



MINISTERIO
DE CIENCIA
Y TECNOLOGÍA



Instituto Geológico
y Minero de España



MINISTERIO
DE MEDIO AMBIENTE

CONFEDERACIÓN
HIDROGRÁFICA
DEL SEGURO

OFICINA DE
PLANIFICACIÓN
HIDROLÓGICA



Región de Murcia
Consejería de Turismo
y Ordenación del Territorio

ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DE LA UNIDAD VEGA MEDIA Y BAJA DEL SEGURO

Tomo VIII

ANEJO 5. RECARGA DEL ACUÍFERO

2002

ÍNDICE GENERAL DE TOMOS

TOMO I	MEMORIA
TOMO II	ANEJO 1. INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA (1)
TOMO III	ANEJO 1. INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA (2)
TOMO IV	ANEJO 2. LITOLOGÍA Y GEOMETRÍA DEL ACUÍFERO. CARTOGRAFÍA HIDROGEOLOGICA (1)
TOMO V	ANEJO 2. LITOLOGÍA Y GEOMETRIA DEL ACUÍFERO. CARTOGRAFÍA HIDROGEOLOGICA (2)
TOMO VI	ANEJO 3. FUNCIONAMIENTO HIDRODINÁMICO
TOMO VII	ANEJO 4. CARACTERÍSTICAS HIDRODINÁMICAS: ENSAYOS
TOMO VIII	ANEJO 5. RECARGA DEL ACUÍFERO
TOMO IX	ANEJO 6. EXPLOTACIÓN Y USOS DEL AGUA
TOMO X	ANEJO 7. HIDROQUÍMICA
TOMO XI	ANEJO 8. PROSPECCIÓN GEOFÍSICA
TOMO XII	ANEJO 9. EVALUACIÓN DE SUPERFICIES AGRÍCOLAS EN LAS VEGAS MEDIA Y BAJA DEL SEGURA CON IMÁGENES DE SATELITE LANDSAT ETM+
TOMO XIII	ANEJO 10. INVESTIGACIÓN DE PLAGUICIDAS
TOMO XIV	ANEJO 11. MODELO DE FLUJO SUBTERRÁNEO

INDICE DE L TOMO

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
2.	DISPOSITIVOS DE OBSERVACIÓN Y CONTROLES REALIZADOS.....	4
2.1.	PARCELAS PILOTO	5
2.1.1.	Parcela PI1	5
2.1.2.	Parcela PI2.....	9
2.1.3.	Parcela PI3.....	12
2.2.	CONTROL DE RIEGOS	16
2.2.1.	Parcela PI1.....	16
2.2.2.	Parcela PI2.....	19
2.2.3.	Parcela PI3.....	19
3.	RECARGA POR INFILTRACIÓN DE LLUVIA	29
3.1.	PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO	30
3.2.	APLICACIÓN A LA VEGA MEDIA.....	39
3.2.1.	Entradas: lluvia útil.....	39
3.2.2.	Salidas: piezometría	39
3.2.3.	Proceso de calibración de la deconvolución	40
3.2.4.	Resultados del cálculo con Thordos	44
4.	RECARGA POR RETORNO DE RIEGOS.....	45
4.1.	METODOLOGÍA.....	46
4.2.	MODELIZACIÓN	48
4.2.1.	Geometría de los modelos.....	48
4.2.2.	Condiciones iniciales	49
4.2.3.	Condiciones de contorno	52
4.2.4.	Simulación del riego (régimen transitorio).....	53
4.2.5.	Calibración.....	53
4.2.6.	Resultados de la modelización	58

5. APÉNDICE 1. FICHERO DE RESULTADOS DEL PROGRAMA THORDOS. PERIODO 1967/68-1999/00 (ARCHIVO INFORMÁTICO)
6. APÉNDICE A5.2. FICHERO DE SALIDA DEL PROGRAMA GMDUJEX (ARCHIVO INFORMÁTICO)
7. APÉNDICE A5.3. FICHERO DE SALIDA DEL PROGRMA MODFOLW. PARCELA PI-1: RÉGIMEN TRANSITORIO (ARCHIVO INFORMÁTICO)
8. APÉNDICE A5.4. FICHERO DE SALIDA DEL PROGRMA MODFOLW. PARCELA PI-3: RÉGIMEN TRANSITORIO (ARCHIVO INFORMÁTICO)

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro A5.1	Parcela de infiltración PI1. Características de los sondeos.....	5
Cuadro A5.2	Parcela de infiltración PI2. Características de los sondeos.....	12
Cuadro A5.3	Parcela de infiltración PI3. Características de los sondeos.....	14
Cuadro A5.4	Control de riego en la parcela PI1.....	17
Cuadro A5.5	Control de riego en la parcela PI2.....	20
Cuadro A5.6	Control de riego en la parcela PI3.....	23
Cuadro A5.7	Control piezométrico en la parcela PI1	26
Cuadro A5.8	Control piezométrico en la parcela PI2	27
Cuadro A5.9	Control piezométrico en la parcela PI3	28
Cuadro A5.10	Parámetros hidrometeorológicos característicos de la Vega Media. Periodo 1968/68-1999/00	44
Cuadro A5.11	Valores de partida para la modelización.....	51
Cuadro A5.12	Medidas diarias de N.P. para calibración del régimen transitorio	54
Cuadro A5.13	Ajuste final en la parcela PI1.....	57
Cuadro A5.14	Ajuste final en la parcela PI2.....	57
Cuadro A5.15	Recarga por infiltración de exceso de riegos.....	58
Cuadro A5.16	Permeabilidad y porosidad obtenidas de la calibración	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. A5.1	Situación de parcelas piloto para el estudio de la infiltración.....	6
Fig. A5.2	Parcela de infiltración PI1. Croquis y esquema de acondicionamiento.....	7
Fig. A5.3	Parcela de infiltración PI2. Croquis y esquema de acondicionamiento.....	11
Fig. A5.4	Parcela de infiltración PI3. Croquis y esquema de acondicionamiento.....	15
Fig. A5.5	Control de la infiltración en la parcela PI1 (cítricos y frutales). Evolución de la superficie libre.....	18
Fig. A5.6	Control de la infiltración en la parcela PI2 (cítricos). Evolución de la superficie libre.....	21
Fig. A5.7	Control de la infiltración en la parcela PI3 (hebáceos). Evolución de la superficie libre.....	24
Fig. A5.8	Evolución piezométrica en la parcela PI1	24
Fig. A5.9	Evolución piezométrica en la parcela PI2.....	25
Fig. A5.10	Evolución piezométrica en la parcela PI3	25
Fig. A5.11	Evolución del nivel piezométrico medida frente a calculada	42
Fig. A5.12	Respuesta impulsional del sistema que modeliza la variación del nivel piezométrico debida a la lluvia útil en la parcela PI1.....	43
Fig. A5.13	Evolución de la superficie libre en la parcela PI1	46
Fig. A5.14	Evolución de la superficie libre en la parcela PI3	47
Fig. A5.15	Geometría del modelo para la simulación del riego Parcela PI1	48
Fig. A5.16	Situación previa al riego en la parcela PI1.....	50
Fig. A5.17	Situación previa al riego en la parcela PI3.....	51
Fig. A5.18	Situación de las condiciones de contorno –celdas-dren–	52

Fig. A5.19	N.P. medido y calculado en PI1 al inicio de la calibración	55
Fig. A5.20	N.P. medido y calculado en PI3 al inicio de la calibración	55
Fig. A5.21	N.P. medido y calculado en PI1 al final de la calibración	56
Fig. A5.22	N.P. medido y calculado en PI3 al final de la calibración	56
Fig. A5.23	Piezometría antes del riego en la zona de influencia de la parcela PI1	59
Fig. A5.24	Piezometría 1 día después del riego en la zona de influencia de la parcela PI1	59
Fig. A5.25	Piezometría 5 días después del riego en la zona de influencia de la parcela PI1	59
Fig. A5.26	Piezometría 15 días después del riego en la zona de influencia de la parcela PI1	59
Fig. A5.27	Piezometría antes del riego en la zona de influencia de la parcela PI3	60
Fig. A5.28	Piezometría el día del riego en la zona de influencia de la parcela PI3	60
Fig. A5.29	Piezometría 2 días después del riego en la zona de influencia de la parcela PI3	60
Fig. A5.30	Piezometría 1 semana después del riego en la zona de influencia de la parcela PI3	60

1. INTRODUCCIÓN

La evaluación del término “recarga” es tradicionalmente uno de los puntos débiles en el establecimiento de los balances hídricos de los acuíferos, puesto que se basan en formulaciones empíricas con escaso contraste experimental –caso de la estimación de lluvia útil y de su fracción que se infiltra efectivamente– o en aproximaciones basadas en estimaciones más o menos objetivas que dan lugar a “cifras mágicas” que se mantienen en el tiempo sin apenas contraste experimental –tal como ocurre con la infiltración por retornos por exceso de riego–.

Uno de los objetivos de mayor importancia planteados en el Estudio fue precisamente el de solventar la clásica imprecisión en la evaluación de la infiltración por exceso de riegos en el acuífero de la Vega Media del Segura, para lo cual, sobre la base de una experiencia anterior que resultó fallida por condiciones de aplicación inadecuadas –ref. VMyB-13–, se diseñó *ex profeso* una metodología cuyos rasgos fundamentales son los siguientes:

- Selección de 3 parcelas de riego representativas de los cultivos y del tipo de suelo de la vega.
- Realización de 3 sondeos mecánicos por parcela, que captasen sólo los primeros metros del tramo acuífero somero.
- Realización de ensayos de hidrodinámica subterránea en los sondeos para la determinación de las características hidrodinámicas del acuífero: K_h , K_v –en el caso de que fuera aplicable el método de Neuman para la interpretación de los ensayos– y m_e .
- Seguimiento del riego, mediante el control riguroso del volumen de agua aplicada (mediante aforos en las acequias de entrada a las parcelas) y de la evolución de la superficie libre en los tres sondeos.

Con los dispositivos de control descritos debería ser factible el cálculo del excedente de riego infiltrado, es decir, la fracción de agua aplicada al riego no evapotranspirada. Dicha fracción se distribuye en los dos conceptos siguientes:

- Aumento de la reserva de agua almacenada en el acuífero (de valor igual al producto de un volumen, por una porosidad eficaz evaluada a partir de los ensayos hidrodinámicos realizados).

- Aumento del caudal de la circulación subterránea local, que debe reflejarse en un aumento del gradiente hidráulico, cuyo valor es igual a la pendiente de la superficie libre, para cuyo cálculo fiable se contaría con 3 sondeos.

Para la evaluación final del retorno de riego, a la vista las características de las evoluciones piezométricas observadas y de los datos hidrodinámicos disponibles, se optó por la realización de sendos modelos matemáticos del flujo, de planteamiento sencillo, en dos de las parcelas experimentales.

Aprovechando la circunstancia de que se disponía de unos excelentes dispositivos de control en el acuífero somero, en el inicio del otoño de 2000 se planteó llevar a cabo un seguimiento piezométrico frecuente en los sondeos de control acondicionados en las parcelas con el fin de evaluar la infiltración de lluvia. De esta forma, pudo obtenerse un registro piezométrico detallado de la elevación de la superficie libre subsiguiente a las fuertes precipitaciones que tuvieron lugar en el mes de octubre.

Para explotar la citada información piezométrica, se planteó la realización de un proceso de cálculo basado en la realización de un ajuste lluvia-piezometría por deconvolución como medio idóneo para calibrar la reserva útil del acuífero –parámetro desconocido habitualmente– y posibilitar así una mejor evaluación de la recarga por infiltración de lluvia.

En los capítulos siguientes se describen con detalle los dispositivos de control, los registros de datos, las metodologías de cálculo aplicadas y los resultados obtenidos en los dos procesos de modelización que han permitido evaluar la recarga del acuífero de la Vega Media.

2. DISPOSITIVOS DE OBSERVACIÓN Y CONTROLES REALIZADOS

2.1. PARCELAS PILOTO

Para los controles de riegos y de la evolución piezométrica precisos para llevar a la práctica el planteamiento metodológico esbozado anteriormente, fueron seleccionadas 3 parcelas de regadío después de un recorrido detallado por la vega, en búsqueda de emplazamientos que resultasen accesibles para la realización de sondeos piezométricos de control y fuera posible en ellos la medida del volumen de agua aplicada en cada riego, además de que sus propietarios facilitasen los oportunos permisos. Como resultado final de la selección se eligieron 3 parcelas piloto, dos con cultivos leñosos y una con cultivos herbáceos, en las que se ha efectuado un seguimiento detallado del agua aplicada y de la evolución de la superficie libre del acuífero.

Seguidamente se describen las características de las parcelas piloto, cuya situación se indica en la figura A5.1.

2.1.1. Parcela PI1

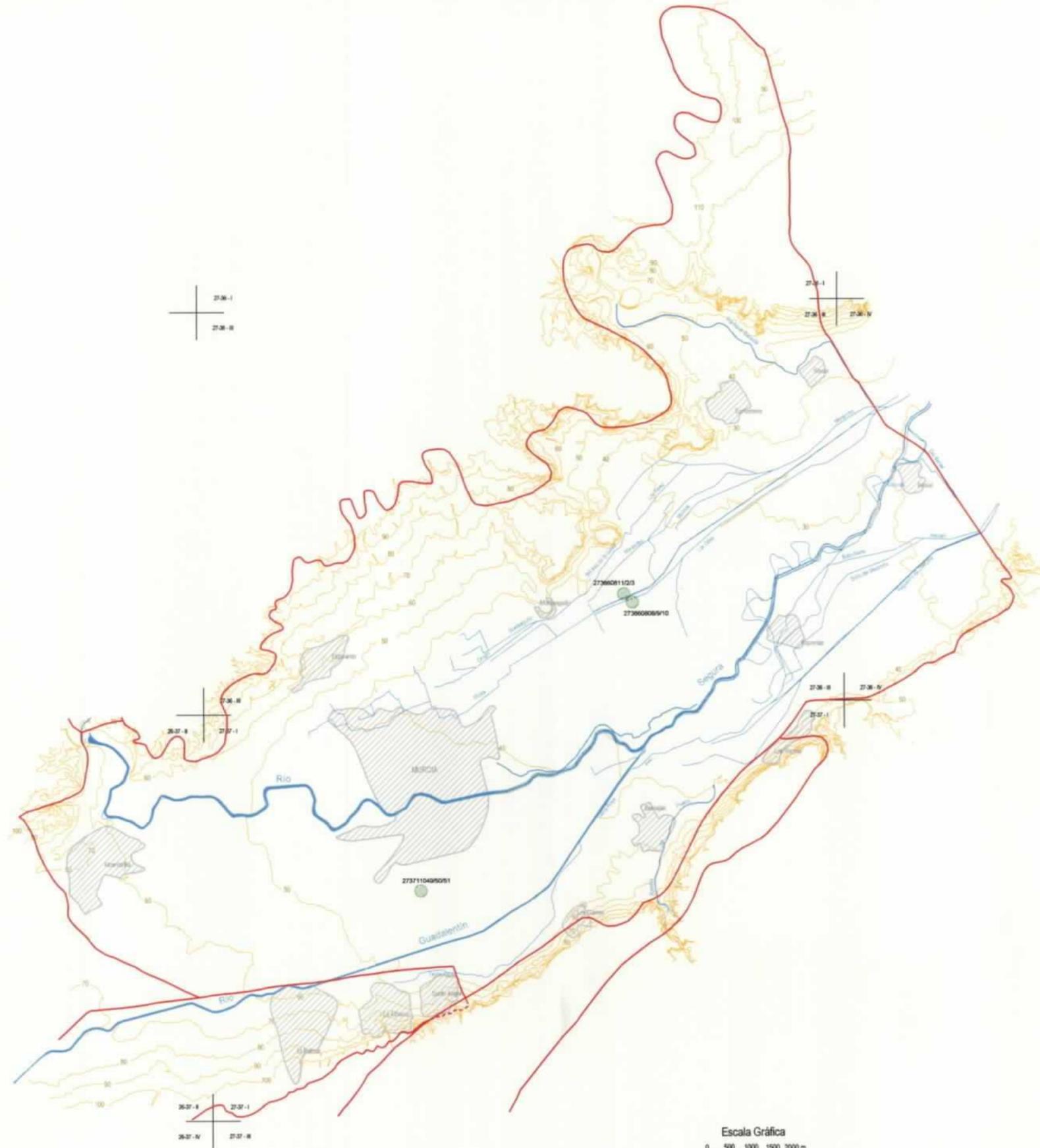
Está localizada a unos 2 km al sur del núcleo urbano de Murcia, en la pedanía de Patiño. Las coordenadas UTM aproximadas del emplazamiento son: X = 664 096, Y = 4 230 540, y su altitud aproximada es de 46,5 m s.n.m. Esta parcela tiene una superficie de 2,5 tahullas (unos 2795 m²) y en ella se cultivan cítricos (naranjos y limoneros) y frutales diversos. En la fig. A5.2 se adjunta un croquis a escala de la parcela y del dispositivo de control piezométrico.

Cuenta con un canal de entrada de agua en el que es posible efectuar aforos con molinete y se acondicionó con 3 piezómetros para el seguimiento de la evolución de la superficie libre del acuífero, cuyas características se resumen en el cuadro A5.1:

Cuadro A5.1. Parcela de infiltración PI1. Características de los sondeos

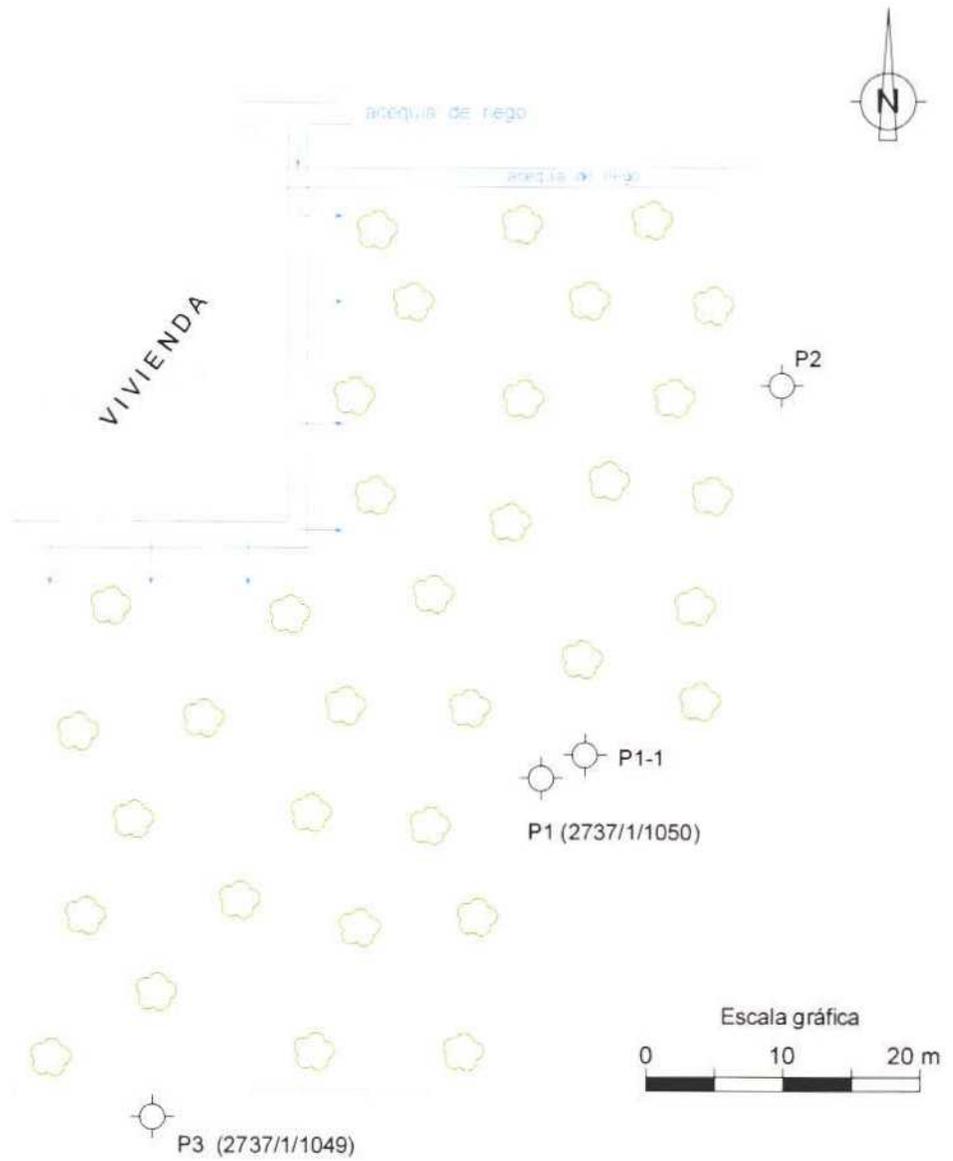
Sondeo	Prof. (m)	$\Phi_{\text{perf.}}$ (mm)	Entubación		Cota RM (m s.n.m.)
			Φ (mm)	Tipo	
P1	7,00	165	50/60	PVC-U (0-5, ciego; 5-7, filtro)	46,85
P2	7,00	165	"	PVC-U (0-5, ciego; 5-7, filtro)	
P3	7,00	165	"	PVC-U (0-5, ciego; 5-7, filtro)	46,79
P1-1	6,95	90	40	PVC (0-5, ciego; 5-6,95, ranurado)	46,87

SITUACIÓN DE LAS PARCELAS PILOTO PARA EL ESTUDIO DE LA INFILTRACIÓN



LEYENDA	
 2736081123	Emplazamiento de parcelas para el estudio de la infiltración
	Limite del acuífero de la Vega Media

PARCELA DE INFILTRACIÓN P1 CROQUIS Y ESQUEMA DE ACONDICIONAMIENTO



SITUACIÓN UTM:

x= 664 100

y=4203 540

Fig. A5.2



Vistas general y parcial (con el piezómetro P3 en primer plano) de la parcela PI1

Los tres sondeos tienen 7 metros de profundidad, fueron perforados con diámetro de 110 mm y acondicionados con tubería filtrante de PVC Preussag de 50/60 mm de diámetro y macizo de gravilla silícea de 3-5 mm de diámetro, con objeto, no sólo de servir como puntos de observación del nivel, sino de poder efectuar en ellos ensayos de hidrodinámica subterránea con el fin de evaluar la permeabilidad y la porosidad del acuífero en la zona, datos imprescindibles para evaluar el agua realmente infiltrada después de los riegos.

