOS POR COMAS) REGISTRADOS EN EL EQUIPO ACUMULADOR DE DATOS GALLOCA1

Lista de ficheros en formato de texto (separados por comas) que contienen los datos registrados en el equipo acumulador de datos *GALLOCA1* con posterioridad al 12 de enero de 2003. Se suministran en el *CD-ROM* adjunto al informe, junto con los ficheros de texto registrados antes de la fecha indicada y listados en Martínez-Cob (2000, 2001, 2002).

Fichero ASCII	Periodo
Gal1-068.CSV	13 ene (0:30) a 31 ene (24:00) de 2003
Gal1-069.CSV	1 feb (0:30) a 28 feb (24:00) de 2003
Gal1-070.CSV	1 mar (0:30) a 31 mar (24:00) de 2003
Gal1-071.CSV	1 abr (0:30) a 30 abr (24:00) de 2003
Gal1-072.CSV	1 may (0:30) a 4 may (24:00) de 2003
Gal1-073.CSV	5 may (0:30) a 11 may (24:00) de 2003
Gal1-074.CSV	12 may (0:30) a 19 may (24:00) de 2003
Gal1-075.CSV	20 may (0:30) a 25 may (24:00) de 2003
Gal1-076.CSV	26 may (0:30) a 1 jun (24:00) de 2003
Gal1-077.CSV	2 jun (0:30) a 8 jun (24:00) de 2003
Gal1-078.CSV	9 jun (0:30) a 15 jun (24:00) de 2003
Gal1-079.CSV	16 jun (0:30) a 22 jun (24:00) de 2003
Gal1-080.CSV	23 jun (0:30) a 6 jul (24:00) de 2003
Gal1-081.CSV	7 jul (0:30) a 17 jul (9:00) de 2003
Gal1-082.CSV	17 jul (9:30) a 20 jul (24:00) de 2003
Gal1-083.CSV	21 jul (0:30) a 27 jul (24:00) de 2003
Gal1-084.CSV	28 jul (0:30) a 3 ago (24:00) de 2003
Gal1-085.CSV	4 ago (0:30) a 10 ago (24:00) de 2003
Gal1-086.CSV	11 ago (0:30) a 17 ago (24:00) de 2003
Gal1-087.CSV	18 ago (0:30) a 24 ago (24:00) de 2003
Gal1-088.CSV	25 ago (0:30) a 31 ago (24:00) de 2003
Gal1-089.CSV	1 sep (0:30) a 7 sep (24:00) de 2003
Gal1-090.CSV	8 sep (0:30) a 15 sep (6:00) de 2003
Gal1-091.CSV	15 sep (6:30) a 21 sep (24:00) de 2003
Gal1-092.CSV	22 sep (0:30) a 28 sep (24:00) de 2003
Gal1-093.CSV	29 sep (0:30) a 19 oct (24:00) de 2003
Gal1-094.CSV	20 oct (0:30) a 30 nov (24:00) de 2003
Gal1-095.CSV	1 dic (0:30) a 17 dic (12:30) de 2003
Gal1-096.CSV	17 dic (13:00) a 31 dic (24:00) de 2003



## ANEJO 5

### LISTADO DE LOS FICHEROS DE TEXTO (SEPARADOS POR COMAS) REGISTRADOS EN EL ACUMULADOR DE DATOS GALLOCA2

Lista de ficheros en formato de texto (separados por comas) que contienen los datos registrados en el equipo acumulador de datos GALLOCA2 con posterioridad al 12 de enero de 2003. Se suministran en el *CD-ROM* adjunto al informe, junto con los ficheros de texto registrados antes de la fecha indicada y listados en Martínez-Cob (2000, 2001, 2002). Todos los ficheros se registraron con el programa Galloca2, versión 1.4, descrito en Martínez Cob (2002).

