



Instituto Tecnológico
GeoMinero de España



MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGIA

37056

**ESTUDIO DE LA EVOLUCION DE LOS
COMPUESTOS DEL NITROGENO EN EL
SUELO Y SUBSUELO**

ITGE, 2ª FASE 1989-1990

PARTE II
FLUJO EN LA ZONA NO SATURADA

PARTE II

INDICE

	Pág.
1. ANALISIS DE LOS DATOS TENSIOMETRICOS Y PIEZO- METRICOS	1
1.1. Estudio de potenciales	2
1.2 Relación tensiometría-piezometría	8
1.3 Relación tensiometría-precipitación-riegos	12
2. MODELIZACION DEL FLUJO EN LA ZONA NO SATURADA EN LA PARCELA EXPERIMENTAL E-2	17
2.1. Selección del modelo	18
2.2. Descripción del modelo	21
2.2.1 Ecuación de flujo	21
2.2.2 Extracción de agua por las plantas	22
2.2.3 Método numérico de solución	24
2.2.4 Condiciones de borde	28
2.2.4.1 Condiciones de borde en el techo del sistema	28
2.2.4.2 Condiciones de borde en el fondo del sistema	29
2.2.5 Resultados del modelo	31
2.3. Datos incorporados al modelo	31
2.3.1 Diferenciación de capas	31

2.3.2	Discretización	33
2.3.3	Parámetros del terreno	36
2.3.3.1	Curvas de retención	36
2.3.3.2	Conductividad hidráulica	37
2.3.4	Condiciones iniciales	45
2.3.5	Condiciones de borde	48
2.3.5.1	Condición de borde en el techo del sistema	48
2.3.5.2	Condición de borde en el fondo del sistema	51
2.4.	Calibración y resultados	51
2.4.1	Introducción	51
2.4.2	Consideraciones iniciales	52
2.4.3	Proceso de ajuste	53
2.4.3.1	Período marzo-junio de 1989	53
2.4.3.2	Período julio-noviembre de 1989	59
2.4.4	Resultados	64
2.4.4.1	Período marzo-junio de 1989	66
2.4.4.2	Período julio-noviembre de 1989	79
2.5.	Discusión de los resultados	89
2.6	Resumen y conclusiones	93
3.	ENSAYO DE TRAZADOR	97
3.1.	Diseño del ensayo	98

3.2 Trazado y seguimiento	99
3.3 Interpretación	101
3.4 Comparación con los resultados sobre velocidades obtenidos en el modelo de flujo	104
3.5 Resumen y conclusiones	105
4. CONCLUSIONES SOBRE EL ESTUDIO DEL FLUJO EN ZONA NO SATURADA	110

PARTE II

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1. Potenciales de los tensiómetros T-07, T-08, T-09, T-10, T-11 y T-12 y del nivel freático en 1989	4
Figura 1.2. Diferencias de potencial entre los tensiómetros T-07 y T-09, T-09 y T-11, y T-07 y T-11 en 1989	5
Figura 1.3. Diferencias de niveles de agua entre los piezómetros profundos y los superficiales de la Finca "El Palomar" en 1988 y 1989	9
Figura 1.4. Potenciales de los tensiómetros T-07, T-09 y T-11, y del nivel freático en 1988	11
Figura 1.5. Potenciales de los tensiómetros T-07, T-09 y T-11, precipitaciones en la estación meteorológica de Madrid-Barajas y riegos controlados durante 1988 y 1989	14
Figura 2.1. Variable adimensional de extracción, α , en función del valor absoluto del potencial de presión h	25
Figura 2.2. Discretización en "profundidad-tiempo"	26

Figura 2.3. Condiciones de borde inferior del modelo SWATRE	30
Figura 2.4. Discretización del perfil para el modelo SWATRE. Localización de los tensiómetros en la parcela E-2	34
Figura 2.5. Curva de retención correspondiente al tipo textural arenoso de grano medio	38
Figura 2.6. Curva de retención correspondiente al tipo textural arenoso-franco de grano medio	39
Figura 2.7. Curva de retención correspondiente al tipo textural arenoso-franco de grano fino	40
Figura 2.8. Curva de retención correspondiente al tipo textural franco	41
Figura 2.9. Comparación de los métodos de Rijtema y Van Genuchten para el cálculo de la permeabilidad para el tipo textural representado en la figura 2.6.	44
Figura 2.10. Perfil tensional, considerado al comienzo del primer período de simulación (28 de febrero de 1989)	47
Figura 2.11. Perfil tensional, considerado al comienzo del segundo período de simulación (6 de julio de 1989)	49

Figura 2.12	Comparación de curvas de retención de humedad de la calicata C-3 con la curva teórica del grupo textural arenoso franco de grano medio	56
Figura 2.13	Período marzo-junio de 1989. Funciones de extracción de aguas por las plantas utilizadas en el ajuste del modelo SWATRE	58
Figura 2.14	Período marzo-junio de 1989. Ajuste final de los potenciales calculados por el modelo SWATRE y los medidos en la parcela experimental E-2, sin considerar riegos no controlados.	60
Figura 2.15	Período marzo-junio de 1989. Ajuste final de los potenciales calculados por el modelo SWATRE y los medidos en la parcela experimental E-2, con riegos supuestos.	61
Figura 2.16	Período julio-noviembre de 1989. Funciones de extracción de aguas por las plantas utilizadas en el ajuste del modelo SWATRE	63
Figura 2.17	Período julio-noviembre de 1989. Ajuste final de los potenciales calculados por el modelo SWATRE y los medidos en la parcela experimental E-2.	65
Figura 2.18	Período marzo-junio de 1989. Infiltración calculada por el modelo SWATRE.	68

Figura 2.19	Período marzo-junio de 1989. Evaporación potencial y real, y transpiración potencial y real calculadas por el modelo SWATRE	70
Figura 2.20	Período marzo-junio de 1989. Flujo en el límite superior de la zona saturada.	72
Figura 2.21	Período marzo-junio de 1989. Flujos calculados por el modelo SWATRE a 30, 90, 150, 200, 250, 300 y 350 cm de profundidad	74
Figura 2.22	Período marzo-junio de 1989. Evolución temporal de las humedades a 30, 150 y 250 cm de profundidad	76
Figura 2.23	Período marzo-junio de 1989. Perfil de humedades entre el 20 de mayo y el 3 de junio.	77
Figura 2.24	Período marzo-junio de 1989. Diagrama tiempo-profundidad-humedad en la parcela experimental E-2	78
Figura 2.25	Período julio-noviembre de 1989. Infiltración calculada por el modelo SWATRE.	80
Figura 2.26	Período julio-noviembre de 1989. Evaporación potencial y real, y transpiración potencial y real calculadas por el modelo SWATRE	82

Figura 2.27	Período julio-noviembre de 1989. Flujo en el límite superior de la zona saturada.	84
Figura 2.28	Período julio-noviembre de 1989. Flujos calculados por el modelo SWATRE a 30, 90, 150, 200, 250, 300 y 350 cm de profundidad	86
Figura 2.29	Período julio-noviembre de 1989. Evolución temporal de las humedades a 30, 150 y 250 cm de profundidad	88
Figura 2.30	Período julio-noviembre de 1989. Perfil de humedades entre el 20 de mayo y el 3 de junio.	90
Figura 2.31	Período julio-noviembre de 1989. Diagrama tiempo-profundidad-humedad en la parcela experimental E-2	91
Figura 3.1	Evolución de la concentración de bromuros en profundidad (junio a diciembre 1989. E-2)	102

PARTE II

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1 Comparación de las características de los modelos	20
Tabla 2.2 Balance de agua en el período 1-3-89 al 30-6-89	67
Tabla 2.3 Valores de evaporación y transpiración del período marzo-junio de 1989 obtenidos por el modelo SWATRE	69
Tabla 2.4 Flujo calculado en la zona no saturada. Período marzo-junio de 1989.	75
Tabla 2.5 Balance de agua en el período 6-7-89 al 30-11-89	81
Tabla 2.6 Valores de evaporación y transpiración del período julio-noviembre de 1989 obtenidos por el modelo SWATRE	83
Tabla 2.7 Flujo calculado en la zona no saturada. Período julio-noviembre de 1989.	85
Tabla 3.1 Concentración de bromuros (mg/l)	100
Tabla 3.2 Velocidades de flujo en la zona no saturada calculadas por el modelo SWATRE (Cultivo maíz. E-2)	106

1. ANALISIS DE LOS DATOS TENSIOMETRICOS Y PIEZOMETRICOS

1. ANALISIS DE LOS DATOS TENSIOMETRICOS Y PIEZOMETRICOS

Con anterioridad a la selección del modelo se ha realizado un análisis semicuantitativo de los datos tensiométricos y de piezometrías para obtener esencialmente las diferencias de potencial que condicionan el flujo al originar el gradiente en el perfil de la zona no saturada.

No ha sido posible analizar el flujo propiamente dicho al no tenerse en todo el perfil curvas de retención que relacionen las presiones (único dato disponible) con las humedades, ni la permeabilidad del medio en función del contenido de humedad de la zona no saturada.

1.1. Estudio de potenciales

El potencial hidráulico en la zona no saturada puede simplificarse mediante la expresión:

$$\phi = \phi_m + \phi_g$$

donde ϕ_m es el potencial de presión debido a las interacciones locales entre los componentes del suelo y el agua, y ϕ_g es el potencial gravitacional debido a la fuerza de la gravedad. Si el potencial hidráulico se define como la energía del agua por unidad de volumen, queda como

$$\phi = p + \rho g z$$

en la que p es la presión a la que se encuentra el agua, ρ es la densidad del agua, g es la constante gravitacional y z es la altura del agua con relación a un plano de referencia.

Expresando el potencial en energía por unidad de volumen las unidades resultantes son las de presión, aunque generalmente se suele expresar con relación al peso unidad, y las unidades resultantes son de longitud.

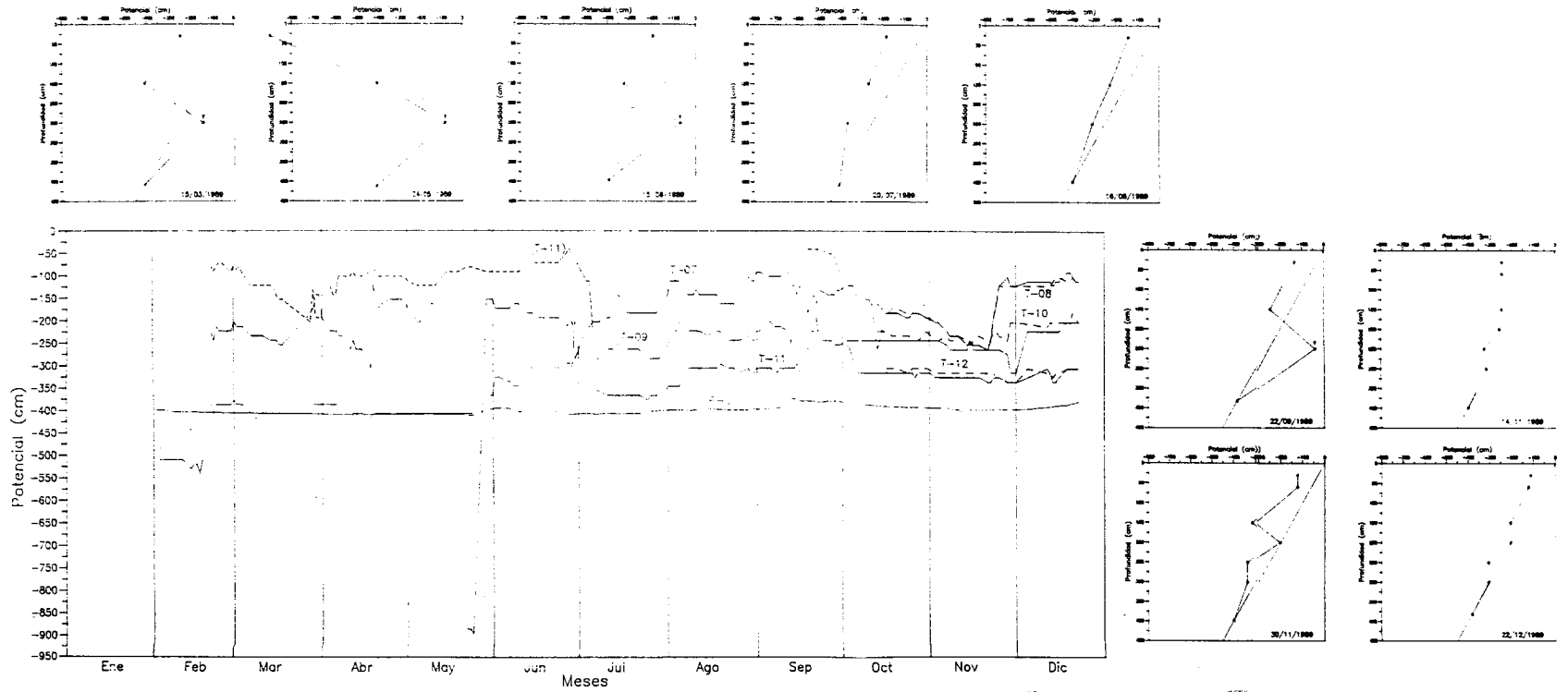
Los tensiómetros instalados en la Finca "El Palomar" miden el potencial hidráulico en la zona no saturada en unidades de presión (bares), tomando como plano de referencia la superficie del suelo. Los datos tensiométricos de la parcela experimental E-2 aparecen en el anexo 2.

Conociendo pues la profundidad a la que están instalados los tensiómetros, y las medidas tensiométricas y piezométricas para una determinada fecha se puede conocer el sentido preferente del flujo en la zona no saturada.

En la figura 1.1 se han representado los potenciales totales en 1989 de los tensiómetros T-07, T-08, T-09, T10, T-11 y T-12, y del nivel freático (profundidad del agua en el piezómetro P-02') para un plano de referencia situado en la superficie del suelo. En la figura 1.2 se encuentran las diferencias de potencial entre los tensiómetros T-07 y T-09, T-07 y T-11, y T-09 y T-11.

En la figura 1.1 también se han representado perfiles de potencial para nueve días característicos de 1989 (15 de marzo, 24 de mayo, 25 de junio, 20 de julio, 16 de agosto, 22 de septiembre, 14 de noviembre, 30 de noviembre y 22 de diciembre).

Fig. 1.1. Potenciales de los tensiómetros T-07, T-08, T-09, T-10, T-11 y T-12 y del nivel freático en 1989



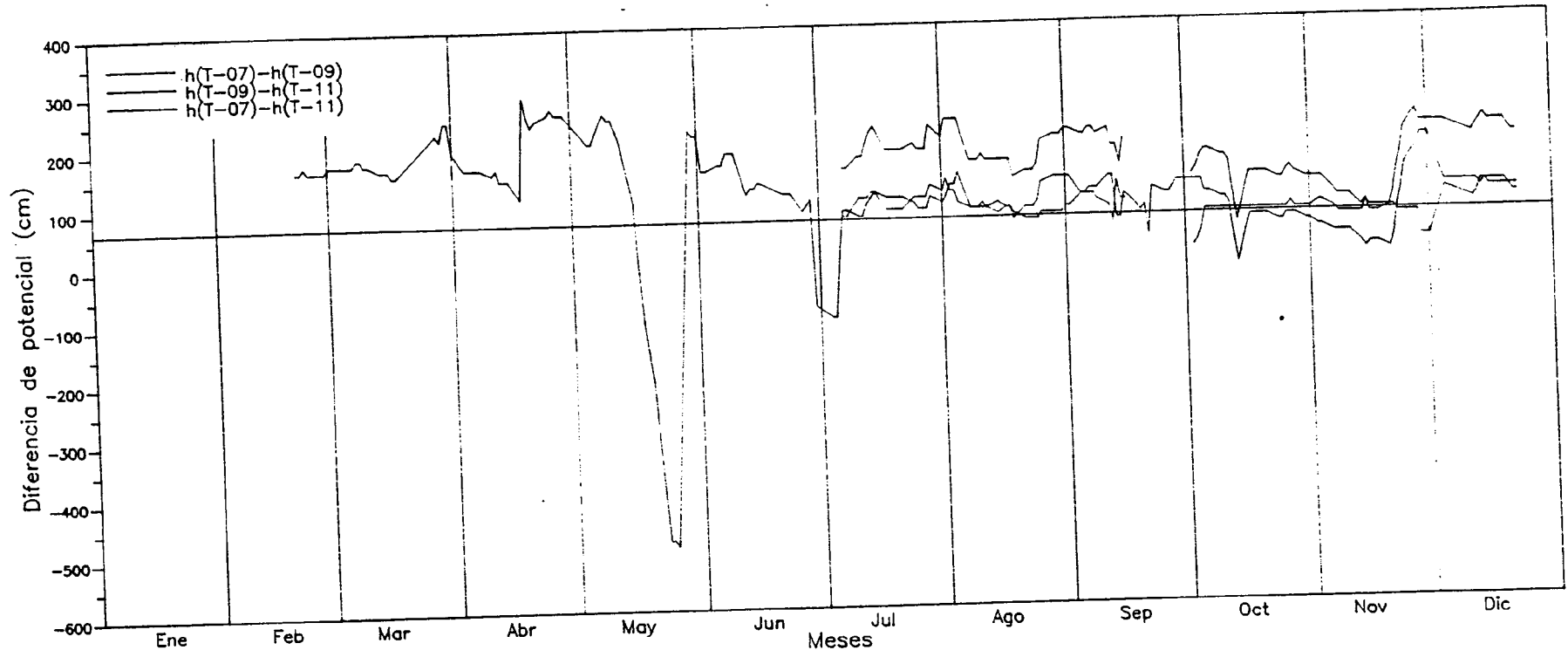


Fig. 1.2. Diferencias de potencial entre los tensiómetros T-07 y T-09, T-09 y T-11 y T-07 y T-11

Debe señalarse que el tensiómetro situado a 250 cm de profundidad ha registrado entre febrero y junio de 1989 siempre un potencial inferior al que debería señalar dada su profundidad y por ello fue revisado a principios de julio de 1989. Sus datos no son pues válidos, y se han representado con líneas discontinuas y únicamente a modo indicativo.

De ambas figuras se desprende que el tensiómetro de mayor potencial es, salvo contadas ocasiones (mayo), T-07 con lo que el flujo parece tener esencialmente sentido descendente desde la superficie.

Es destacable en las figuras 1.1 y 1.2 el cambio que sufre el sistema en el límite junio-julio. Este cambio se manifiesta fundamentalmente porque el potencial del tensiómetro T-09 aumenta progresivamente desde mayo hasta agosto. Este cambio del potencial coincide aproximadamente en el tiempo con el comienzo del cultivo del maíz en la parcela experimental E-2.

La representación de los potenciales de los seis tensiómetros existentes en la parcela E-2 a partir de octubre de 1989 (figura 1.1) muestra que los nuevos tensiómetros se comportan de modo muy similar a los anteriores. Así, el potencial del T-08 es muy parecido al T-07, el potencial del T-10 al del T-09 y el del T-12 al del T-11. Este hecho parece indicar que el comportamiento del perfil se puede asimilar al de tres capas relativamente independientes y homogéneas, con tensiometría similar a lo largo de todo su espesor, y muy diferente a la de las otras capas. En las figuras de los perfiles se observa una fuerte variación en los gradientes existentes entre tensiómetros pertenecientes

a la misma capa y los de los tensiómetros a capas diferentes. De estas tres capas la intermedia (marcada por los tensiómetros T-09 y T10) sería la más heterogénea, ya que los potenciales no muestran tendencias de comportamiento completamente similares, como ocurre con los tensiómetros de las otras capas.

Por lo que se refiere a la zona saturada en la figura 1.1 aparece, como ya se dijo, el potencial del nivel freático con plano de referencia situado en la superficie. Únicamente se puede señalar la escasa variación del mismo frente a los potenciales de la zona no saturada, y que no existe relación aparentemente importante entre nivel freático y tensiometría, ya que el amplio período de riegos (junio-septiembre) no produce de modo significativo un ascenso del nivel freático.

Además, en la figura 1.3 que representa las diferencias de potencial entre los piezómetros profundos y los superficiales de la Finca "El Palomar" durante los años 1988 y 1989, se puede observar que prácticamente todos los datos se encuentran próximos al valor cero, con variación de ± 0.03 m aproximadamente, valor que está dentro del margen de error del método de medida, y de la diferencia de cota entre las bocas de los piezómetros. Esto indicaría que en la zona saturada el flujo tiene como componente horizontal principalmente. Únicamente durante septiembre de 1989 se produce en los piezómetros de las parcelas E-1 y E-2 un ascenso del nivel freático (anexo 3), produciéndose exclusivamente en esta última un ascenso diferencial de los dos piezómetros con una diferencia de potencial de hasta

14 cm y que indica un flujo con cierta componente vertical y sentido descendente. Este ascenso parece estar motivado por causas externas al perfil de la parcela, ya que no se corresponde aparentemente con cambios importantes en las condiciones de humedad de la zona no saturada (figuras 1.1 y 1.2).

1.2. Relación tensiometría-piezometría

La representación conjunta de la tensiometría de la parcela experimental E-2 y la profundidad del nivel del agua (nivel freático según el apartado 5.5) en el piezómetro P-02' en los años 1988 y 1989 muestra en una primera aproximación una escasa relación entre ambos datos, como ya se citó en el apartado anterior.

Así, durante el año 1988 (Fig. 1.4) la piezometría muestra primero una suave tendencia ascendente, alcanzando el nivel más alto en junio, y después descendente. Los tensiómetros en cambio tienen un funcionamiento muy irregular. El tensiómetro más superficial únicamente muestra altos potenciales en julio y octubre-noviembre. Estos aumentos de potencial no se aprecian de forma importante en los tensiómetros más profundos, ni tampoco las fuertes succiones del tensiómetro T-07 en abril-junio y agosto-octubre. De hecho, los tensiómetros T-09 y T-11 apenas muestran variaciones la mayor parte del año 1988; sólo el tensiómetro intermedio tiene un secado importante en septiembre y un humedecimiento progresivo en octubre-diciembre, que no se transmite al T-11. Este, por su parte, muestra el período de máxima succión (mínimo

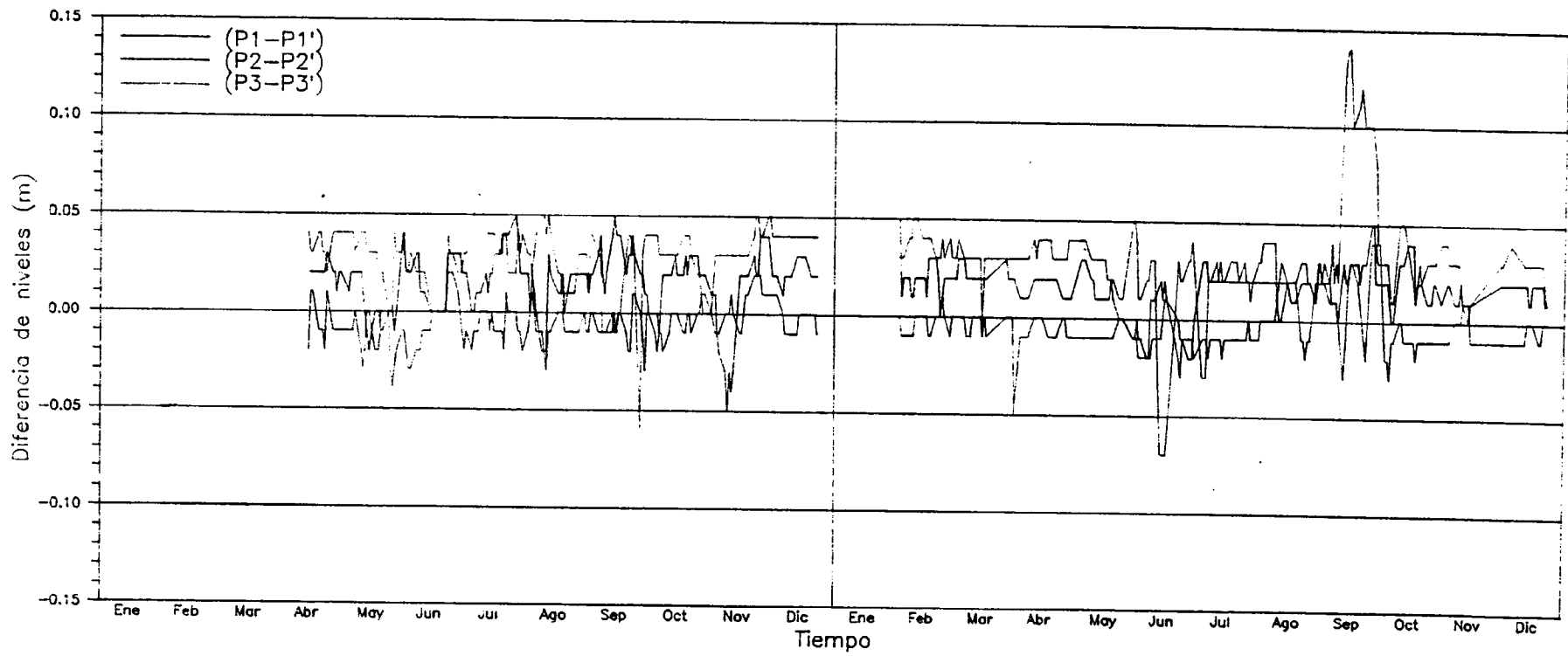


Fig. 1.3. Diferencias de niveles de agua entre los piezómetros profundos y los superficiales de la Finca "El Palomar" en 1988 y 1989

potencial, mínima humedad) cuando el nivel freático es más alto, y un importante aumento de potencial durante el descenso del mismo. Además cuando el flujo se hace netamente descendente (noviembre) el nivel freático sigue descendiendo.