- La columna litológica atravesada por los sondeos está formada por:
 - De 0 a 4,5 m: limos arcillosos.
 - De 4,5 a 7,0 m: arcillas.

A 1 m de distancia del sondeo localizado en el centro de la parcela –PI1 (2737/1/1050)– se construyó un piezómetro auxiliar –PI1-1– para apoyar la determinación de la porosidad eficaz mediante bombeo de ensayo, que finalmente no fue posible porque la baja permeabilidad del acuífero somero en la zona donde está ubicada la parcela impide la realización práctica de un bombeo de ensayo: la extracción de agua con un caudal de unas pocas centésimas de litros por segundo llega a vaciar el sondeo PI1 al cabo de unos 5 minutos de bombeo. La caracterización hidrodinámica se ha realizado a base de ensayos de tipo *bail test*.

2.1.2. Parcela PI2

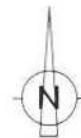
Está situada a unos 6 km al nordeste de Murcia y 1,5 km al este de Monteagudo, en el carril Orilla del Azarbe, en la margen derecha del azarbe Mayor. Las coordenadas UTM del emplazamiento son X = 669 070, Y = 4 210 150 y su altitud aproximada es de 36 m s.n.m. Se dedica exclusivamente al cultivo de cítricos (limoneros).

La parcela tiene forma rectangular, de dimensiones 55 x 24,5 m, es decir, una superficie de unos 1347,5 m². Cuenta con un canal de entrada de agua en el que es posible efectuar aforos con molinete, y se acondicionó con 3 piezómetros, con disposición triangular (están implantados en tres de los vértices) para el seguimiento de la evolución de la superficie libre del acuífero, tal como se refleja en el croquis de la fig. A5.3. Las características de los sondeos, cuya construcción es idéntica a los de la parcela PI1, se resumen en el cuadro A5.2.



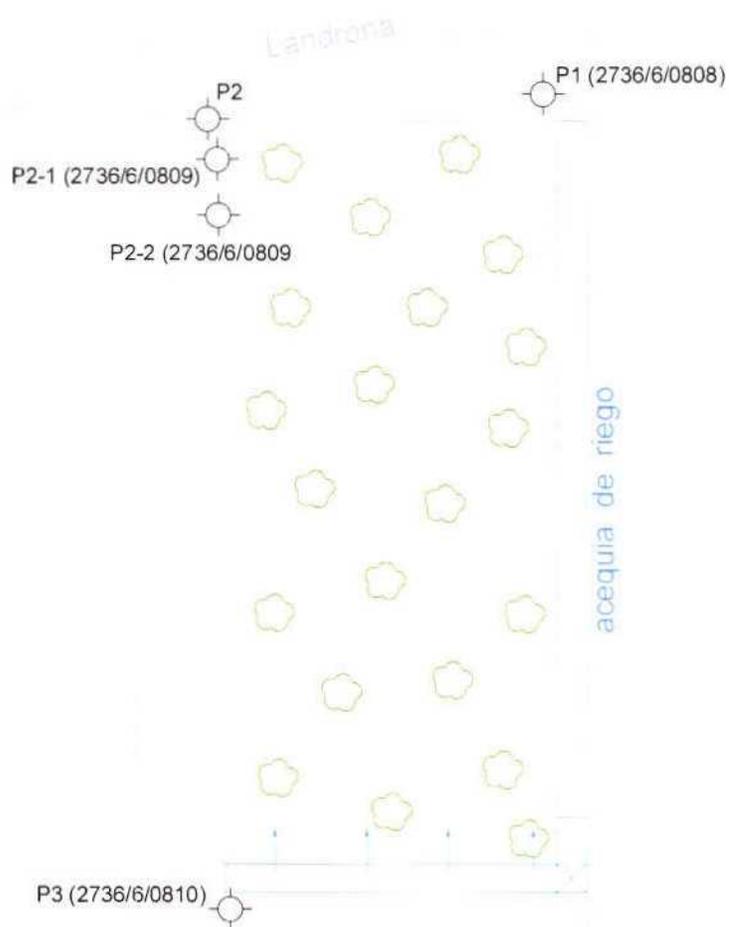
Vistas general y parcial de la parcela PI2 durante el control de riego

PARCELA DE INFILTRACIÓN PI2 CROQUIS Y ESQUEMA DE ACONDICIONAMIENTO



Orilla del azarbe

azarbe Mayor



SITUACIÓN UTM:

x= 669 100

y=4210 150



Fig. A5.3

Cuadro A5.2. Parcela de infiltración PI2. Características de los sondeos

Sondeo	Prof. (m)	$\Phi_{\text{perf.}}$ (mm)	Entubación		Cota RM (m s.n.m.)
			Φ (mm)	Tipo	
P1	3,00	110	50/60	PVC-U (0-1, ciego; 1-3, filtro)	36,20
P2	3,00	"	"	PVC-U (0-1, ciego; 1-3, filtro)	
P3	4,00	"	"	PVC-U (0-1, ciego; 1-4, filtro)	36,33
P2-1	3,25	90	40	PVC (0-1, ciego; 1-3,25, ranurado)	36,39
P2-2	3,30	"	"	PVC (0-1, ciego; 1-3,3, ranurado)	36,38

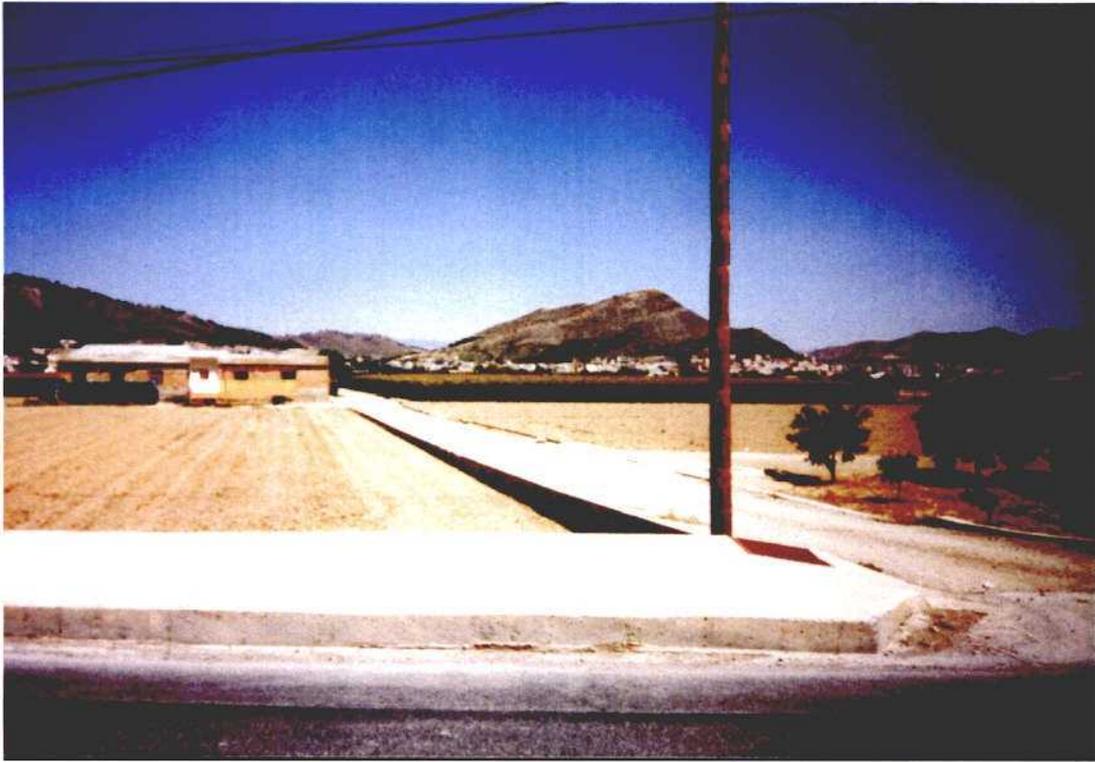
Junto al sondeo P2, posteriormente desaparecido, se perforaron dos sondeos piezométricos –PI2-1 y PI2-2 (2736/6/0809)– situados a distancias respectivas de 2,50 m y 5,45 m, para apoyar la determinación de la porosidad eficaz mediante bombeo de ensayo, que finalmente no fue posible porque la baja permeabilidad del acuífero somero en la zona donde está ubicada la parcela impide la realización práctica de un bombeo de ensayo: la extracción de agua con un caudal de unas pocas centésimas de litros por segundo llega a vaciar los sondeos al cabo de unos pocos minutos de bombeo. La caracterización hidrodinámica se ha realizado a base de ensayos de tipo *bail test*.

- La columna litológica atravesada por los sondeos está formada por:
 - De 0 a 2,0 m: limos arcillosos.
 - De 2,0 a 4,0 m: arcillas arenosas.

2.1.3. Parcela PI3

Está situada a la misma altura que la parcela PI2, a unos 6 km al nordeste de Murcia y 1,5 km al este de Monteagudo, en la Orilla del Azarbe, pero en la margen izquierda del azarbe Mayor. Las coordenadas UTM del emplazamiento son X = 668 900, Y = 4 210 300 y su altitud aproximada es de 36 m s.n.m. Se dedica al cultivo de herbáceos: en la época en que se controló el riego estaba sembrada de maíz, y posteriormente se cultivaron lechugas.

La parcela tiene forma irregular y está dividida en dos por una vereda perpendicular a la Orilla del Azarbe, y tiene una superficie total de 12 tahullas (unos 13 446 m²).



Vista general de la parcela PI3 desde la Orilla del Azarbe



Vista general de la parcela PI3 desde el límite norte
En primer plano equipo de perforación de piezómetros

Se acondicionó con 3 piezómetros de control para el seguimiento de la evolución de la superficie libre del acuífero, dispuestos de forma triangular, tal como se muestra en el croquis de la parcela que se muestra en la fig A5.4. Las características de los sondeos se resumen en el cuadro A5.3.

Cuadro A5.3. Parcela de infiltración PI3. Características de los sondeos

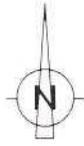
Sondeo	Prof. (m)	$\Phi_{\text{perf.}}$ (mm)	Entubación		Cota RM (m s.n.m.)
			Φ (mm)	Tipo	
P1	3,00	110	50/60	PVC-U (0-1, ciego; 1-3, filtro)	
P2	3,00	"	"	PVC-U (0-1, ciego; 1-3, filtro)	36,20
P3	3,00	"	"	PVC-U (0-1, ciego; 1-3, filtro)	
P2-1	2,80	90	40	PVC (0-1, ciego; 1-2,8, ranurado)	36,36
P2-2	3,25	"	"	PVC (0-1, ciego; 1-3,25, ranurado)	36,37

La columna litológica atravesada por los sondeos es la siguiente:

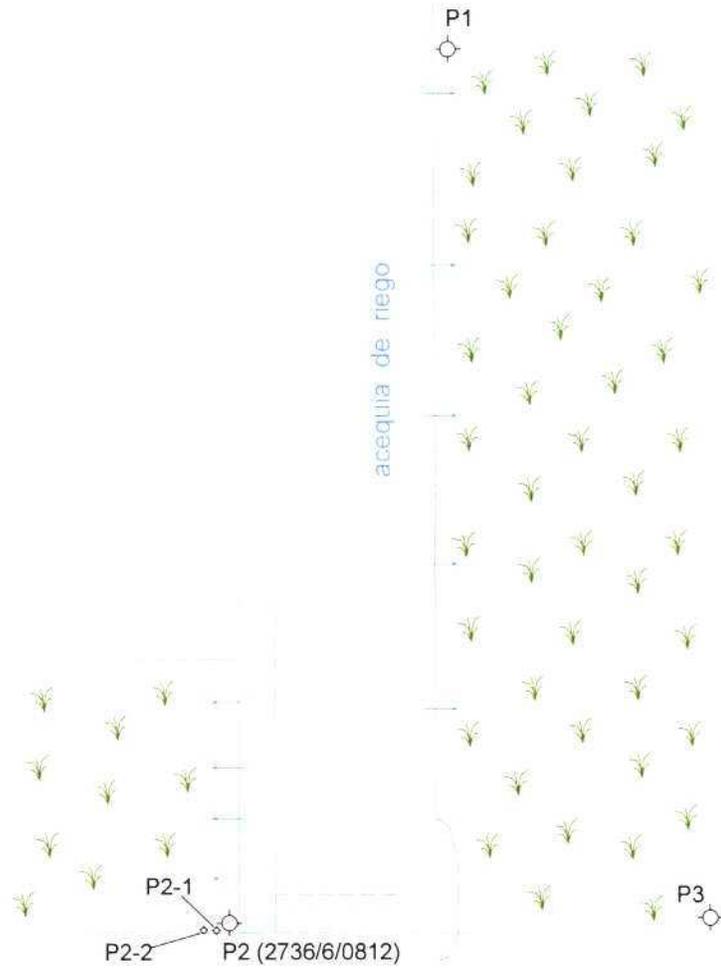
- De 0 a 1,5 m: limos arcillosos.
- De 1,5 a 3,0 m: arcillas arenosas.

A distancias de 2,20 m y 5,80 m, respectivamente, del sondeo P2 (2736/6/0812) se perforaron dos sondeos piezométricos –PI2-1 y PI2-2– situados a distancias respectivas de 2,50 m y 5,45 m, para apoyar la determinación de la porosidad eficaz mediante bombeo de ensayo, cuyos resultados se comentan en el Anejo 4.

PARCELA DE INFILTRACIÓN PI3 CROQUIS Y ESQUEMA DE ACONDICIONAMIENTO



SITUACIÓN UTM:
x= 668 900
y=4210 300



Orilla del azarbe

a PI2

azarbe Mayor →

Fig. A5.4

2.2. CONTROL DE RIEGOS

2.2.1. Parcela PI1

En esta parcela se controló el riego con agua superficial que tuvo lugar el 25 de julio de 2000 entre las 10.32 y las 15.40 h, en el que se aplicó un volumen total de 443,5 m³, evaluados a partir de 24 aforos del caudal entrante por el brazal que muere en la parcela. Para un mejor seguimiento de la evolución del nivel de la superficie libre, se efectuaron controles diarios de la profundidad del nivel de agua desde el día 10 de julio para conocer la tendencia previa del nivel. Desde que comenzó a entrar agua en la parcela, se aumentó la frecuencia de las medidas, tomando profundidades de nivel cada 30 minutos. A la vista de la evolución de los niveles, las medidas se fueron espaciando en el tiempo, aunque el control diario se mantuvo hasta el día 4 de agosto.

En el cuadro A5.4 se adjuntan las medidas realizadas y en la fig. A5.5 se han representado las evoluciones de la profundidad de la superficie libre del acuífero en los tres piezómetros de control.

La evolución observada muestra claramente la superposición de dos efectos. Desde el inicio de los controles, se aprecia una tendencia general progresivamente ascendente de la superficie libre en el acuífero, como consecuencia de la generalización de los aportes de agua a los cultivos durante la campaña de riegos tradicionales que se desarrolló en las vegas a partir del 15 de julio. A dicha tendencia general se superpone un aumento de pendiente brusco como consecuencia de la infiltración local del riego aplicado en la propia parcela. Tras el máximo, observado 2 días y medio después del inicio del riego, se produce un descenso exponencial que refleja la "asimilación" por el acuífero del domo de agua subterránea formado bajo la parcela.

El final del tramo descendente se produce cuando la elevación general de la superficie libre, que refleja la respuesta del acuífero a la recarga por la infiltración del excedente de riegos, es de mayor rango que el agotamiento local en la parcela, de modo que se produce un nuevo cambio de pendiente en la evolución del nivel, que vuelve a ser ascendente. Con línea discontinua se ha trazado la evolución de fondo del acuífero.