Fichero ASCII	Periodo
Gal2-073.CSV	13 ene (0:10) a 31 ene (24:00) de 2003
Gal2-074.CSV	1 feb (0:10) a 28 feb (24:00) de 2003
Gal2-075.CSV	1 mar (0:10) a 31 mar (24:00) de 2003
Gal2-076.CSV	1 abr (0:10) a 30 abr (24:00) de 2003
Gal2-077.CSV	1 may (0:10) a 4 may (24:00) de 2003
Gal2-078.CSV	5 may (0:10) a 11 may (24:00) de 2003
Gal2-079.CSV	12 may (0:10) a 19 may (24:00) de 2003
Gal2-080.CSV	20 may (0:10) a 25 may (24:00) de 2003
Gal2-081.CSV	26 may (0:10) a 1 jun (24:00) de 2003
Gal2-082.CSV	2 jun (0:10) a 8 jun (24:00) de 2003
Gal2-083.CSV	9 jun (0:10) a 15 jun (24:00) de 2003
Gal2-084.CSV	16 jun (0:10) a 22 jun (24:00) de 2003
Gal2-085.CSV	23 jun (0:10) a 6 jul (24:00) de 2003
Gal2-086.CSV	7 jul (0:10) a 20 jul (24:00) de 2003
Gal2-087.CSV	21 jul (0:10) a 27 jul (24:00) de 2003
Gal2-088.CSV	28 jul (0:10) a 5 ago (0:10) de 2003
Gal2-089.CSV	5 ago (0:20) a 10 ago (24:00) de 2003
Gal2-090.CSV	11 ago (0:10) a 17 ago (24:00) de 2003
Gal2-091.CSV	18 ago (0:10) a 24 ago (24:00) de 2003
Gal2-092.CSV	25 ago (0:10) a 31 ago (24:00) de 2003
Gal2-093.CSV	1 sep (0:10) a 7 sep (24:00) de 2003
Gal2-094.CSV	8 sep (0:10) a 15 sep (6:00) de 2003
Gal2-095.CSV	15 sep (6:10) a 21 sep (24:00) de 2003
Gal2-096.CSV	22 sep (0:10) a 19 oct (24:00) de 2003
Gal2-097.CSV	20 oct (0:30) a 30 nov (24:00) de 2003
Gal2-098.CSV	1 dic (0:30) a 31 dic (24:00) de 2003



## ANEJO 6

### VALORES DE HUMEDAD VOLUMÉTRICA DE SUELO REGISTRADOS POR LA SONDA *DIVINER 2000* EN LA LAGUNA DE GALLOCANTA

A continuación se listan los valores de humedad volumétrica de suelo (mm) registrados por la sonda *Diviner 2000* en la laguna de Gallocanta, en los distintos tubos instalados, a varias profundidades y en distintas fechas. Recuérdese que estos valores se obtuvieron con la calibración configurada de fábrica [ecuación (2)] y que los valores de humedad volumétrica de suelo realmente utilizados en este trabajo fueron los que se obtuvieron a partir de los valores de *SF* (Anejo 7) aplicando las ecuaciones de calibración obtenidas para cada tubo (Tabla 8).

<b>Tubo 80</b>										
Fecha	Profundidad (cm)									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
17-jul-2003	14.3	36.4	38.8	32.6	29.5	30.8	31.7	42.9	44.9	50.1
29-jul-2003	14.6	34.8	36.8	30.9	29.7	31.6	32.1	45.0	47.9	57.1
05-ago-2003	13.8	34.9	37.8	31.9	29.9	31.6	31.3	43.5	46.6	55.8
12-ago-2003	13.7	33.6	36.4	30.5	29.5	30.4	31.2	43.5	46.9	55.3
19-ago-2003	14.5	33.1	35.8	30.5	28.7	30.8	31.1	43.1	46.1	54.6
26-ago-2003	28.6	35.3	37.2	32.4	30.4	31.7	31.8	43.8	46.5	54.6
02-sep-2003	18.6	34.1	36.5	30.0	28.8	30.9	31.6	43.6	46.5	55.3
09-sep-2003	36.7	45.8	48.1	41.6	30.6	32.4	32.4	42.8	46.0	55.1
19-sep-2003	28.3	43.5	46.9	40.7	33.6	32.0	32.6	44.7	46.9	54.9
02-oct-2003	36.8	42.8	45.7	39.5	33.1	34.1	34.6	46.4	48.8	56.2
23-oct-2003	30.3	38.8	42.2	36.3	31.4	31.6	34.2	45.7	47.8	55.2
06-nov-2003	38.9	43.0	45.6	40.1	33.8	31.9	32.7	46.3	47.9	55.7
17-dic-2003	34.4	41.6	43.9	39.2	35.8	36.5	38.5	52.1	50.7	56.0
<b>Tubo 81</b>										
Fecha	Profundidad (cm)									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
17-jul-2003	34.7	34.0	45.5	61.9	78.4	79.9	75.8	73.6	84.4	102.9
29-jul-2003	34.4	33.9	49.7	62.6	74.1	73.1	72.7	72.3	73.8	91.3
05-ago-2003	34.9	35.0	49.1	60.9	72.9	74.4	71.7	70.0	71.4	87.2
12-ago-2003	33.2	32.7	49.0	54.9	72.3	73.7	71.1	69.8	70.2	85.6
19-ago-2003	33.8	32.7	48.8	48.5	72.6	73.0	70.6	69.1	68.7	83.8
26-ago-2003	34.2	34.0	49.8	56.6	72.7	73.8	71.3	70.1	68.9	84.7
02-sep-2003	32.7	33.1	48.3	47.2	67.5	71.8	68.6	67.0	65.8	76.8
09-sep-2003	36.8	39.9	68.9	70.4	71.8	72.7	69.6	68.4	67.1	66.1
19-sep-2003	36.6	36.0	54.3	71.1	72.2	72.8	70.3	68.8	66.1	66.1
02-oct-2003	35.4	35.6	61.1	71.7	73.4	73.6	70.7	68.6	66.5	66.1
23-oct-2003	33.1	33.8	49.4	63.6	71.4	72.6	68.9	67.1	65.5	65.2
06-nov-2003	66.3	71.2	69.9	71.5	72.8	73.5	70.3	68.8	67.0	66.7
17-dic-2003	34.4	47.5	70.0	71.3	72.6	73.2	69.7	68.3	66.9	65.8