La tensiometría y la piezometría del año 1989 (Fig. 1.1) son mucho más complejas. Así la piezometría continúa con la tendencia descendente de los últimos meses del año anterior hasta aproximadamente el límite junio-julio a partir del cual la tendencia es ascendente. Dentro de esta evolución general aparecen dos anomalías significativas, cada una de ellas con una duración de un mes aproximadamente (figuras 5.12 de la Parte I y 1.1 de esta Parte II), y están caracterizadas por ascensos relativamente importantes del nivel freático y un descenso rápido del mismo durante estos episodios.

Por lo que se refiere a la tensiometría, el tensiómetro más superficial (T-07) muestra un estado de humedecimiento mucho mayor que el año 1988, hecho que no se manifiesta el tensiómetro intermedio (T-09) que presenta en los seis primeros meses unos potenciales con valores menores para alcanzar un potencial semejante al de la mayor parte de 1988.

El tensiómetro más profundo (T-11), en el periodo de validez de las medidas, también presenta unos potenciales ligeramente más altos que en el año anterior.

En cuanto a la posible relación entre la tensiometría y piezometría, en el primer semestre de 1989 (mientras no

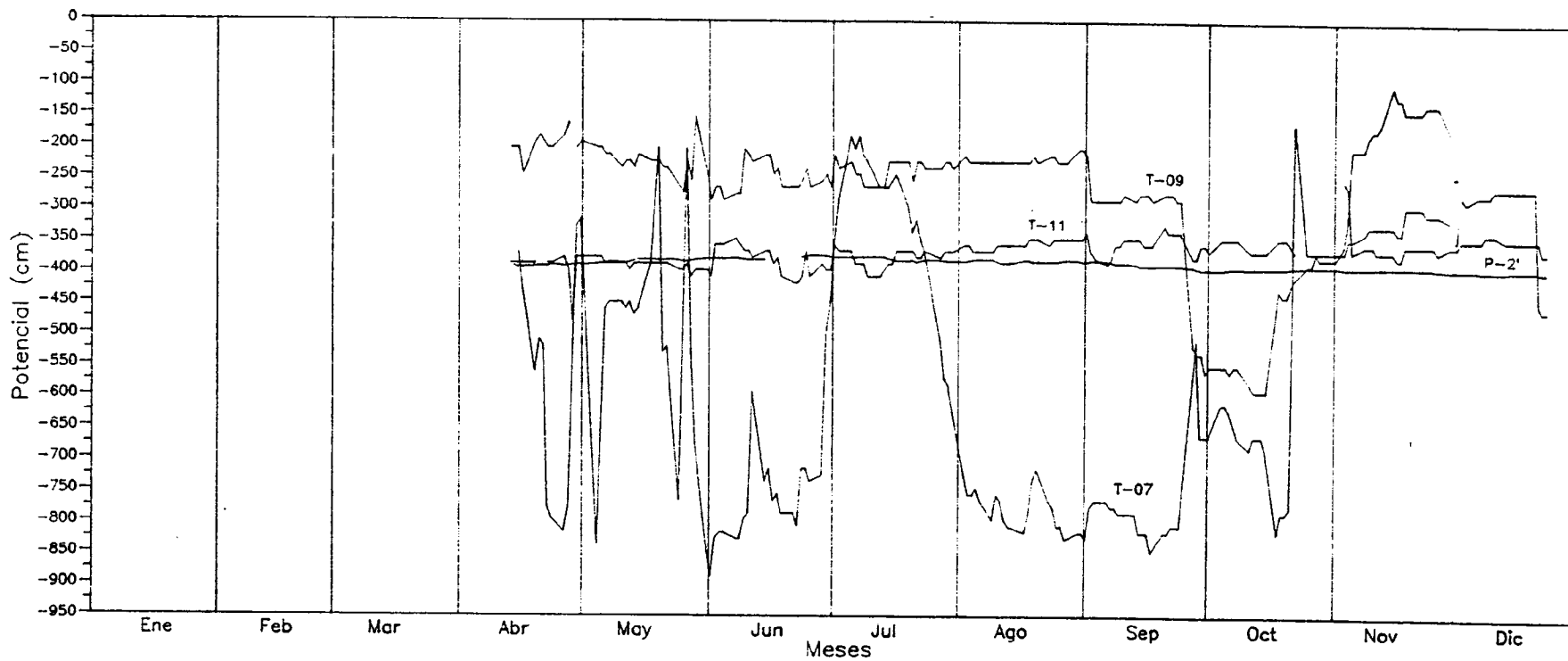


Fig. 1.4. Potenciales de los tensiómetros T-07, T-09 y T-11, y del nivel freático en 1988

parece existir flujo en las parte más profundas del perfil) el nivel piezométrico es descendente hasta que el nivel asciende de forma brusca. En el segundo semestre, con flujo netamente descendente en toda la zona no saturada, el nivel freático asciende ligeramente en toda la zona no saturada, el nivel freático asciende ligeramente hasta septiembre en que lo hace de forma brusca, para continuar descendiendo ligeramente. Por ello, aunque el nivel freático podría responder al flujo en la zona no saturada, las fuertes oscilaciones que sufre en pocos días parece indicar que sus variaciones están controladas por causas de sectores más amplios (a nivel de la terraza o incluso a nivel regional).

1.3. Relación tensiometría-precipitación-riegos

Como ya se comentó en el apartado 5.1 de la Parte I los datos meteorológicos utilizados para el análisis del flujo en la parcela experimental E-2 son los procedentes de la estación meteorológica del aeropuerto de Madrid-Barajas (3129).

Igualmente en el apartado 5.7 (Parte I) se comentó la problemática de los datos de riegos, ya que únicamente se dispone de datos cuantitativos desde junio de 1989.

Estos últimos valores, así como los de precipitación de Barajas aparecen en la parte inferior de la figura 1.5 y en conjunto representan las entradas controladas de agua a la zona no saturada por su límite superior.

La representación de la tensiometría con las precipitaciones y riegos (figura 1.5) sólo muestra una cierta

relación entre éstos y los datos del tensiómetro T-07, aunque sólo es apreciable a nivel cualitativo, y fundamentalmente durante 1988.

Así ese año, la tensiometría del T-07 tiene en general valores altos (próximos a 0.8 bares, es decir unos 820 cm de potencial). Cuando se produce una lluvia desciende bruscamente el valor de la tensiometría para volver a ascender si no llueve. Cuando el período de lluvias o la cantidad de agua registrada son importantes la tensiometría se mantiene en valores de mínimos relativos, como ocurre en mayo, principios de junio y octubre-noviembre. Se encuentran algunos descensos importantes de tensiometría, sin relación con lluvia (agosto, septiembre), que quizá se relacionan con riegos no cuantificados.

Por lo que se refiere a 1989, el tensiómetro T-07, muestra entre febrero y mayo unos valores del orden de magnitud de la de finales de 1988, es decir de unos 0.2-0.3 bares. Teniendo en cuenta que las precipitaciones de enero a abril son relativamente escasas y el comportamiento del tensiómetro en el año 1988, se puede pensar que en este período (que coincide con el cultivo de veza) se realizaron una serie de riegos que no están registrados (es significativo el descenso brusco de la tensiometría en T-07 a mediados de abril). Coincidiendo con el final de cultivo de veza (mayo de 1989) se produce un aumento muy importante de la succión (quizá motivado por las labores agrícolas realizadas), y después una disminución debida a las importantes lluvias caídas en la última quincena de mayo (del orden de 90 mm). Desde junio a septiembre, la tensiometría

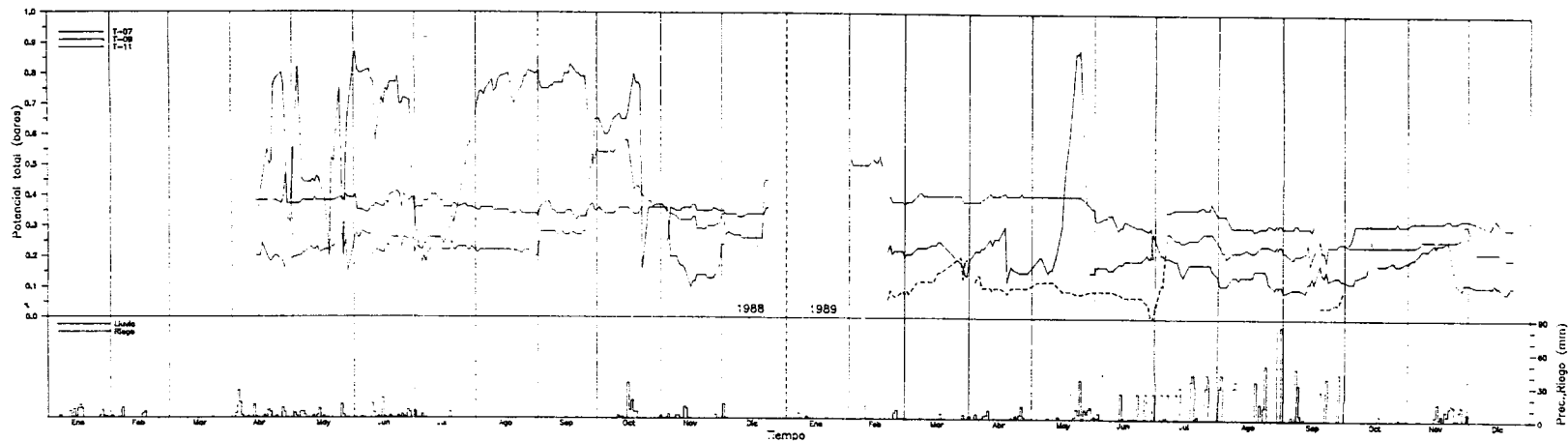


Fig. 1.5. Potenciales de los tensiómetros T-07, T-09 y T-11, precipitaciones en la estación meteorológica de Madrid-Berajés y riegos controlados durante 1988 y 1989

de T-07 se mantiene en unos valores semejantes a la de los primeros meses, aún cuando el aporte de agua mediante riego es muy importante (más de 800 mm en el periodo junio-septiembre).

Finalmente, tras el periodo de riego, el T-07 muestra un ascenso paulatino de la tensiometría en octubre y parte de noviembre hasta que en este mes comienza un periodo importante de lluvias (cerca de 110 mm de precipitación) y la succión baja hasta valores de 0.1 bares.

El tensiómetro T-09 en 1989 apenas muestra variación hasta finales de mayo, es decir, apenas se ve afectado por las entradas de agua mientras existe un cultivo con escasos riegos. Cuando desaparece el cultivo de veza se ve afectado por las lluvias, y en el segundo semestre de 1989 sigue una evolución semejante a la del tensiómetro T-07, aunque atenuada, habiendo un desplazamiento de los máximos y mínimos relativos del orden de 1 a 2 semanas.

El tensiómetro T-11 en el periodo julio-diciembre de 1989 tienen una evolución semejante a la de los dos tensiómetros más altos, aunque sus máximos y mínimos relativos están desplazados con respecto a T-07 del orden de 2 semanas a 1 mes.

Con ello parece que los tensiómetros responden claramente al aporte superficial de agua. En tensiómetro superficial T-07 es el único que muestra una respuesta neta a lo largo de todo el periodo de su instalación. Los tensiómetros más profundos únicamente responden a la lluvia y riegos cuando

éstos se dan en cantidades apreciables, de modo que ese aporte sea muy superior al consumo de agua por las plantas en la parte superior del perfil.

**2. MODELIZACION DEL FLUJO EN LA ZONA NO SATURADA EN LA
PARCELA EXPERIMENTAL E-2**

2. MODELIZACION DEL FLUJO EN LA ZONA NO SATURADA EN LA PARCELA EXPERIMENTAL E-2

2.1. Selección del modelo

Para la selección del modelo más adecuado para el problema de flujo planteado en la parcela experimental E-2 de la Finca "El Palomar" se han comparado los disponibles a fin de evaluar las capacidades de cada uno de ellos frente a los datos existentes tanto de las características hidrodinámicas del perfil investigado como de la cobertura vegetal presente en cada momento.

Los modelos estudiados han sido los siguientes:

- SWATRE - SWACROP (Belmans et al., 1983)
- MUST (de Laat, 1985) (Model for Unsaturated flow above a Shallow water Table)
- UNSAT (Khaleel y Yeh, 1985) (Unsaturated flow in porous media)
- UNSAT2 (Neuman, 1982)
- WASTEN (Selim e Iskandar, 1980) (Simplified model for prediction of Nitrogen behavior in land treatment of water)
- LEACHN (Wagemant y Hutson, 1989) (Leaching Estimation and Chemistry Model)
- PRZM (Carsel et al., 1984) (Pesticide Root Zone Model)
- SUTRA (Voss, 1984) (Saturated Unsaturated Transport model)

De estos modelos, los cuatro últimos (WASTEN, LEACHN, PRZM, SUTRA) permiten simular, además del flujo de agua, el transporte de solutos.

A fin de que la comparación sea más sencilla, en la tabla 2.1. se han resumido las características fundamentales de cada uno de ellos.

De los modelos estudiados, UNSAT2 y SUTRA están más orientados al tratamiento de problemas regionales de flujo, y consideran el flujo en la zona no saturada para definir la posición del nivel freático. Estos programas, así como UNSAT o WASTEN, no consideran en detalle la influencia de las plantas en la extracción de agua por las raíces y, por tanto, la separación entre evaporación (del agua de lluvia interceptada en las hojas o del suelo) y transpiración.

De los tres modelos que más adecuadamente pueden evaluar todos los factores que intervienen en el flujo de agua en una zona cultivada se eligió el modelo SWATRE debido a que presenta más opciones para calcular la evapotranspiración y condiciones de borde.

Además, este modelo presenta unas salidas de resultados muy elaboradas en las que se incluyen los valores de presión de succión, humedad, permeabilidad, extracción por las raíces, etc., para cada día de la simulación.

Tabla 2.1. COMPARACION DE LAS CARACTERISTICAS DE LOS MODELOS

MODELO	METODO NUMERICO (1)	No DIMENSIONES	TIPO DE SUELO (2)	EVAPOTRANSPIRACION (3)	RAICES	CONDICION BORDE INF. (4)	CONDICION BORDE SUP.	OBSERVACIONES
SWATRE	D.F.	1	HET.	E + T	Si	Variable	Variable	Tratamiento detallado de la influencia de las plantas
MUST	D.F.	1	HET.	E + T	Si	Variable	Variable	Especialmente útil para casos de nivel freático somero
UNSAT	E.F.	1	HOM.	No	No	Constante	Constante	Aplicable para problemas de infiltración constante (recarga artificial)
UNSAT2	E.F.	2 - 3	HET.	E + T	Si	Variable	Variable	Util para perfiles bidimensionales. Pozos, rezumes, etc.
WASTEN	D.F.	1	HET.	ET	Si	--	Variable	Aplicable para tratamiento con aguas residuales
LEACHM	D.F.	1	HET.	E + T	Si	Variable	Variable	Transporte de especies nitrogenadas, pesticidas, etc.
PRZM	D.F.	1	HET.	E + T	Si	--	Variable	Transporte de pesticidas
SUTRA	E.F.	1 - 2	HET.	ET	No	Variable	Variable	No es un modelo específico de zona no saturada

(1) D.F. = Diferencias finitas
E.F. = Elementos finitos

(3) E + T = Evapotranspiración y transpiración por separado
E T = Evapotranspiración

(2) HET. = Heterogéneo
HOM. = Homogéneo

(4) Condiciones variables o constantes durante la simulación

2.2. Descripción del modelo

2.2.1. Ecuación de flujo

La ecuación diferencial que rige el flujo de agua en la zona no saturada proviene de la combinación de la ecuación de conservación de la masa y de la ecuación de Darcy, y tiene la siguiente forma:

$$\nabla(K\nabla.\phi) = \frac{\partial\theta}{\partial t} + S \quad (1)$$

donde,

- ∇ : es el operador divergencia
- K : es el tensor de segundo grado de la permeabilidad
- $\nabla.$: es el operador gradiente
- ϕ : es el potencial total (h)
- θ : es el contenido volumétrico de humedad
- S : es el término que describe la extracción de agua por las plantas

La ecuación (1) describe el flujo en régimen transitorio en medios anisótropos y multidimensionales.

Puesto que la permeabilidad depende además del contenido de humedad (o del potencial, h_m), si se considera el caso de flujo vertical y se define la capacidad de retención como

$$C(h_m) = \frac{\partial\theta}{\partial h_m}$$

La ecuación de flujo puede reescribirse en términos del potencial mátrico, h_m , como:

$$\frac{1}{C(h_m)} \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h_m) \left(\frac{\partial h_m}{\partial z} + 1 \right) \right] - \frac{S}{C(h_m)} = \frac{\partial h_m}{\partial t} \quad (2)$$

Esta última ecuación tiene la ventaja de que es aplicable a todo el dominio de flujo, incluyendo el flujo en zona saturada. Por otra parte, el uso de h_m en vez de θ como variable dependiente tiene la ventaja de que es aplicable en suelos estratificados, donde h_m permanece constante en los límites entre capas.

2.2.2. Extracción de agua por las plantas

El término S de la ecuación (2) puede tratarse de distintas formas. Teóricamente, debe considerarse que el sistema de raíces de las plantas es dinámico y las raíces viejas son constantemente reemplazadas por otras nuevas. Además, su geometría varía con el tiempo.

Por otra parte, la extracción de agua por las raíces es más efectiva en las más jóvenes pero la longitud de las raíces jóvenes no está directamente relacionada con la longitud total de las raíces, y la evaluación experimental de las propiedades de las raíces es muy difícil y a menudo imposible.

Por estas razones, en vez de considerar el flujo de agua a cada raíz individual, se utiliza una aproximación macroscópica en la que el término S , que representa la

extracción de agua por un elemento homogéneo e isotropo del sistema de raíces, es añadido a la ecuación de conservación de la masa.

Puesto que es muy poco práctico buscar una descripción física completa de la extracción de agua por las plantas, el modelo SWATRE describe S de forma semiempírica como:

$$S(h_m) = \alpha(h_m) S_{\max} \quad (3)$$

donde $\alpha(h_m)$ es una función adimensional del potencial de succión h_m y S_{\max} es la máxima extracción posible de agua por las raíces. Si las raíces se distribuyen homogéneamente a lo largo de toda su longitud, se define S_{\max} como

$$S_{\max} = \frac{Tp}{|z_r|} \quad (4)$$

donde Tp es la tasa de transpiración potencial y $|z_r|$ es la profundidad de la zona de raíces.

Dado que en muchos casos las raíces extraen agua principalmente de las capas superiores del suelo y no afectan a las partes más profundas del perfil, la extracción en el fondo de la zona de raíces (z_r) es nula, y se puede utilizar la siguiente solución:

$$S_{\max}(Z) = \frac{2Tp}{|z_r|} \left\{ 1 - \frac{|z|}{|z_r|} \right\} \quad (5)$$

Hasta ahora se ha considerado la extracción de agua por las raíces en condiciones óptimas de agua en el suelo (S_{\max}). No obstante, en condiciones no óptimas, es decir, con suelo muy seco o muy húmedo, S_{\max} se reduce, como se comentó en

la ecuación (3), por la función α , que depende del potencial de succión h_m . La forma de esta función se observa en la figura 2.1. La extracción bajo $|h_{m1}|$ (deficiencia de oxígeno o suelo empapado) y por encima de $|h_{m4}|$ (punto de marchitez permanente) se hace igual a cero. Entre $|h_{m2}|$ y $|h_{m3}|$ (punto de reducción) la extracción es máxima. Entre $|h_{m1}|$ y $|h_{m2}|$ existe una variación lineal, y entre $|h_{m3}|$ y $|h_{m4}|$ se asume una variación lineal o hiperbólica. El valor de $|h_{m3}|$ depende de la demanda atmosférica y por tanto varía con Tp .

2.2.3. Método numérico de solución

La ecuación (2) es resuelta por el modelo SWATRE mediante un esquema implícito en diferencias finitas y aplica una linearización explícita. En la figura 2.2 se muestra una región "profundidad-tiempo" ocupada por las variables independientes z (índice i) y t (índice j).

La aproximación numérica de la ecuación (2) produce la siguiente expresión en diferencias finitas que es válida para todos los nodos excepto para el superior y el inferior de la zona no saturada:

$$\frac{h_i^{j+1} - h_i^j}{\Delta t^j} = \frac{1}{C_i^j} \frac{1}{\Delta z_i} \left[K_{i-1/2}^j \left\{ \left(\frac{\Delta h}{\Delta z_u} \right)_{i-1/2}^{j+1} + 1 \right\} - K_{i+1/2}^j \left\{ \left(\frac{\Delta h}{\Delta z_l} \right)_{i+1/2}^{j+1} + 1 \right\} \right] - \frac{S_i^j}{C_i^j} \dots\dots\dots(6)$$

Para el nodo superior $i=1$ se obtiene una solución introduciendo como condición de borde un flujo en la ecuación (6). Es decir:

$$K_{1-1/2}^j \left[\left(\frac{\Delta h}{\Delta z_u} \right)_{1-1/2}^{j+1} + 1 \right] \rightarrow q_1 \quad (7)$$

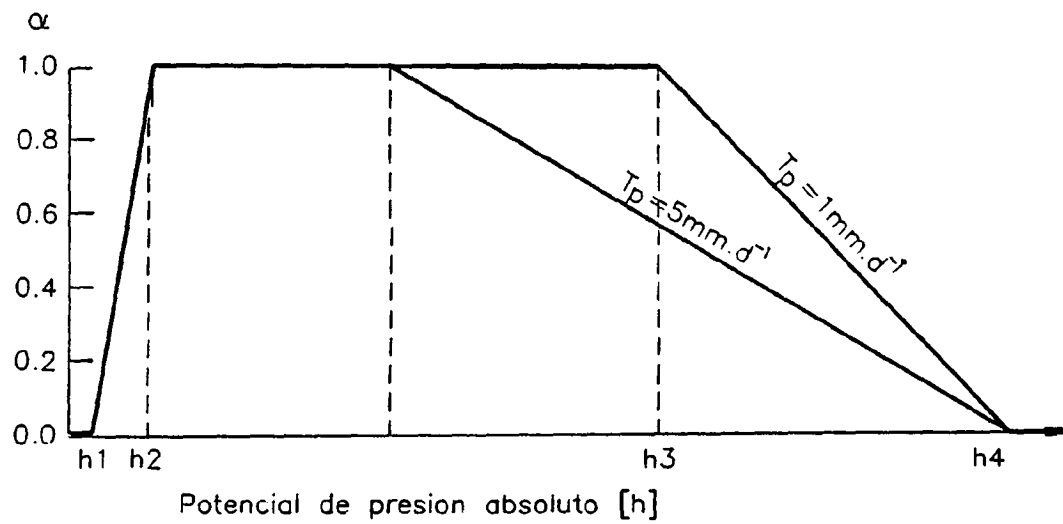
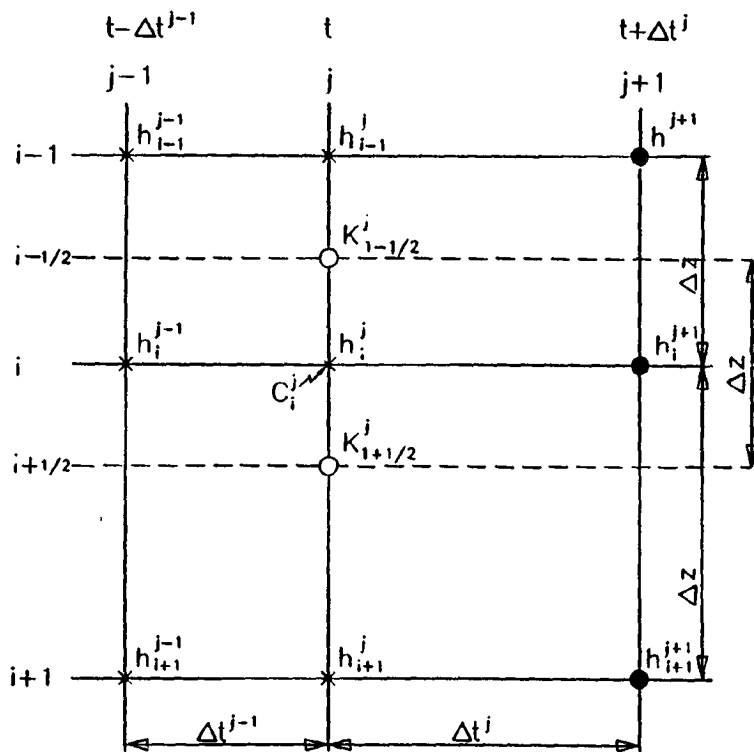


Fig.2.1.—Variable adimensional de extraccion, α , en funcion del valor absoluto del potencial de presion $[h]$.