Cuadro A5.4. Control del riego en la parcela PI1

Fecha	Hora	Tiempo (horas)	Tiempo (días)	Sondeo PI-1		Sondeo PI-2		Sondeo PI-3	
				Prof SL (m)	Cota SL (m s.n.m.)	Prof SL (m)	Cota SL (m s.n.m.)	Prof SL (m)	Cota SL (m s.n.m.)
10/07/2000	0:00	0,00							
10/07/2000	20:00 h	20,00	0,83	5,82	41,03	5,62		5,77	41,02
11/07/2000	20:00 h	44,00	1,83	5,90	40,95	5,69		5,83	40,96
13/07/2000	12:00 h	84,00	3,50	5,99	40,86	5,74		5,93	40,86
	19:30 h	91,50	3,81	5,97	40,88	5,73		5,92	40,87
14/07/2000	11:30 h	107,50	4,48	5,97	40,88	5,73		5,92	40,87
17/07/2000	21:25h	189,50	7,90	5,92	40,94	5,69		5,85	40,94
18/07/2000	10:00h	202,00	8,42	5,90	40,95	5,66		5,85	40,94
	21:00h	213,00	8,88	5,91	40,94	5,65		5,82	40,97
19/07/2000	19:45h	235,75	9,82	5,81	41,04	5,57		5,77	41,02
20/07/2000	21:45h	261,75	10,91	5,79	41,06	5,65		5,76	41,03
22/07/2000	11:00h	299,00	12,46	5,72	41,13	5,46		5,65	41,14
	20:30h	308,50	12,85	5,70	41,15	5,47		5,65	41,15
24/07/2000	19:30h	355,50	14,81	5,71	41,14	5,38		5,65	41,14
25/07/2000	9:45h	369,75	15,41	5,58	41,27	5,30		5,52	41,27
	10:45h	370,75	15,45	5,58	41,28	5,30		5,52	41,27
	11:15h	371,25	15,47	5,58	41,28	5,30		5,52	41,27
	11:45h	371,75	15,49	5,57	41,28	5,30		5,52	41,28
	12:15h	372,25	15,51	5,57	41,29	5,24		5,52	41,28
	12:45h	372,75	15,53	5,57	41,28	5,20		5,51	41,28
	13:15h	373,25	15,55	5,53	41,32	5,13		5,50	41,29
	14:15h	374,25	15,59	5,53	41,32	5,05		5,53	41,26
	15:45h	375,75	15,66	4,35	42,50	4,90		5,48	41,31
	16:15h	376,25	15,68	4,35	42,50	4,81		5,47	41,32
	16:45h	376,75	15,70	4,85	42,00	4,47		5,46	41,33
	17:15h	377,25	15,72	5,06	41,79	4,70		5,45	41,34
	17:45h	377,75	15,74	5,24	41,61	4,61		5,50	41,29
	18:15h	378,25	15,76	5,26	41,59	4,63		5,52	41,27
	18:45h	378,75	15,78	5,28	41,57	4,40		5,41	41,38
	19:15h	379,25	15,80	5,29	41,56	4,32		5,42	41,37
	20:00h	380,00	15,83	5,30	41,55	4,18		5,37	41,42
	20:30h	380,50	15,85	5,31	41,54	4,12		5,37	41,43
	21:00h	381,00	15,88	5,31	41,54	4,08		5,35	41,44
	21:45h	381,75	15,91	5,30	41,55	4,00		5,32	41,47
	22:15h	382,25	15,93	5,30	41,55	3,94		5,30	41,49
	22:45h	382,75	15,95	5,31	41,54	3,91		5,29	41,50
	23:15h	383,25	15,97	5,30	41,55	3,89		5,28	41,51
	24:00h	384,00	16,00	5,28	41,57	3,81		5,25	41,54
26/07/2000	7:30h	391,50	16,31	5,02	41,83	3,28		5,02	41,77
	11:30h	395,50	16,48	4,83	42,02	3,10		4,89	41,90
	15:45h	399,75	16,66	4,58	42,27	3,00		4,74	42,05
	19:15h	403,25	16,80	4,35	42,50	2,91		4,62	42,17
	19:45h	403,75	16,82	4,32	42,53	2,87		4,60	42,19
	20:15h	404,25	16,84	4,30	42,55	2,86		4,58	42,21
	20:45h	404,75	16,86	4,27	42,58	2,85		4,57	42,22
	22:15h	406,25	16,93	4,20	42,65	2,81		4,52	42,27
	22:45h	406,75	16,95	4,18	42,67	2,81		4,51	42,28
	23:15h	407,25	16,97	4,16	42,69	2,81		4,49	42,30
27/07/2000	7:45h	415,75	17,32	3,91	42,94	2,70		4,28	42,51
	16:00h	424,00	17,67	3,77	43,08	2,72		4,18	42,61
	19:10h	427,25	17,80	3,76	43,10	2,79		4,16	42,63
	22:15h	430,25	17,93	3,76	43,09	2,87		4,17	42,63
28/07/2000	9:25h	441,50	18,40	3,83	43,02	3,18		4,21	42,59
	16:30h	448,50	18,69	3,90	42,95	3,35		4,24	42,55
	22:15h	454,25	18,93	3,98	42,87	3,51		4,29	42,51
29/07/2000	9:30h	465,50	19,40	4,14	42,71	3,74		4,40	42,39
	16:20h	472,25	19,68	4,21	42,64	3,83		4,43	42,36
	22:15h	478,25	19,93	4,27	42,58	3,94		4,48	42,31
30/07/2000	10:30h	490,50	20,44	4,41	42,44	4,10		4,56	42,24
	16:40h	496,75	20,70	4,46	42,39	4,15		4,58	42,21
	20:30h	500,50	20,85	4,49	42,36	4,18		4,59	42,20
31/07/2000	10:00h	514,00	21,42	4,59	42,26	4,30		4,65	42,14
	14:30h	518,50	21,60	4,60	42,25	4,32		4,67	42,12
	21:00h	525,00	21,88	4,62	42,23	4,33		4,67	42,12
01/08/2000	12:00h	528,00	22,00	4,68	42,17	4,42		4,71	42,08
	21:15h	549,25	22,89	4,68	42,17	4,41		4,71	42,08

ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DE LA UNIDAD VEGA MEDIA Y BAJA DEL SEGURA (MURCIA-ALICANTE)
CONTROL DE INFILTRACIÓN EN LA PARCELA PI1 (CÍTRICOS Y FRUTALES)
EVOLUCIÓN DE LA SUPERFICIE LIBRE

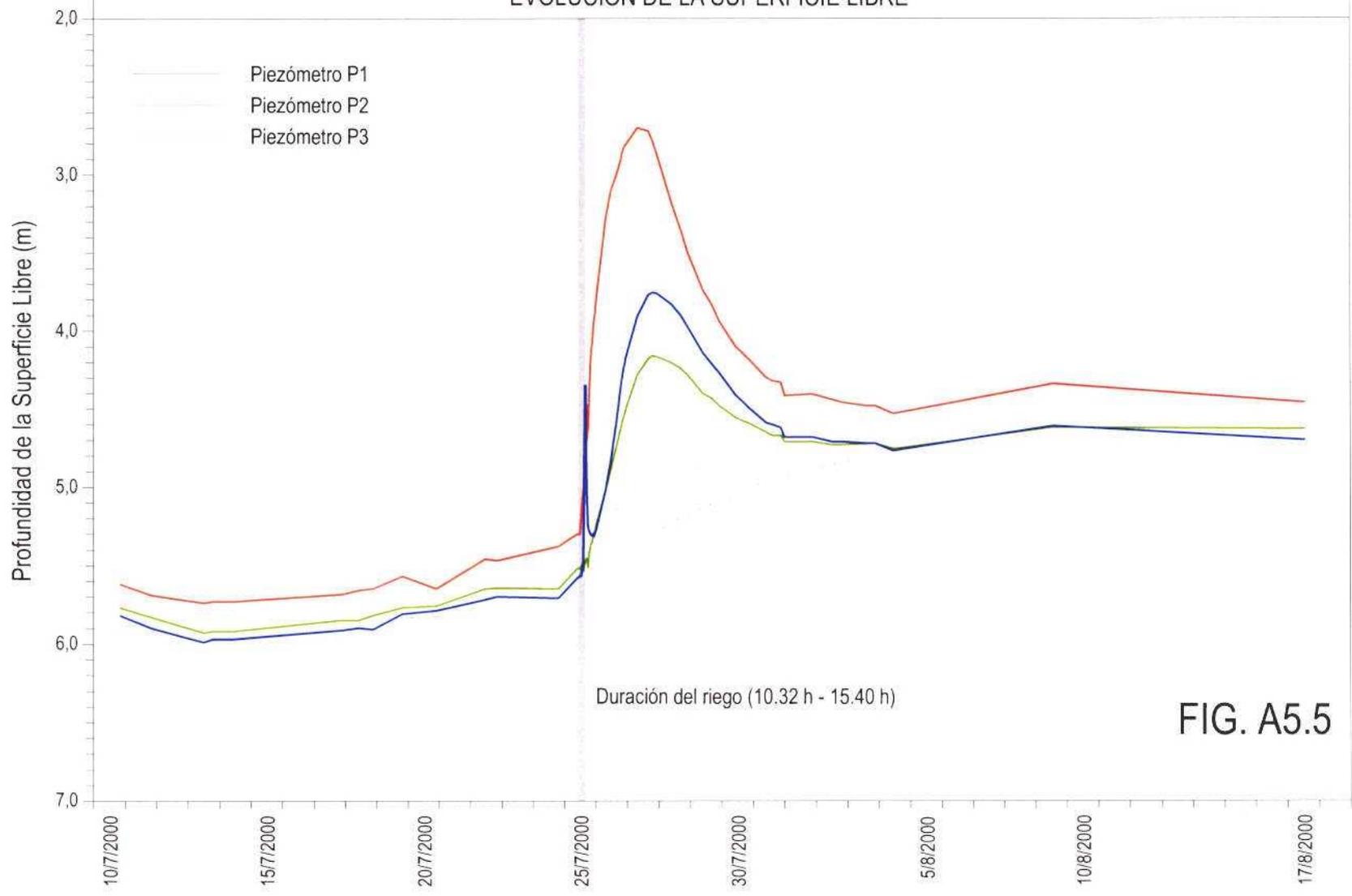


FIG. A5.5

2.2.2. Parcela PI2

En esta parcela se controló el riego con agua superficial que tuvo lugar el 19 de julio entre las 11.42 y las 13.32 h, es decir, duró 50 minutos, en el que se aplicó un volumen total de agua de 231,3 m³, evaluado a partir de 14 aforos del caudal entrante por el brazal que termina en la parcela. Para un mejor seguimiento de la evolución del nivel de la superficie libre, se efectuaron controles diarios desde el día 13 de julio con objeto de identificar la tendencia de fondo del nivel de la superficie libre. El seguimiento piezométrico se efectuó tomando profundidades de nivel cada 30 minutos, que se fueron espaciando en función de la evolución observada, aunque el control diario se mantuvo hasta el día 4 de agosto. En el cuadro A5.5 se adjuntan las medidas realizadas y en la fig. A5.6 se ha representado la evolución de la superficie libre del acuífero en los tres piezómetros de control.

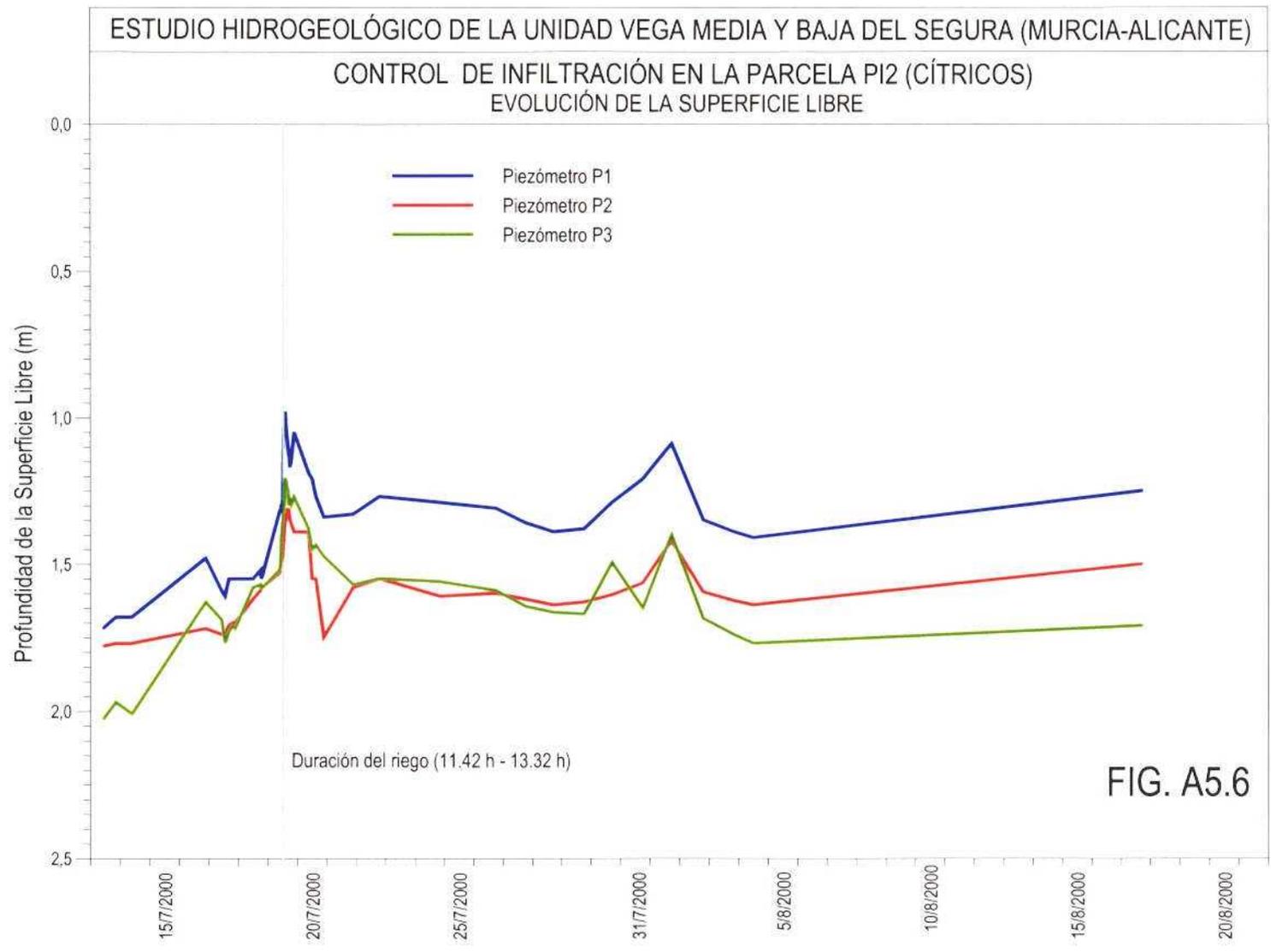
La evolución que se observa no es tan nítida como en el caso de la parcela PI1, ya que la superficie presenta oscilaciones de corta duración y pequeña amplitud que se superponen a una tendencia de fondo de ascenso general del nivel. Esta evolución más compleja se debe, por un lado, a que la superficie libre del acuífero está muy próxima al suelo y, por otra parte, a una mayor permeabilidad que en el caso de PI1, de modo que el efecto de la infiltración de excedentes de riego tiene una respuesta mucho más rápida tanto en el tramo ascendente de la evolución como en el de agotamiento. Además, en el caso de la parcela PI2, existen varias parcelas vecinas que se regaron más o menos simultáneamente; de ahí los picos aislados que se observan a lo largo de la evolución de la superficie libre. La rápida respuesta del acuífero en este caso se pone de manifiesto en que el máximo piezométrico se produjo sólo unas 2,5 horas después de haber comenzado a entrar el agua en la parcela.

2.2.3. Parcela PI3

En esta parcela se controló el riego con agua superficial que tuvo lugar el 17 de julio entre las 11.45 y las 20.07 h (es decir la entrada de agua se produjo durante 8 horas y 22 minutos), en el que se aplicó un volumen total de agua de 2108,4 m³, obtenido a partir del caudal (70 l/s) de la bomba que eleva el agua desde la acequia hasta la parcela. Para un mejor seguimiento de la evolución del nivel de la superficie libre, se efectuaron controles diarios desde el día 13 de julio con objeto de identificar la tendencia de fondo.

Cuadro A5.5. Control del riego en la parcela PI-2

Fecha	Hora	Tiempo (horas)	Tiempo (días)	Sondeo P1		Sondeo P2		Sondeo P3	
				Prof SL (m)	Cota SL (m s.n.m.)	Prof SL (m)	Cota SL (m s.n.m.)	Prof SL (m)	Cota SL (m s.n.m.)
13/07/2000	0:00	0,00							
13/07/2000	10:00 h	10,00	0,42	1,47	34,73	1,53		1,78	34,55
	20:30 h	20,50	0,85	1,43	34,77	1,52		1,72	34,61
14/07/2000	9:30 h	33,50	1,40	1,43	34,77	1,52		1,76	34,57
16/07/2000	21:15h	93,25	3,89	1,23	34,97	1,47		1,38	34,95
17/07/2000	10:00h	106,00	4,42	1,34	34,86	1,49		1,44	34,89
	13:00h	109,00	4,54	1,36	34,84	1,49		1,52	34,81
	16:00h	112,00	4,67	1,30	34,90	1,46		1,48	34,85
	19:00h	115,00	4,79	1,30	34,90	1,45		1,46	34,87
	20:55h	117,00	4,88	1,30	34,90	1,45		1,47	34,86
18/07/2000	11:45h	131,75	5,49	1,30	34,90	1,37		1,33	35,00
	18:00h	138,00	5,75	1,27	34,93	1,34		1,32	35,01
	18:30h	138,50	5,77	1,30	34,90	1,33		1,33	35,00
	19:30h	139,50	5,81	1,29	34,91	1,33		1,33	35,00
19/07/2000	9:30h	153,50	6,40	1,07	35,13	1,28		1,27	35,06
	10:00h	154,00	6,42	1,07	35,13	1,26		1,25	35,08
	10:30h	154,50	6,44	1,06	35,14	1,24		1,22	35,11
	11:00h	155,00	6,46	1,05	35,15	1,24		1,16	35,17
	11:30h	155,50	6,48	1,06	35,15	1,23		1,14	35,19
	12:00h	156,00	6,50	1,03	35,17	1,23		1,11	35,22
	12:15h	156,25	6,51	0,91	35,30	1,22		1,10	35,23
	12:45h	156,75	6,53	0,82	35,39	1,19		1,07	35,26
	13:00h	157,00	6,54	0,78	35,42	1,18		1,07	35,27
	13:15h	157,25	6,55	0,77	35,43	1,14		1,05	35,28
	13:30h	157,50	6,56	0,74	35,46	1,14		1,03	35,30
	13:50h	157,75	6,57	0,74	35,46	1,12		0,97	35,36
	14:15h	158,25	6,59	0,74	35,47	1,10		0,96	35,37
	14:30h	158,50	6,60	0,75	35,45	1,10		0,96	35,37
	14:45h	158,75	6,61	0,77	35,43	1,09		0,96	35,37
	16:30h	160,50	6,69	0,86	35,34	1,06		1,00	35,33
	17:00h	161,00	6,71	0,88	35,32	1,07		1,05	35,28
	17:30h	161,50	6,73	0,88	35,32	1,08		1,02	35,31
	18:00h	162,00	6,75	0,92	35,28	1,10		1,04	35,30
	18:30h	162,50	6,77	0,90	35,30	1,11		1,05	35,29
	19:00h	163,00	6,79	0,91	35,29	1,11		1,05	35,28
	21:15h	165,25	6,89	0,80	35,40	1,14		1,02	35,31
20/07/2000	9:00h	177,00	7,38	0,94	35,26	1,16		1,13	35,20
	12:00h	180,00	7,50	0,96	35,24	1,30		1,20	35,13
	15:00h	183,00	7,63	1,02	35,18	1,30		1,19	35,15
	21:30h	189,50	7,90	1,10	35,11	1,50		1,23	35,11
21/07/2000	21:30h	213,50	8,90	1,08	35,12	1,33		1,32	35,01
22/07/2000	19:15h	235,25	9,80	1,02	35,18	1,30		1,30	35,03
24/07/2000	20:15h	284,25	11,84	1,04	35,16	1,36		1,31	35,02
26/07/2000	18:00h	330,00	13,75	1,06	35,14	1,35		1,34	34,99
27/07/2000	18:25h	354,50	14,77	1,12	35,09	1,37		1,40	34,94
28/07/2000	17:15h	377,25	15,72	1,14	35,06	1,39		1,42	34,92
29/07/2000	18:30h	402,50	16,77	1,13	35,07	1,38		1,42	34,91
30/07/2000	17:15h	425,25	17,72	1,05	35,16	1,36		1,25	35,09
31/07/2000	18:15h	450,25	18,76	0,96	35,24	1,32		1,40	34,93
01/08/2000	17:45h	473,75	19,74	0,85	35,36	1,17		1,15	35,18
02/08/2000	19:15h	499,25	20,80	1,10	35,10	1,35		1,44	34,90
03/08/2000	20:00h	524,00	21,83	1,15	35,06	1,38		1,49	34,84
04/08/2000	12:00h	540,00	22,50	1,16	35,04	1,39		1,52	34,81
17/08/2000	18:00h	858,00	35,75	1,92	34,28	1,25		1,46	34,87