<b>Tubo 84</b>									
Fecha	Profundidad (cm)								
	10	20	30	40	50				
17-jul-2003	51.9	29.9	5.2	0.7	69.1				
29-jul-2003	49.5	30.2	4.2	0.3	64.1				
05-ago-2003	51.3	32.9	4.1	0.3	65.5				
12-ago-2003	52.7	28.6	3.7	0.3	63.1				
19-ago-2003	52.1	30.4	3.7	0.2	61.8				
26-ago-2003	51.2	30.4	4.3	0.2	61.6				
02-sep-2003	50.8	28.2	2.8	0.2	59.0				
09-sep-2003	51.0	30.3	4.1	0.2	60.0				
19-sep-2003	52.2	30.6	3.5	0.2	58.6				
02-oct-2003	50.7	30.4	3.8	0.2	58.8				
23-oct-2003	50.2	25.7	3.4	0.2	55.7				
06-nov-2003	53.0	33.8	3.7	0.2	57.7				
17-dic-2003	51.1	27.8	3.5	0.2	59.6				
<b>Tubo 89</b>									
Fecha	Profundidad (cm)								
	10	20	30	40	50	60	70	80	90
29-jul-2003	12.5	26.5	29.3	27.6	26.6	30.9	40.2	54.5	67.5
05-ago-2003	12.1	27.3	29.5	27.1	26.6	30.8	40.2	55.1	67.4
12-ago-2003	11.2	27.0	29.5	27.5	26.6	30.1	38.4	52.3	66.6
19-ago-2003	13.2	26.4	27.9	26.7	26.3	29.8	39.0	53.5	66.5
26-ago-2003	27.4	30.0	28.1	26.9	26.7	29.8	38.6	52.9	67.2
02-sep-2003	18.7	29.1	27.5	25.7	25.7	28.9	38.1	52.6	65.9
09-sep-2003	32.6	37.4	31.7	27.0	25.9	29.2	38.2	53.1	66.7
19-sep-2003	29.1	34.3	30.2	26.6	26.3	30.0	40.7	54.1	66.6
02-oct-2003	33.0	35.2	30.2	26.2	26.1	28.9	37.8	52.7	66.1
23-oct-2003	27.2	33.7	30.2	26.2	24.9	28.3	37.1	51.8	66.1
06-nov-2003	34.0	35.2	29.4	25.3	24.6	28.3	37.2	51.8	66.1
17-dic-2003	31.2	32.9	28.6	24.8	24.3	28.1	39.7	58.5	66.4
<b>Tubo 90</b>									
Fecha	Profundidad (cm)								
	10	20	30	40	50	60	70		
29-jul-2003	65.0	27.6	32.6	34.7	40.6	71.6	70.9		
05-ago-2003	67.5	29.6	34.1	35.8	38.4	61.5	70.8		
12-ago-2003	67.8	29.4	34.1	35.4	37.8	44.2	68.8		
19-ago-2003	67.4	28.1	33.9	35.4	38.7	40.7	69.4		
26-ago-2003	67.9	28.5	33.1	34.8	37.0	39.3	68.7		
02-sep-2003	66.1	28.1	32.9	33.2	36.3	37.0	53.4		
09-sep-2003	66.2	27.5	32.9	34.3	41.0	71.4	68.7		
19-sep-2003	65.1	27.1	32.3	33.1	36.9	47.8	68.1		
02-oct-2003	66.1	28.2	32.8	34.7	42.1	71.2	68.2		
23-oct-2003	64.6	27.1	32.9	34.2	39.4	47.6	69.0		
06-nov-2003	65.9	27.9	33.6	33.8	50.2	71.1	68.4		
17-dic-2003	65.5	27.7	32.4	47.5	68.5	69.9	67.5		