- × valor conocido
- valor desconocido
- valor estimado

Fig.2.2.—Discretización en profundidad-tiempo.

Para los puntos nodales intermedios se tienen (n-2) ecuaciones con n incógnitas (los potenciales h en los n puntos nodales de la zona no saturada). La solución para el nodo superior da una ecuación más, con lo que hay n-1 ecuaciones. Para el nodo más profundo de la zona no saturada se pueden distinguir tres condiciones:

1. Cuando la presión es conocida (presión en un punto o posición del nivel freático) se tienen n-1 ecuaciones con n-1 incógnitas
2. Cuando se conoce el flujo a través del fondo de la zona no saturada. En este caso se necesita una ecuación más que relacione presión y caudal.
3. Cuando se permite un drenaje libre en el fondo del sistema. En este caso $\Delta h/\Delta Z$ es cero y $q_n = -K(h_n^i)$, con lo que se tienen n ecuaciones con n incógnitas.

Para resolver el sistema de ecuaciones se usa un método directo aplicando el algoritmo tridiagonal de Thomas.

Los intervalos de tiempo son variables y son estimados explícitamente del siguiente modo:

$$\Delta t^{j+1} = \frac{\Delta \theta_{\max}}{\left(\frac{\Delta \theta}{\Delta t}\right)_{\max}^j} \quad (8)$$

donde $\Delta \theta_{\max}$ tiene un valor específico que hay que asignar.

El denominador de la ecuación (8) se calcula como:

$$\left(\frac{\Delta \theta}{\Delta t}\right)_{\max}^j = \text{Max}_{j=i,n} \left[S_{i+1}^j + \left(\frac{\Delta q}{\Delta z}\right)_i^j \right] \quad (9)$$

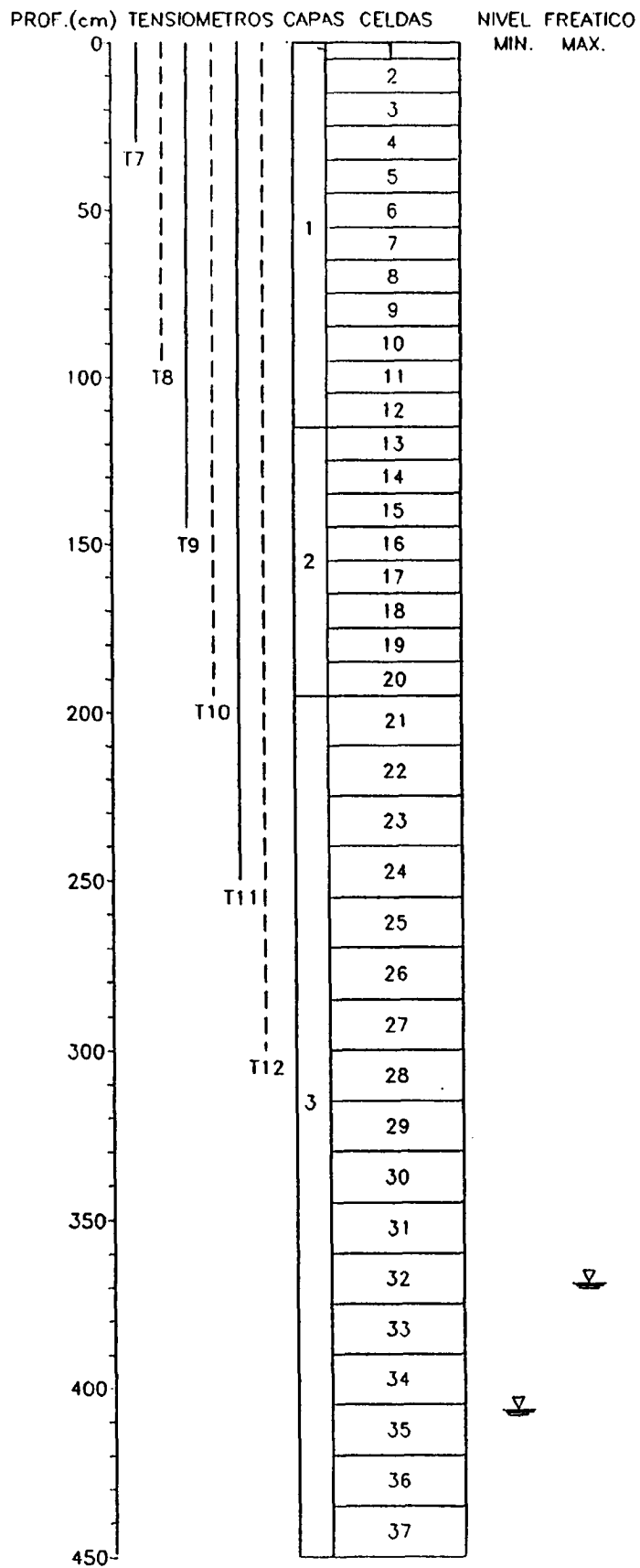


Fig.2.4.—Discretización del perfil para el modelo SWATRE.
 Localización de los tensiómetros en la parcela E-2.

En la figura 2.4 se ha representado la discretización efectuada. La celda superior tiene un espesor de 5 cm. En profundidad, se ha asignado un espesor de 10 cm hasta la celda n° 20. Por último, hasta los 4.5 m se ha adoptado un tamaño de celda de 15 cm.

Se han considerado, por tanto, un total de 37 celdas, de las cuales las 12 superiores definen la capa 1, de la 13 a la 20 la capa 2, y de la 21 a la 37, la capa 3, con unas potencias de 115, 80 y 225 cm respectivamente.

Esta discretización se ha adaptado, por otra parte, a la localización de los tensiómetros de los que se dispone un registro temporal más amplio. Así, el tensiómetro T-07 queda representado por la celda n° 4, el tensiómetro T-07, que se localiza a 1.5 m de profundidad, por la celda n° 16, y el tensiómetro T-11, (2.5 m de profundidad), por la celda n° 24. Queda, por tanto, cada tensiómetro en una capa.

Debe mencionarse que SWATRE adapta el tamaño de la celda situada inmediatamente sobre el nivel freático durante la simulación a medida que éste varía de posición. Así, por ejemplo, y tomando como referencia el nivel más alto del agua representado en la figura 2.4, si éste desciende bajo el límite de las celdas 32 y 33, el modelo reajusta automáticamente el tamaño de ambas celdas aumentando el espesor de la superior y disminuyendo el de la inferior (y desplazando la posición de sus nodos correspondientes) para que no haya nunca una celda con una parte completamente saturada.

2.3.3. Parámetros del terreno

2.3.3.1. Curvas de retención

Una vez definidas las tres capas más representativas de la zona no saturada en el sector de estudio, es necesario establecer unas características hidráulicas homogéneas dentro de ellas. Esta simplificación del medio real en tres capas conlleva la no consideración de las muchas pequeñas heterogeneidades observadas en profundidad en los sondeos y calicatas realizadas, pero es necesaria dadas las variaciones espaciales observadas.

Asumida, por tanto, la necesidad de esquematizar el suelo de la zona, los parámetros que mejor definen las capas son las curvas de retención de la humedad. Pero dado que las de la zona de estudio podían presentar algún tipo de problemas (como se vio en el apartado 5.3 de la Parte I) se han tenido en cuenta principalmente las características texturales de los materiales. En este sentido, existen en la bibliografía curvas de retención tipificadas para cada suelo definido según la clasificación triangular del U.S.D.A., que considera los porcentajes de limo, arena y arcilla, y dentro de ésta, subdivisiones según la arena sea media, fina o gruesa, etc.

Estas curvas tipo son las que se han empleado para representar las curvas de retención de humedad en el perfil modelado.

Debe tenerse en cuenta, además, que no se ha considerado el fenómeno de histéresis, que origina que las curvas de retención sean diferentes según la muestra ensayada se someta a secado o humedecimiento.

Los datos aportados en la Parte I, referentes a las granulometrías observadas en los materiales de la zona, indican una importante falta de constancia en las características de los materiales a la misma profundidad. Por ello, durante la simulación se han variado las características de las capas a fin de obtener un mejor ajuste de las tensiones calculadas a las medidas. Tales variaciones han sido, sin embargo, en general, de poca magnitud, y están siempre dentro de los criterios (observaciones de campo y estudio de granulometrías) que permitieron la separación de tres capas.

En las figuras 2.5 a 2.8 se han representado las curvas de retención de humedad para los tipos de suelo más probables de la zona investigada según la granulometría de sus materiales.

Como se observa, existen notables diferencias entre las curvas representadas, en las que varía de forma importante el contenido de humedad en saturación (mayor cuanto más franco es el suelo) y la respuesta de presión para bajos contenidos de agua

2.3.3.2. Conductividad hidráulica

Como es conocido, en el caso de flujo saturado, el total del espacio de poros conectados está disponible para el flujo. En el caso de flujo en la zona no saturada, sin

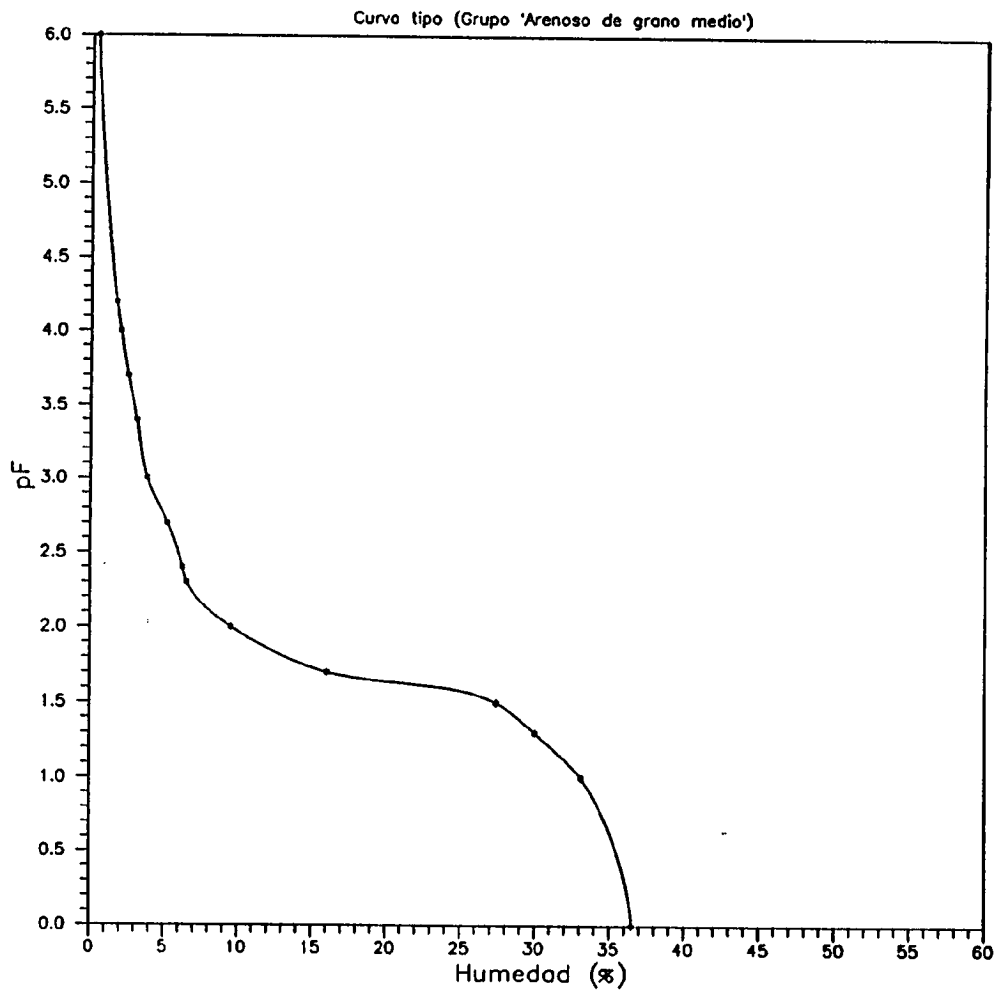


Fig. 2.5. Curva de retención correspondiente al tipo textural arenoso de grano medio

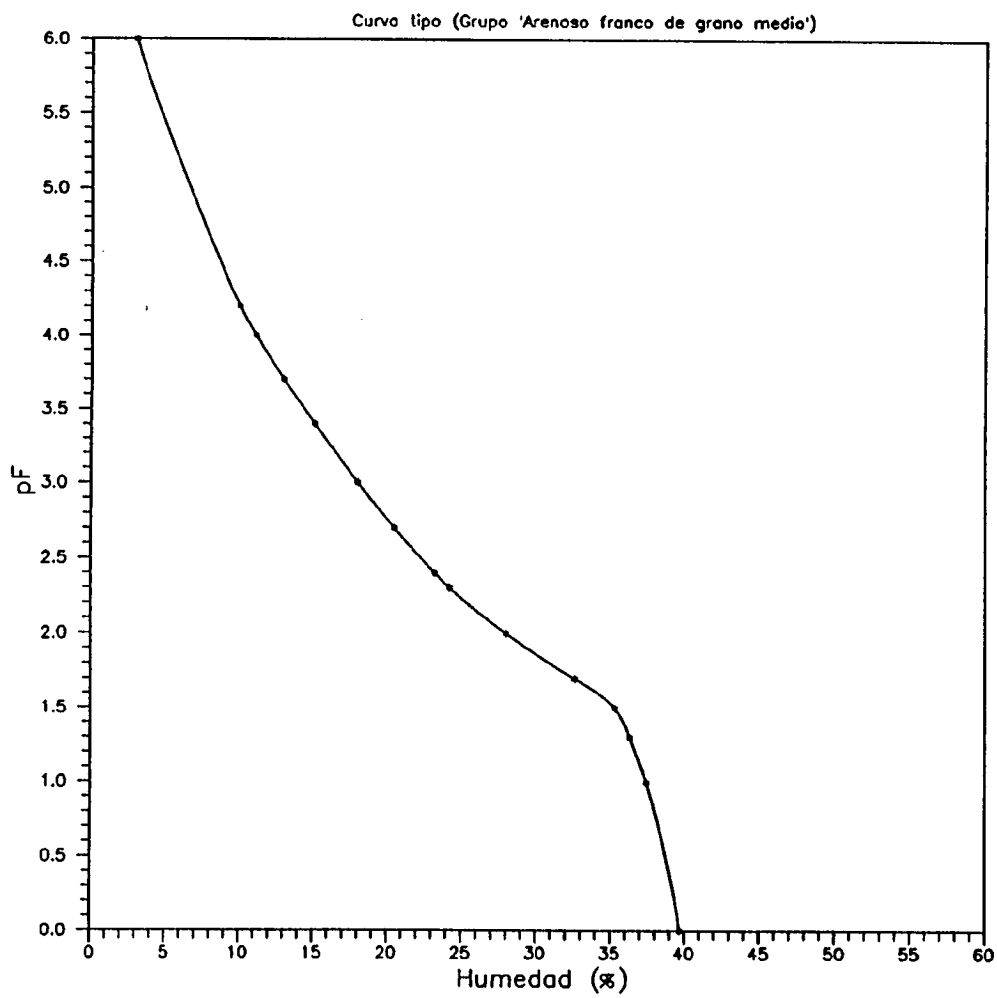


Fig. 2.6. Curva de retención correspondiente al tipo textural arenoso-franco de grano medio

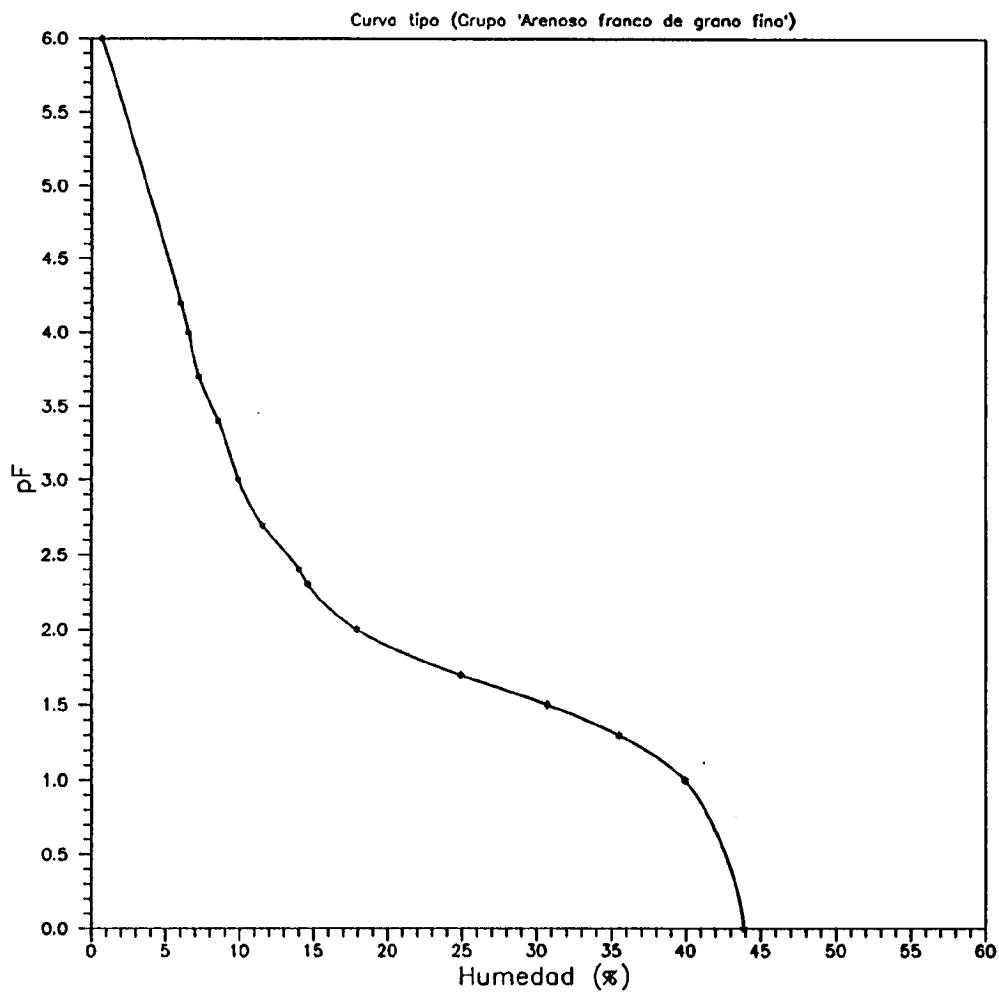


Fig. 2.7. Curva de retención correspondiente al tipo textural arenoso-franco de grano fino

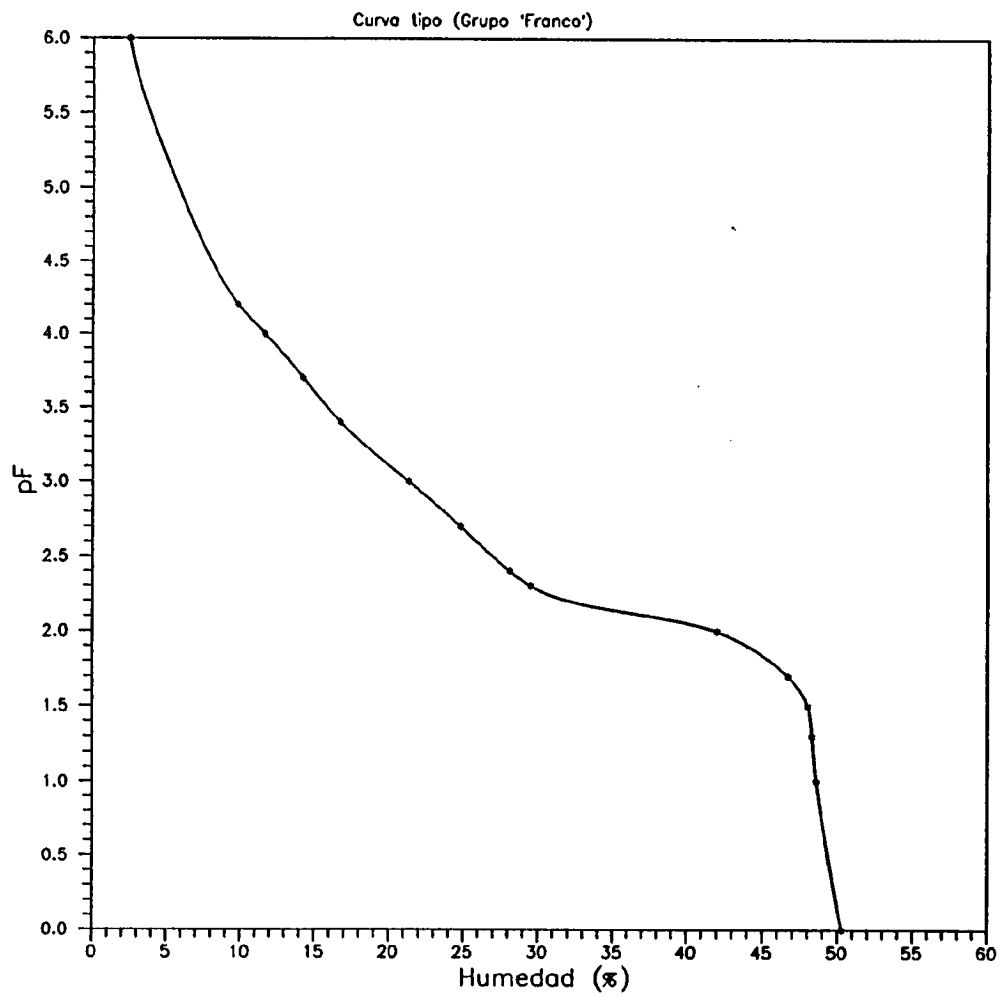


Fig. 2.8. Curva de retención correspondiente al tipo textural franco

embargo, parte de los poros tienen aire y esta parte no interviene en el flujo del agua. Por ello, la conductividad hidráulica debe ser menor que en el caso de flujo saturado, de tal manera que a menores contenidos de humedad el área disponible para el flujo disminuirá y, con él, la conductividad hidráulica.

La variación de la conductividad hidráulica con el contenido de humedad (o la tensión de succión) puede determinarse en laboratorio, mediante ensayos que suelen ser de larga duración, o estimarse mediante fórmulas empíricas.

En ausencia de tales datos para nuestra zona, hubo de optarse por elegir un método empírico para obtener las permeabilidad a aplicar en el modelo de flujo.

Existen numerosos métodos para realizar este cálculo. Los más conocidos son:

- | | | |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| a) Wind (1955) | $K = \frac{K_s}{(1 + \frac{\psi}{\alpha})^n}$ | ψ = presión de succión
α, n = constantes |
| b) Gardner (1985) | $K = \frac{K_s}{(1 + \frac{\psi}{\alpha})^b}$ | α, a, b = constantes |
| c) Talsma (1963) | $K = K_s \cdot e^{-\alpha \psi}$ | K_s = permeabilidad saturada
α = constante |
| d) Rijtema (1965) | Para $\psi > \psi_a$ → $K = K_s$
$\psi_a > \psi > \psi_b$ → $K = K_s \cdot e^{-\alpha(\psi - \psi_a)}$
$\psi < \psi_b$ → $K = \frac{K_s}{(1 + \frac{\psi}{\alpha})^n}$ | |

donde $\psi_a, \psi_b, \alpha, a, n$ = constantes para cada tipo de suelo.