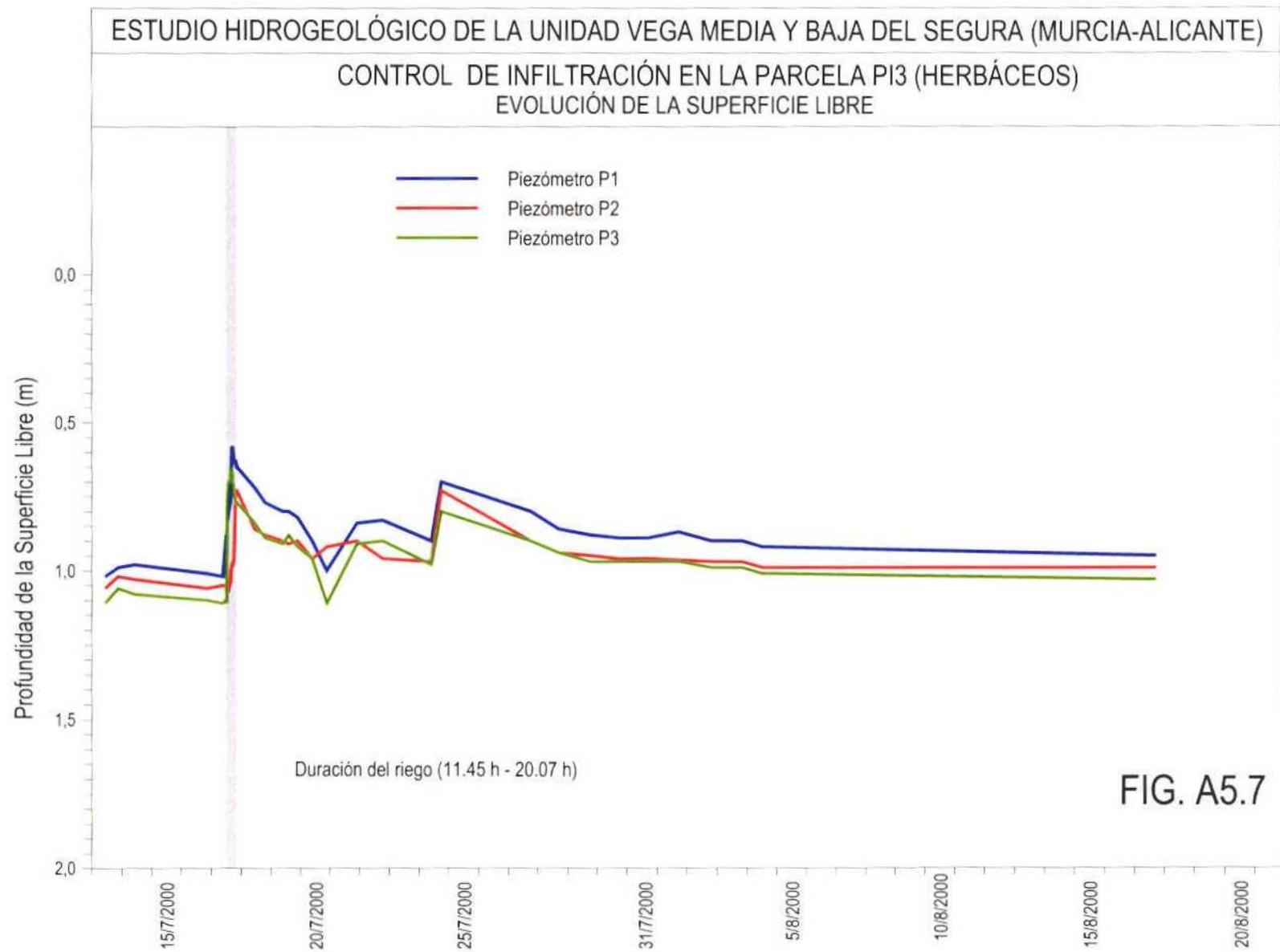
El seguimiento piezométrico durante el riego se efectuó tomando profundidades de nivel cada 30 minutos, que se fueron espaciando en función de la evolución observada, aunque el control diario se mantuvo hasta el día 4 de agosto.

En el cuadro A5.6 se adjuntan las medidas realizadas y en la fig. A5.5 se han representado las evoluciones de la profundidad de la superficie libre del acuífero en los tres piezómetros de control.

La evolución presenta características similares y se presta a idénticos comentarios que los efectuados para la parcela PI2.

Cuadro A5.6. Control del riego en la parcela PI3

Fecha	Hora	Tiempo (horas)	Tiempo (días)	Sondeo P1		Sondeo P2		Sondeo P3	
				Prof SL (m)	Cota SL (m s.n.m.)	Prof SL (m)	Cota SL (m s.n.m.)	Prof SL (m)	Cota SL (m s.n.m.)
13/07/2000	0:00	0,00							
13/07/2000	11:00 h	11,00	0,46	1,02		1,06	35,14	1,11	
	21:15 h	21,25	0,89	0,99		1,02	35,18	1,06	
14/07/2000	10:30 h	34,50	1,44	0,98		1,03	35,17	1,08	
16/07/2000	21:00h	93,00	3,88	1,01		1,06	35,14	1,10	
17/07/2000	9:10h	105,25	4,39	1,02		1,05	35,15	1,11	
	11:15h	107,25	4,47	0,92		1,05	35,15	1,10	
	11:45h	107,75	4,49	0,88		1,05	35,15	1,10	
	12:15h	108,25	4,51	0,89		1,08	35,12	1,11	
	12:45h	108,75	4,53	0,83		1,05	35,15	0,77	
	13:15h	109,25	4,55	0,83		1,07	35,13	0,73	
	13:45h	109,75	4,57	0,80		1,07	35,13	0,71	
	14:15h	110,25	4,59	0,79		1,06	35,15	0,70	
	14:45h	110,75	4,61	0,78		1,05	35,15	0,70	
	15:15h	111,25	4,64	0,77		1,04	35,16	0,69	
	15:45h	111,75	4,66	0,70		1,00	35,20	0,66	
	16:15h	112,25	4,68	0,64		0,99	35,21	0,66	
	16:45h	112,75	4,70	0,58		0,98	35,22	0,68	
	17:15h	113,25	4,72	0,60		0,98	35,22	0,71	
	17:45h	113,75	4,74	0,61		0,97	35,23	0,72	
	18:15h	114,25	4,76	0,63		0,96	35,24	0,74	
	18:45h	114,75	4,78	0,63		0,90	35,30	0,76	
	19:15h	115,25	4,80	0,63		0,82	35,38	0,76	
	19:45h	115,75	4,82	0,63		0,73	35,47	0,77	
	20:15h	116,25	4,84	0,65		0,73	35,47	0,77	
	20:45h	116,75	4,86	0,65		0,74	35,47	0,77	
18/07/2000	11:00h	131,00	5,46	0,72		0,86	35,34	0,84	
	19:30h	139,50	5,81	0,77		0,88	35,32	0,89	
19/07/2000	9:45h	153,75	6,41	0,80		0,90	35,30	0,91	
	14:35h	158,50	6,60	0,80		0,92	35,29	0,89	
	21:30h	165,50	6,90	0,82		0,90	35,30	0,92	
20/07/2000	9:20h	177,25	7,39	0,91		0,96	35,24	0,96	
	21:15h	189,25	7,89	1,00		0,92	35,28	1,11	
21/07/2000	21:45h	213,75	8,91	0,84		0,90	35,30	0,91	
22/07/2000	19:00h	235,00	9,79	0,83		0,96	35,24	0,90	
24/07/2000	10:00h	274,00	11,42	0,90		0,97	35,23	0,98	
26/07/2000	18:10h	282,25	11,76	0,70		0,73	35,47	0,80	
27/07/2000	18:15h	354,25	14,76	0,80		0,90	35,30	0,90	
28/07/2000	17:00h	377,00	15,71	0,86		0,94	35,26	0,95	
29/07/2000	18:15h	402,25	16,76	0,88		0,95	35,25	0,97	
30/07/2000	17:00h	425,00	17,71	0,89		0,97	35,24	0,97	
31/07/2000	18:00h	450,00	18,75	0,89		0,96	35,24	0,97	
01/08/2000	17:30h	473,50	19,73	0,87		0,95	35,25	0,97	
02/08/2000	19:30h	499,50	20,81	0,90		0,97	35,23	1,00	
03/08/2000	20:15h	524,25	21,84	0,90		0,97	35,23	1,00	
04/08/2000	12:15h	540,25	22,51	0,92		0,99	35,21	1,01	
17/08/2000	18:15h	858,25	35,76	0,95		0,99	35,21	1,04	



2.3. CONTROL PIEZOMÉTRICO

Con objeto de aprovechar las precipitaciones del otoño de 2000, dado que suele ser la estación más lluviosa en la zona de la vega del Segura, se programó un seguimiento piezométrico de detalle en las tres parcelas piloto, con la siguiente secuencia de medidas de profundidad de la superficie libre en todos los sondeos útiles:

- Control semanal durante los periodos de ausencia de lluvias, a partir del día 26 de septiembre de 2000.
- Control diario en caso de producirse lluvias importantes que supusieran un aporte de agua significativo para el acuífero, manteniendo esta periodicidad hasta la desaparición del efecto sobre la evolución piezométrica.

Los controles programados coincidieron con el periodo de medidas tuvieron lugar las intensas lluvias de los días 23 a 25 de octubre de 2000, que provocaron una respuesta rápida y nítida del acuífero, cuya evolución pudo ser registrada con detalle.

Una vez conseguido un pico piezométrico correspondiente a una lluvia conocida, los controles se mantuvieron con carácter semanal hasta finales de 2000 y quincenal (coincidiendo con las campañas de la Red Piezométrica General del Estudio) hasta abril de 2001.

Los registros piezométricos realizados en las 3 parcelas se han agrupado en los cuadros A5.7, A5.8 y A5.9.

Cuadro A5.7. Control piezométrico en la parcela PI1

Fecha	Hora	Sondeo P1 (2737/1/1050)		Sondeo P2 (2737/1/1051)		Sondeo P3 (2737/1/1049)	
		Prof SL (m)	Cota SL (m s.n.m.)	Prof SL (m)	Cota SL (m s.n.m.)	Prof SL (m)	Cota SL (m s.n.m.)
26/09/2000	9:30	5,87	40,98	5,98		6,03	40,76
27/09/2000	18:00	5,93	40,92	6,13		6,08	40,71
28/09/2000	11:30	5,91	40,94	6,12		6,07	40,72
29/09/2000	9:30	5,92	40,93	6,12		6,06	40,73
02/10/2000	9:30	6,06	40,79	6,28		6,23	40,56
11/10/2000	9:30	6,30	40,55	6,50		6,42	40,37
13/10/2000	10:00	6,29	40,56	6,51		6,47	40,32
19/10/2000	9:30	6,26	40,59	6,48		6,43	40,36
23/10/2000	13:55			6,35			46,79
24/10/2000	19:15	5,10	41,75	5,32			46,79
25/10/2000	10:30	5,06	41,79	5,37		5,27	41,52
26/10/2000	9:30	4,85	42,00	5,29		5,27	41,52
27/10/2000	9:30	4,32	42,53	5,04		5,21	41,58
31/10/2000	9:30	4,48	42,37	4,82		4,97	41,82
02/11/2000	11:00	4,83	42,02	5,09		5,08	41,71
03/11/2000	9:30	4,89	41,96	5,15		5,11	41,68
06/11/2000	14:30	5,01	41,84	5,24		5,17	41,62
07/11/2000	9:30	5,20	41,65	5,30		5,31	41,48
08/11/2000	19:15	5,13	41,72	5,33		5,32	41,47
09/11/2000	19:05	5,16	41,69	5,38		5,31	41,48
10/11/2000	9:30	5,22	41,63	5,43		5,35	41,44
13/11/2000	18:30	5,19	41,66	5,44		5,35	41,44
14/11/2000	19:45	5,23	41,62	5,48		5,41	41,38
15/11/2000	19:15	5,26	41,59	5,50		5,42	41,37
16/11/2000	17:30	5,29	41,56	5,52		5,42	41,37
17/11/2000	13:20	5,27	41,58	5,51		5,42	41,37
24/11/2000	11:45	5,31	41,54	5,60		5,52	41,27
01/12/2000	12:30	5,40	41,45	5,64		5,56	41,23
07/12/2000	17:10			5,65		5,58	41,21
15/12/2000	13:20			5,74		5,65	41,14
22/12/2000	13:00			5,76		5,68	41,11
29/12/2000	12:45			5,82		5,75	41,04
11/01/2001	12:45			6,09		5,89	40,90
25/01/2001	10:45			6,08		5,98	40,81
08/02/2001	10:15			6,51		6,17	40,62
23/02/2001	11:00			6,21		6,16	40,63
09/03/2001	9:50			6,40		6,28	40,51
23/03/2001	10:30			6,45		6,27	40,52
09/04/2001	14:00			5,01		4,58	42,21

Cuadro A5.8. Control piezométrico en la parcela PI2

Fecha	Hora	Sondeo P1 (2736/6/0808)		Sondeo P2 (2736/6/0809)		Sondeo P3 (2736/6/0810)	
		Prof SL (m)	Cota SL (m s.n.m.)	Prof SL (m)	Cota SL (m s.n.m.)	Prof SL (m)	Cota SL (m s.n.m.)
26/09/2000	11:00					1,47	34,86
27/09/2000	11:00	1,15	35,05	1,35		1,51	34,82
28/09/2000	19:30	1,20	35,00	1,43		1,60	34,73
29/09/2000	11:45	1,23	34,97	1,39		1,61	34,72
02/10/2000	11:30	1,27	34,93			1,76	34,57
11/10/2000	10:30	1,16	35,04	1,35		1,53	34,80
13/10/2000	10:30	1,25	34,95	1,38		1,60	34,73
19/10/2000	10:30	1,53	34,67	1,35		1,33	35,00
23/10/2000	12:00	0,98	35,22	1,13		0,53	35,80
24/10/2000	12:30	0,79	35,41	0,75		0,93	35,40
25/10/2000	11:30	0,97	35,23	1,06		0,80	35,53
26/10/2000	10:30	0,96	35,24	1,21		1,20	35,13
27/10/2000	17:00	1,12	35,08	1,30		1,38	34,95
31/10/2000	12:00	1,19	35,01	1,37		1,51	34,82
02/11/2000	11:40	1,20	35,00	1,59		1,56	34,77
03/11/2000	10:30	1,20	35,00	1,40		1,57	34,76
06/11/2000	13:45	1,20	35,00	1,38		1,54	34,79
07/11/2000	10:30	1,22	34,98	1,42		1,56	34,77
08/11/2000	18:45	1,27	34,93	1,39		1,43	34,90
09/11/2000	16:30	1,21	34,99	1,36		1,43	34,90
10/11/2000	14:15	1,23	34,97	1,39		1,55	34,78
13/11/2000	14:00	1,21	34,99	1,40		1,58	34,75
14/11/2000	13:05	1,24	34,96	1,42		1,61	34,72
15/11/2000	18:30	1,24	34,96	1,42		1,60	34,73
16/11/2000	9:30	1,24	34,96	1,43		1,63	34,70
17/11/2000	9:30	1,28	34,92	1,44		1,65	34,68
24/11/2000	14:00	1,13	35,07	1,30		1,48	34,85
01/12/2000	9:00	1,21	34,99	1,39		1,57	34,76
07/12/2000	9:30	1,22	34,98	1,41		1,60	34,73
15/12/2000	11:35	1,22	34,98	1,77		1,61	34,72
22/12/2000	17:00	1,27	34,93	1,32		1,50	34,83
29/12/2000	9:00	1,24	34,96	1,29		1,59	34,74
12/01/2001	10:30	1,22	34,98	1,42		1,63	34,70
26/01/2001	16:30	1,05	35,15			1,33	35,00
09/02/2001	18:10	1,23	34,97			1,54	34,79
23/02/2001	10:00	1,22	34,98			1,60	34,73
08/03/2001	10:30	1,23	34,97			1,58	34,75
22/03/2001	10:10	1,25	34,95			1,57	34,76
09/04/2001	9:55	1,10	35,10			1,39	34,94

Cuadro A5.9. Control piezométrico en la parcela PI3

Fecha	Hora	Sondeo P1 (2736/6/0811)		Sondeo P2 (2736/6/0812)	
		Prof SL (m)	Cota SL (m s.n.m.)	Prof SL (m)	Cota SL (m s.n.m.)
26/09/2000	10:30	0,89		0,995	35,21
27/09/2000	11:00	0,93		1,05	35,15
28/09/2000	19:00	0,92		0,95	35,25
29/09/2000	11:30	0,94		1,05	35,15
02/10/2000	10:30	0,96		1,05	35,15
11/10/2000	10:30	0,85		0,95	35,25
13/10/2000	10:30	0,91		0,98	35,22
19/10/2000	10:30	0,83		0,95	35,25
24/10/2000	13:00	0,38		0,41	35,79
25/10/2000	12:00	0,70		0,66	35,54
26/10/2000	10:45	0,85		0,76	35,44
27/10/2000	17:15	0,84		0,87	35,33
31/10/2000	12:00	0,91		0,85	35,35
02/11/2000	11:55	0,90		0,95	35,25
03/11/2000	10:45	0,92		0,97	35,23
06/11/2000	19:00	0,85		0,91	35,29
07/11/2000	10:45	0,87		0,97	35,23
08/11/2000	16:30	0,78		0,88	35,32
09/11/2000	17:00	0,84		0,91	35,29
10/11/2000	14:00	0,87		1,00	35,20
13/11/2000	14:30	0,91		0,97	35,23
14/11/2000	13:15	0,88		0,96	35,24
15/11/2000	18:45	0,93		0,98	35,22
16/11/2000	20:30	0,95		1,00	35,20
17/11/2000	9:45	0,94		0,98	35,22
24/11/2000	14:15	0,88		0,91	35,29
01/12/2000	9:15	0,89		0,90	35,30
07/12/2000	11:50	0,90		0,93	35,27
15/12/2000	11:50	0,90		0,93	35,27
22/12/2000	17:25	0,85		0,87	35,33
28/12/2000	9:20	0,96			
12/01/2001	10:50	0,86			
26/01/2001	16:45	0,87			
08/02/2001	18:20				
22/02/2001	10:15			0,90	35,30
08/03/2001	11:00			0,85	35,35
22/03/2001	10:00			0,87	35,33
09/04/2001	10:00			0,87	35,33

3. RECARGA POR INFILTRACIÓN DE LLUVIA

3.1. PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO

Para la determinación de la recarga por infiltración de lluvia al acuífero en la unidad de la Vega Media se ha diseñado una metodología específica para aprovechar la circunstancia poco común de disponer de registros detallados de la evolución de un pico piezométrico correspondiente a la respuesta del tramo acuífero somero a las intensas precipitaciones de los días 23 a 25 de octubre de 2000, que descargaron en total 138,2 mm –30,9 mm, el día 23; 90,0 mm, el día 24 y 17,3 mm, el día 25–.

La metodología consiste en la aplicación encadenada de dos programas de cálculo, THORDOS¹ y GMDUEX², que ha dado como resultado final la determinación de los parámetros hidrometeorológicos característicos de la recarga por infiltración de lluvia – evapotranspiración potencial y real, lluvia útil, y reparto de la misma entre infiltración y escorrentía superficial– en el acuífero de la Vega Media, para el periodo de 33 años comprendido entre los años hidrológicos 1967/68 y 1999/00:

- El programa THORDOS proporciona distintas estimaciones del valor de la lluvia útil –LU–, para series de datos diarios de precipitación y temperatura media, que dependerán de la opción que se adopte en cuanto al funcionamiento de la reserva útil del suelo, caracterizada por dos valores extremos RMIN y RMAX.
- El programa GMDUEX permite ajustar los valores de la reserva útil del suelo, mediante la correlación por deconvolución entre la lluvia útil (calculada para diferentes valores de reserva útil) y la evolución de la superficie libre en el pico piezométrico –NP– correspondiente a las lluvias de octubre.

La pareja de valores de RMIN y RMAX a la que corresponda el mejor ajuste entre la *entrada* calculada –LU– y la *salida* observada³ –NP– reflejará el funcionamiento real del sistema y la descomposición realista de la lluvia útil en sus dos componentes: infiltración –INF– y escorrentía estrictamente superficial –ESC–.

1 IDRENA, 1990.

2 Programa elaborado por el Centre d'Informatique Géologique. École Nationale Supérieure des Mines de Paris. Fontainebleau.