<b>Tubo 91</b>									
Fecha	Profundidad (cm)								
	10	20	30	40	50	60	70	80	
06-nov-2003	64.5	67.8	66.3	70.1	69.3	70.3	70.3	66.6	
17-dic-2003	67.1	68.1	66.2	68.5	66.7	68.3	67.6	61.7	
<b>Tubo 95</b>									
Fecha	Profundidad (cm)								
	10	20	30	40	50	60	70	80	90
29-jul-2003	29.7	15.9	15.0	14.1	19.6	19.5	22.9	42.3	64.3
05-ago-2003	32.8	17.2	15.3	14.0	20.1	20.0	21.5	41.2	62.0
12-ago-2003	32.1	16.9	14.9	13.9	19.5	19.2	21.2	40.7	61.5
19-ago-2003	31.7	16.7	14.5	13.9	19.9	19.3	21.7	41.0	61.6
26-ago-2003	32.1	16.4	14.5	13.7	19.9	19.2	20.8	40.7	61.4
02-sep-2003	31.7	16.0	14.3	13.4	19.3	18.9	21.4	40.6	60.9
09-sep-2003	30.1	16.5	14.8	13.5	19.3	18.8	21.3	41.2	59.9
19-sep-2003	30.8	16.4	14.3	13.0	18.8	18.5	21.3	41.1	60.4
02-oct-2003	30.7	15.8	14.1	13.3	18.6	18.3	21.1	41.6	60.9
23-oct-2003	30.0	16.3	14.7	13.2	18.8	18.7	21.1	41.0	60.5
06-nov-2003	28.0	15.7	14.4	12.7	18.4	18.0	20.6	40.7	59.5
17-dic-2003	27.0	15.0	14.6	13.1	19.1	18.4	21.2	43.6	61.0
<b>Tubo 96</b>									
Fecha	Profundidad (cm)								
	10	20	30	40	50	60			
06-nov-2003	64.9	68.8	70.2	65.8	72.6	72.4			
17-dic-2003	63.8	67.3	69.1	61.6	69.4	66.9			
<b>Tubo 98</b>									
Fecha	Profundidad (cm)								
	10	20	30	40	50				
29-jul-2003	31.9	36.2	47.2	40.6	30.2				
05-ago-2003	32.1	38.0	47.1	44.9	30.6				
12-ago-2003	31.2	37.5	47.3	45.1	31.4				
19-ago-2003	36.2	41.6	48.5	42.9	28.5				
26-ago-2003	41.6	39.5	48.7	43.9	31.6				
02-sep-2003	40.9	38.9	47.0	42.1	30.6				
09-sep-2003	41.6	36.4	47.7	43.3	39.5				
19-sep-2003	39.9	37.4	48.4	45.2	32.5				
02-oct-2003	44.5	37.4	46.8	42.8	30.6				
23-oct-2003	41.7	36.8	45.5	41.4	29.7				
06-nov-2003	48.7	64.8	66.2	68.6	72.5				
17-dic-2003	43.9	43.1	49.9	44.9	31.9				



## ANEJO 7

### VALORES DE FRECUENCIA ESCALADA REGISTRADOS POR LA SONDA *DIVINER 2000* EN LA LAGUNA DE GALLOCANTA

A continuación se listan los valores de frecuencia escalada (*SF*) registrados por la sonda *Diviner 2000* en la laguna de Gallocanta, en los distintos tubos instalados, a varias profundidades y en distintas fechas.