- e) Van Genuchten (1980)

De los cinco métodos mencionados, los dos primeros son muy simplistas y obtienen la permeabilidad a partir de los datos de tensión de succión. Posteriormente se introduce el valor de la permeabilidad saturada, valor fácilmente obtenible en laboratorio, para dar un límite máximo a la

conductividad hidráulica. Rijtema (1965) obtiene una solución que combina todas las anteriores y permite obtener la permeabilidad a partir de la curva de retención del suelo y unos parámetros específicos de cada material.

Por último, el método de Van Genuchten requiere un análisis gráfico de la curva de retención del material para obtener determinados parámetros que intervienen en el cálculo.

Dada la progresiva complejidad de los métodos consultados, y considerando como más representativos las estimaciones de Rijtema y Van Genuchten, se evaluaron los resultados de ambos métodos a fin de elegir uno para calcular la conductividad hidráulica de los materiales del perfil.

En la figura 2.9 se han representado los resultados obtenidos por ambos métodos para un tipo de suelo cuya curva de retención sería la que se presentó en la figura 2.6. Como se observa, existen notables diferencias en los valores calculados para todo el rango de humedades, diferencias que llegan a ser de muchos órdenes de magnitud para bajos contenidos de humedad.

Este tipo de análisis se ha hecho para varios tipos de suelo observándose siempre importantes disparidades.

Para elegir entre uno u otro método se han utilizado los valores de permeabilidad (saturada) aportados en la primera fase del estudio (tomo 3, pág. 22 y anexo 3), que indican que ésta debe ser del orden de 2 a 5 m/día. En la figura se han representado las conductividades hidráulicas

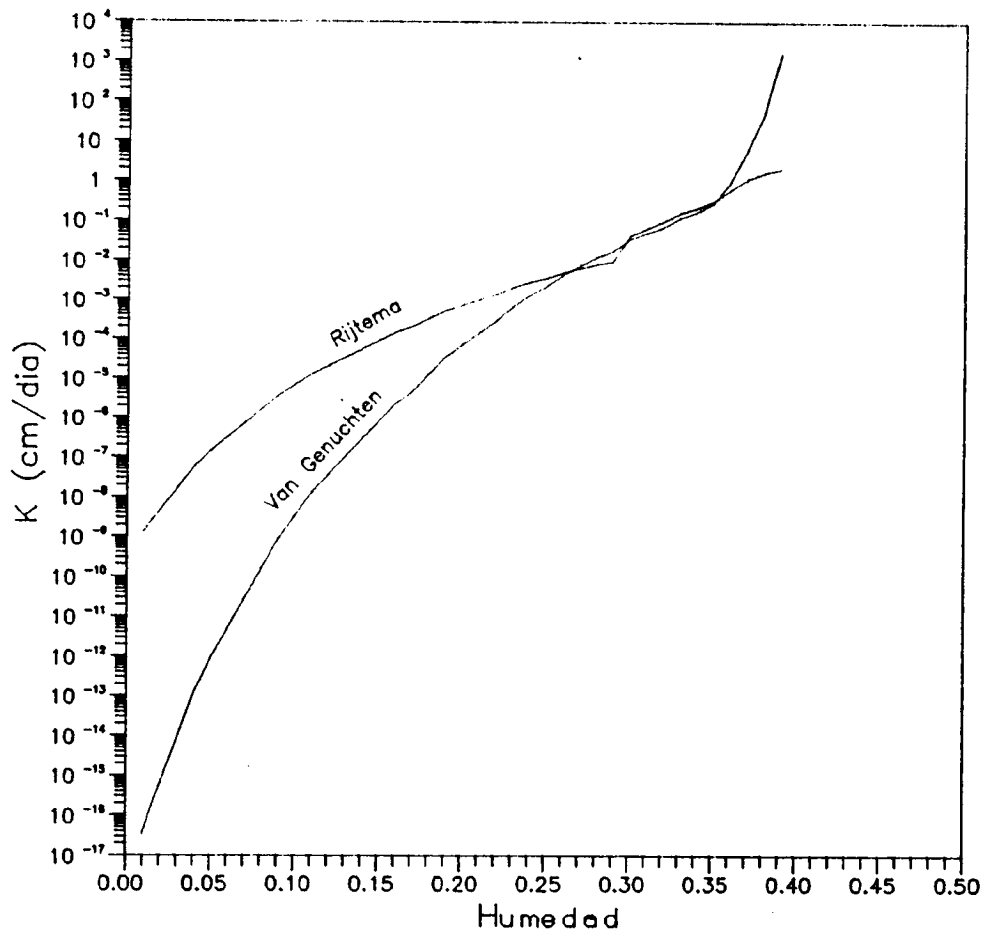


Fig. 2.9. Comparación de los métodos de Rijtema y Van Genuchten para el cálculo de la permeabilidad para el tipo textural representado en la figura 2.6

obtenidas, por los dos métodos de cálculo descritos, para un tipo de suelo arenoso cuya curva de retención se presentó en la figura 2.5.

Como se observa, el valor de permeabilidad obtenido en saturación por el método de Rijtema está muy próximo al citado anteriormente, mientras que el cálculo por el método de Van Genuchten difiere en varios órdenes de magnitud.

Este único dato ha condicionado que el método de Rijtema se haya elegido para calcular la permeabilidad en todo el perfil en función de las curvas de retención establecidas. No obstante, es necesario un mayor volumen de datos, aunque sean sólo de permeabilidad saturada, a lo largo de todo el perfil para definir con mayor precisión las características hidráulicas de la zona no saturada en el área de estudio.

2.3.4. Condiciones iniciales

El período de 1989 en que se ha simulado el flujo en la zona no saturada se ha dividido en dos partes diferenciadas en función del cultivo que se ha desarrollado en la parcela experimental.

Así, desde primero de marzo, en que ya se controlaba con periodicidad la tensiometría, hasta finales de junio se ha considerado el ciclo de cultivo de la veza en la parcela. La veza fue de hecho plantada en noviembre del año anterior, por lo que en marzo ya se encontraba completamente desarrollada, y segada a mediados de mayo de 1989. El maíz fue sembrado a mediados de junio de 1989 pero hubo de ser

resembrado en la parcela experimental E-2 dado que el exceso de bromuro potásico para ensayo de trazador pudo impedir el desarrollo normal de la planta.

Por ello, desde primero de marzo a 30 de junio se ha considerado la veza como el cultivo de la parcela, mientras que de julio a final de año lo ha sido el maíz.

Como condiciones iniciales para la simulación del período de la veza se han tomado las tensiometrías medidas en la parcela el día 28 de Febrero de 1989, a las que se ha ajustado una curva para obtener las tensiones en cada una de las celdas del modelo. En la figura 2.10 se han representado las tensiones. La tensión en la celda más alta es una extrapolación de la tendencia observada entre los tensiómetros T-07 y T-09. Por otra parte, en el límite inferior se ha tomado presión cero a la profundidad a la que estaba el nivel freático en aquel momento.

Por otra parte, los datos iniciales para la simulación en julio deberían ser las tensiones calculadas por el modelo a finales de junio. No obstante, como se comentó en el apartado 1.2, en el tensiómetro T-11, tuvo un funcionamiento incorrecto y debió ser ajustado a finales de junio. Por esto se han tomado las tensiones en la parcela el 6 de julio de 1989, tras las anomalías comentadas.

En la figura 2.11 se ha representado la tensiometría del perfil en base a los datos obtenidos de los tensiómetros T-07, T-09 y T-11. El valor de tensión de succión en superficie se ha obtenido extrapolando la tendencia que

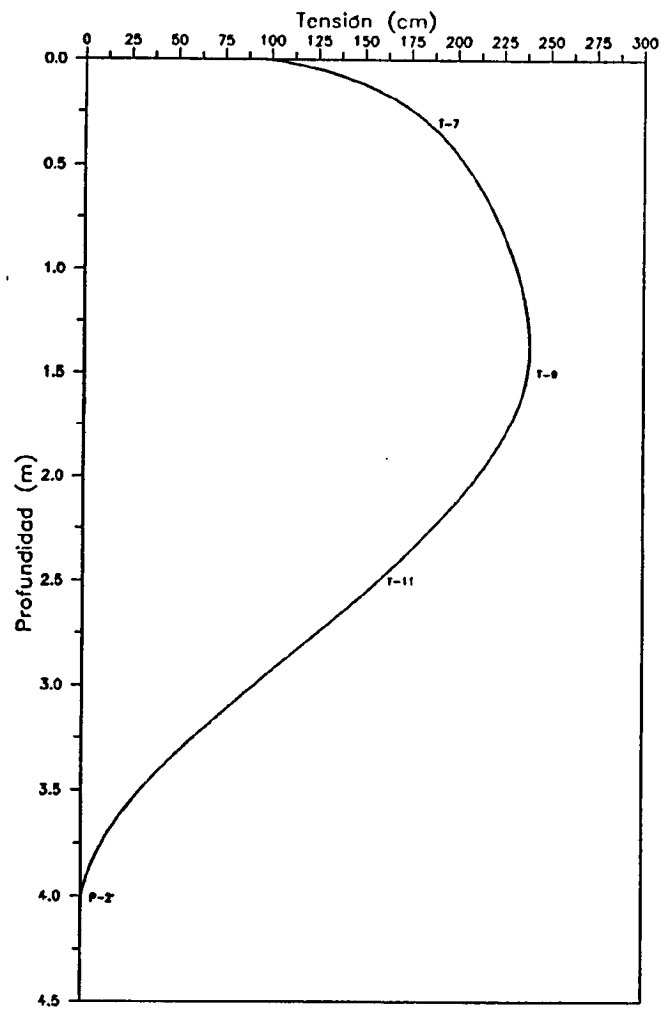


Fig. 2.10. Perfil tensional, considerado al comienzo del primer periodo de simulación (28 de febrero de 1989)

Por otra parte, la constante empírica α de la ecuación de Priestley y Taylor se ha variado entre 1.25 y 1.35 es decir, dentro de los márgenes que recomienda la bibliografía.

En cuanto a los riegos, como entrada de agua adicional al sistema, en el apartado 5.7 de la Parte I se han comentado los datos existentes, que están recogidos en la tabla 5.4 de la Parte I. Sobre estos datos debemos mencionar que se produjeron riegos (no evaluables por ser observaciones de campo) los días 10, 15 de marzo y 5 de mayo de 1989.

En lo referente a los parámetros que afectan a la transpiración, como se indicó en el apartado 5.7 de la Parte I no hay datos acerca de cubierta de suelo, índice de hojas, así como de la profundidad de las raíces, y su distribución en el tiempo. Por ello, durante el proceso de validación del modelo, se han variado a fin de conseguir un mejor ajuste de las tensiometrías calculadas.

En general, para el cultivo de veza se han considerado elevadas coberturas de suelo (80%) dado que es una planta que alcanza poca altura pero tiene gran amplitud, con lo que proporciona mucha sombra al suelo. Su profundidad máxima de raíces es pequeña (unos 15 cm), según se ha observado en campo, por lo que la extracción de agua por las raíces no llega a afectar al tensiómetro T-07, que se encuentra a 30 cm de profundidad.

Se ha considerado que las raíces ya estaban totalmente desarrolladas al comienzo de la simulación, el día 1 de marzo, y que su longitud desaparece entre mediados y finales de mayo debido a la siega y labores agrícolas.

Por otra parte, para el maíz se han considerado profundidades de raíces más importantes (hasta 1.3 m) y cubiertas de suelo del orden del 50%. Ambas variables son prácticamente cero al comienzo de la simulación y se ha supuesto que son máximas el día 15 de agosto, cuando el maíz ya estaba casi completamente desarrollado.

2.3.5.2. Condición de borde en el fondo del sistema

De las varias opciones que permite SWATRE para establecer la condición del fondo del sistema modelado, y que fueron descritas en el apartado 2.2.4.2, se ha elegido la de fijar la posición del nivel freático dado que existen datos suficientemente precisos para su definición clara a partir de los niveles de agua obtenidos en el piezómetro P-02'.

La evolución temporal de este piezómetro se puede observar en el apartado 5.5 (Parte I). Debe mencionarse que en el caso de que no existan medidas diarias, SWATRE realiza una interpolación lineal entre la anterior y posterior conocidas.

2.4. Calibración y resultados

2.4.1. Introducción

La calibración del modelo SWATRE en la parcela experimental E-2 presenta importantes problemas, consecuencia de los originados por los propios datos de partida (como se ha visto en apartados anteriores) y por aquellos que sirven para comparar el funcionamiento del medio real con los resultados del modelo.

Así, los únicos elementos de calibración disponibles son las medidas de los tensiómetros T-07, T-09 y T-11. Esto trae consigo una serie de limitaciones. En primer lugar sólo es posible disponer de medidas muy puntuales a profundidades de 0.3 m, 1.5 m y 2.5 m, escasas en un medio heterogéneo como el estudiado. Igualmente se puede mencionar que la correspondencia humedad-succión no es única debido al proceso de histéresis, y así una medida tensiométrica puede corresponder a varias humedades, mientras que son estas el punto de referencia para obtener todas las variables que intervienen en el cálculo del flujo en la zona no saturada. La influencia de la histéresis no ha sido evaluada hasta el momento en los materiales de la zona de estudio.

2.4.2. Consideraciones iniciales

El modelo permite que muchos datos de entrada sean variables con el tiempo. Así, se deben introducir por ejemplo el nivel freático, los datos meteorológicos, los riegos, etc. Pero existen otros tipos de datos, esencialmente agrícolas, que son fijos para cada tipo de cultivo, como ocurre con los parámetros de cálculo del índice de área de hojas, la función de extracción de agua por las plantas, la intercepción, etc. Por ello, debe realizarse una simulación independiente para cada tipo de cultivo.

Así, se ha realizado una simulación para el período de 1989 en que en la parcela experimental E-2 se cultivó veza y, tras la siega, no hubo ningún cultivo y otra para la parte final del año en que se cultivó maíz.

Durante la simulación del cultivo de veza se ha procedido a realizar la calibración del medio físico en combinación con modificaciones en los parámetros agronómicos. Para la simulación del maíz se han debido ajustar de nuevo los parámetros de las plantas ya que las características de flujo del sistema sufren fuertes modificaciones.

Finalmente se puede mencionar que, debido a la fuerte relación existente entre todas las variables que intervienen en el modelo SWATRE, la modificación de una de ellas muchas veces ha llevado consigo el cambio en otras. De todos modos se han analizado estos cambios cuando modificando de forma apreciables las variables "menos significativas" los resultados no son muy diferentes.

2.4.3. Proceso de ajuste

2.4.3.1. Período marzo-junio de 1989

Este período comprende parte del cultivo de veza (que se sembró en noviembre de 1988), parte de tiempo con el terreno sin cultivo, y otra parte de tiempo (13 a 30 de junio) con cultivo de maíz, pero que no germinó en la parcela experimental aunque sí en sus alrededores.

Durante este período el tensiómetro T-11 tuvo un comportamiento anómalo y no ha podido ser utilizado en el proceso de ajuste, lo cual constituye una limitación a la calibración efectuada.

En la calibración se han considerado, como ya se ha comentado, una serie de factores fijos y otros susceptibles de modificación, de acuerdo con el conocimiento que sobre ellos se tenían.

Entre los datos no modificados durante todo el ajuste figuran el perfil tensional al comienzo de la simulación, los niveles piezométricos, los datos meteorológicos y los riegos controlados.

Entre lo que se han modificado se pueden citar los parámetros hidráulicos del medio físico, los factores agrícolas, y otros elementos que afectan esencialmente a la entrada de agua en el sistema.

El perfil de tensiones considerado como inicial se ha basado en los registros tensiométricos del 28 de febrero de 1989. A la profundidad correspondiente al tensiómetro T-11 se le ha asignado una tensión de unos 150 cm, próxima al valor medio de ese tensiómetro durante todo 1988. La profundidad del agua en esa fecha, en el piezómetro P-02', marca el límite de zona con tensión matricial, y por tanto, el límite de la zona no saturada. La figura 2.10 representa el perfil inicial de tensiones que se ha considerado para la simulación del período marzo-junio.

Por lo que se refiere a los datos piezométricos, ya se comentó anteriormente que se han utilizado los niveles de agua en el piezómetro P-02', que definen la condición de borde inferior elegida.

En cuanto a los datos meteorológicos, los utilizados son los de la estación del Aeropuerto de Madrid-Barajas, sobre los que únicamente se ha debido obtener la relación de radiación neta-radiación global, pues éste es un dato de entrada necesario en SWATRE para calcular la evaporación. Para ello se ha considerado un albedo de 0.2.

Como se se expuso en la Parte I (apartado 5.2.) las curvas de retención de humedad obtenidas en las proximidades de la parcela E-2 presentan problemas de interpretación y falta de datos para unas tensiones de succión inferiores a 100 cm. Por ello, se ha considerado que estos datos no son suficientemente precisos para definir las características del medio, por lo que han sido evaluados conjuntamente con los datos granulométricos existentes, las observaciones de campo y la bibliografía consultada para definir los tipos de material presente en el perfil y sus curvas de retención (Figura 2.12).

Como factores agronómicos se tomaron las correspondientes a observaciones de campo (cubierta de suelo máxima del 80%, longitud de las raíces 15 cm) desde el comienzo de la simulación hasta mediados de mayo, y las funciones de extracción de agua por las raíces, el índice de área de hojas y la función de intercepción incorporados en el propio modelo SWATRE. Las funciones que se han utilizado para el cálculo de extracción de agua por las plantas aparecen en la figura 2.13.

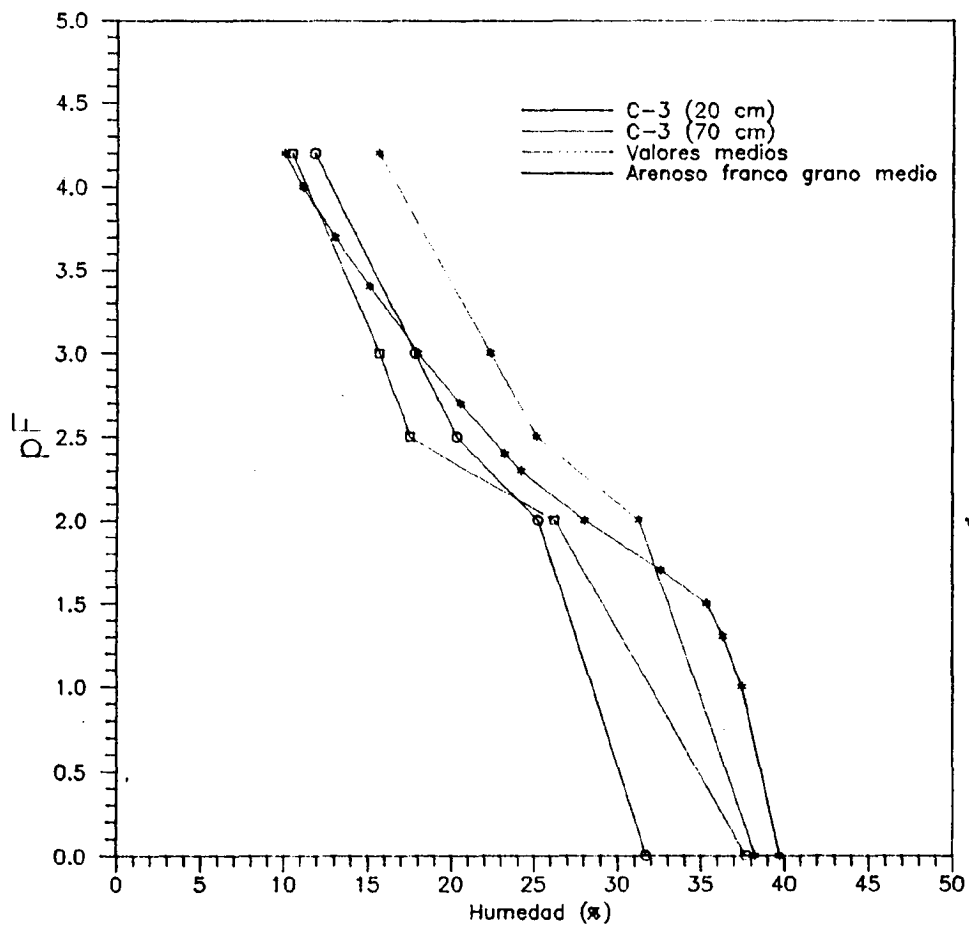


Fig. 2.12. Comparación de curvas de retención de humedad de la calicata C-3 con la curva teórica del tipo textural arenoso franco de grano medio

Una vez considerados todos los datos a incorporar en el programa y obtenido un primer resultado, se compararon los potenciales calculados con los reales de los tensiómetros T-07 y T-09 para la calibración del modelo.

Las modificaciones se centraron fundamentalmente en conseguir un mayor humedecimiento del perfil, especialmente en la primera capa. Para ello se realizaron principalmente dos procesos.

El primero de ellos consistió en modificar el medio físico de modo que no existiese una pérdida importante de agua hacia la parte baja del perfil, según se apreciaba en los potenciales reales. Para ello hubo que considerar la parte más alta del perfil como un medio más limo-arcilloso, y la parte intermedia del perfil como una zona con cambios importantes de presión frente a cambios poco importantes de humedad. El perfil resultante sería tres capas progresivamente más arenosas en profundidad.

El segundo de ellos fue considerar las funciones agronómicas para conseguir un menor consumo de agua por las plantas, que se realizó modificando la función de extracción (Figura 2.13) y cambiando el índice de área de hojas para disminuir la transpiración frente a una cubierta de suelo tan considerable como el 80% (o mayor) de la veza.

El resultado final de estas modificaciones aparece en la figura 2.14. Se puede apreciar que aún con los cambios efectuados los potenciales calculados se separan de modo muy apreciable de los reales en el período abril-mayo,

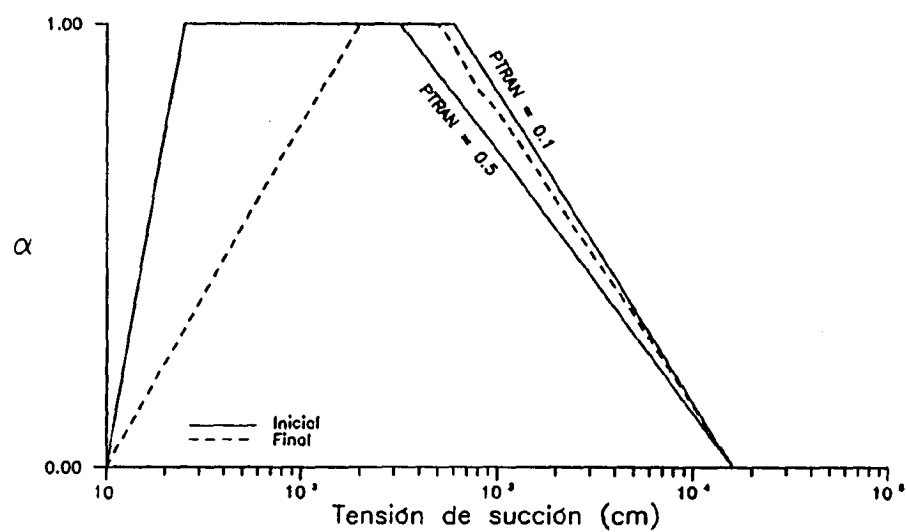


Fig. 2.13. Periodo marzo-junio de 1989. Funciones de extracción de agua por las plantas, utilizadas en el ajuste del modelo SWATRE

indicando una falta de entrada de agua. El ajuste es relativamente bueno en el mes de junio, cuando se tienen controlados los riegos.

Como consecuencia de lo anteriormente expuesto y conociéndose, por tener datos químicos, que hubo riegos al menos los días 11 y 15 de marzo, y el 5 de mayo se realizaron nuevos ajustes con ellos. Al no conocerse la cuantía de los mismos se supusieron semejantes a los efectuados en junio (2.3 cm de agua en cada uno). Además, en vista del fuerte descenso de potencial registrado en el tensiómetro T-07 a mediados de abril, se supuso otro riego de 2.3 cm de agua el día 17 de ese mes.

El resultado final aparece en la figura 2.15. Se aprecia que el ajuste ha mejorado sensiblemente con relación al de la figura 2.14 a las dos profundidades de referencia. Este ajuste cuenta con la limitación de no conocerse la cuantía exacta de los riegos llevados a cabo, y si se produjeron más de los considerados.

Únicamente se produce un desajuste importante en la fuerte pérdida de potencial encontrada a 30 cm de profundidad en la última quincena de mayo. Este hecho puede ser debido a una sobrevaloración de los riegos supuestos, o a un cambio en el medio físico debido a las labores agrícolas de siega de veza (que tuvo lugar en esas fechas).

2.4.3.2. Período julio-noviembre de 1989

Este período comprende exclusivamente cultivo de maíz, desde su germinación hasta su madurez.