3 Como salida observada, hay que señalar que se toma la variación del nivel piezométrico, es decir, los cambios provocados al nivel de base o "natural" por el efecto de la infiltración de la precipitación.

El proceso de cálculo secuencial que se ha utilizado permite identificar con objetividad⁴ y razonable precisión el régimen de recarga por infiltración de lluvia –**INF**– en un acuífero, ya que al final del proceso de cálculo quedan identificados de forma contrastada los valores aproximados de los parámetros que condicionan la estimación de la evapotranspiración real –**ETR**– y la lluvia útil –**LU**–.

En el planteamiento que se expone, los valores de la variación del nivel piezométrico –**NP**– y los datos termopluviométricos diarios –**T(i)**, **P(i)**– registrados en una estación razonablemente representativa del área de estudio, son objeto del tratamiento matemático informatizado que de forma esquemática se refleja en el diagrama de flujo adjunto y se describe a continuación.

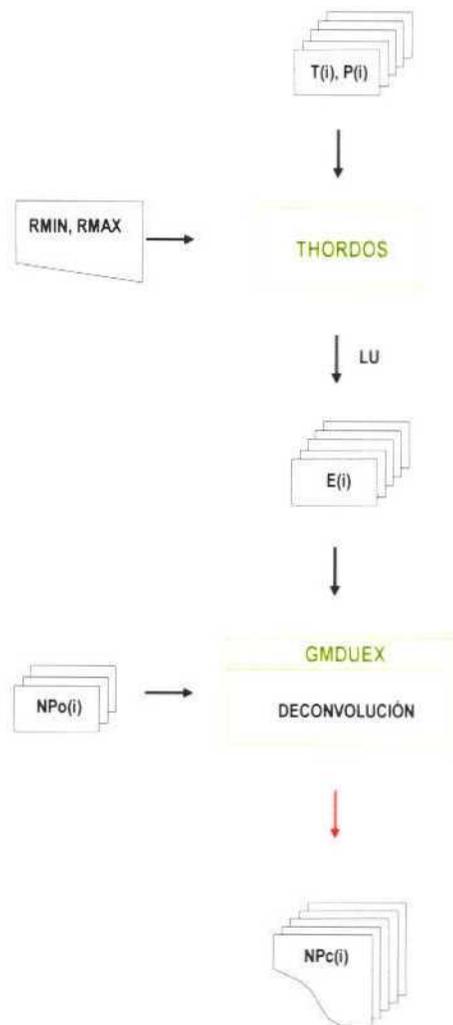
El método de cálculo se basa en correlacionar por deconvolución una de las diversas series de entrada posibles, $E(i)$, que pueden ser determinadas a partir de datos termopluviométricos –la lluvia útil, $LU(i)$; la infiltración, $INF(i)$ –, con la serie de salida registrada, o variación del nivel piezométrico observado, $NP_o(i)$.

Las diferentes opciones de tanteo para la *entrada*, $E(i)$, se han calculado mediante aplicación del programa **THORDOS**, que, bajo determinados supuestos respecto de la reserva de agua almacenable en el suelo, posibilita la estimación diaria de la evapotranspiración real, $ETR(i)$; y la lluvia útil $LU(i)$. En esencia, los principios en que se basa el programa **THORDOS** son los siguientes:

- se calculan los valores diarios de la evapotranspiración potencial de forma similar a como se suelen determinar los valores mensuales de la misma en las aplicaciones tradicionales del método de Thornthwaite. Se realizan balances diarios en los que se hacen intervenir las siguientes magnitudes:
 - reserva almacenada en el suelo al final del día anterior,
 - precipitación registrada en el día, y
 - evapotranspiración potencial diaria.

4 El principal "punto débil" de los métodos empíricos –Thornthwaite, Penman, Blaney-Criddle, etc.– con los que se suele estimar el valor de la lluvia útil en una determinada zona a partir de sus datos meteorológicos y de sus parámetros climáticos, edafológicos, agronómicos, etc., no suele estar tanto en la aplicabilidad del método o en la representatividad de las variables utilizadas, sino en la "impunidad" del cálculo; es decir, en la imposibilidad de contrastar con la realidad la validez de los resultados obtenidos.

DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE CORRELACIÓN POR DECONVOLUCIÓN ENTRE LA LLUVIA ÚTIL Y LA EVOLUCIÓN DEL NIVEL PIEZOMÉTRICO



A diferencia de lo que sucede en los cálculos tradicionales, en los que se realizan balances mensuales y se adopta un determinado valor fijo para la reserva útil del suelo (considerando que no se producirá lluvia útil hasta que la misma se encuentre al completo), el programa THORDOS efectúa balances diarios y adopta un planteamiento físico y edafológicamente más realista sobre el funcionamiento de la reserva de agua almacenable en el suelo, que, en síntesis, consiste en utilizar dos parámetros extremos –**RMIN** y **RMAX**–, característicos de la misma. La forma de intervención de dichos parámetros, que ha podido ser contrastada en numerosos casos de aplicación (dentro y fuera de España) consiste en:

- aceptar que si, al finalizar el día anterior al del cálculo –**(i-1)**– la reserva contenida en el suelo presentaba un valor comprendido entre **RMIN** y **RMAX**, en el día considerado –**(i)**– se producirá una cierta descomposición de la lluvia que, en su caso, se registrase en él, entre una parte destinada a aumentar dicha reserva, y otra parte, el resto, que se convierte en la lluvia útil del día –**LU (i)**–;
 - suponer que, sólo cuando la reserva de agua contenida en el suelo sea inferior a **RMIN**, se destinará a ella la totalidad de la precipitación (hasta que se alcance dicho valor mínimo); por el contrario, toda la precipitación se convertirá en lluvia útil cuando la reserva de agua en el suelo se encuentre en su valor máximo, **RMAX**; y
 - admitir que la evapotranspiración real –**ETR (i)**– tiene lugar, hasta un máximo representado por el valor de **ETP (i)**, a expensas de la reserva de agua almacenada en el suelo, después de que la misma se haya visto aumentada, en su caso, con una parte o con toda la precipitación registrada en el día –**P (i)**–.
- La descomposición diaria de la lluvia útil, **LU (i)**, entre infiltración, **INF (i)**, y escorrentía superficial, **ESC (i)**, se efectúa de forma regresiva para **INF (i)** (hasta un tope de 35 mm/d) y progresiva para **ESC (i)**:

$$INF (i) = \alpha \cdot LU (i) \text{ siendo } \alpha \text{ un coeficiente variable que decrece a medida que aumenta } LU$$

$$ESC (i) = LU (i) - INF (i)$$

$$INF (i) \leq 35 \text{ mm}$$

- Además de los correspondientes registros diarios de precipitación y temperatura media, los datos que se deben suministrar al programa son:
 - Índices **F** de iluminación mensual, expresados en unidades de 12 horas, dependientes de la latitud de la zona.
 - Valores supuestos para **RMIN** y **RMAX**, fijados en función de la naturaleza litológica del terreno y del grado de desarrollo del suelo vegetal.
 - Valor estimado para la reserva inicial (**RINI**) del suelo, fijado teniendo en cuenta la pluviosidad de los días inmediatamente anteriores al de comienzo del periodo de cálculo.

- El programa **THORDOS** ofrece distintas posibilidades de presentación de resultados. La que se presenta en el Apéndice 5.1 comprende la serie de valores diarios de:
 - precipitación, **P (i)**, y temperatura media, **T (i)**, datos utilizados en el cálculo;
 - evapotranspiración potencial, **ETP (i)**;
 - evapotranspiración real, **ETR (i)**;
 - lluvia útil, **LU (i)**;
 - infiltración, **INF (i)**;
 - escorrentía, **ESC (i)**; y
 - reserva de agua contenida en el suelo al final de cada día, **RFIN (i)**.

La correlación por deconvolución entre las diferentes opciones de la entrada, **E** – calculables mediante THORDOS a partir de las series termopluviométricas diarias, **T (i)** y **P (i)**–, y la salida observada, **NPo (i)**, para el periodo de disponibilidad simultánea de datos termopluviométricos y piezométricos, desemboca en la identificación de la ley de correspondencia cuantitativa y cronológica –que generalmente suele ser denominada función de convolución, función de transferencia o, más comúnmente, respuesta impulsional, Φ – entre el valor unitario (en mm ó l/m²) de la entrada y el absoluto de la salida (en m). Para ello, se tantean diferentes series de entrada calculadas mediante THORDOS con distintas parejas de valores [**RMIN**, **RMAX**], hasta seleccionar la que genere la serie de salida calculada, **NPc (i)**, que mejor se correlacione con la serie de salida observada, **NPo (i)**.

Para efectuar la correlación por *deconvolución* se ha aplicado el programa **GMDUEX**, cuyo fundamento y características se describen seguidamente:

- El programa **GMDUEX** tiene por objeto identificar de forma empírica –por el procedimiento denominado de "caja negra", es decir, sin entrar a analizar la funcionalidad física de la relación causa/efecto– la ley de correlación cuantitativa y cronológica entre una *entrada* y una *salida*. En un sistema hidrológico, la primera puede venir dada por una recarga por infiltración de una parte de la lluvia útil registrada, por la totalidad de ésta o, incluso, por la precipitación bruta sobre la cuenca hidrológica o hidrogeológica estudiada; la *salida* o respuesta del sistema puede ser el caudal de descarga de un manantial o, como es el caso, la variación del nivel piezométrico.
- El funcionamiento del programa es, en esencia, el siguiente:
 - Si la *memoria* del sistema o duración del efecto provocado por una causa unitaria (en su duración y en su magnitud) es **M** *pasos de tiempo* –la duración de cada uno de ellos (1 día, 10 días, 1 mes, etc.) se fija de antemano dependiendo de la variabilidad del fenómeno en estudio–, el programa **GMDUEX** identifica el conjunto de **M** valores de la respuesta provocada por una *entrada* de valor unidad (1 mm ó $1/\text{m}^2$) y duración igual a 1 paso de tiempo. Dicho conjunto de valores recibe el nombre de *respuesta impulsional*, $\Phi(i)$, y es tal que, aplicado a la serie de la *entrada* considerada, $E_c(i)$, –el historial de infiltraciones calculadas por **THORDOS**, por ejemplo, como caso más sencillo–, da lugar a una *salida* o respuesta calculada, $S_c(i)$ –una sucesión de variaciones de niveles, $NP_c(i)$ –, que debe coincidir al máximo posible con la *salida* realmente observada, $S_o(i)$, $-NP_o(i)$ –.
 - La *memoria* libre máxima admitida por el programa **GMDUEX** es de 256 *pasos de tiempo*, para cada uno de los cuales se calcula el correspondiente valor de la *respuesta impulsional*, $\Phi(i)$. Después de esta primera y principal etapa de la *memoria*, para la que calcula libremente o con determinadas especificaciones matemáticas –unimodalidad, monotonía, alisado, etc.– la función $\Phi(i)$, el programa permite considerar una cola de disminución exponencial de los valores de dicha función, parametrizada mediante el correspondiente coeficiente de agotamiento, **C**, equivalente al cociente entre

el valor, $\Phi (i)$, en un paso de tiempo cualquiera, dentro de la citada fase de agotamiento exponencial, y el correspondiente al paso de tiempo precedente, $\Phi (i-1)$.

- La elección de los valores más realistas para la duración de la *memoria* del sistema, y la de cada *paso de tiempo* –1 día, 10 días, 1 mes, etc.– deberá ser efectuada en función del comportamiento real registrado, y teniendo en cuenta la secuencia y calidad de los datos meteorológicos e hidrométricos disponibles.

Si los valores de la respuesta impulsional en los M pasos de tiempo de la *memoria* del sistema son:

$$\Phi (1), \Phi (2) \dots \Phi (M)$$

la *salida* calculada, $S_c (i)$, para un determinado *paso de tiempo*, i , será consecuencia de las entradas registradas en los M pasos precedentes, según la equivalencia siguiente:

$$S_C (i) = E_C (i-1) \cdot \Phi (1) + E_C (i-2) \cdot \Phi (2) + \dots + E_C (i-M) \cdot \Phi (M)$$

En algunas ocasiones, cuando la rapidez de la respuesta y/o la mayor duración del paso de tiempo adoptado hacen que una *entrada* $E_c (i)$ acaecida en el paso de tiempo i tenga ya respuesta o *salida* $S_c (i)$ en el mismo paso de tiempo, la equivalencia sería:

$$S (i) = E_C (i) \cdot \Phi(1) + E_C (i-1) \cdot \Phi(2) + \dots + E_C (i-M+1) \cdot \Phi(M)$$

- El proceso de cálculo de los M valores de la función Φ tiene lugar según fases sucesivas, para cada una de las cuales se determina la calidad del ajuste obtenido entre la *salida* observada, S_o , y la calculada, S_c , por aplicación de los correspondientes valores de Φ a la *entrada* calculada, E_c . Dicha calidad es reflejada mediante el correspondiente coeficiente de correlación; se calculan también los residuos o valores de la diferencia entre las *salidas* observada y calculada, su valor global cuadrático o absoluto (norma en L^2 ó en L^∞ , respectivamente), las medias de los valores de *salida* observada y calculada, etc.

- en la 1ª fase de cálculo se identifica un conjunto de **M** valores iguales de Φ ;
 - en la 2ª fase se calculan dos grupos distintos de **M/2** valores iguales de Φ ;
 - en la 3ª fase se calculan cuatro grupos de **M/4** valores de Φ ; y así sucesivamente, hasta un máximo de 9 fases, en la última de las cuales se calcularían 256 valores diferentes de Φ , como máximo.

- El programa **GMDUEX** permite una amplia gama de posibilidades de modulación de los parámetros matemáticos que caracterizan la *respuesta impulsional* Φ : unimodalidad, monotonía, alisados de la función, cola exponencial (que se establece a partir de los coeficientes de agotamiento obtenidos en el análisis de las curvas de vaciado-agotamiento en estiaje), tratamiento de *entradas* con lagunas de datos (por carencia o insuficiente fiabilidad de los mismos en algunos pasos de tiempo dentro de la serie de *salidas* observadas), primacía diferencial en el ajuste para valores extremos (en ocasiones puede interesar dar más importancia a la coincidencia entre las *salidas* observada y calculada máximas, en detrimento de sus valores mínimos) o, por el contrario, dar mayor peso al ajuste de los valores mínimos, u optar por un enfoque "neutro", sin dar mayor importancia a ninguna gama de valores, etc.

- En el Apéndice 5.2 se incluyen los ficheros de salida que genera el programa **GMDUEX**.

- El resultado final de la *deconvolución* –que será el correspondiente al mejor de los ajuste conseguidos entre la serie de *salida* calculada y la de la observada–, proporciona la siguiente información:
 - Identificación de la *entrada* –**INF**, **LU**, etc.– calculada mediante el programa **THORDOS**, que mejor se correlacione con la *salida*.
 - Determinación de la *función de transferencia* o *respuesta impulsional*, Φ .
 - Determinación de la pareja de valores característicos [**RMIN**, **RMAX**] que describen el funcionamiento de la reserva útil de agua almacenable en el suelo, que constituye un dato de entrada para el cálculo, mediante **THORDOS**, de la *entrada* seleccionada, para periodos en los que se disponga

sólo de datos termopluviométricos diarios, $T(i)$ y $P(i)$, pero no de descargas observadas, $NP_o(i)$.

3.2. APLICACIÓN A LA VEGA MEDIA

3.2.1. Entradas: lluvia útil

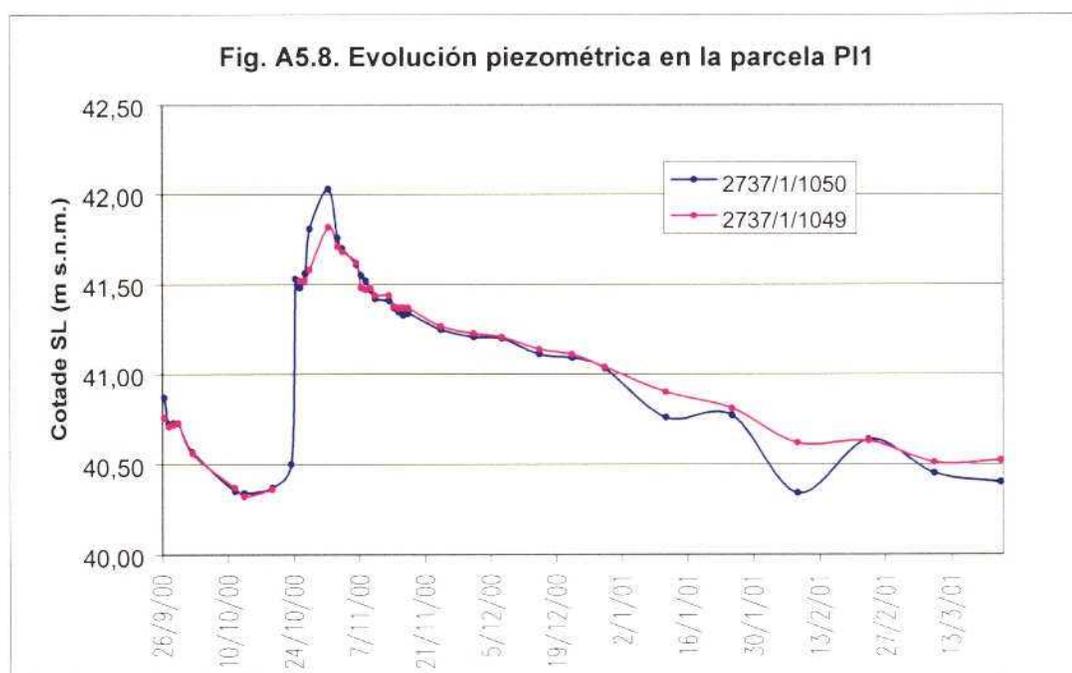
Como datos de base se han utilizado los de la estación termopluviométrica nº 7182 Murcia "Alfonso X" (antes Vistabella) del Instituto Nacional del Meteorología, para la que se dispone de series completas de precipitación y temperatura media diarias para el periodo comprendido entre el 1/10/1967 y el 28/2//2001, cuya relación se incluye en los cuadros del Apéndice 5.1.