<b>Tubo 80</b>										
Fecha	Profundidad (cm)									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
17-jul-2003	0.664	0.904	0.923	0.871	0.843	0.855	0.863	0.954	0.969	1.005
29-jul-2003	0.667	0.890	0.907	0.856	0.845	0.863	0.867	0.970	0.990	1.049
05-ago-2003	0.655	0.891	0.915	0.865	0.847	0.862	0.860	0.959	0.981	1.041
12-ago-2003	0.654	0.880	0.904	0.852	0.843	0.852	0.859	0.959	0.983	1.038
19-ago-2003	0.667	0.876	0.899	0.852	0.835	0.855	0.857	0.956	0.978	1.034
26-ago-2003	0.834	0.895	0.911	0.869	0.852	0.864	0.864	0.961	0.980	1.034
02-sep-2003	0.724	0.885	0.905	0.847	0.836	0.856	0.862	0.960	0.980	1.038
09-sep-2003	0.906	0.975	0.991	0.945	0.854	0.870	0.869	0.954	0.976	1.037
19-sep-2003	0.831	0.959	0.983	0.938	0.880	0.866	0.871	0.967	0.983	1.036
02-oct-2003	0.907	0.953	0.974	0.929	0.875	0.884	0.889	0.980	0.996	1.044
23-oct-2003	0.851	0.923	0.949	0.903	0.860	0.862	0.885	0.974	0.989	1.038
06-nov-2003	0.924	0.955	0.974	0.933	0.881	0.865	0.873	0.979	0.990	1.041
17-dic-2003	0.887	0.945	0.961	0.926	0.899	0.905	0.921	1.018	1.008	1.043
<b>Tubo 81</b>										
Fecha	Profundidad (cm)									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
17-jul-2003	0.889	0.884	0.973	1.077	1.165	1.173	1.153	1.141	1.194	1.275
29-jul-2003	0.887	0.883	1.002	1.081	1.144	1.138	1.136	1.135	1.142	1.226
05-ago-2003	0.891	0.892	0.998	1.072	1.138	1.145	1.131	1.122	1.130	1.207
12-ago-2003	0.876	0.872	0.998	1.036	1.135	1.142	1.128	1.121	1.123	1.200
19-ago-2003	0.882	0.872	0.996	0.994	1.136	1.138	1.126	1.118	1.115	1.191
26-ago-2003	0.885	0.884	1.003	1.046	1.136	1.142	1.129	1.123	1.117	1.196
02-sep-2003	0.873	0.875	0.993	0.985	1.109	1.132	1.115	1.106	1.100	1.157
09-sep-2003	0.907	0.932	1.117	1.125	1.132	1.136	1.121	1.114	1.107	1.102
19-sep-2003	0.905	0.900	1.032	1.128	1.134	1.137	1.124	1.116	1.101	1.102
02-oct-2003	0.896	0.897	1.073	1.131	1.140	1.141	1.126	1.115	1.103	1.102
23-oct-2003	0.876	0.882	1.000	1.087	1.130	1.136	1.117	1.107	1.098	1.096
06-nov-2003	1.103	1.129	1.122	1.130	1.137	1.141	1.124	1.116	1.106	1.104
17-dic-2003	0.887	0.987	1.122	1.129	1.136	1.139	1.121	1.113	1.106	1.100

<b>Tubo 84</b>									
Fecha	Profundidad (cm)								
	10	20	30	40	50				
17-jul-2003	1.017	0.847	0.474	0.244	1.118				
29-jul-2003	1.001	0.849	0.443	0.187	1.090				
05-ago-2003	1.012	0.874	0.440	0.177	1.098				
12-ago-2003	1.022	0.834	0.425	0.174	1.085				
19-ago-2003	1.018	0.852	0.425	0.169	1.077				
26-ago-2003	1.012	0.851	0.444	0.171	1.076				
02-sep-2003	1.009	0.830	0.386	0.162	1.061				
09-sep-2003	1.011	0.851	0.439	0.166	1.066				
19-sep-2003	1.019	0.854	0.417	0.162	1.058				
02-oct-2003	1.009	0.852	0.426	0.166	1.059				
23-oct-2003	1.005	0.805	0.411	0.159	1.041				
06-nov-2003	1.024	0.882	0.422	0.160	1.053				
17-dic-2003	1.011	0.827	0.417	0.160	1.064				
<b>Tubo 89</b>									
Fecha	Profundidad (cm)								
	10	20	30	40	50	60	70	80	90
29-jul-2003	0.634	0.813	0.841	0.824	0.815	0.856	0.934	1.033	1.109
05-ago-2003	0.627	0.822	0.843	0.819	0.814	0.855	0.934	1.037	1.108
12-ago-2003	0.612	0.819	0.843	0.823	0.815	0.849	0.920	1.019	1.104
19-ago-2003	0.645	0.812	0.828	0.815	0.812	0.846	0.925	1.027	1.103
26-ago-2003	0.822	0.847	0.829	0.818	0.815	0.846	0.921	1.023	1.107
02-sep-2003	0.725	0.839	0.824	0.805	0.805	0.838	0.918	1.021	1.100
09-sep-2003	0.871	0.912	0.864	0.818	0.808	0.840	0.918	1.024	1.104
19-sep-2003	0.839	0.886	0.850	0.815	0.812	0.848	0.938	1.031	1.104
02-oct-2003	0.875	0.894	0.850	0.811	0.809	0.838	0.915	1.022	1.101
23-oct-2003	0.821	0.881	0.850	0.811	0.797	0.831	0.909	1.016	1.102
06-nov-2003	0.884	0.894	0.842	0.801	0.794	0.832	0.910		
17-dic-2003	0.859	0.874	0.835	0.796	0.791	0.829	0.930	1.058	1.103
<b>Tubo 90</b>									
Fecha	Profundidad (cm)								
	10	20	30	40	50	60	70		
29-jul-2003	1.095	0.824	0.871	0.889	0.937	1.131	1.127		
05-ago-2003	1.109	0.844	0.884	0.899	0.920	1.075	1.127		
12-ago-2003	1.111	0.842	0.884	0.896	0.915	0.964	1.116		
19-ago-2003	1.109	0.830	0.883	0.895	0.922	0.937	1.119		
26-ago-2003	1.111	0.833	0.876	0.890	0.908	0.927	1.115		
02-sep-2003	1.102	0.830	0.874	0.876	0.903	0.909	1.026		
09-sep-2003	1.102	0.824	0.874	0.886	0.940	1.130	1.115		
19-sep-2003	1.096	0.820	0.869	0.875	0.908	0.989	1.112		
02-oct-2003	1.102	0.831	0.873	0.890	0.948	1.129	1.113		
23-oct-2003	1.093	0.820	0.874	0.885	0.928	0.988	1.117		
06-nov-2003	1.100	0.828	0.880	0.882	1.005	1.129	1.114		
17-dic-2003	1.098	0.826	0.870	0.987	1.114	1.122	1.109		