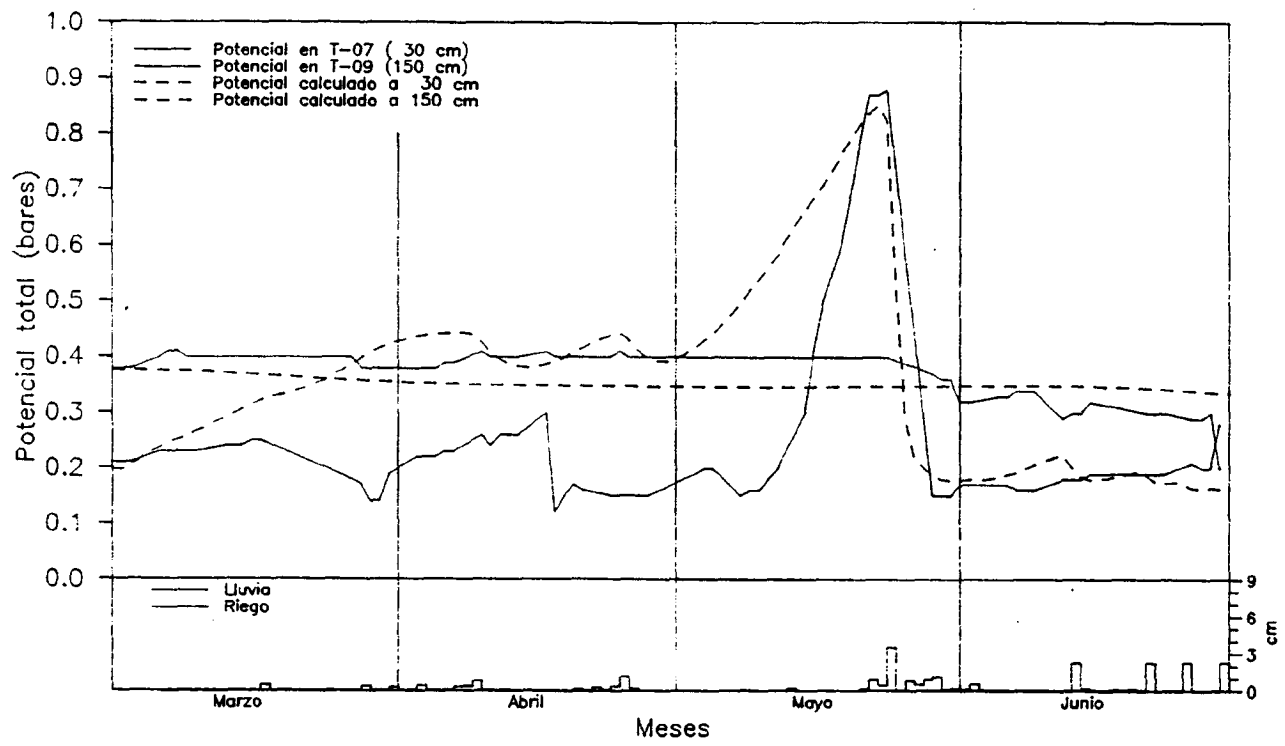


Fig. 2.14. Periodo marzo-junio de 1989. Ajuste final de los potenciales calculados por el modelo SWATRE y los medidos en la parcela experimental E-2, sin considerar riegos no controlados

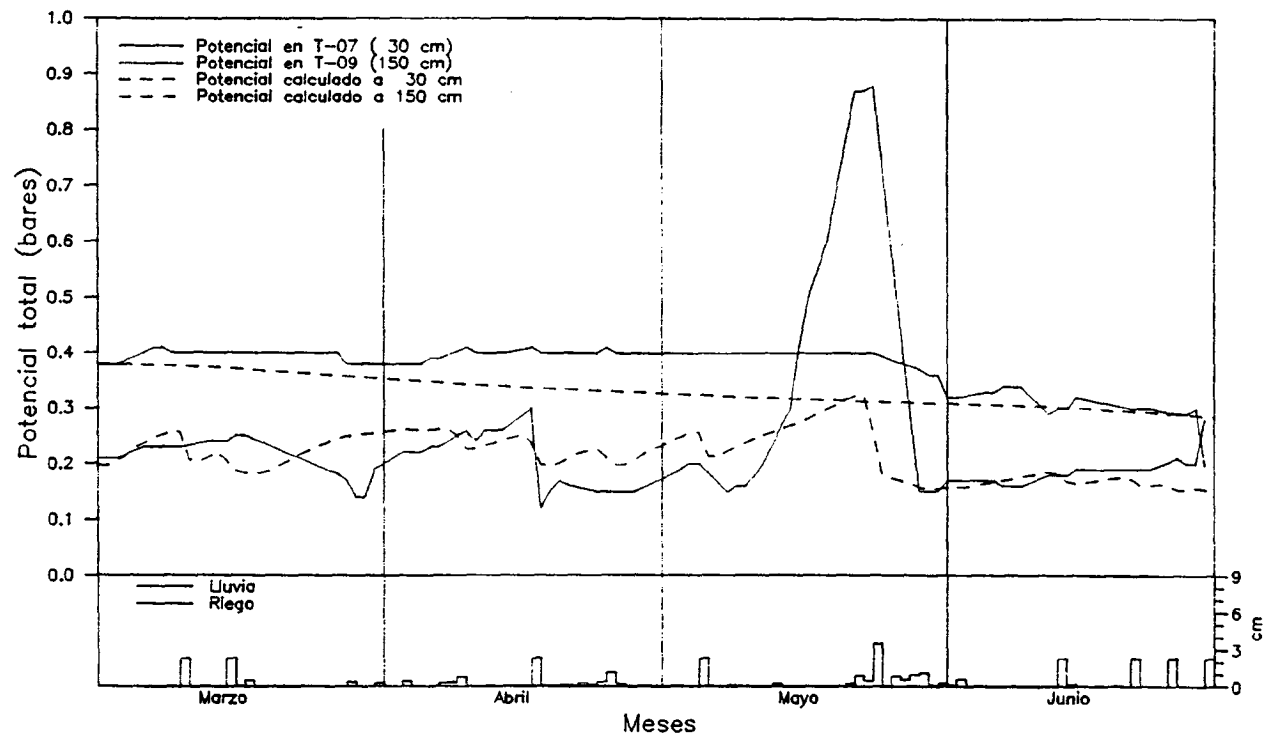


Fig. 2.15. Periodo marzo-junio de 1989. Ajuste final de los potenciales calculados por el modelo SWATRE y los medidos en la parcela experimental E-2, con riegos supuestos

Desde el 6 de julio el tensiómetro T-11 funcionó regularmente con normalidad, por ello se tomó esta fecha como comienzo de la simulación. El perfil tensional inicial también ha sido el de esa fecha (figura 2.11).

El medio físico no ha necesitado modificaciones al haberse considerado válido el resultante del ajuste del período de simulación anterior.

En cuanto a los factores agronómicos, se ha considerado que el maíz estaba en germinación al comienzo de la simulación, con una pequeña cubierta de suelo y con unas raíces de escasa longitud. A mediados de agosto alcanzaría ya su madurez con una cubierta de suelo del 50% en la parcela experimental E-2 y una profundidad de raíces que alcanzaría los 130 cm (esta profundidad ha sido observada en las zanjas que se han realizado en la zona). A partir de octubre el maíz comenzaría a secarse y disminuiría la cubierta de suelo (se ha considerado que es del 30% al final de la simulación).

La función de extracción por las plantas que se ha considerado es la que aparece en la figura 2.16. Esta función no se ha modificado a lo largo del ajuste.

Tras realizar las primeras simulaciones el medio calculado por el modelo presentaba un estado de humedades mucho mayor que el observado en los tensiómetros.

Los cambios fundamentales para conseguir reducir la humedad en el terreno se centraron en el índice de hojas, que se aumentó de modo importante. La función de extracción por las raíces no se modificó ya que la original se consideró óptima para satisfacer la transpiración potencial.

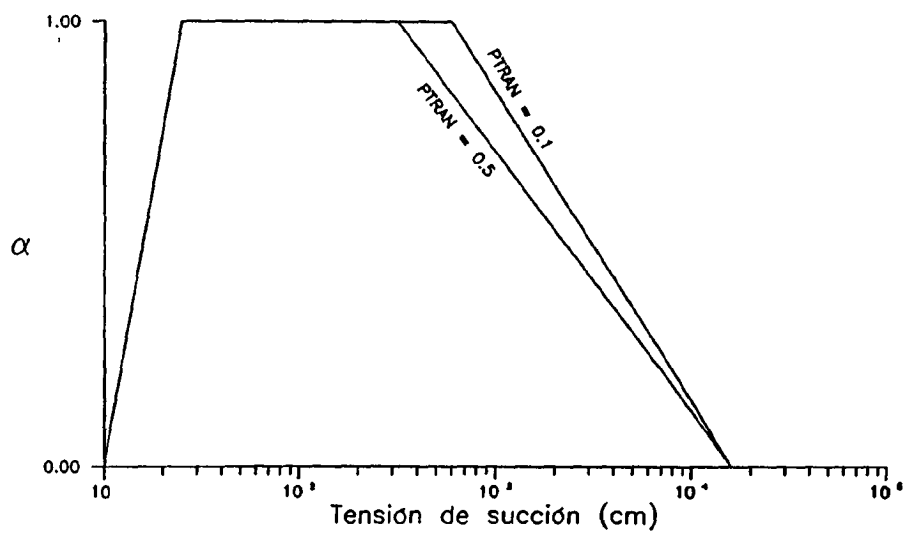


Fig. 2.16. Periodo julio-noviembre de 1989. Funciones de extracción de agua por las plantas, utilizadas en el ajuste del modelo SWATRE

El resultado final obtenido, tras realizar todas las modificaciones, aparece en la figura 2.17. En ella se puede apreciar que se ha conseguido una aproximación relativamente importante al comportamiento del medio teniendo en cuenta las características reales de este, por una parte, y los datos disponibles sobre características hidráulicas del mismo, por otra (apartado 5.2., Parte I).

2.4.4. Resultados

Una vez dado por finalizado el proceso de ajuste se han analizado los resultados obtenidos por el modelo SWATRE en cada uno de los períodos en que se ha dividido el año 1989.

Como se comentó anteriormente, los resultados que proporciona el modelo son:

- Balance global de agua en el perfil simulado diariamente y en todo el período simulado.
- "Entradas":
 - Lluvias
 - Riegos
 - Entradas desde la zona saturada
- "Salidas":
 - Escorrentía superficial
 - Intercepción de agua por las plantas
 - Transpiración
 - Evaporación
 - Flujo hacia o desde la zona saturada

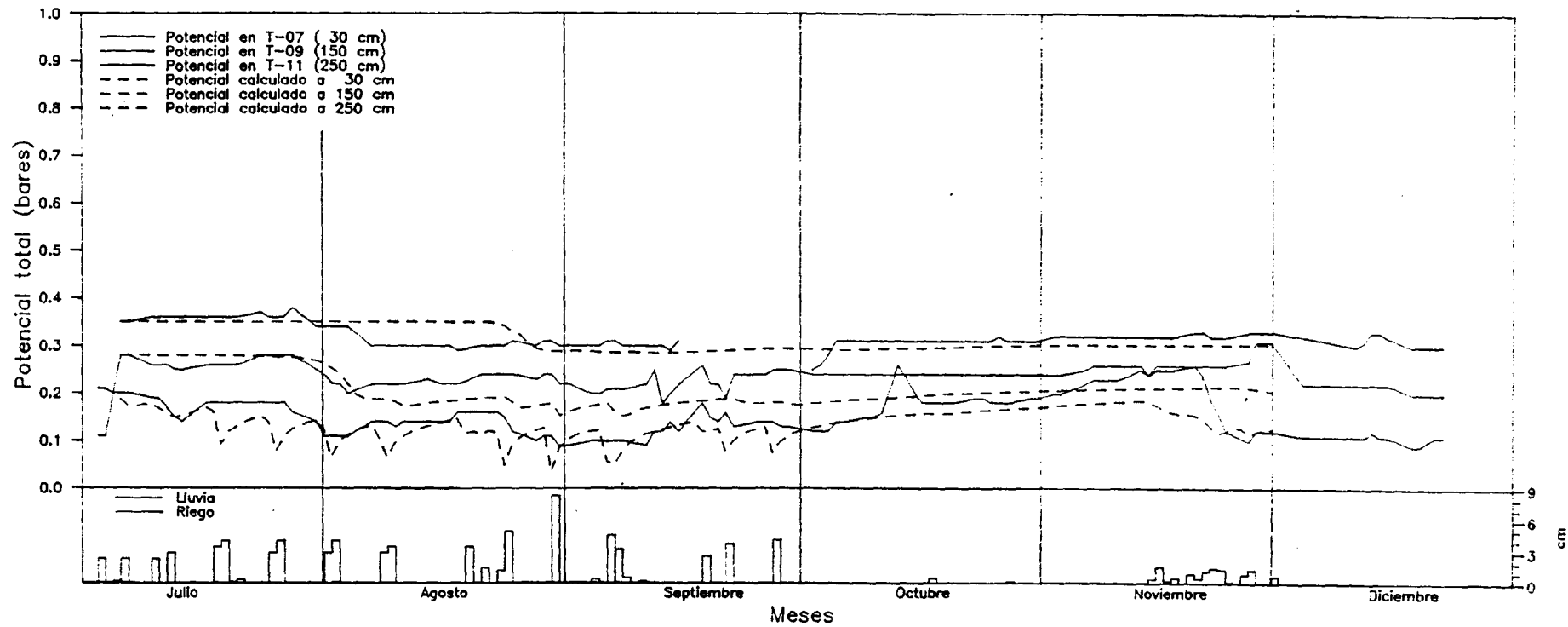


Fig. 2.17. Periodo julio-noviembre de 1989. Ajuste final de los potenciales calculados por el modelo SWATRE y los medidos en la parcela experimental E-2

- Estado de cada uno de los nudos o celdas en los que se ha discretizado el medio

- Humedades
- Presiones
- Flujo de agua desde la celda superior
- Extracción de agua por las plantas
- Conductividad hidráulica

2.4.4.1. Periodo marzo-junio 1989

Este período corresponde al del cultivo de veza (marzo-mayo) y al de siembra de maíz de grano (junio) en la parcela experimental E-2.

Para esta época la precipitación caída (considerando válida la registrada en el Aeropuerto de Madrid-Barajas) es del orden de 15.2 cm y los riegos de los que se tiene constancia son en total de 9.2 cm. Como ya se comentó en los apartados previos durante la calibración ha sido necesario introducir otros riegos, que han supuesto en total otros 9.2 cm de agua.

Con estas entradas de agua, el perfil de tensiones en el terreno (y sus correspondientes humedades en la curva de retención de humedad), los datos meteorológicos, el nivel freático y el estado de las plantas, el modelo SWATRE ha realizado balances de agua diarios cuyos resultados globales aparecen en la tabla 2.2.

Existe pues una ganancia de agua en el conjunto del perfil del orden de 8 cm, con unos aportes al sistema de unos 33.6 cm, que se dividen en 2.3 cm interceptados por

Tabla 2.2.
Balance de agua en el período 1-3-89 al 30-6-89

Contenido inicial de agua en el perfil (cm)	104.0			
Precipitación y riego (cm)		33.6 *		
Escorrentía (cm)			0.0	
Intercepción (cm)			2.3	
Transpiración (cm)			7.3	
Evaporación (cm)			10.6	
Flujo a la zona saturada (cm)			5.4	
Contenido final de agua en el perfil (cm)				112.0
	104.0	33.6	25.6	112.0

* Se han añadido cuatro riegos de 2.3 cm a lo largo del período de simulación

las plantas y 31.3 cm son infiltración (realmente agua que llega a la superficie del suelo y es susceptible de entrar en el perfil).

Dado que el modelo no ha calculado escorrentía superficial y que la intercepción sólo representa el 7% del agua proporcionada al sistema, la mayor parte de ésta se convierte en infiltración.

En la figura 2.18 se han representado las lluvias y los riegos introducidos en el modelo SWATRE y la infiltración calculada por éste. Como se acaba de decir, la infiltración resulta del mismo orden de magnitud que los aportes al sistema.

De este agua infiltrada una parte sale del sistema mediante evapotranspiración y otra parte permanecerá en él y evolucionará en el perfil a lo largo del tiempo.

Por lo que se refiere a la evapotranspiración, en la figura 2.19 se han representado los resultados obtenidos por SWATRE en este aspecto. Aparecen por una parte la evapotranspiración y la transpiración potenciales y por

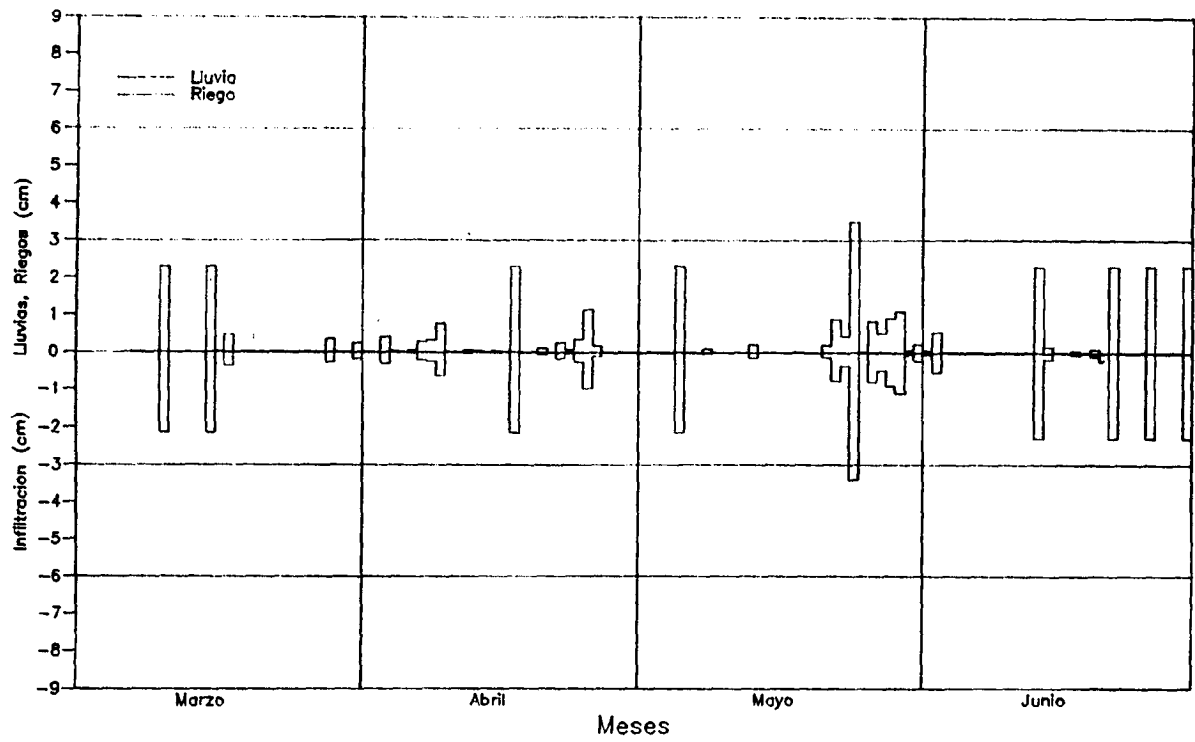


Fig. 2.18. Periodo marzo-junio de 1989. Infiltración calculada por el modelo SWATRE

otro la evaporación y la transpiración reales. Cabe señalar que el modelo calcula la transpiración potencial por diferencia entre la evapotranspiración y la evaporación potenciales, calculadas a su vez por métodos semiempíricos. Por esto, aunque no exista planta existe una evapotranspiración potencial.

De la figura se desprende que la transpiración está satisfecha siempre mientras dura el cultivo. En cambio, la evaporación sólo es satisfecha totalmente tras una lluvia o riego importantes. Los resultados globales en cuanto a evapotranspiración aparecen en la tabla 2.3.

Tabla 2.3.
Valores de evaporación y transpiración del período marzo-junio de 1989 obtenidos por el modelo SWATRE

	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Total
Transpiración potencial (cm)	2.2	2.3	3.3	3.0	10.8
Transpiración real (cm)	2.2	2.3	2.9	0.0	7.4
Evaporación potencial (cm)	4.0	4.2	6.4	8.8	23.4
Evaporación real (cm)	2.5	2.0	2.5	3.6	10.6
Precipitación y riegos (cm)	5.7 *	6.5 **	11.3 **	10.1	33.6

* Incluye dos riegos supuestos de 2.3 cm

** Incluye un riego supuesto de 2.3 cm

Otra zona de entrada o salida de agua del sistema es el fondo del perfil.

Al tener el modelo como condición de borde inferior el nivel freático, la posición de éste define el que un

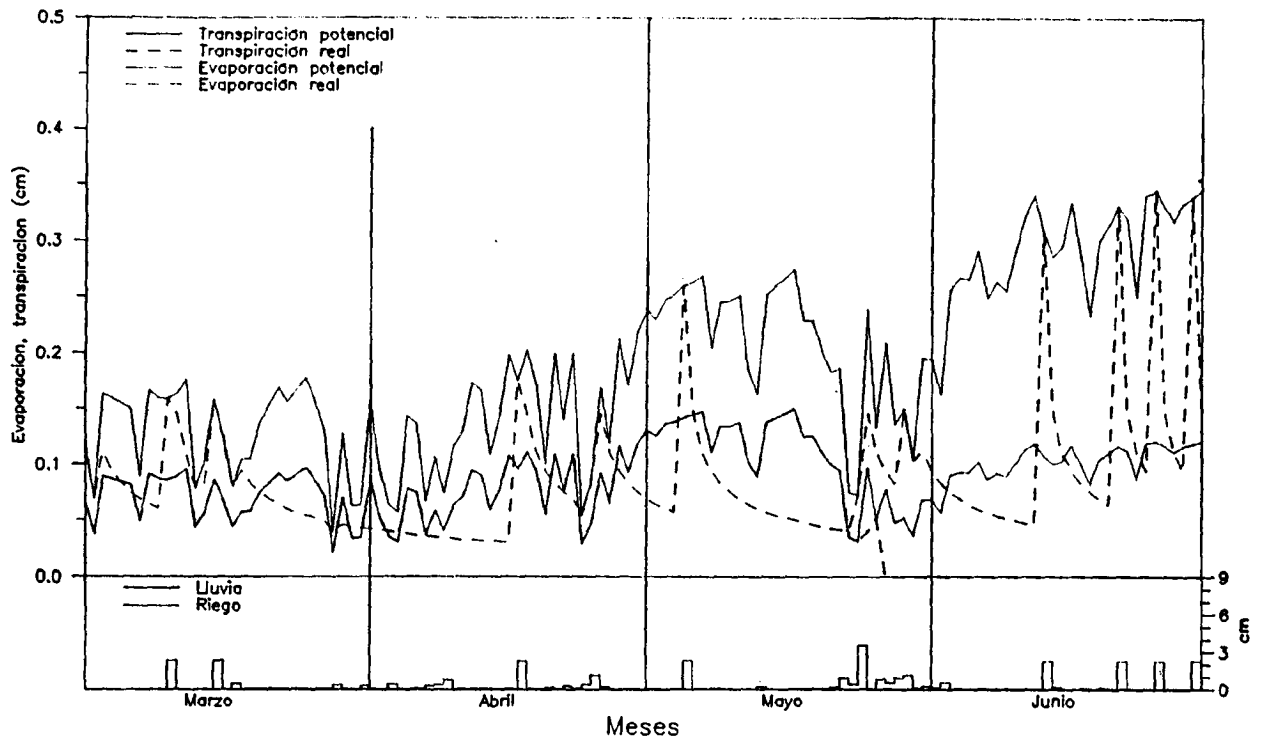


Fig. 2.19. Periodo marzo-junio de 1989. Evaporación potencial y real, y transpiración potencial y real calculadas por el medio SNATRE

determinado número de celdas se encuentren totalmente saturadas y por tanto influye de modo importante en el cálculo global de agua en el perfil.

En la figura 2.20 se representa el flujo desde (+) o hacia (-) la zona saturada. Una vez alcanzado el equilibrio entre el sistema y las condiciones iniciales impuestas, no se produce flujo en el límite entre las zonas saturada y no saturada hasta que el nivel freático comienza a oscilar de modo relativamente brusco en el mes de mayo. Cuando asciende el nivel freático dominan los flujos ascendentes y viceversa.

La posición del nivel freático no parece ser pues reflejo del funcionamiento hidráulico de la zona no saturada, sino que su variación es consecuencia de hechos ajenos a este sistema de flujo local.