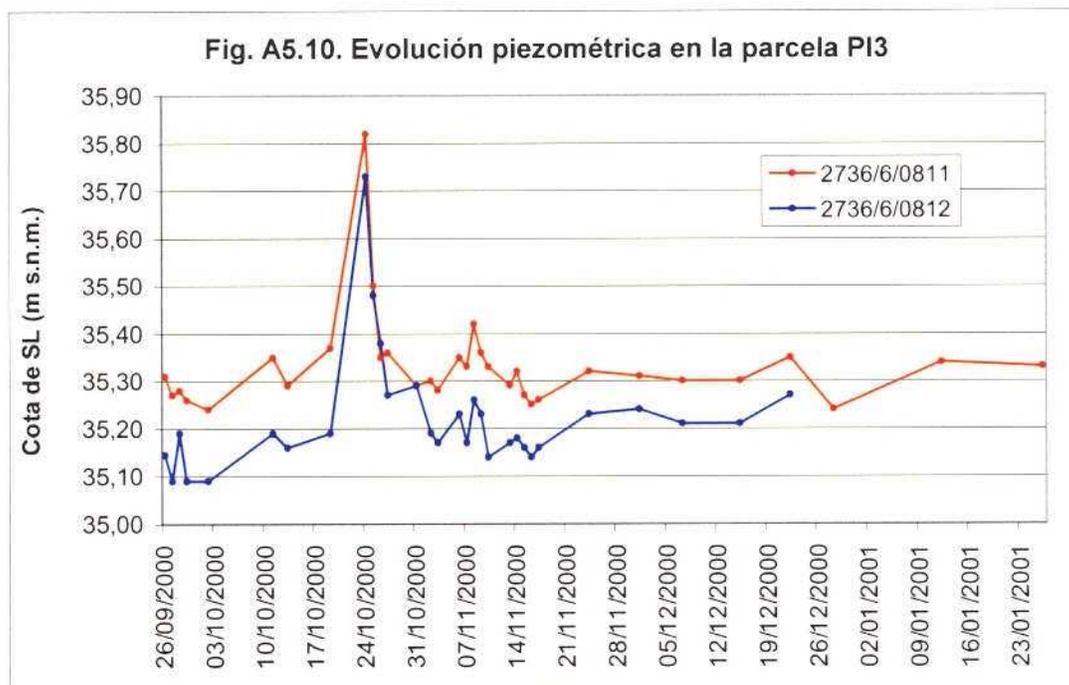
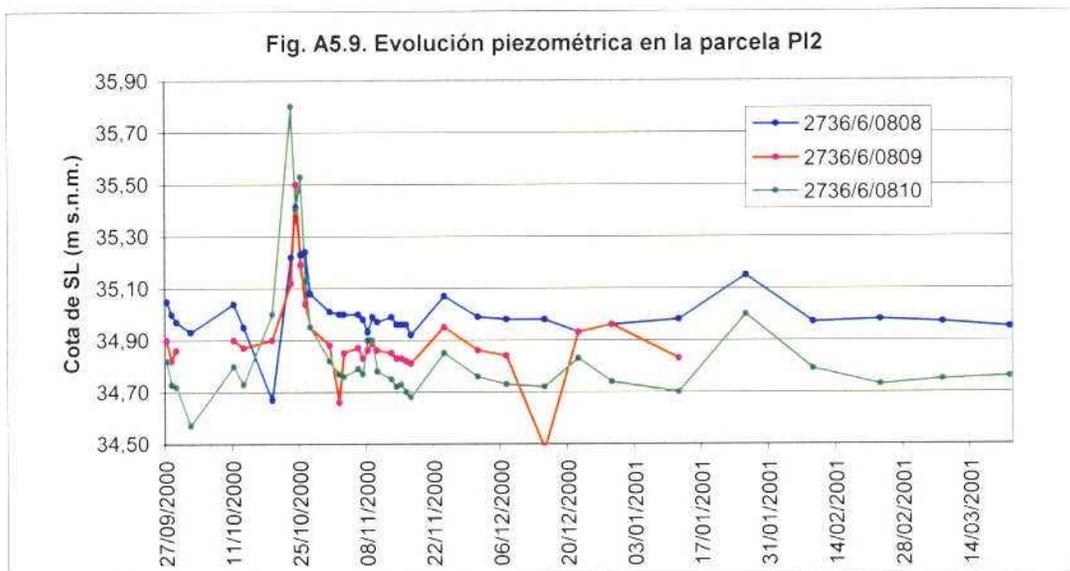
Los valores medios característicos de la serie termopluviométrica para el periodo de cálculo considerado son:

- Precipitación media anual 284,4 mm
- Temperatura media anual 18,8° C

3.2.2. Salidas: Piezometría.

Como datos de salida se han utilizado los registros piezométricos efectuados en las 3 parcelas piloto entre el 26/9/2000 y el 22/3/2001, cuyas evoluciones completas para los piezómetros útiles en octubre de 2000 se reflejan en las figs. A5.8, A5.9 y A5.10.





De las tres parcelas, la que presenta una evolución más uniforme es la que corresponde a la parcela PI1, que refleja un único pico de la superficie libre como respuesta del acuífero a las precipitaciones de los días 22-24 de octubre, mientras que en las parcelas

PI2 y PI3 se observan varios picos consecutivos, posiblemente causados por riegos en las zonas colindantes, lo que genera un gráfico de evolución piezométrica en forma de “dientes de sierra”. Por esta razón, se seleccionó la variación del nivel piezométrico en la parcela PI1 como dato de salida para generar el modelo deconvolutivo⁵.

Una vez seleccionada la evolución piezométrica para servir de base al ajuste, se transformaron las cotas absolutas de la superficie libre en cotas relativas respecto al valor mínimo medido antes del episodio lluvioso, para considerar únicamente la variación del nivel de la superficie libre debido a la influencia de la precipitación.

3.2.3. Proceso de calibración de la deconvolución

El proceso de identificación, en la forma más realista y representativa posible, de la ley de correlación cuantitativa y cronológica (también denominable función de convolución Φ o ley de "respuesta impulsional") entre la lluvia útil y la variación del nivel piezométrico, proceso que recibe el nombre de **deconvolución**, guarda bastante similitud con la calibración de un modelo matemático del flujo subterráneo en un acuífero, en la medida en que es necesario ir tanteando diferentes opciones para la *entrada* y la *salida* de la correlación, así como modular los parámetros de cálculo: paso de tiempo, memoria, ritmo de agotamiento exponencial de la fase final de la memoria, etc. :

- Como *entrada* se ha utilizado la lluvia útil –en mm o l/m²– en la zona de estudio, calculada mediante el programa THORDOS, tal como se ha descrito en el apartado 7.2.1. Cada una de las opciones analizadas, caracterizadas por sendas parejas de valores [**RMIN**, **RMAX**], da lugar a una secuencia de valores diarios de la lluvia útil –**LU**– para el periodo con datos termopluviométricos diarios disponibles –1 octubre 1967 a 28 de febrero de 2001– para la estación nº 7182 Murcia “Alfonso X”.
- La *salida* esta constituida por la serie diaria de la variación del nivel piezométrico debida a la precipitación correspondiente al periodo 26 septiembre de 2000 a 29 de diciembre de 2000 en la parcela PI1.

Una vez identificada la ley de correlación más ajustada posible, queda simultáneamente definida y “parametrizada” una metodología fiable para la evaluación de la recarga del sistema en función de datos meteorológicos accesibles.

⁵ Se repitió el modelo deconvolutivo con la evolución de la parcela PI-3 obteniéndose un peor resultado que con el realizado con la evolución de la parcela PI-1.

- Después de un laborioso proceso de calibración se llegó a ajuste satisfactorio, cuyas condiciones y magnitudes características son las siguientes:

Memoria del sistema: 64 pasos de tiempo, equivalentes a 64 días. Con un coeficiente de agotamiento exponencial igual a 0,99.

Recarga del sistema: Lluvia útil calculada mediante el programa THORDOS con:

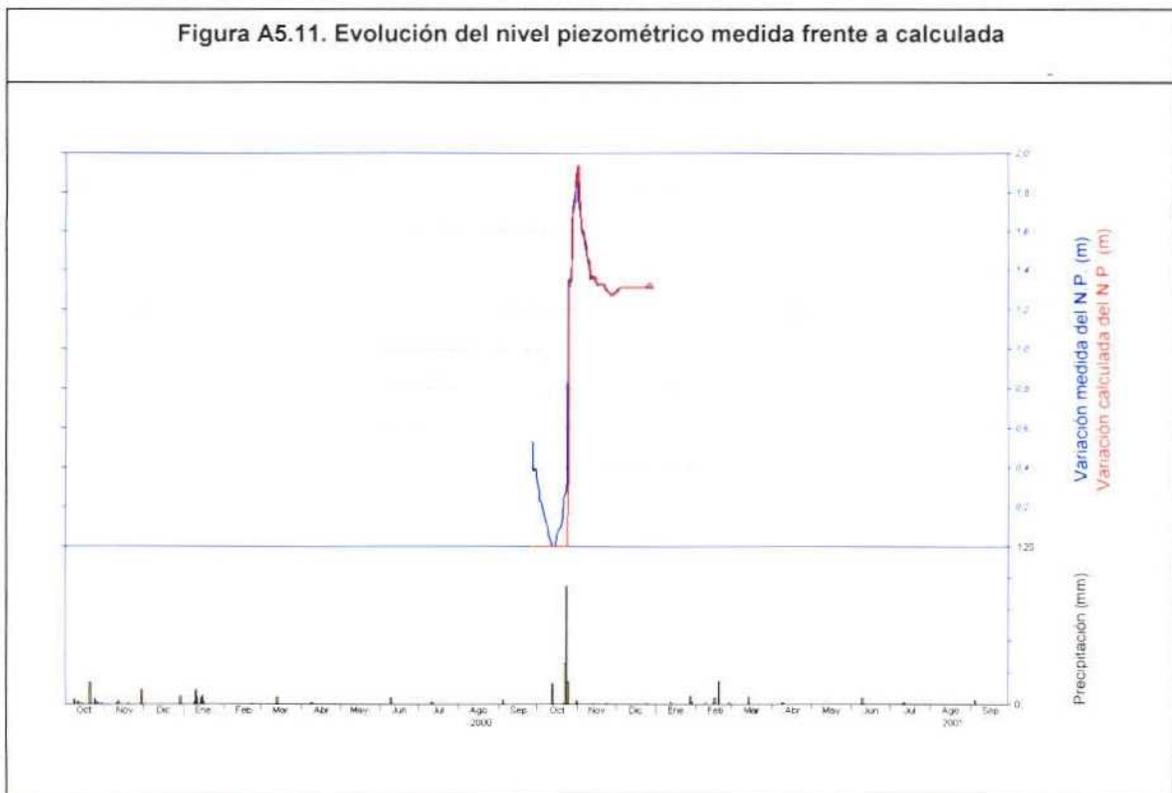
RMIN = 30 mm; RMAX = 70 mm

Respuesta del sistema: Variación del nivel piezométrico debida a la precipitación.

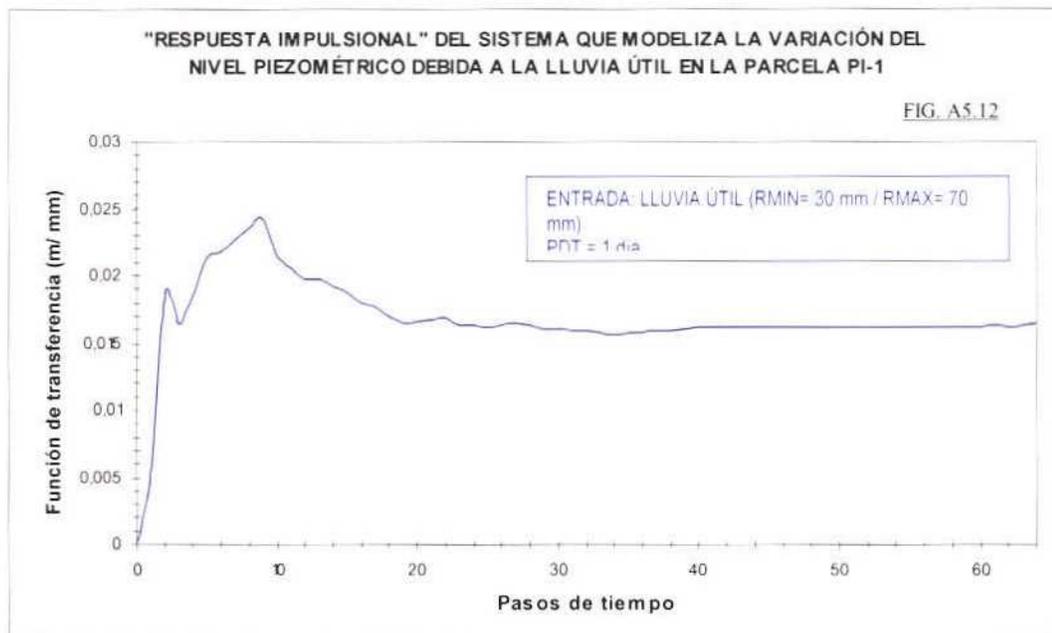
Periodo de calibración: 26/9/2000-29/12/2000.

Coefficiente de correlación: 0,9922.

En la Fig. A5.11. se han representado los valores de la variación del NP "observados" –en color azul– y calculados –color rojo–, según el ajuste finalmente obtenido.



En las Fig. A5.12 se ha representado los valores de la función Φ , también denominada "respuesta impulsional", función de transferencia o función de convolución, calculados y representados también por el programa, para el ajuste finalmente retenido. La significación y utilidad de los valores de la función Φ derivan del hecho de que:



- Si en el paso de tiempo j se registra una *entrada* (lluvia útil) de valor $E(j)$, su efecto individual (al que será necesario añadir el ocasionado por las entradas registradas en otros pasos de tiempo anteriores y/o posteriores al j) en el paso de tiempo i será

$$s_j(i) = E(j) \cdot \Phi(i-j)$$

- Los valores de Φ representan el efecto relativo distribuido de una determinada *entrada* E .

- La *salida* o efecto total registrable en el paso de tiempo i será la suma de las componentes provocadas por todas las $s_j(i)$, es decir

$$S(i) = \sum_j s_j(i) \quad \text{para } j = (j-M) \dots \dots \dots (i-1)$$

La función Φ representada en la Fig. 5.5, presenta un máximo relativo en el paso de tiempo 1, que corresponde a una respuesta "inmediata" a las primeras lluvias, seguido de un máximo absoluto situado en el paso de tiempo 9 –desfase de 9 días–. Este pico provoca el

aumento máximo del nivel piezométrico debido a la infiltración de la lluvia, atenuándose poco a poco este incremento hasta llegar a un valor constante.

3.2.4. Resultados del cálculo con Thordos

Los valores de RMIN y RMAX de 30 y 70 mm, respectivamente, derivados del excelente ajuste conseguido por deconvolución, se han utilizado para efectuar los cálculos definitivos con el programa Thordos para el periodo 1967/68-1999/00, con los siguientes resultados medios característicos:

$$\begin{aligned} \text{LU} &= 50,03 \text{ mm (17,6 \% de la lluvia)} \\ \text{INF} &= 34,39 \text{ mm (12,1 \% de la lluvia)} \\ \text{ESC} &= 15,64 \text{ mm (5,5 \% de la lluvia)} \\ \text{ETR} &= 234,39 \text{ mm (82,4 \% de la lluvia)} \end{aligned}$$

Los valores correspondientes al balance hídrico de los años característicos del periodo considerado se resumen en el cuadro A5.10

Cuadro A5.10. Parámetros hidrometeorológicos característicos de la Vega Media
Periodo 1967/68-1999/00

	Año seco 1999/00	Año húmedo 1972/73	Año medio
P (mm)	108,8	469,1	284,4
T (° C)	19,5	17,9	18,8
ETP (mm)	1061,0	935,5	990,9
ETR (mm)	108,7	259,1	234,4
LU (mm)	0,0	185,4	50,0
INF (mm)	0,0	113,3	34,4
ESC (mm)	0,0	72,2	15,6

Teniendo en cuenta las características morfológicas de la Vega Media, en especial su escasa pendiente media, se considera conveniente retener como valor de la recarga media por infiltración de lluvia el correspondiente a la lluvia útil, es decir, 50 mm/año. Para el periodo del Estudio (marzo2000-abril 2001) la lluvia útil calculada es de 81,3 mm.

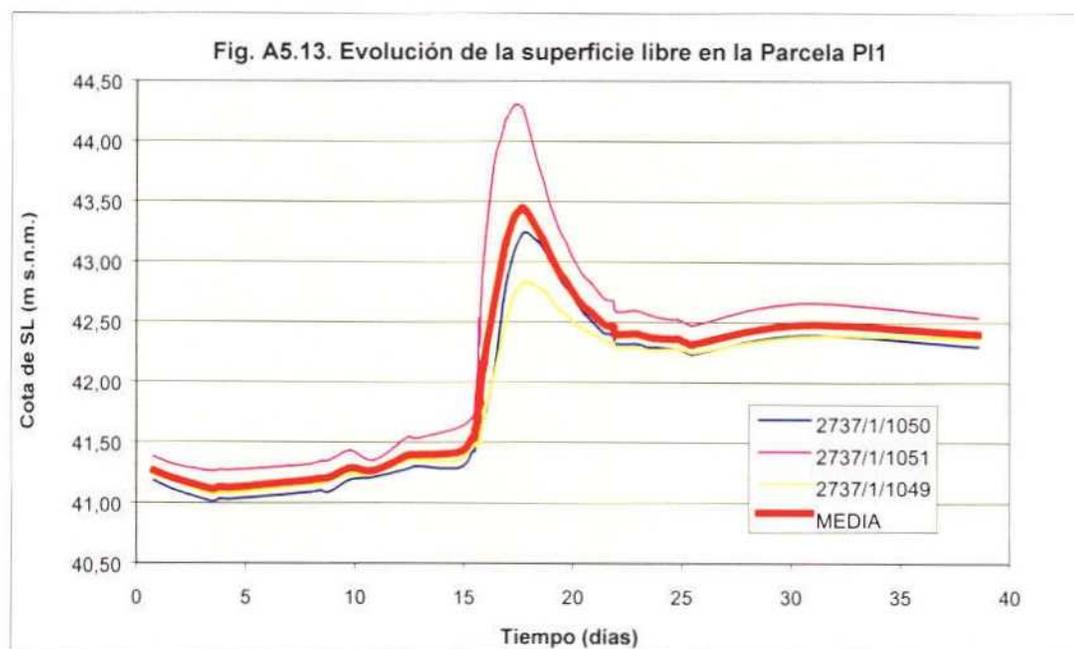
4. RECARGA POR RETORNO DE RIEGOS

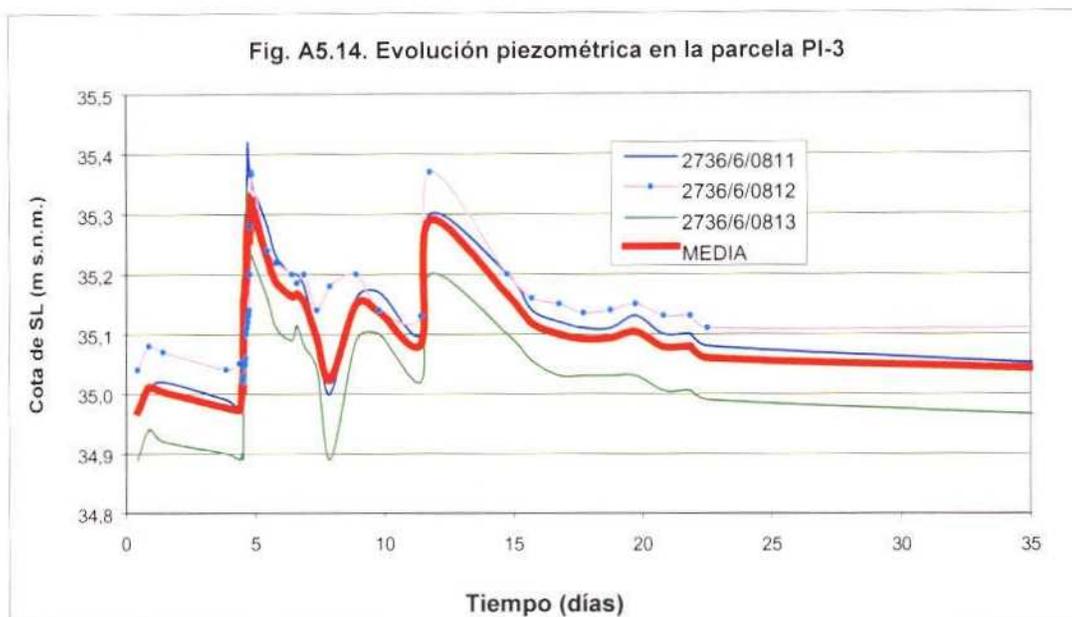
4.1. METODOLOGÍA

Para el análisis y la determinación de la recarga por retorno de riegos al acuífero en la unidad de la Vega Media a partir de los controles de riegos efectuados en las parcelas piloto acondicionadas al efecto, y teniendo en cuenta que se disponía de valores representativos de las características hidrodinámicas del tramo acuífero somero derivados de los ensayos de diverso tipo realizados en el Estudio, se optó por la elaboración de modelos matemáticos del flujo sencillos como medio más operativo y objetivo de considerar todos los parámetros que influyen en el cálculo, cuya viabilidad analítica es más que dudosa.

Se realizaron dos modelizaciones, correspondientes a las parcelas PI1, representativa de cultivos leñosos (cítricos), y PI3, representativa de cultivos herbáceos.

En las figs. A5.13 y A5.14 se han reflejado los hidrogramas de la superficie libre observados en los piezómetros de control de cada una de las dos parcelas, junto con el correspondiente a la media de los registros en los mismos, que es la evolución utilizada como referencia en los trabajos de simulación matemática.