<b>Tubo 91</b>									
Fecha	Profundidad (cm)								
	10	20	30	40	50	60	70	80	
06-nov-2003	1.092	1.111	1.103	1.123	1.119	1.124	1.124	1.104	
17-dic-2003	1.107	1.112	1.102	1.114	1.104	1.113	1.110	1.077	
<b>Tubo 95</b>									
Fecha	Profundidad (cm)								
	10	20	30	40	50	60	70	80	90
29-jul-2003	0.845	0.687	0.673	0.659	0.736	0.735	0.775	0.950	1.091
05-ago-2003	0.873	0.705	0.678	0.658	0.742	0.741	0.759	0.942	1.078
12-ago-2003	0.867	0.701	0.672	0.657	0.735	0.731	0.755	0.937	1.075
19-ago-2003	0.863	0.698	0.666	0.657	0.739	0.733	0.762	0.940	1.076
26-ago-2003	0.867	0.694	0.666	0.654	0.739	0.732	0.750	0.938	1.075
02-sep-2003	0.863	0.688	0.664	0.650	0.732	0.727	0.758	0.937	1.072
09-sep-2003	0.849	0.696	0.671	0.650	0.733	0.726	0.756	0.942	1.066
19-sep-2003	0.855	0.693	0.662	0.643	0.726	0.722	0.756	0.941	1.069
02-oct-2003	0.854	0.686	0.661	0.648	0.724	0.720	0.755	0.945	1.072
23-oct-2003	0.848	0.693	0.669	0.645	0.726	0.725	0.755	0.940	1.070
06-nov-2003	0.828	0.683	0.665	0.637	0.721	0.716	0.748	0.937	1.064
17-dic-2003	0.819	0.673	0.668	0.645	0.730	0.721	0.755	0.960	1.072
<b>Tubo 96</b>									
Fecha	Profundidad (cm)								
	10	20	30	40	50	60			
06-nov-2003	1.095	1.116	1.123	1.100	1.136	1.135			
17-dic-2003	1.089	1.108	1.118	1.076	1.119	1.106			
<b>Tubo 98</b>									
Fecha	Profundidad (cm)								
	10	20	30	40	50				
29-jul-2003	0.865	0.902	0.985	0.937	0.849				
05-ago-2003	0.867	0.917	0.984	0.969	0.854				
12-ago-2003	0.859	0.913	0.986	0.970	0.860				
19-ago-2003	0.902	0.944	0.994	0.954	0.833				
26-ago-2003	0.945	0.929	0.996	0.961	0.862				
02-sep-2003	0.940	0.924	0.984	0.948	0.853				
09-sep-2003	0.944	0.903	0.988	0.958	0.928				
19-sep-2003	0.932	0.912	0.993	0.971	0.870				
02-oct-2003	0.966	0.912	0.982	0.954	0.853				
23-oct-2003	0.945	0.907	0.973	0.943	0.844				
06-nov-2003	0.996	1.094	1.102	1.115	1.136				
17-dic-2003	0.962	0.956	1.003	0.969	0.865				



## ANEJO 8

### VALORES DE HUMEDAD VOLUMÉTRICA DE SUELO EN LA LAGUNA DE GALLOCANTA OBTENIDOS TRAS APLICAR LAS ECUACIONES DE CALIBRACIÓN RESPECTIVAS

A continuación se listan los valores de humedad volumétrica de suelo (mm) en la laguna de Gallocanta obtenidos en los distintos tubos instalados, a varias profundidades y en distintas fechas, tras aplicar las ecuaciones de calibración respectivas (Tabla 8). No se incluyen los tubos 91 y 96 porque para ellos no se determinó una ecuación de calibración. Los valores en rojo señalan aquellos que no están comprendidos en el rango ( $\theta_{FC}$ ,  $0.5 \theta_{WP}$ ) que es que se utiliza para determinar el agua evaporable total [ecuación (11)]; los valores de  $\theta_{FC}$  y  $\theta_{WP}$  se listan en la Tabla 4.