En el resto del perfil, salvo la zona afectada por las raíces, el hecho más importante es el paso de agua a través del mismo. La transmisión de agua en la zona no saturada lleva consigo la modificación del estado de presiones en la misma y por tanto del potencial hidráulico. Igualmente la modificación de la humedad hace cambiar también la permeabilidad, que del mismo modo que el potencial, influye en el cálculo del flujo dentro de la zona no saturada.

El estado tensional en el perfil, como ha sido comentado anteriormente, transformado a potencial hidráulico ha sido el único criterio de ajuste posible en este caso, y el resultado obtenido por el modelo SWATRE aparece en la figura 2.15.

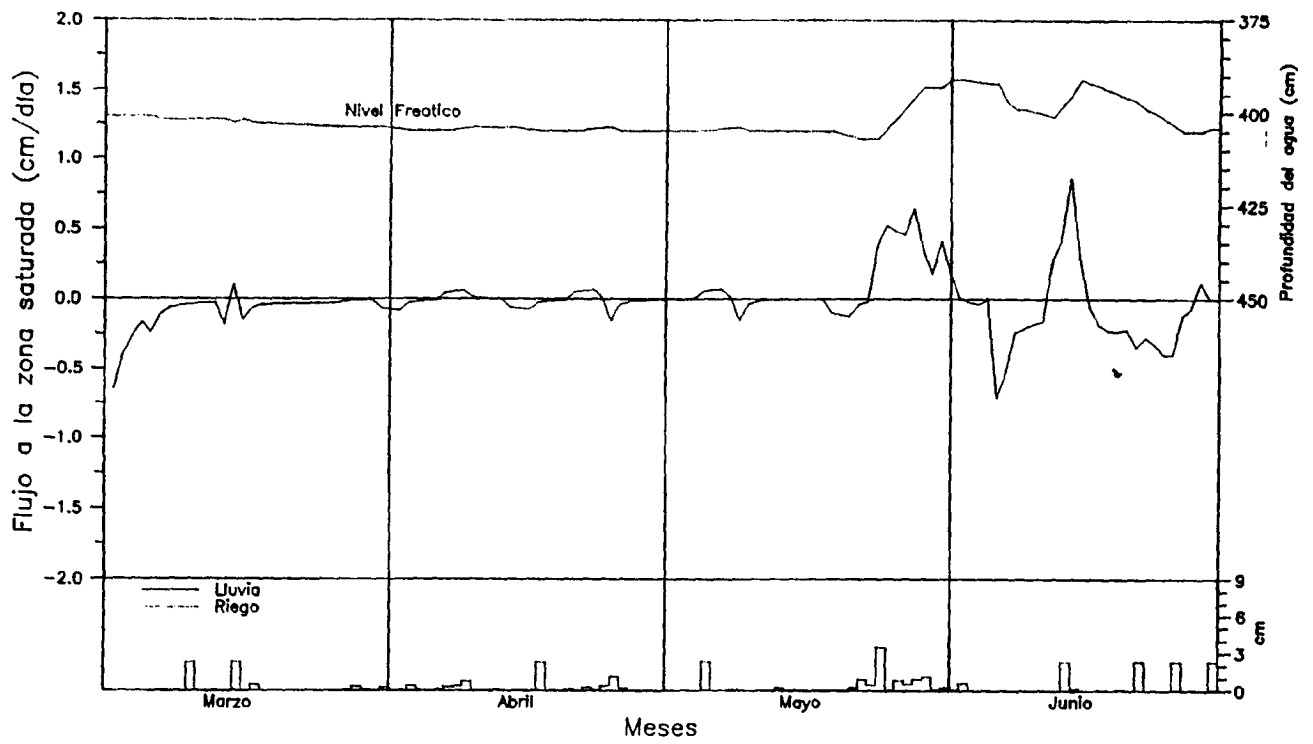


Fig. 2.20. Periodo marzo-junio de 1989. Flujo en el límite superior de la zona saturada

De acuerdo con ese estado tensional y las funciones $\theta_i = f(p_i)$ y $K_i = f(\theta_i)$ el modelo SWATRE calcula también la transferencia de agua entre las diferentes celdas, así como la humedad en cada una de ellas en cada día.

En lo referente al flujo en la figura 2.21 se ha representado el flujo en cm/día calculado por el modelo entre las celdas en las que se sitúan los tomamuestras y las inmediatamente superiores. El flujo es descendente con signo negativo y ascendente con signo positivo.

Como se desprende de la figura, con las condiciones impuestas, apenas existe movimiento de agua en todo el perfil entre marzo y junio. Únicamente los dos puntos de referencia más altos, los situados a 30 y 90 cm de profundidad reflejan flujo (esencialmente descendente) tras los riegos y principalmente tras las importantes lluvias caídas a finales de mayo.

El resto de los puntos de referencia del perfil muestran un flujo nulo a lo largo de todo el período de simulación.

Así pues el flujo de agua en la zona no saturada durante el primer semestre de 1989 estaría limitado a la capa más alta de las tres definidas en el perfil (hasta aproximadamente 115 cm). En la parte inferior del perfil existiría un flujo que sería reflejo de la oscilación del nivel freático.

En la tabla 2.4 figuran los flujos entre las diferentes capas en que se ha dividido el perfil y en el límite superior de la zona saturada.

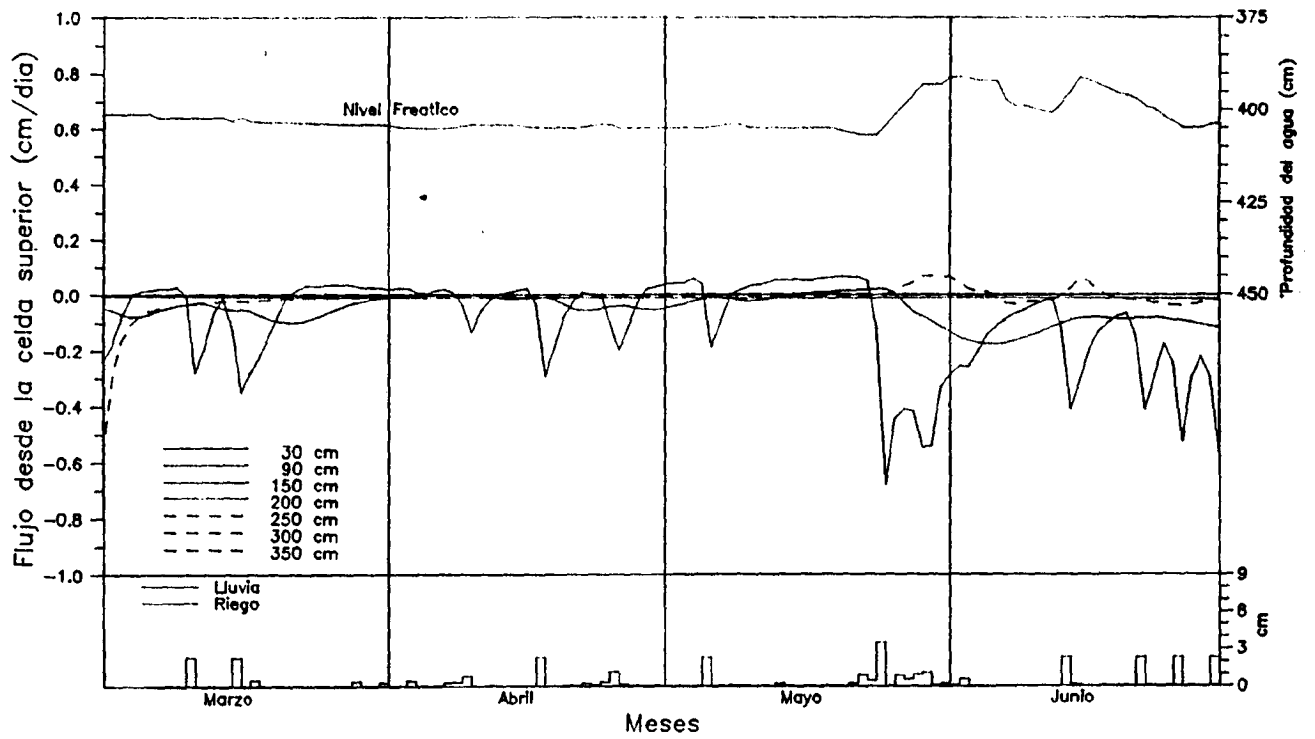


Fig. 2.21. Periodo marzo-junio de 1989. Flujo calculado por el modelo SWATRE a 30, 90, 150, 200, 250, 300 y 350 cm de profundidad

Consecuencia de ese flujo es el contenido de humedad reflejado por el modelo en cada una de las celdas a lo largo de todo el período de simulación.

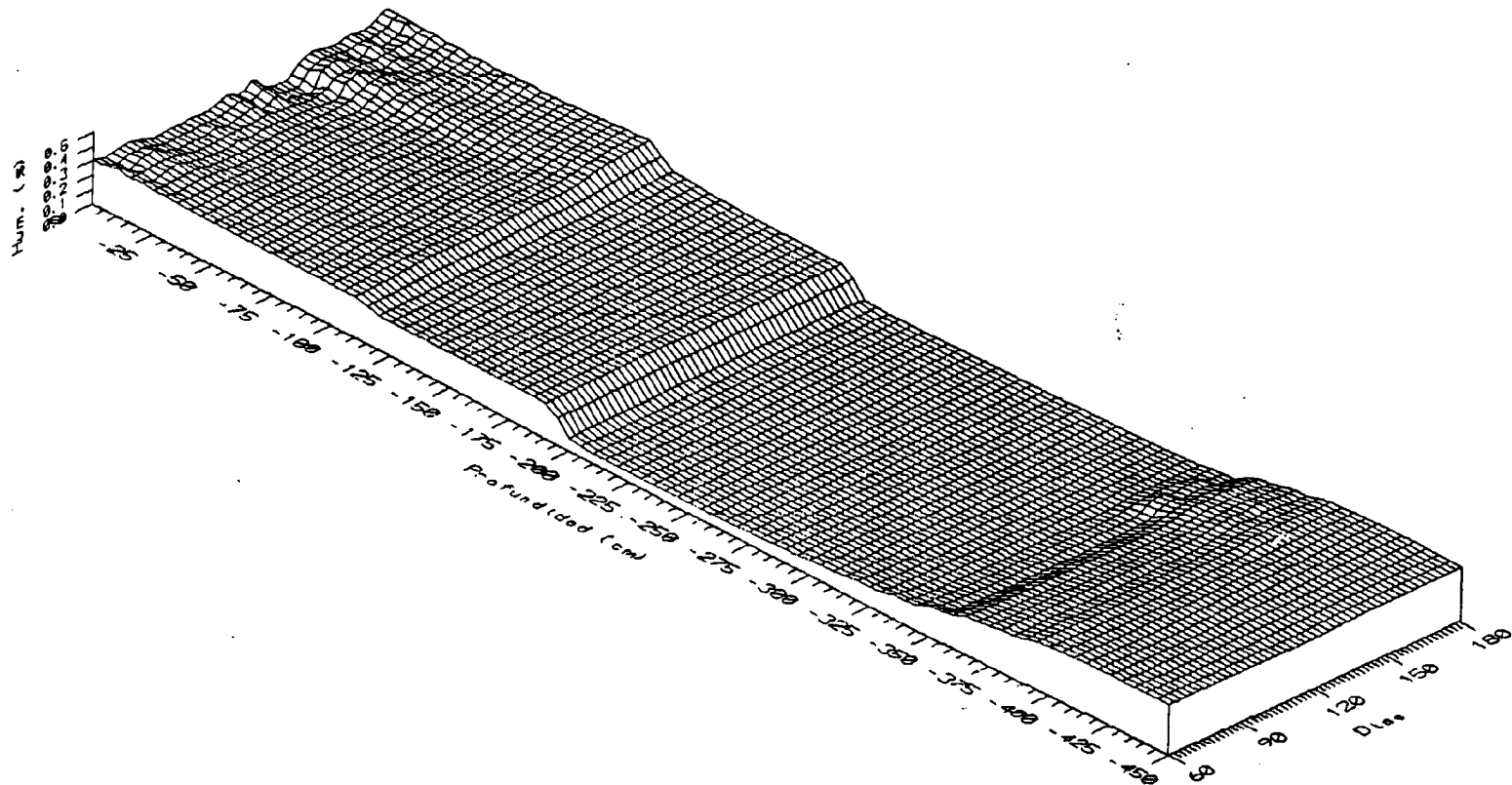
Tabla 2.4.
Flujo calculado en la zona no saturada. Período marzo-junio de 1989

Flujo (cm/mes) en el límite superior de	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Total
Primera capa	- 2.62	- 3.38	- 8.13	- 6.58	- 20.71
Segunda capa	- 0.65	- 0.41	- 0.37	- 0.95	- 2.38
Tercera capa	- 0.01	- 0.02	- 0.03	- 0.04	- 0.10
Zona saturada	- 5.4	- 0.3	3.1	- 2.6	- 5.2

La representación de la variación de la humedad con el tiempo a las profundidades en las que se sitúan los tensiómetros T-07, T-09 y T-11 (figura 2.22) muestra igualmente que en este período la variación de humedad es apreciable principalmente en las partes más altas del perfil y a partir de mayo.

Este hecho se aprecia igualmente en las figuras 2.23 y 2.24 donde se ha representado un gráfico humedad-profundidad en el período 20 de marzo a 3 de junio y otro tridimensional humedad-profundidad-tiempo. Se aprecia que los cambios más importantes de humedad se producen en la primera de las tres capas en las que se ha dividido el sistema, esencialmente con un aumento progresivo en profundidad de acuerdo con las lluvias y los riegos, y un descenso tras los mismos. En la segunda capa no se producen variaciones apreciables de humedad aunque existe un ligero aumento de ésta. Por lo que respecta a la tercera capa, sólo existen cambios importantes en el fondo del sistema, de acuerdo con la oscilación del nivel freático.

Fig. 2.24. Periodo marzo-junio de 1989. Diagrama tiempo-profundidad-humedad en la parcela experimental E-2



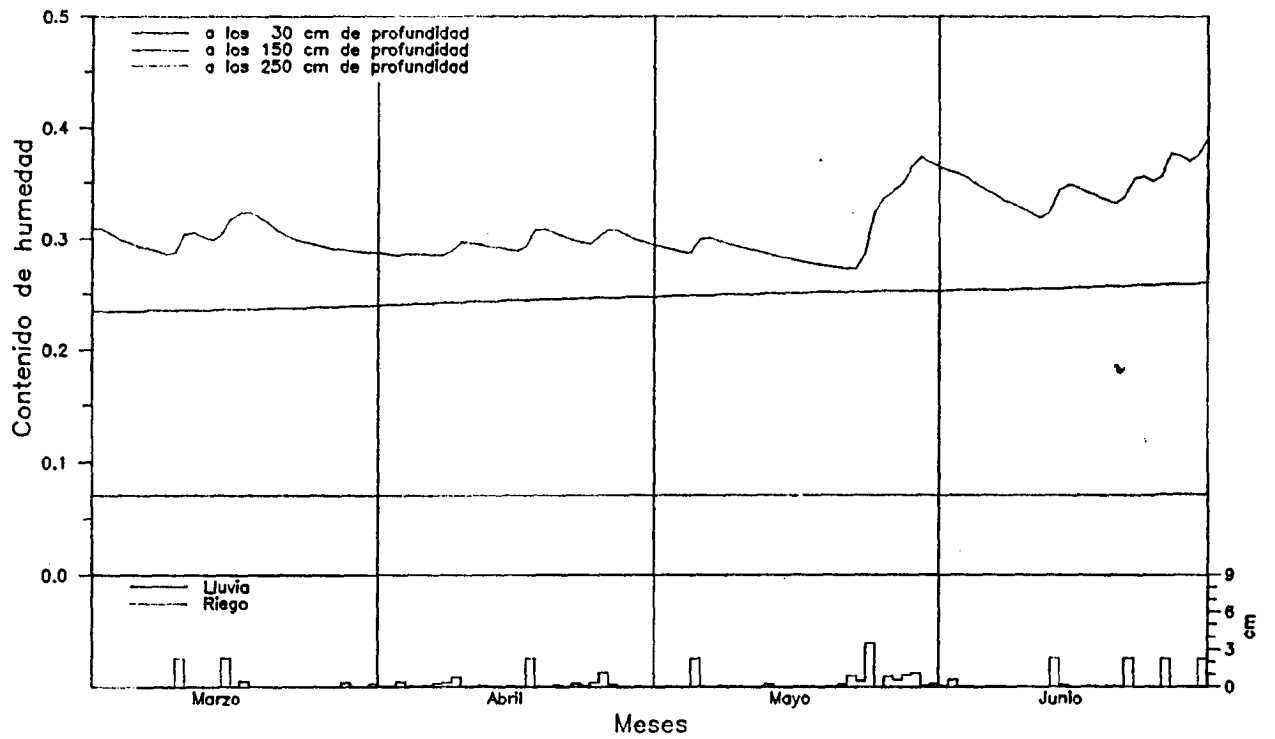


Fig. 2.22. Periodo marzo-junio de 1989. Evolución temporal de las humedades a 30, 150 y 250 cm de profundidad

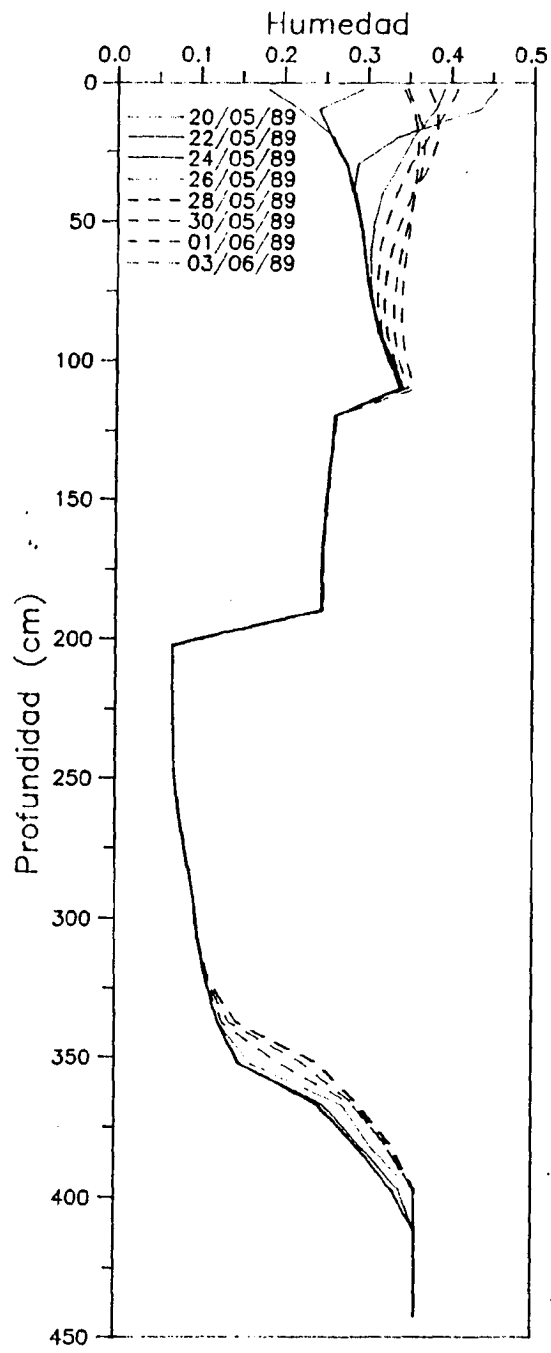


Fig. 2.23. Periodo marzo-junio de 1989. Perfil de humedades entre el 20 de mayo y el 3 de junio

2.4.4.2. Período Julio-Noviembre de 1989

El período julio-noviembre de 1989 corresponde al cultivo del maíz, tanto en la parcela experimental E-2 como en sus alrededores (el maíz fue sembrado en junio, pero debió ser resembrado en julio en la parcela E-2 debido a que la experiencia de trazado con bromuros impidió su crecimiento normal).

La simulación efectuada para este cultivo comienza el 6 de julio, ya que este día funcionan correctamente todos los tensiómetros de la parcela y finaliza el 30 de noviembre de 1989 al no disponerse de más datos meteorológicos.

Entre estas dos fechas la precipitación registrada en el Aeropuerto de Madrid-Barajas es de 16.3 cm y los riegos llevados a cabo en la parcela experimental son de 69.3 cm.

Con estas entradas de agua al sistema, el estado de humedades del terreno el 6 de julio de 1989 (obtenidos a partir de las tensiones), la evolución piezométrica y de las plantas, el modelo SWATRE ha realizado un balance global de agua en el sistema cuyo resultado aparece en la tabla 2.5.

De los aportes al sistema por su límite superior (85.6 cm), existe una pérdida de agua antes de llegar al perfil que son calculadas como escorrentía superficial (1 cm) y como intercepción por las plantas (2.4 cm). El resto del agua (82.2 cm) se incorpora al perfil como infiltración.

En la figura 2.25 se han representado todas las lluvias y los riegos entre julio y noviembre de 1989, y la infiltración desde el 6 de julio calculada por el modelo SWATRE.

Se puede apreciar que la mayor parte de las lluvias y riegos se transforman en infiltración y sólo es significativa la pérdida calculada por escorrentía superficial el día 30 de agosto en el que se regaron 8.3 cm.

Tabla 2.5.
Balance de agua del período 6-7-89 al 30-11-89

Contenido inicial de agua en el perfil (cm)	114.1			
Precipitación y riego (cm)		85.6		
Escorrentía (cm)			1.0	
Intercepción (cm)			2.4	
Transpiración (cm)			22.9	
Evaporación (cm)			8.6	
Flujo a la zona saturada (cm)			34.0	
Contenido final de agua en el perfil (cm)				130.8
	114.1	85.6	68.9	130.8

De los 82.2 cm infiltrados, 31.5 cm se pierden por evapotranspiración. En la figura 2.26 se han representado los resultados obtenidos por SWATRE en relación a la evapotranspiración, separando la transpiración y evaporación potenciales, y la transpiración y evaporación reales.

De la figura 2.26 se desprende que en este período la transpiración es mayor que la evaporación en la mayor parte del período y que queda prácticamente satisfecha en todo el período de simulación. Esto ocurre igualmente con la evaporación, debido a los importantes aportes de agua por riego.

Los resultados mensuales de evapotranspiración obtenidos por SWATRE aparecen en la tabla 2.6.

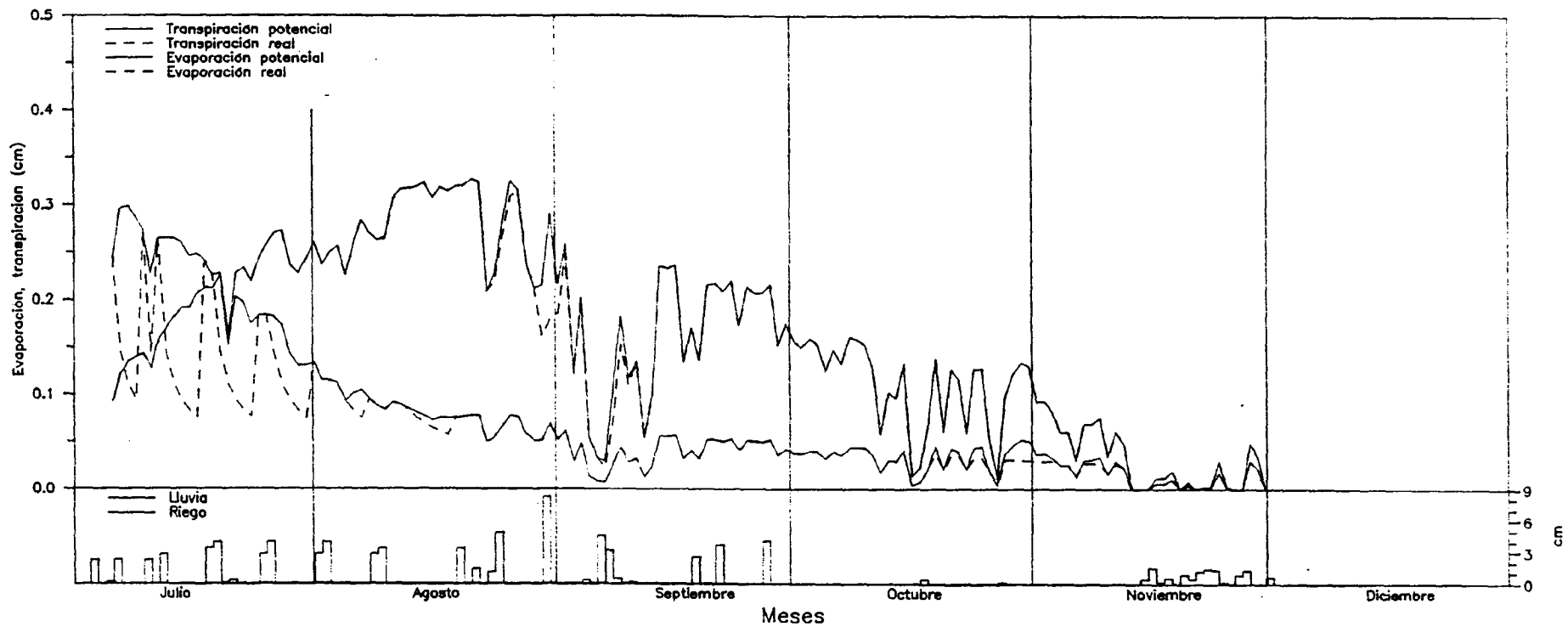


Fig. 2.26. Periodo julio-noviembre de 1989. Evaporación potencial y real y transpiración potencial y real, calculadas por el modelo SWATRE

Tabla 2.6.
Valores de evaporación y transpiración del periodo julio-noviembre de 1989 obtenidos por el modelo SWATRE

	Julio *	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Total
Transpiración potencial (cm)	5.1	8.7	5.0	3.4	0.9	23.1
Transpiración real (cm)	5.1	8.5	5.0	3.4	0.9	22.9
Evaporación potencial (cm)	5.7	2.6	1.2	1.0	0.4	10.9
Evaporación real (cm)	3.6	2.5	1.2	0.9	0.4	8.6
Precipitación y riegos (cm)	22.4	32.5	19.2	0.6	10.9	85.6

* Periodo 6 de julio - 31 de julio

Por lo que se refiere al fondo del perfil, el nivel freático y la posible bajada de agua desde la zona no saturada definen en este caso el flujo hacia o desde la zona saturada.