El planteamiento seguido en las modelizaciones del flujo es idéntico para ambas parcelas: se han elaborado sendos modelos monocapa, ya que únicamente el acuífero somero es objeto de la modelización. Para la modelización se ha utilizado el programa VisualModflow⁶.

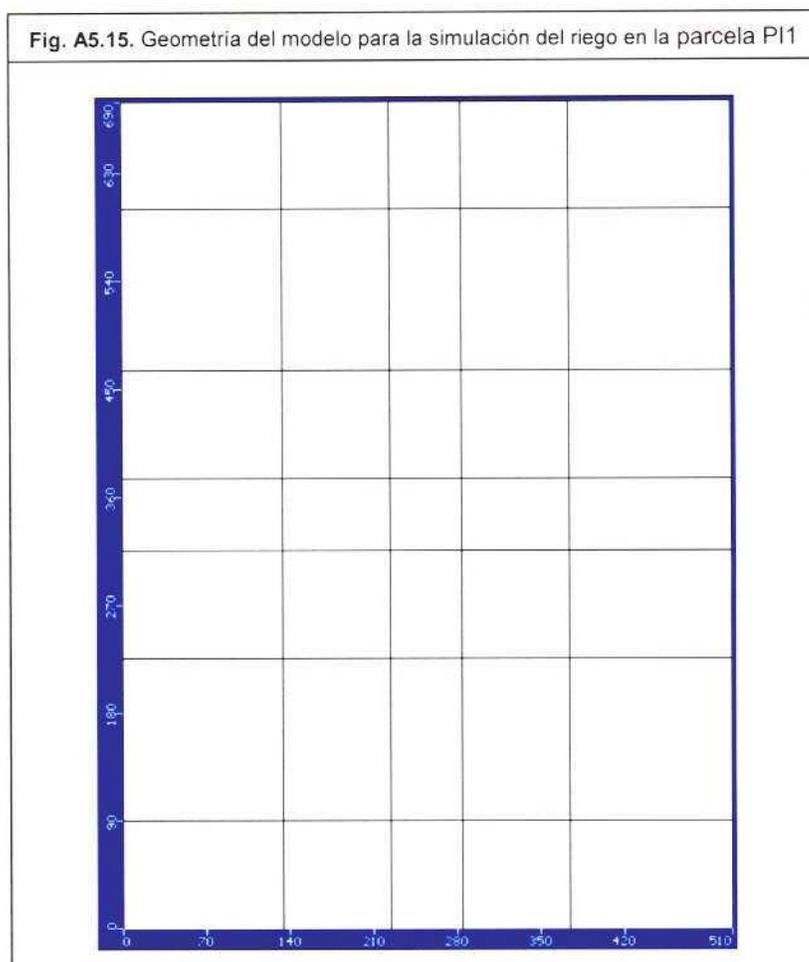
Se parte de un régimen permanente que es el correspondiente a la posición de la superficie libre inmediatamente anterior al riego. A partir del permanente, se ha elaborado un régimen transitorio en el que se introduce como recarga en la malla central del modelo (la correspondiente a la parcela piloto) un porcentaje del agua aplicada al riego que se ajusta utilizando como referencia de calibración la evolución piezométrica media observada en los piezómetros de control. En la modelización correspondiente a la parcela PI1, la piezometría de referencia se ha asignado a la malla representativa de la parcela de riego, ya que se dispone de control piezométrico en los bordes y el centro de la parcela. En el caso de la parcela PI3, la piezometría observada se ha asignado a la malla situada inmediatamente aguas debajo de la malla que representa a la parcela de riego, ya que las observaciones de superficie libre corresponden a puntos situados en la periferia de la parcela piloto. Se ha utilizado un paso de tiempo de 1 día, con una duración de simulación que corresponde en cada caso de la duración del efecto del riego.

⁶ Programa para la modelización tridimensional del flujo subterráneo, desarrollado por Waterloo Hydrogeologic Inc. (Canada).

4.2. MODELIZACIÓN

4.2.1. Geometría de los modelos

El diseño de la geometría de los modelos –el mismo para las dos parcelas– se ha reflejado en la fig. A5.15 (se incluyen escalas vertical y horizontal, en metros).



Los modelos están constituidos por un conjunto de 35 celdas repartidas de forma regular en 7 filas por 5 columnas, que se genera a partir de una celda central cuadrada de dimensiones equivalentes a las de cada parcela de riego (60 m, en la parcela PI, y 116 m, en la parcela PI3), a partir de la cual se ha extendido lateralmente el dominio de modelización con celdas que incrementan una de sus dimensiones un 50% conforme se alejan de la celda

central⁷; las dos filas extremas –1 y 7– según la mayor dimensión del modelo (que corresponde a la dirección del flujo subterráneo) ven reducida su dimensión longitudinal un 50% respecto de las celdas de la fila vecina.

El espesor de la capa modelizada es el correspondiente al espesor del acuífero somero en cada caso: 24 m, para la parcela PI1, y 26 m, para la PI3. No obstante, este espesor ha sido rectificado en la dirección del flujo del agua para compensar el efecto del gradiente hidráulico, con objeto de crear una superficie libre horizontal y así modelizar únicamente la acción provocada por el riego.

4.2.2. Condiciones iniciales

Como situación de partida para ambos casos, una vez constituida la geometría del dominio de modelización, se parte de una situación estacionaria del nivel piezométrico, que para cada parcela está definida del siguiente modo:

- Parcela PI1. El nivel piezométrico medio en esta parcela en los días previos al riego fue de 41,2 m s.n.m., con un gradiente hidráulico medio del 0,025 %, a partir del cual se ha definido la situación de partida de la simulación, que se refleja en la fig. A5.16 (escalas horizontal y vertical en metros, cotas de superficie libre en m s.n.m.).
- Parcela PI3. El nivel piezométrico medio en esta parcela en los días previos al riego fue de 35,0 m s.n.m., con un gradiente hidráulico medio del 0,1 %, que aplicado a todo el mallado proporciona la situación piezométrica que se muestra en la fig. A5.17 (escalas horizontal y vertical en metros, cotas de superficie libre en m s.n.m.).

Los parámetros característicos de partida de ambas simulaciones se han resumido en el cuadro A5.11., si bien, los valores que se presentan en este cuadro serán ajustados en el correspondiente proceso de calibración del régimen transitorio.

Cuadro A5.11. Valores de partida para la modelización

	K (m/s)	Porosidad eficaz
Parcela PI-1	$1,25 \cdot 10^{-6}$	0,01
Parcela PI-3	$4,2 \cdot 10^{-5}$	0,04

⁷ El programa VisualModflow aconseja que el incremento de tamaño en la transición de unas celdas a otras sea como máximo del 50%.

Fig. A5.16. Situación previa al riego en la parcela P11

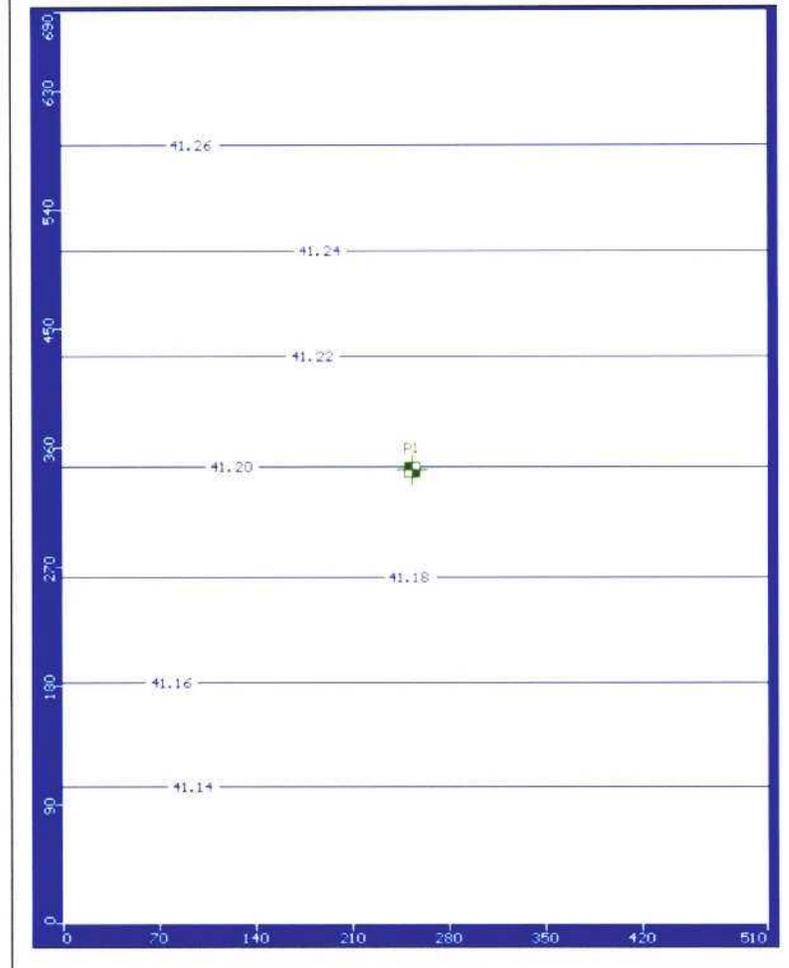
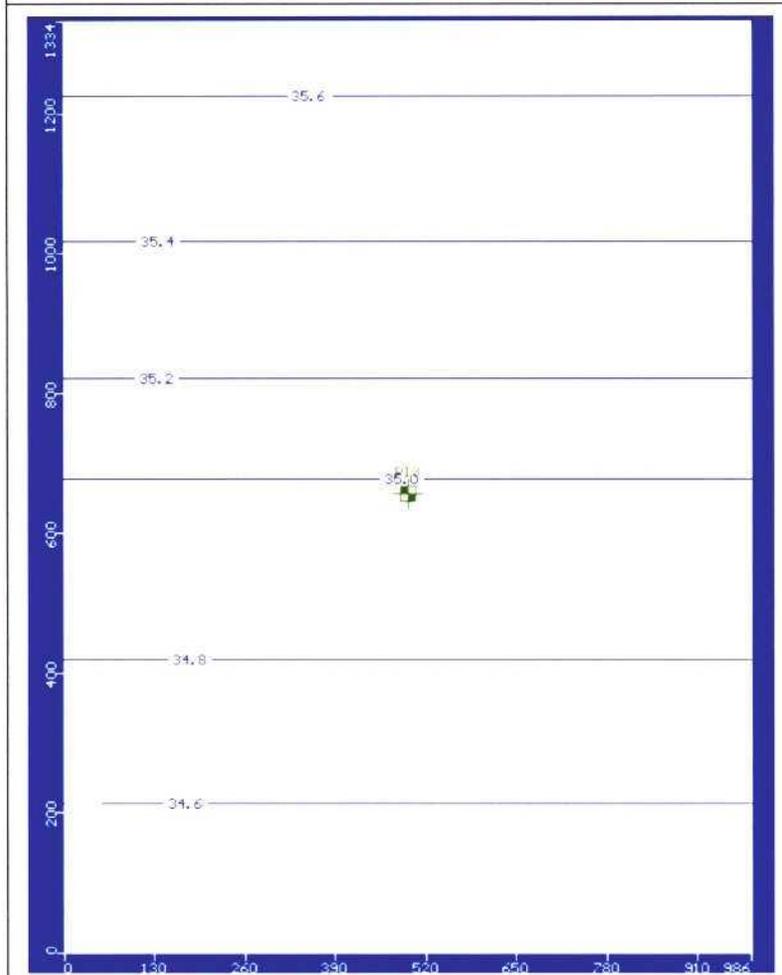
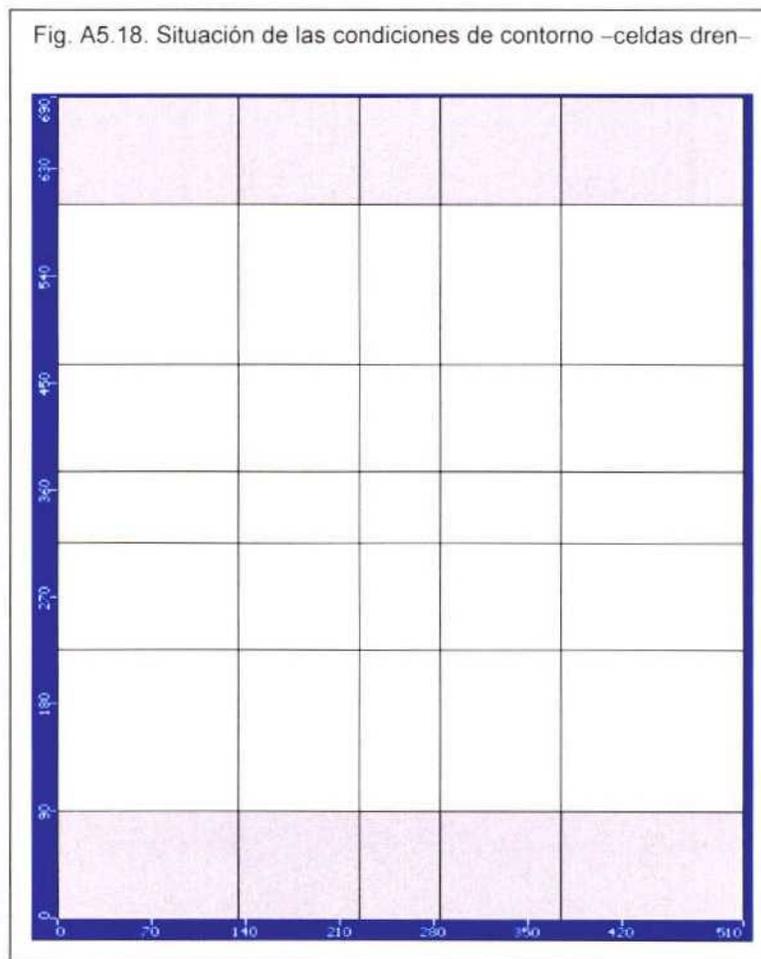


Fig. A5.17. Situación previa al riego en la parcela PI3



4.2.3. Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno han sido idénticas para las dos parcelas modelizadas, variando únicamente los valores que toman los distintos parámetros que las definen en cada caso. Tal y como se ha reflejado en la figura A5.18, las condiciones de contorno han quedado definidas de la siguiente manera: flujo nulo en los laterales izquierdo y derecho de la zona modelizada y celdas dren en las mallas que conforman las filas extremas aguas arriba y aguas abajo –primera y última– según el sentido del flujo.



Se a optado por colocar celdas dren en los extremos de la zona modelizada y no celdas a potencial constante porque, aunque las celdas en las que se colocan las condiciones de contorno han sido intencionadamente alejadas, el imponer un potencial constante da una rigidez extrema al modelo, haciendo muy difícil reproducir la evolución del nivel piezométrico provocada por el riego.

La cota de drenaje de las celdas dren se ha situado 1 metro por debajo de la cota del nivel piezométrico en la situación de partida y la transmisividad de paso se ha calculado para cada celda dren teniendo en cuenta el caudal máximo intercambiable por la celda dren y la cota de drenaje, también en la situación de origen.

4.2.4. Simulación del riego (régimen transitorio)

Una vez definidas la geometría, los parámetros constitutivos, las condiciones iniciales y de contorno, se pasa a definir el régimen transitorio que refleje la evolución del nivel piezométrico antes, durante y después del riego. En los dos casos modelizados se eligió un paso de tiempo de un día, introduciéndose el riego en forma de recarga el día correspondiente. Como valores iniciales de recarga se han tomado los volúmenes de agua aplicada al riego una vez descontada la tasa de evapotranspiración potencial calculada mediante el programa Tordos. Las condiciones de partida para cada parcela son las siguientes:

- Parcela PI1. El periodo modelizado es de 39 días, aplicándose inicialmente un volumen de agua de riego de 420,6 m³ el decimosexto día. Este volumen de agua resulta de descontar al agua total del riego –443,5 m³– el volumen de agua evapotranspirado⁸, 22,9 m³.
- Parcela PI3. El periodo modelizado es de 12 días aplicándose un volumen inicial de agua de riego de 2039 m³ el cuarto día. Este volumen de agua resulta de descontar al agua total del riego –2108 m³– el volumen de agua evapotranspirado⁹, 69,16 m³.

4.2.5. Calibración

Para calibrar el régimen transitorio se han comparado las medidas¹⁰ de nivel piezométrico tomadas en las parcelas con las calculadas por los modelos. A las medidas diarias de contraste de nivel piezométrico para cada parcela se les descontó la parte de la carga hidráulica debida a la tendencia natural del nivel piezométrico del acuífero cuando se hizo el seguimiento que aquí se plantea. Estos valores de calibración se han resumido en el cuadro A5.12.

8 La ETP calculada por el programa THORDOS para el día del riego, 25 de julio, es de 6,37 mm.

9 La ETP calculada por el programa THORDOS para el día del riego, 17 de julio, es de 5,14 mm.

10 Como medidas del nivel piezométrico diarias con las que verificar la bondad de la simulación se ha tomado la media de las medidas realizadas en los sondeos de cada parcela para el periodo modelizado. Para aquellos días en los que se tengan más de una medida, se tomará la media de éstas como nivel piezométrico de la parcela ese día.

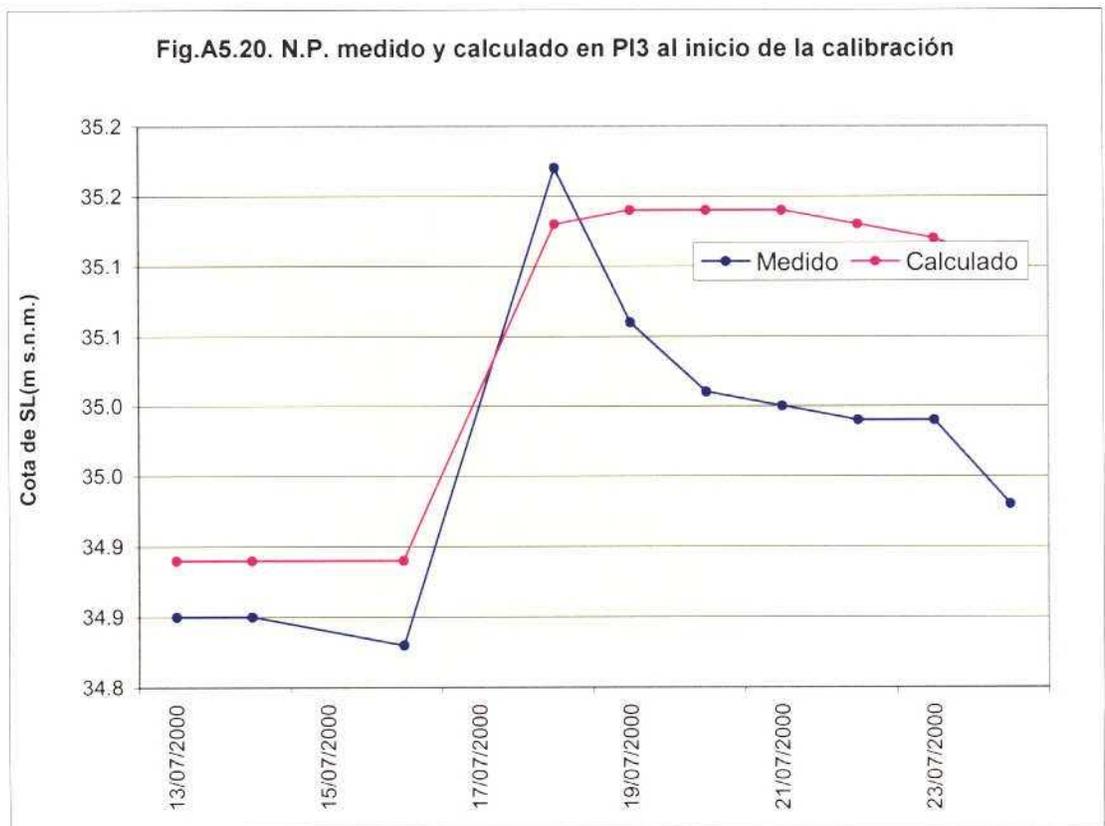
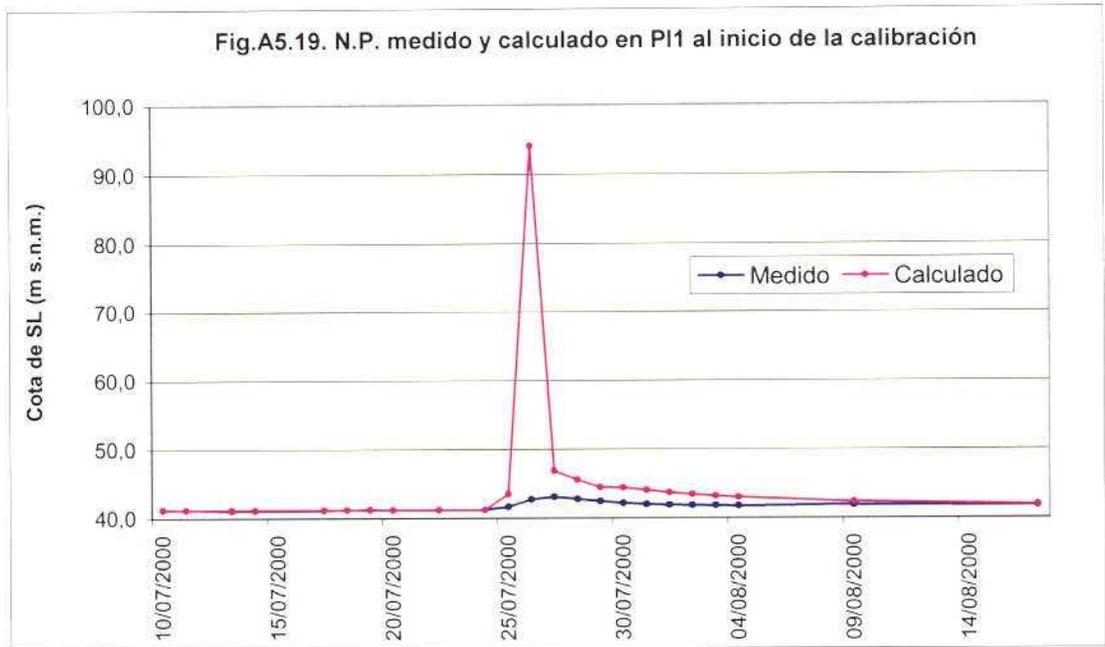
La calibración del riego en la parcela cultivada por herbáceos –PI3– se realizó con las medidas del nivel piezométrico en la parcela en los 12 primeros días de los que se tienen datos, ya que a partir de este día como puede apreciarse en la evolución del nivel piezométrico de esta parcela –fig. 5.10.– el nivel se ve afectado por otros riegos no controlados.