<b>Tubo 80</b>										
Fecha	Profundidad (cm)									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
17-jul-2003	9.6	16.2	16.6	15.3	14.8	15.3	15.5	18.0	18.5	19.9
29-jul-2003	9.7	15.7	16.2	14.7	14.4	14.9	15.0	18.1	18.7	20.6
05-ago-2003	9.4	15.7	16.4	14.9	14.4	14.8	14.8	17.7	18.4	20.4
12-ago-2003	9.4	15.4	16.1	14.6	14.3	14.6	14.8	17.7	18.5	20.3
19-ago-2003	9.7	15.3	15.9	14.6	14.1	14.6	14.7	17.6	18.3	20.1
26-ago-2003	14.1	15.8	16.3	15.1	14.6	14.9	14.9	17.8	18.4	20.1
02-sep-2003	11.1	15.5	16.1	14.4	14.1	14.7	14.8	17.8	18.4	20.3
09-sep-2003	16.1	18.2	18.7	17.3	14.6	15.1	15.1	17.6	18.3	20.2
19-sep-2003	14.0	17.7	18.5	17.1	15.4	15.0	15.1	18.0	18.5	20.2
02-oct-2003	16.2	17.6	18.2	16.8	15.2	15.5	15.6	18.4	18.9	20.4
23-oct-2003	14.5	16.6	17.4	16.0	14.8	14.9	15.5	18.2	18.7	20.2
06-nov-2003	16.7	17.6	18.2	17.0	15.4	14.9	15.2	18.4	18.7	20.3
17-dic-2003	15.6	17.3	17.8	16.7	15.9	16.1	16.6	19.6	19.3	20.4
<b>Tubo 81</b>										
Fecha	Profundidad (cm)									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
17-jul-2003	29.1	29.4	37.2	45.3	48.3	48.3	47.4	47.7	48.8	54.4
29-jul-2003	28.9	28.5	38.0	43.7	47.9	47.6	47.5	47.3	47.8	53.1
05-ago-2003	29.3	29.3	37.7	43.1	47.5	48.0	47.1	46.5	47.0	52.0
12-ago-2003	28.0	27.6	37.7	40.5	47.3	47.8	46.9	46.5	46.6	51.5
19-ago-2003	28.5	27.6	37.6	37.4	47.4	47.6	46.7	46.2	46.1	51.0
26-ago-2003	28.8	28.6	38.1	41.3	47.5	47.9	47.0	46.6	46.1	51.3
02-sep-2003	27.7	27.9	37.3	36.8	45.6	47.1	46.0	45.4	45.0	48.8
09-sep-2003	30.6	32.6	46.1	46.7	47.1	47.5	46.4	46.0	45.5	45.1
19-sep-2003	30.4	30.0	40.2	46.9	47.3	47.5	46.7	46.1	45.1	45.1
02-oct-2003	29.7	29.8	43.2	47.1	47.7	47.8	46.8	46.0	45.3	45.1
23-oct-2003	28.0	28.5	37.9	44.1	47.0	47.4	46.1	45.5	44.9	44.8
06-nov-2003	45.2	47.0	46.5	47.1	47.5	47.7	46.7	46.1	45.4	45.3
17-dic-2003	28.9	36.9	46.5	47.0	47.4	47.6	46.4	45.9	45.4	45.0