En la figura 2.27 se ha representado ese flujo desde (+) o hacia (-) la zona saturada. Una vez alcanzado el equilibrio en el sistema, apenas se producen flujos en el límite de las dos zonas hasta que el nivel freático asciende de modo importante. En este momento el flujo en el fondo del perfil es ascendente y llega a ser del orden de 1.25 cm/día. Tras ascender el nivel freático y por existir en el perfil un contenido importante de humedad por los riegos, el flujo se invierte y es descendente y del mismo orden que el flujo ascendente previo. En octubre y noviembre, con descensos progresivos del nivel freático y sin importantes entradas de agua, se tiende de nuevo al equilibrio entre la zona saturada y la no saturada, y el flujo tiende progresivamente a cero.

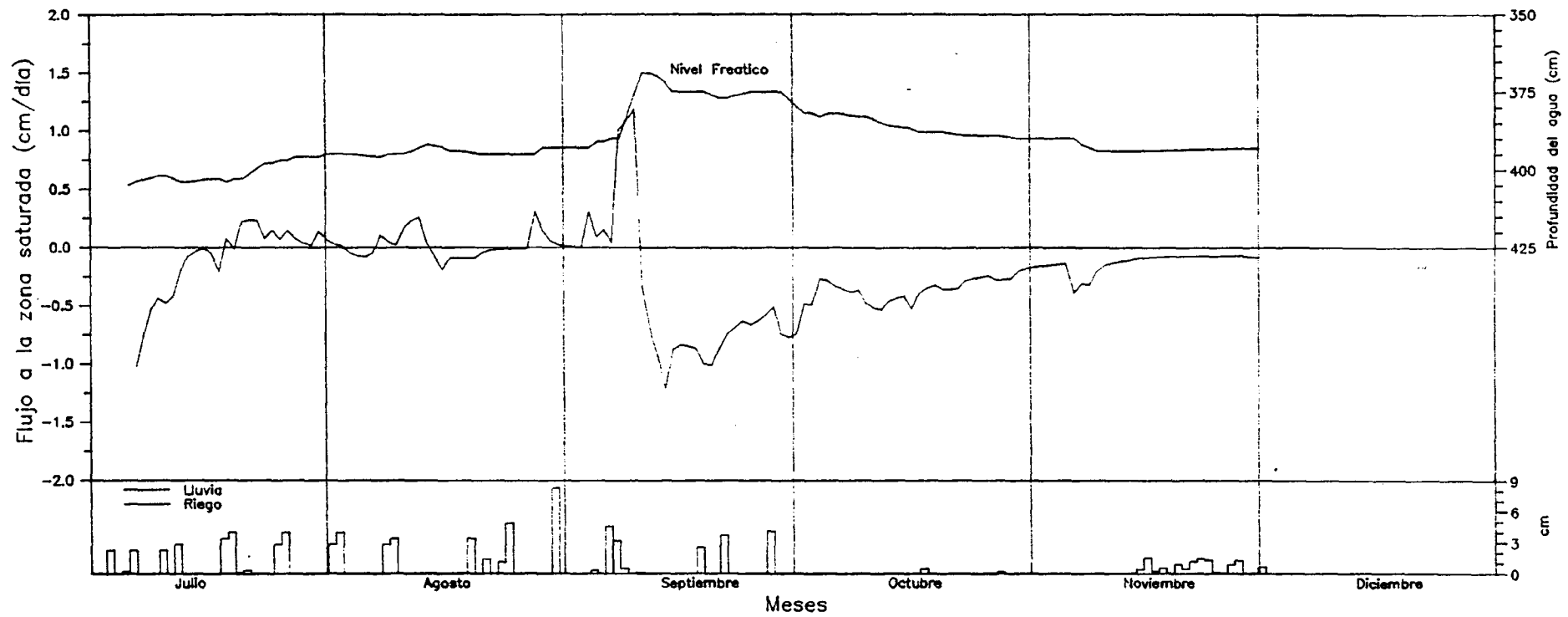


Fig. 2.27. Periodo julio-noviembre de 1989. Flujo en el límite superior de la zona saturada

El flujo simulado en el resto del perfil es bastante diferente al descrito para el período de marzo a junio. En la figura 2.28 se ha representado el flujo en cm/día calculado SWATRE para el techo de las celdas en las que se sitúan los tomamuestras de la parcela experimental E-2. Se puede apreciar que los riegos y lluvias afectan casi inmediatamente al primer punto de referencia situado a 30 cm de profundidad. Conforme el perfil se va humedeciendo por los sucesivos riegos el flujo de agua va afectando a zonas más profundas del perfil. Así el primer riego del mes de septiembre (día 6) parece ya afectar a todo el perfil. Esta tendencia termina cuando finalizan los riegos a finales de septiembre (día 27), y con las escasas lluvias de octubre el flujo se va anulando progresivamente. Con las importantes precipitaciones de finales de noviembre parece comenzar de nuevo un flujo de agua descendente a lo largo del perfil.

Los flujos entre las diferentes capas en que se ha dividido el perfil así como hacia o desde la zona saturada, y hacia o desde la superficie del suelo figuran en la tabla 2.7.

Tabla 2.7.
Flujo calculado en la zona no saturada. Período julio-noviembre de 1989

Flujo (cm) en el límite superior de	Julio *	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Total
Primera capa	- 18.46	- 28.27	- 17.46	0.44	- 9.87	- 73.62
Segunda capa	- 1.60	- 14.21	- 15.51	- 4.40	- 2.44	- 38.17
Tercera capa	- 0.06	- 6.34	- 16.85	- 6.93	- 2.01	- 32.19
Zona saturada	- 7.7	0.5	- 11.6	- 11.5	- 3.7	- 34.0

* Desde el 6 de julio

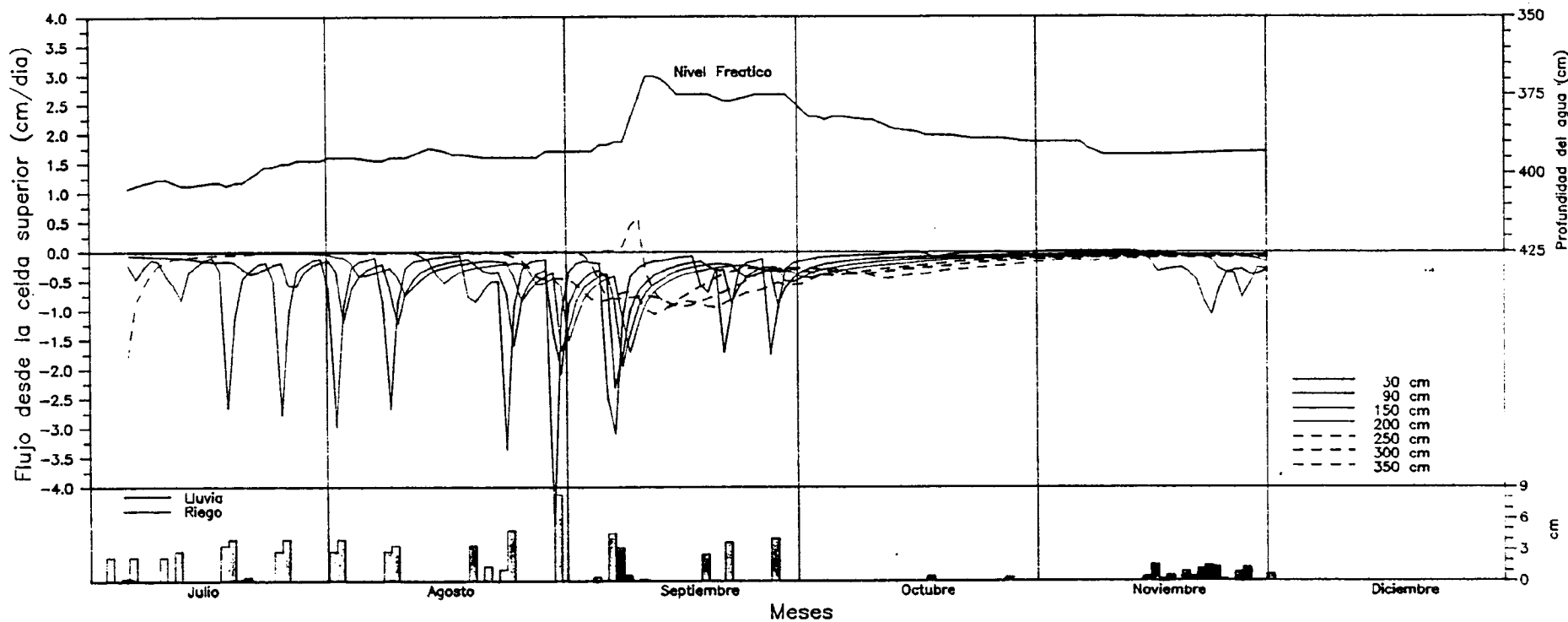


Fig. 2.28. Periodo julio-noviembre de 1989. Flujo calculado por el modelo SWATRE a 30, 90, 150, 200, 250, 300 y 350 cm de profundidad

Estos importantes flujos a lo largo de todo el perfil hacen modificar de forma muy apreciable la humedad en el mismo. En la figura 2.29 se ha representado la humedad en la profundidad a la que se sitúan los tensiómetros T-07, T-09 y T-11 a lo largo del tiempo. En esta época, al contrario de lo que ocurría en el período de cultivo de veza, existe una importante variación de humedad en todo el perfil. En la parte superficial el aumento de humedad es inmediato tras un riego o una precipitación. En la parte intermedia el aumento de humedad responde en un período de tiempo importante (hasta 1 mes) cuando el terreno está relativamente seco (menos del 26% de humedad), pero una vez humedecido el retardo es del orden de una semana. La referencia más profunda (2.5 m de profundidad) también muestra este efecto, pero suavizado. El retardo con el terreno seco (humedad menor al 10%) es de mes y medio con respecto a la parte alta del perfil, mientras que con el terreno húmedo (del orden del 15%) responde antes de dos semanas al humedecimiento de la parte alta.

Este hecho se aprecia también en las figuras 2.30 y 2.31 donde se han representado un gráfico humedad-profundidad para el período 30 de agosto a 13 de septiembre y otro tridimensional tiempo-profundidad-humedad. El primero es una época de importante contenido de humedad y muestra la respuesta diferente de cada una de las capas al paso de la humedad. Mientras que la capa superior muestra una respuesta inmediata a la precipitación o riego, tanto de humedecimiento como de secado, sobre todo en su parte alta, la capa intermedia responde en este caso de forma prácticamente homogénea en

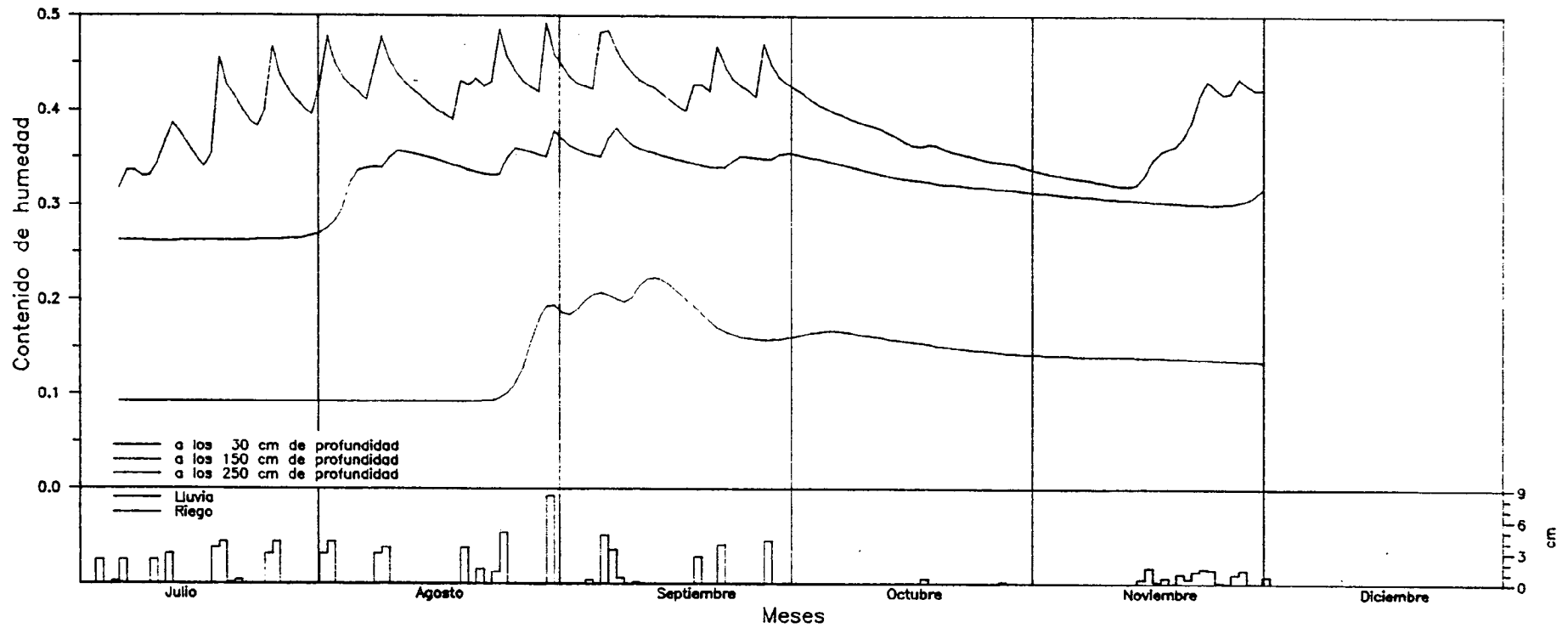


Fig. 2.29. Periodo julio-noviembre de 1989. Evolución temporal de las humedades a 30, 150 y 250 cm de profundidad

todo su espesor y a lo largo del tiempo. La capa más profunda presenta un perfil más complejo y mientras en su parte alta está afectada el día 1 de septiembre por el riego del 30 de agosto, en su parte intermedia responde a riegos anteriores (23 y 24 de agosto); a partir del 7 de septiembre y a los 3 m de profundidad aproximadamente la capa responde a ambos periodos de riego con un único frente de humedad.

La figura 2.31 representa todo el período de simulación y muestra lo expuesto anteriormente. Durante esta época todo el perfil presenta flujo de agua, fundamentalmente en el mes de septiembre. El flujo tras una lluvia es inmediato en la parte superior del suelo y se va transmitiendo a las partes más profundas en una serie de frentes de humedad, pero progresivamente amortiguados. Estos frentes, procedentes de riegos o lluvias diferentes pueden superponerse en las zonas profundas, mientras que quedan claramente diferenciados en las partes altas.

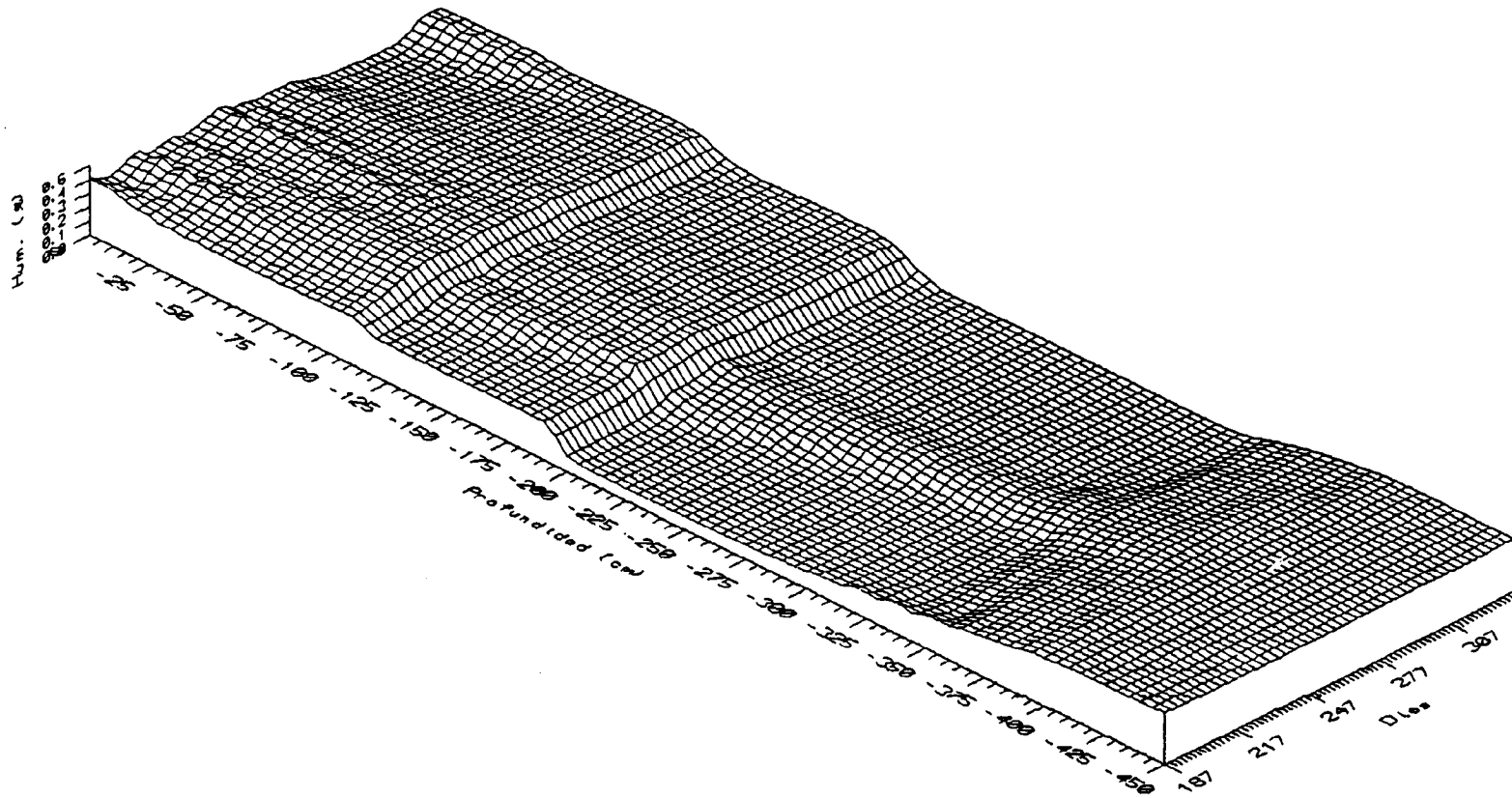
2.5. Discusión de los resultados

Se puede considerar que el modelo SWATRE ha logrado reproducir el comportamiento hidráulico del medio físico en el que se sitúa la parcela experimental E-2

Los resultados, sin embargo, tienen una serie de limitaciones que pueden ser importantes esencialmente en los referente a la aproximación de los valores calculados a los que pudieran existir realmente.

Estas limitaciones son consecuencia, por una parte, de los datos de partida y, por otra, de los parámetros de calibración.

Fig. 2.31. Período julio-noviembre de 1989. Diagrama tiempo-profundidad-humedad en la parcela experimental E-2



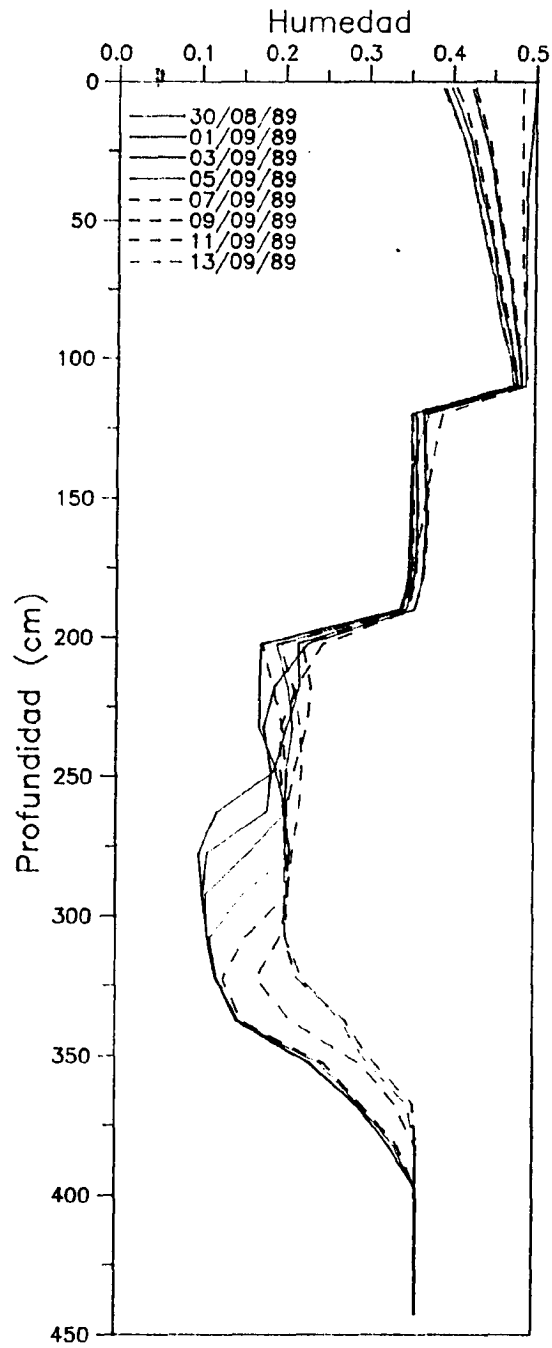


Fig. 2.30. Periodo julio-noviembre de 1989. Perfil de humedades entre el 30 de agosto y el 13 de septiembre

Por lo que se refiere a estos últimos, sólo se han podido utilizar los potenciales medidos en tres tensiómetros. Para el período de cultivo de veza, además, únicamente tenían un funcionamiento correcto dos de ellos. Con esto sólo se han podido comparar datos muy puntuales a una determinada profundidad, y no a lo largo de todo el perfil. Al no conocerse en éste ningún valor de humedad no se han podido comparar los resultados del modelo con las mismas ni la relación entre las humedades y las presiones en el terreno.

En cuanto a los datos de partida las limitaciones proceden esencialmente de los datos agronómicos y de los datos del soporte físico de la zona no saturada. Los datos agronómicos necesarios para la simulación utilizando el modelo SWATRE no son conocidos, desde la cubierta de suelo hasta la profundidad de las raíces (los datos utilizados se han basado en observaciones de campo), y desde el índice de hojas (m^2 de hoja/ m^2 de suelo) hasta la función de intercepción o la de extracción de agua por las plantas. Estos últimos parámetros han debido irse estimando sucesivamente de acuerdo con los resultados del proceso de calibración.

El soporte físico de la zona no saturada es, en este sector, muy heterogéneo. Por ello es posible que la simplificación efectuada (que no contempla los numerosos niveles que pueden encontrarse) no sea la correcta, que los tensiómetros, dada su disposición, no respondan a un único perfil de flujo, o incluso, que se den flujos con una cierta componente horizontal (existen niveles con fuertes pendientes deposicionales) que no se puede simular con el modelo SWATRE dado su carácter unidimensional.