Cuadro A5.12. Medidas diarias de N.P. para calibración del régimen transitorio

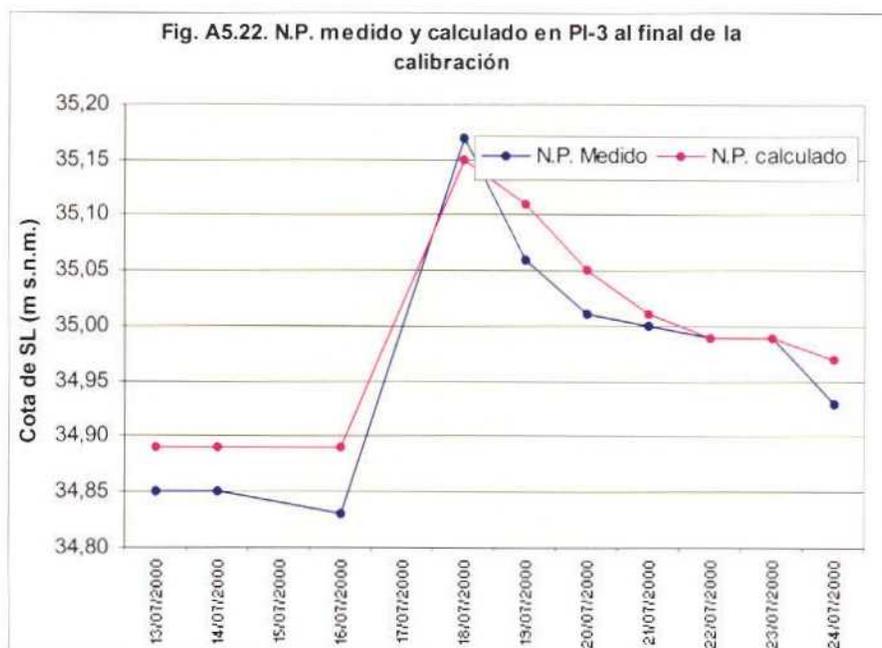
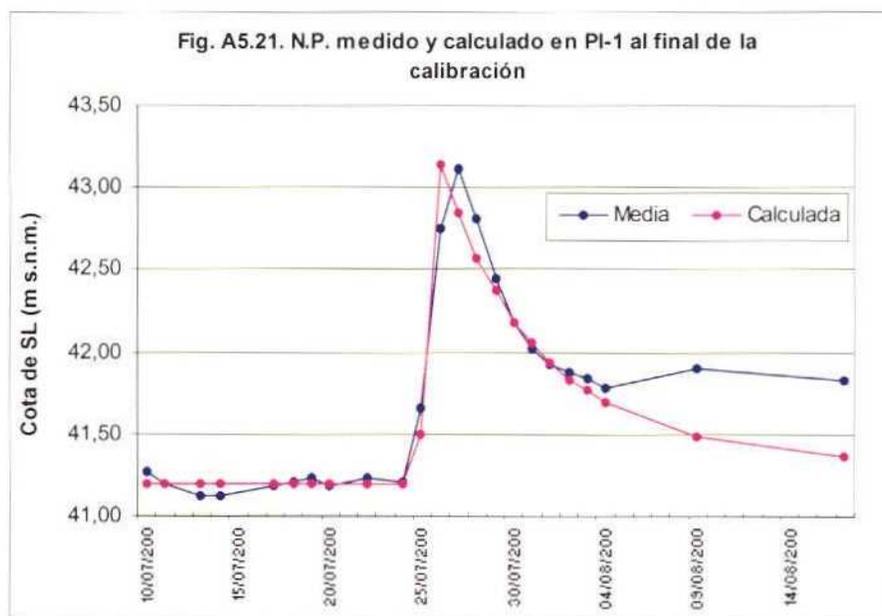
Parcela PI1		
Fecha	Tiempo (días)	N.P. Medio (m s.n.m.)
10/07/2000	1	41,26
11/07/2000	2	41,19
13/07/2000	4	41,12
14/07/2000	5	41,13
17/07/2000	8	41,18
18/07/2000	9	41,20
19/07/2000	10	41,23
20/07/2000	11	41,19
22/07/2000	13	41,23
24/07/2000	15	41,21
25/07/2000	16	41,66
26/07/2000	17	42,75
27/07/2000	18	43,11
28/07/2000	19	42,81
29/07/2000	20	42,45
30/07/2000	21	42,18
31/07/2000	22	42,02
01/08/2000	23	41,92
02/08/2000	24	41,87
03/08/2000	25	41,83
04/08/2000	26	41,77
09/08/2000	31	41,90
17/08/2000	39	41,83

Parcela PI3		
Fecha	Tiempo (días)	N.P. Medio (m s.n.m.)
13/07/2000	1	34,99
14/07/2000	2	35,00
16/07/2000	4	34,98
18/07/2000	5	35,32
19/07/2000	6	35,21
20/07/2000	7	35,16
21/07/2000	8	35,15
22/07/2000	9	35,15
23/07/2000	10	35,14
24/07/2000	12	35,08

Con las condiciones iniciales planteadas en el apartado 4.2.2. se ejecutaron sendas simulaciones en régimen transitorio para las dos parcelas –cítricos y herbáceos–, obteniéndose los primeros valores de piezometría calculada que han sido representados frente a los valores medidos en las figuras A5.19. y A5.20.



El proceso de calibración en régimen transitorio se realizó en dos etapas. En primer lugar se ajustó el pico piezométrico provocado por el riego, ajuste que se consigue variando el volumen de agua que se introduce al modelo en forma de recarga. Un segundo ajuste "fino" se realizó variando valores de permeabilidad y porosidad hasta alcanzarse los satisfactorios ajustes que se presentan gráficamente en las figuras A5.21. y A5.22., y numéricamente en los cuadros A5.13. y A5.14.



Cuadro A5.13. Ajuste final en la parcela PI1

Fecha	Tiempo (días)	N.P. Medio (m s.n.m.)	N.P. Calculado (m s.n.m.)
10/07/00	1	41.26	41.20
11/07/00	2	41.19	41.20
13/07/00	4	41.12	41.20
14/07/00	5	41.13	41.20
17/07/00	8	41.18	41.20
18/07/00	9	41.20	41.20
19/07/00	10	41.23	41.20
20/07/00	11	41.19	41.20
22/07/00	13	41.23	41.19
24/07/00	15	41.21	41.19
25/07/00	16	41.66	41.50
26/07/00	17	42.75	43.14
27/07/00	18	43.11	42.85
28/07/00	19	42.81	42.56
29/07/00	20	42.45	42.37
30/07/00	21	42.18	42.18
31/07/00	22	42.02	42.05
01/08/00	23	41.92	41.93
02/08/00	24	41.87	41.83
03/08/00	25	41.83	41.77
04/08/00	26	41.77	41.69
09/08/00	31	41.90	41.49
17/08/00	39	41.83	41.37

Cuadro A5.14. Ajuste final en la parcela PI3

Fecha	Tiempo (días)	N.P. Medio (m s.n.m.)	N.P. Calculado (m s.n.m.)
13/07/2000	1	34.85	34.89
14/07/2000	2	34.85	34.89
16/07/2000	4	34.83	34.89
18/07/2000	5	35.17	35.15
19/07/2000	6	35.06	35.11
20/07/2000	7	35.01	35.05
21/07/2000	8	35.00	35.01
22/07/2000	9	34.99	34.99

4.2.6. Resultados de la modelización

Como resultado principal de la calibración se obtiene el valor de la infiltración por exceso de riego según el tipo de cultivo, valor que ha sido resumido en el cuadro A5.15. A su vez, se obtiene como resultado accesorio un mejor conocimiento de la permeabilidad y la porosidad de las zonas modelizadas, llegándose a los valores que se describen en el cuadro A5.16, así como del comportamiento de la piezometría en la zona de influencia a la parcela afectada por el riego. Como muestra de esto último se han representado una serie de figuras –A5.23 a A5.30.– en las que se refleja la evolución de las isopiezas según va progresando el régimen transitorio. Los ficheros de resultados generados por el programa Modflow se incluyen en los Apéndices 5.3 y 5.4.

Cuadro A5.15. Recarga por infiltración de exceso de riegos

	Volumen regado (m ³)	Volumen infiltrado (m ³)	Tasa de infiltración (%)	Dotación por riego (m ³ /Ha)	Recarga por riego (m ³ /Ha)
Parcela PI-1 Cítricos	443,5	80,4	18,1	1242	225
Parcela PI-3 Herbáceos	2100	609	29,0	1078	313

Cuadro A5.16. Permeabilidad y porosidad obtenidas de la calibración

	Permeabilidad (m/s)	Porosidad eficaz
Parcela PI-1 Cítricos	$1,25 \cdot 10^{-6}$	0,01
Parcela PI-3 Herbáceos	$9 \cdot 10^{-5}$	0,01

Fig. A5.23. Piezometría antes del riego en la parcela PI-1

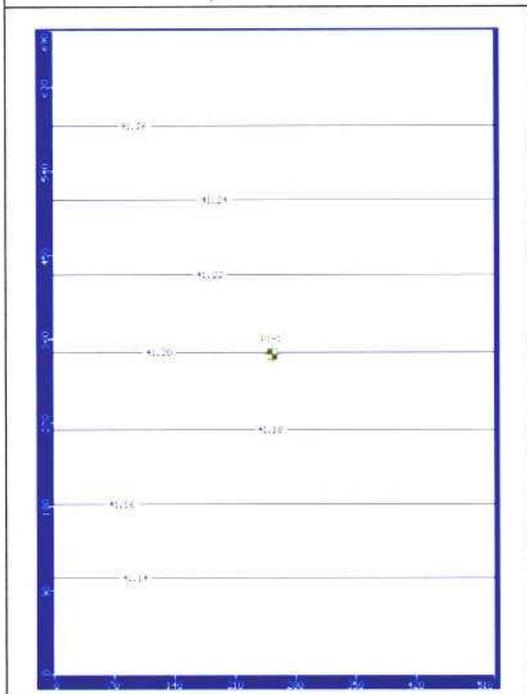


Fig. A5.24. Piezometría 1 día después del riego en la parcela PI-1

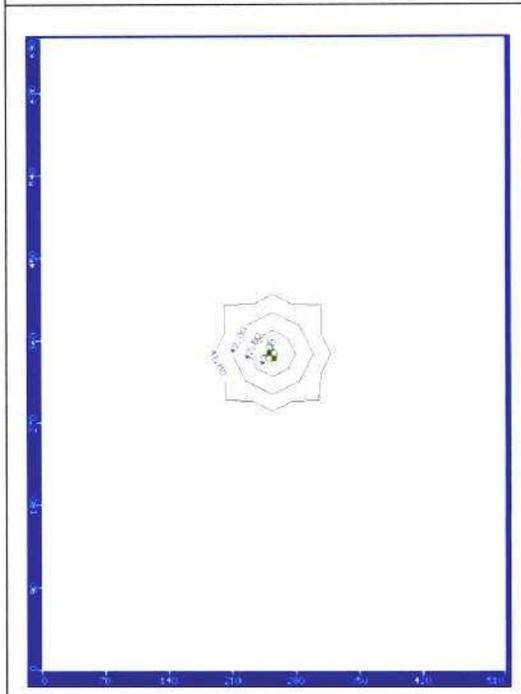


Fig. A5.25. Piezometría 5 días después del riego en la parcela PI-1

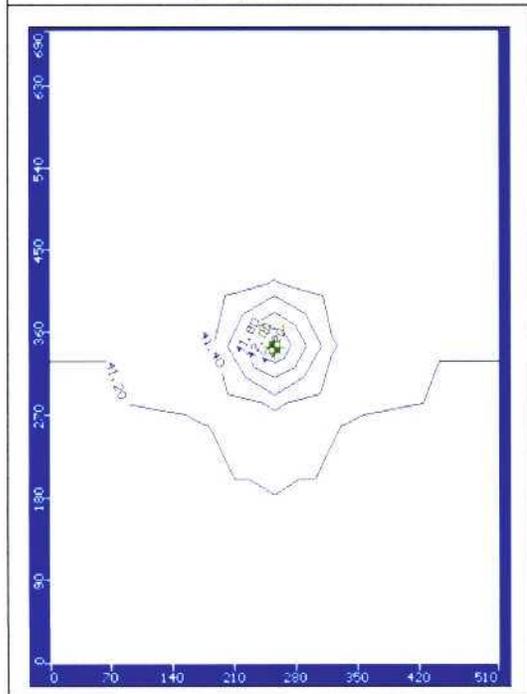


Fig. A5.26. Piezometría 20 días después del riego en la parcela PI-1

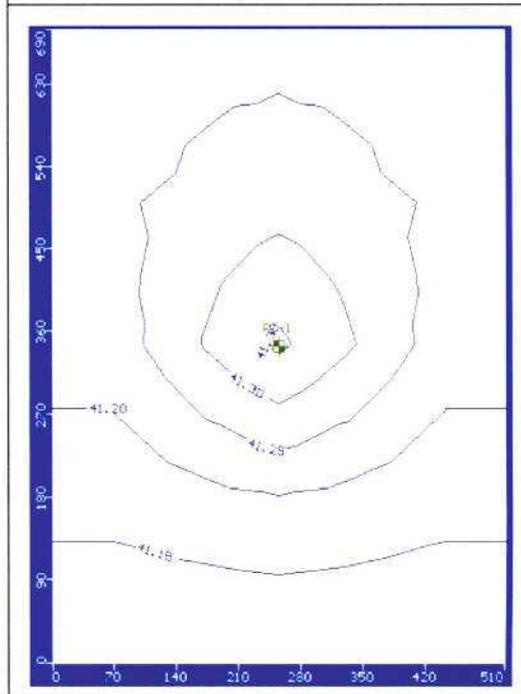


Fig. A5.27. Piezometría antes del riego en la zona de influencia de la parcela PI-3

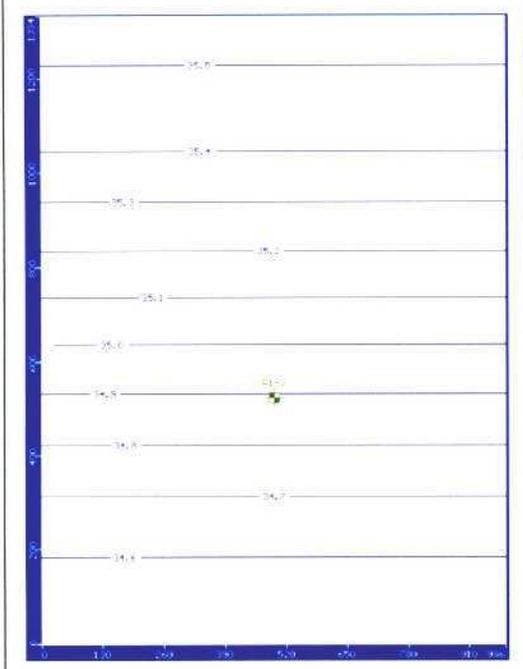


Fig. A5.28. Piezometría el día del riego en la zona de influencia de la parcela PI-3

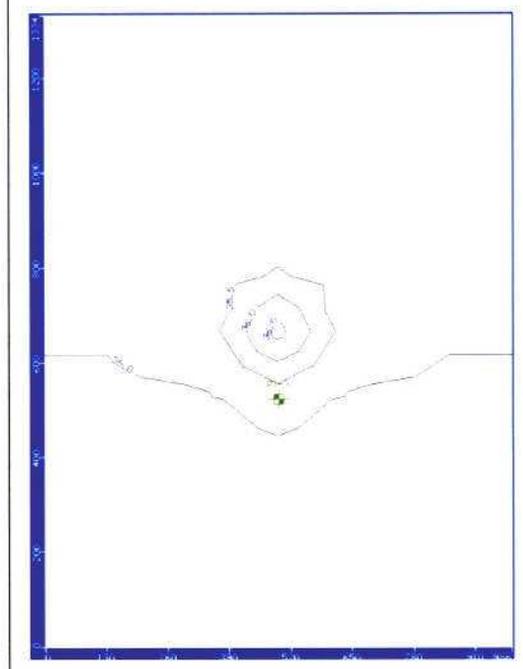


Fig. A5.29. Piezometría 2 días después del riego en la zona de influencia de la parcela PI-3

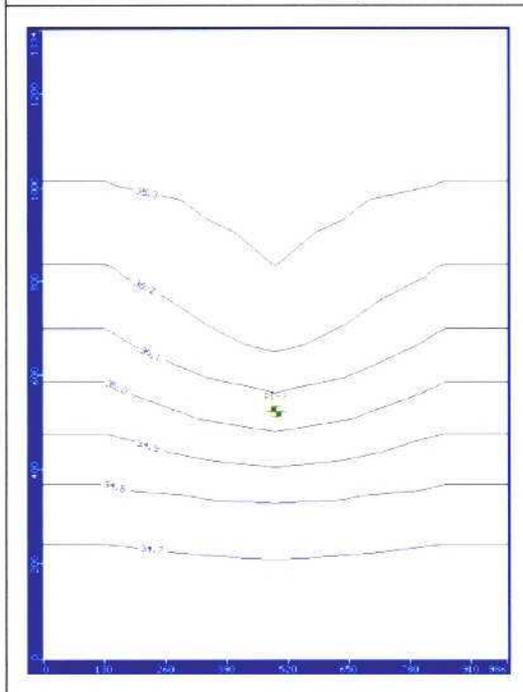


Fig. A5.30. Piezometría 1 semana después del riego en la zona de influencia de la parcela PI-3