<b>Tubo 84</b>									
Fecha	Profundidad (cm)								
	10	20	30	40	50				
17-jul-2003	32.0	30.8	27.4	24.0	32.6				
29-jul-2003	31.9	30.8	27.0	22.7	32.4				
05-ago-2003	31.9	31.0	27.0	22.5	32.5				
12-ago-2003	32.0	30.7	26.8	22.4	32.4				
19-ago-2003	32.0	30.9	26.8	22.3	32.3				
26-ago-2003	31.9	30.8	27.1	22.3	32.3				
02-sep-2003	31.9	30.7	26.3	22.1	32.3				
09-sep-2003	31.9	30.8	27.0	22.2	32.3				
19-sep-2003	32.0	30.9	26.7	22.1	32.2				
02-oct-2003	31.9	30.9	26.8	22.2	32.2				
23-oct-2003	31.9	30.5	26.6	22.0	32.1				
06-nov-2003	32.0	31.1	26.8	22.0	32.2				
17-dic-2003	31.9	30.7	26.7	22.0	32.3				
<b>Tubo 89</b>									
Fecha	Profundidad (cm)								
	10	20	30	40	50	60	70	80	90
29-jul-2003	15.4	24.8	26.1	25.3	24.9	26.7	30.0	33.8	36.5
05-ago-2003	15.0	25.2	26.1	25.1	24.8	26.7	30.0	34.0	36.5
12-ago-2003	14.1	25.1	26.1	25.3	24.9	26.4	29.5	33.3	36.3
19-ago-2003	16.1	24.8	25.5	24.9	24.7	26.3	29.6	33.6	36.3
26-ago-2003	25.2	26.3	25.5	25.0	24.9	26.3	29.5	33.5	36.4
02-sep-2003	20.5	26.0	25.3	24.4	24.4	25.9	29.4	33.4	36.2
09-sep-2003	27.4	29.1	27.1	25.0	24.5	26.0	29.4	33.5	36.3
19-sep-2003	26.0	28.1	26.4	24.9	24.7	26.4	30.2	33.7	36.3
02-oct-2003	27.6	28.4	26.4	24.7	24.6	25.9	29.3	33.4	36.2
23-oct-2003	25.2	27.8	26.4	24.7	24.0	25.6	29.0	33.2	36.2
06-nov-2003	27.9	28.4	26.1	24.2	23.9	25.7	29.0		
17-dic-2003	26.9	27.5	25.8	24.0	23.7	25.5	29.9	34.7	36.3
<b>Tubo 90</b>									
Fecha	Profundidad (cm)								
	10	20	30	40	50	60	70		
29-jul-2003	34.0	35.1	34.9	34.8	34.6	33.8	33.9		
05-ago-2003	33.9	35.0	34.8	34.8	34.7	34.0	33.9		
12-ago-2003	33.9	35.0	34.8	34.8	34.7	34.5	33.9		
19-ago-2003	33.9	35.1	34.8	34.8	34.7	34.6	33.9		
26-ago-2003	33.9	35.1	34.9	34.8	34.7	34.6	33.9		
02-sep-2003	33.9	35.1	34.9	34.9	34.8	34.7	34.2		
09-sep-2003	33.9	35.1	34.9	34.8	34.6	33.8	33.9		
19-sep-2003	34.0	35.1	34.9	34.9	34.7	34.4	33.9		
02-oct-2003	33.9	35.1	34.9	34.8	34.6	33.9	33.9		
23-oct-2003	34.0	35.1	34.9	34.8	34.6	34.4	33.9		
06-nov-2003	34.0	35.1	34.9	34.8	34.3	33.9	33.9		
17-dic-2003	34.0	35.1	34.9	34.4	33.9	33.9	33.9		

<b>Tubo 95</b>									
Fecha	Profundidad (cm)								
	10	20	30	40	50	60	70	80	90
29-jul-2003	37.5	35.7	35.6	35.4	36.3	36.3	36.7	38.5	39.6
05-ago-2003	37.8	35.9	35.6	35.4	36.4	36.4	36.6	38.4	39.5
12-ago-2003	37.7	35.9	35.5	35.4	36.3	36.2	36.5	38.4	39.5
19-ago-2003	37.7	35.9	35.5	35.3	36.3	36.3	36.6	38.4	39.5
26-ago-2003	37.7	35.8	35.5	35.3	36.3	36.3	36.5	38.4	39.5
02-sep-2003	37.7	35.7	35.4	35.3	36.3	36.2	36.6	38.4	39.5
09-sep-2003	37.5	35.8	35.5	35.3	36.3	36.2	36.5	38.4	39.4
19-sep-2003	37.6	35.8	35.4	35.2	36.2	36.1	36.5	38.4	39.5
02-oct-2003	37.6	35.7	35.4	35.2	36.2	36.1	36.5	38.4	39.5
23-oct-2003	37.5	35.8	35.5	35.2	36.2	36.2	36.5	38.4	39.5
06-nov-2003	37.3	35.7	35.4	35.1	36.1	36.1	36.4	38.4	39.4
17-dic-2003	37.2	35.6	35.5	35.2	36.2	36.1	36.5	38.6	39.5
<b>Tubo 98</b>									
Fecha	Profundidad (cm)								
	10	20	30	40	50				
29-jul-2003	19.2	20.6	23.8	21.9	18.6				
05-ago-2003	19.3	21.1	23.7	23.1	18.8				
12-ago-2003	19.0	21.0	23.8	23.2	19.0				
19-ago-2003	20.6	22.2	24.1	22.6	18.1				
26-ago-2003	22.2	21.6	24.2	22.8	19.1				
02-sep-2003	22.0	21.4	23.7	22.3	18.8				
09-sep-2003	22.2	20.6	23.9	22.7	21.6				
19-sep-2003	21.7	21.0	24.1	23.2	19.4				
02-oct-2003	23.0	21.0	23.6	22.5	18.8				
23-oct-2003	22.2	20.8	23.3	22.1	18.5				
06-nov-2003	24.2	28.2	28.5	29.1	30.0				
17-dic-2003	22.8	22.6	24.5	23.1	19.2				