Sin embargo, y aunque los valores absolutos obtenidos tengan esas limitaciones, a la vista de los resultados el ajuste es apreciable y se puede considerar válido también debido que no se dispone de más valores de aproximación.

2.6. Resumen y conclusiones

De las simulaciones efectuadas con el modelo SWATRE en la parcela experimental E-2 para 1989, se pueden obtener las siguientes conclusiones generales:

- Se han reproducido con el modelo las presiones de succión obtenidas experimentalmente con un grado de ajuste que puede considerarse bueno. Para ello se ha tenido en cuenta que el perfil de zona no saturada en el área de estudio se puede representar como un medio heterogéneo en el que se pueden distinguir tres capas de textura progresivamente más arenosa en profundidad.
- Para que la transmisión del agua en el perfil sea efectiva son importantes tanto la cantidad de agua aportada al mismo, como la frecuencia en que se aporta. Para que exista flujo descendente es más importante este segundo factor que el primero.
- La respuesta del perfil frente a las lluvias o riegos es muy diferente. En la parte más superficial los procesos de humedecimiento y secado son inmediatos. En profundidad este fenómeno se va amortiguando y llega a desaparecer si no se aporta agua con frecuencia al sistema.

- Las variaciones de nivel freático no responden a los procesos de flujo de la zona no saturada, ya que existen importantes ascensos de aquél mientras que en el perfil del suelo no se aprecia descenso de agua. En cambio, la relación inversa es importante; la elevación del nivel piezométrico hace aumentar el gradiente y la permeabilidad en la zona no saturada próxima, favoreciendo el flujo.

En lo referente a las dos simulaciones que se han efectuado se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- Para conseguir un mejor ajuste en el período marzo-junio de 1989, en la ECCA se ha necesitado incluir como entrada de agua una serie de riegos, que no se habían controlado.
- Durante el período de simulación de cultivo de veza (marzo-junio de 1989) únicamente se produce un importante flujo de agua en la parte superior del perfil (hasta 1.00 m de profundidad), y de forma muy atenuada en la parte intermedia (hasta 1.50 m de profundidad).
- En los meses de marzo-junio de 1989 únicamente se produce flujo en la proximidades del límite superior de la zona saturada, como consecuencia del brusco ascenso y posterior descenso del nivel.

A continuación se señalan algunos de los resultados más relevantes calculados por el modelo SWATRE durante este período de cultivo de veza:

- a) el contenido de agua en el perfil aumentó un 8% durante todo el período
 - b) la evapotranspiración real es del orden del 55% de las entradas de agua (precipitaciones más riegos)
 - c) el flujo total entre la capa superficial y la intermedia es sólo un 10% del que se produce en la superficie debido a las extracciones de agua por las plantas y variaciones en el almacenamiento. Entre las dos capas más profundas no se produce un flujo apreciable
- Durante el período de simulación del cultivo del maíz (julio-noviembre de 1989) el flujo es descendente en todo el perfil, debido a un humedecimiento progresivo de los niveles más someros a consecuencia de los fuertes riegos que se han aplicado. Este flujo en todo el perfil tiene lugar principalmente en el mes de septiembre.
 - También en este período el flujo en los alrededores del límite superior de la zona saturada es muy importante y se debe en parte a las oscilaciones del nivel freático, y a la llegada del frente de humedad que desciende por la zona no saturada.
 - En el período de simulación del maíz, el contenido de humedad del suelo ha aumentado en un 15%, la evapotranspiración real calculada es del orden del 37% de las lluvias y riegos, y el flujo entre las dos capas superiores es el 52% del flujo en la parte superior del perfil, mientras que entre las dos capas

profundas es el 44%. Es decir, prácticamente todo el agua que pasa de la primera a la segunda capa, va a la más profunda y de aquí al nivel freático.

Para el período de simulación del maíz, los resultados más relevantes se pueden resumir en:

- El contenido de humedad en el suelo ha aumentado un 15%.
- La evapotranspiración real calculada es del orden del 37% de las lluvias y riegos.
- El flujo entre las dos capas superiores es el 52% del de entrada en superficie. Entre las dos capas profundas representa el 44% total, es decir prácticamente todo el agua que pasa de la primera a la segunda capa, llega a los niveles más profundos e incluso a la zona saturada.

3. ENSAYO DE TRAZADOR

3. ENSAYO DE TRAZADOR

3.1. Diseño del ensayo

Durante el año 1988 no se observaron variaciones apreciables en las concentraciones de especies iónicas en el perfil del suelo. Por esta razón se pensó en la conveniencia de trazar el flujo en la zona no saturada para poder comparar los resultados con las observaciones sobre la calidad natural del agua.

En la selección del trazador se consideraron las siguientes características que debía reunir:

- estable en el tiempo
- con un bajo nivel de fondo
- fácilmente detectable por métodos analíticos
- sin interferencias con otros trazadores
- disponibilidad en el mercado
- no adsorbible/absorbible por el terreno
- no tóxico

Por la gran cantidad de arcillas del medio, no podía utilizarse ningún catión. Asimismo, por la alta salinidad observada, no era conveniente usar cloruros en altas concentraciones, ya que se podrían provocar efectos de distorsión de flujo por alta densidad.

Tampoco era factible emplear trazadores radiactivos como el tritio por los impedimentos legales a la hora de su manejo.

Por la baja toxicidad, alta estabilidad, y bajas concentraciones de fondo existentes se consideró que el bromuro

(Br⁻) podría ser el trazador más adecuado. Se escogió bromuro potásico, ya que en principio el potasio es un nutriente esencial para las plantas (tolerado en grandes concentraciones), y así se evitaba utilizar sodio (por el riesgo de sodicidad) o calcio (menos soluble).

Para el cálculo de la dosis necesaria en el ensayo, se requiere conocer la concentración de fondo en la zona. Se analizaron para este fin una serie de muestras, en las que el ion bromuro siempre resultó inferior al límite de detección (0.2 mg/l de Br⁻).

Con objeto de evitar efectos de densidad que influyesen en el movimiento del trazador, la concentración debía ser como máximo de 3000 mg/l de Br⁻. Utilizando un factor de dilución más dispersión de 10⁵ (que en principio se consideró suficiente en el medio a estudiar), se obtiene una concentración de bromuro de 2000 mg/l. En este caso, para 50 l de disolución, se precisaron 150 g de KBr.

3.2. Trazado y seguimiento

La aplicación del trazador se realizó en las proximidades de los lisímetros de la parcela E-2, adicionando la disolución de KBr directamente sobre el terreno, con una dotación aproximada de 15 mm.

El ensayo se llevó a cabo el día 2 de junio de 1989, posteriormente al muestreo realizado el 31 de mayo, y a la siembra del maíz.

Se observaron, problemas en la germinación y desarrollo de las plantas de maíz que se atribuyeron al trazador. Se volvió a sembrar la parcela y sin embargo los problemas continuaron (escasa densidad y desarrollo de la vegetación).

Las muestras se tomaron de los lisímetros y piezómetros a partir del 26 de junio, con una periodicidad mensual, coincidiendo con los muestreos habituales. En total, hasta fin de año se recogieron 60 muestras. Los resultados se expresan en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Concentración de bromuros (mg/l)

Denominación	Junio (26-6-89)	Julio (24-7-89)	Agosto (5-9-89)	Septiembre (4-10-89)	Octubre (2-11-89)	Noviembre (28-11-89)	Diciembre (20-12-89)
L8	0.20	1.28	> 50	32.6/12	7	1	1
L9	4.81	5.10	6.1	8.25/8.2	9	6.6	1.1/3.3
L10	2.34	4.65	5.9	10.5/8.0/12.	3.2	1.0	0.6
L11	1.66	6.40	9.1	5	18.5	11.0	9.5/6.6
L12	--	--	--	39.5/16/6.6	8	4.7	2.5
L13	1.38	2.45	3.1	10.5	9	5.5	2.1
L14	0.89	2.22	4.0	15.5/3/3.3	2.4	< 0.2	2.4
P-02'	0.20	3.4	3.65	1.72	< 0.2	1	2.5
P-02	0.76	3.46	1.5	2.3 1.8	< 0.2	< 0.2	1.4

Los análisis se realizaron en el laboratorio que el ITGE tiene en Tres Cantos, y se determinaron por un método colorimétrico, en el que el bromo liberado de los bromuros por la cloramina T, transforma a pH 4.6 la fenol-sulfonftaleína de color púrpura, susceptible de una determinación colorimétrica.

En los muestreos de septiembre y diciembre, se repitieron los análisis en algunas muestras para contrastar los resultados.

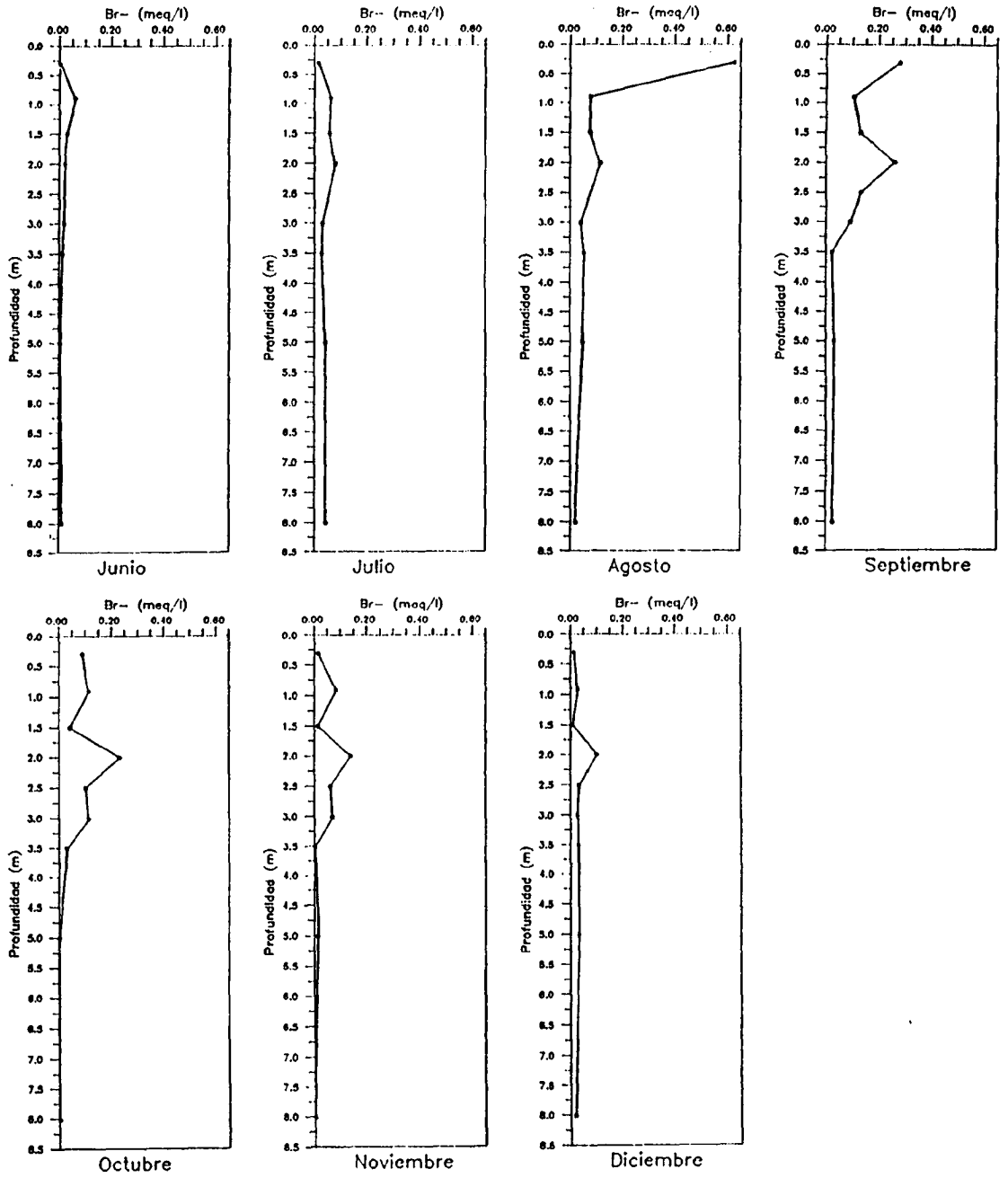


Fig. 3.1. Evolución de la concentración de Bromuros en profundidad (Junio a Diciembre 1989. E-2)

concentraciones analíticas son muy pequeñas, por lo que es difícil realizar apreciaciones fiables a partir de esta fecha.

Con estas consideraciones, se ha realizado una estimación de las velocidades de flujo durante estos intervalos de tiempo.

Junio-Agosto

Desplazamiento: 0.3 m

Período de tiempo: 71 días

Velocidad de descenso: 0.4 cm/día

Agosto-Septiembre

Desplazamiento: $2.0 - 0.3 = 1.7$ m

Período de tiempo: 29 días

Velocidad de descenso: 5.8 cm/día

Octubre

Desplazamiento: 0 m

Velocidad de descenso: 0 cm/día

Por tanto, durante el período de tiempo descrito (con riegos intensivos), la velocidad del flujo en los 3.5 primeros metros de la zona no saturada está comprendida entre 0 y 5.8 cm/día.

Se observa que en el nivel más somero, la concentración máxima del trazador tarda más en desplazarse: unos 3 meses en llegar a 0.3 m, y otros tres meses más en desaparecer de este nivel. En cambio, a profundidades mayores (1.5 a 2.5 m) el movimiento de Br^- es más rápido hasta que cesa el flujo.

Este hecho concuerda con las observaciones de campo y por tanto con la discretización del medio realizada en el modelo. El nivel superior es más arcilloso, mientras que en profundidad aumenta el contenido en arenas.

En cualquier caso, hay que tener en cuenta las limitaciones implícitas en estas estimaciones. Por una parte, los lisímetros se muestrean una vez al mes, sin que se pueda precisar el momento justo en el que el agua entró en ellos, ni el volumen exacto de terreno del que se extrae. Además, también hay que considerar que el muestreo no es continuo, sino que se realiza a unas profundidades determinadas, sin que haya datos intermedios.

3.4. Comparación con los resultados sobre velocidades obtenidos en el modelo de flujo

Las velocidades de flujo en la zona no saturada calculadas por el modelo, se recogen en la tabla 3.2 y se representan gráficamente en la figura 2.28. Para poder comparar estos valores diarios con los obtenidos con el ensayo de trazador, se han tenido que calcular los valores medios para los mismos periodos de tiempo.

Período	Velocidad media de descenso en la parte superior del perfil (resultados modelo)	Velocidad media de descenso (ensayo trazador)
Junio-Agosto	0.65 cm/día	0.42 cm/día
Agosto-Septiembre	0.56 cm/día	5.86 cm/día
Octubre-Diciembre	0.08 cm/día	0 cm/día

En general, los resultados concuerdan bastante bien, excepto para el período agosto-septiembre, donde el valor estimado según el ensayo de trazador es un orden de magnitud superior al calculado con el modelo de flujo (valor medio).

En este intervalo de tiempo, y de acuerdo con los resultados del modelo expresados en la figura 2.28, se alcanzaron en algunos días valores puntuales del mismo orden de magnitud (4.5 m/día de máximo).

A partir de octubre, y a consecuencia de una estabilización de humedad en el perfil, los procesos de difusión dominan frente a los de advección, observándose una disminución de concentraciones.

3.5. Resumen y conclusiones

Otra de las metodologías que se han manejado en la investigación del movimiento del agua en la zona no saturada ha sido la práctica de un ensayo de trazador.

La aplicación del trazador seleccionado (ion bromuro) se realizó por riego en las proximidades de los lisímetros de la parcela E-2, en el mes de junio. Se realizó el seguimiento de su evolución en el perfil durante todo el período de cultivo de maíz.

A pesar de haber tenido problemas con la información analítica, se han podido estimar velocidades de flujo en zona no saturada entre 0 y 5.8 cm/día.

Tabla 3.7. Velocidades de flujo en la zona no saturada, calculadas por el modelo SWATRE (Cultivo maíz, E-2).

Día	Flujo en cm/día a la profundidad de						
	30 cm	90 cm	150 cm	200 cm	250 cm	300 cm	350 cm
187	-.2318	-.0690	-.0033	-.0018	-.0006	-.0005	-1.7988
188	-.4617	-.0722	-.0034	-.0019	-.0006	-.0004	-.8829
189	-.2783	-.0750	-.0035	-.0019	-.0006	-.0004	-.6007
190	-.1424	-.0827	-.0037	-.0020	-.0006	-.0004	-.3806
191	-.1690	-.0911	-.0038	-.0020	-.0006	-.0005	-.2315
192	-.4147	-.0950	-.0039	-.0021	-.0006	-.0006	-.1614
193	-.5735	-.0985	-.0040	-.0021	-.0006	-.0007	-.1174
194	-.8280	-.1054	-.0042	-.0021	-.0006	-.0008	-.0973
195	-.3364	-.1212	-.0043	-.0021	-.0006	-.0008	-.0814
196	-.2356	-.1447	-.0045	-.0022	-.0006	-.0009	-.0676
197	-.1392	-.1637	-.0047	-.0022	-.0006	-.0010	-.0589
198	-.0958	-.1730	-.0049	-.0022	-.0006	-.0010	-.0522
199	-.3378	-.1708	-.0051	-.0022	-.0006	-.0010	-.0471
200	-2.6536	-.1617	-.0053	-.0022	-.0006	-.0011	-.0440
201	-1.1324	-.1890	-.0055	-.0022	-.0006	-.0011	-.0389
202	-.4490	-.2969	-.0058	-.0022	-.0006	-.0011	-.0336
203	-.3174	-.3797	-.0061	-.0022	-.0006	-.0011	-.0246
204	-.2081	-.3431	-.0064	-.0023	-.0006	-.0011	-.0122
205	-.1800	-.2864	-.0068	-.0023	-.0006	-.0011	-.0043
206	-.5097	-.2238	-.0073	-.0023	-.0006	-.0011	-.0019
207	-2.7794	-.1845	-.0078	-.0023	-.0006	-.0011	-.0001
208	-1.0155	-.5773	-.0085	-.0023	-.0006	-.0012	.0006
209	-.3155	-.5779	-.0096	-.0023	-.0006	-.0012	.0031
210	-.2184	-.3408	-.0114	-.0023	-.0006	-.0012	.0020
211	-.1427	-.2315	-.0162	-.0023	-.0006	-.0012	-.0016
212	-.1109	-.1810	-.0253	-.0023	-.0006	-.0012	-.0027
213	-.6414	-.1490	-.0351	-.0023	-.0006	-.0012	.0003
214	-2.9725	-.3340	-.0750	-.0023	-.0006	-.0012	-.0005
215	-.9314	-1.1886	-.0936	-.0023	-.0006	-.0012	-.0027
216	-.2721	-.6423	-.1896	-.0023	-.0006	-.0012	-.0051
217	-.1635	-.4186	-.4018	-.0023	-.0006	-.0012	-.0083
218	-.1366	-.3105	-.3892	-.0023	-.0006	-.0012	-.0109
219	-.0933	-.2460	-.3487	-.0024	-.0006	-.0012	-.0121
220	-.8411	-.2086	-.3033	-.0025	-.0006	-.0012	-.0096
221	-2.6699	-.6523	-.2660	-.0029	-.0006	-.0012	-.0036
222	-.8569	-1.2168	-.4196	-.0037	-.0006	-.0012	-.0026
223	-.2711	-.7084	-.7266	-.0062	-.0006	-.0012	-.0014
224	-.1579	-.4695	-.5910	-.0199	-.0006	-.0012	.0058
225	-.1364	-.3393	-.4640	-.0697	-.0006	-.0012	.0143
226	-.1031	-.2726	-.3586	-.1569	-.0006	-.0012	.0160
227	-.0825	-.2222	-.2917	-.3912	-.0006	-.0012	.0045
228	-.0706	-.1920	-.2594	-.5292	-.0006	-.0012	-.0060
229	-.0676	-.1646	-.2293	-.4195	-.0006	-.0012	-.0125
230	-.0592	-.1427	-.2039	-.3447	-.0006	-.0012	-.0117
231	-.7570	-.1230	-.1855	-.2993	-.0006	-.0012	-.0120
232	-.8527	-.2271	-.1665	-.2722	-.0008	-.0012	-.0127
233	-.6633	-.3268	-.1517	-.2541	-.0016	-.0011	-.0126
234	-.5007	-.3631	-.1512	-.2380	-.0036	-.0011	-.0108
235	-.4975	-.3412	-.1603	-.2215	-.0107	-.0011	-.0091
236	-3.3571	-.6947	-.1745	-.2097	-.0376	-.0011	-.0079
237	-.9307	-1.5895	-.4078	-.2000	-.0851	-.0011	-.0071
238	-.3025	-.7947	-.8482	-.2042	-.1558	-.0011	-.0065
239	-.1708	-.5213	-.6379	-.3486	-.2837	-.0011	-.0061
240	-.1443	-.3721	-.5006	-.5567	-.4302	-.0011	-.0012
241	-.1268	-.2992	-.4063	-.5288	-.4599	-.0011	.0111
242	-4.6304	-1.3773	-.3422	-.4512	-.4460	-.0012	.0101
243	-1.0654	-2.0771	-1.6793	-.5918	-.4484	-.0015	.0054

244	-.3312	-.8921	-1.3098	-1.5139	-.4718	-.0031	.0022
245	-.1933	-.6057	-.8400	-1.1464	-.5605	-.0114	.0005
246	-.1546	-.4439	-.5976	-.8004	-.6915	-.0586	-.0005
247	-.1867	-.3487	-.4897	-.6382	-.8079	-.2080	.0062
248	-.2001	-.3113	-.4086	-.5290	-.8456	-.5041	.0260
249	-2.4911	-.4519	-.3610	-.4501	-.8153	-.7765	.0202
250	-3.0968	-2.3206	-.8593	-.4122	-.7528	-.8012	.0178
251	-1.0867	-1.7661	-1.9384	-1.1300	-.6859	-.7906	.0996
252	-.4140	-.9885	-1.3965	-1.7187	-.6683	-.7757	.4428
253	-.2662	-.6700	-.9317	-1.2420	-.7942	-.7559	.5952
254	-.1935	-.5133	-.6731	-.8690	-.9851	-.7448	-.3609
255	-.1584	-.4004	-.5435	-.6921	-1.0579	-.7628	-.6494
256	-.1457	-.3341	-.4652	-.5801	-1.0121	-.8136	-.8110
257	-.1205	-.2831	-.3845	-.4967	-.9190	-.8760	-.9332
258	-.0903	-.2405	-.3160	-.4303	-.8235	-.9179	-.8707
259	-.0794	-.2054	-.2832	-.3841	-.7368	-.9227	-.8359
260	-.0704	-.1830	-.2543	-.3503	-.6599	-.8956	-.8511
261	-.5677	-.1664	-.2310	-.3249	-.5876	-.8496	-.8702
262	-.6934	-.2500	-.2116	-.3005	-.5103	-.7956	-.9251
263	-.2749	-.3199	-.2037	-.2787	-.4352	-.7397	-.9325
264	-1.7154	-.3138	-.2058	-.2610	-.3724	-.6828	-.8757
265	-.9351	-.8737	-.2199	-.2472	-.3330	-.6232	-.7996
266	-.2855	-.5956	-.3504	-.2384	-.3052	-.5583	-.7395
267	-.1838	-.4216	-.4373	-.2409	-.2850	-.4798	-.6850
268	-.1563	-.3289	-.3918	-.2711	-.2715	-.4071	-.6652
269	-.1154	-.2739	-.3324	-.3139	-.2651	-.3525	-.6287
270	-1.7591	-.2665	-.2992	-.3352	-.2663	-.3205	-.5753
271	-.9558	-.8935	-.2992	-.3338	-.2758	-.2989	-.5120
272	-.2933	-.6162	-.4864	-.3258	-.2895	-.2869	-.5641
273	-.1841	-.4436	-.5019	-.3590	-.3033	-.2824	-.5511
274	-.1550	-.3481	-.4393	-.4300	-.3193	-.2835	-.5384
275	-.1284	-.2893	-.3735	-.4428	-.3459	-.2885	-.4831
276	-.0973	-.2488	-.3195	-.4135	-.3774	-.2993	-.4176
277	-.0870	-.2134	-.2920	-.3778	-.3984	-.3190	-.3429
278	-.0762	-.1937	-.2671	-.3496	-.4019	-.3444	-.2902
279	-.0711	-.1754	-.2439	-.3269	-.3918	-.3665	-.3127
280	-.0684	-.1577	-.2224	-.3056	-.3747	-.3802	-.3369
281	-.0579	-.1453	-.2055	-.2852	-.3549	-.3839	-.3570
282	-.0555	-.1313	-.1925	-.2681	-.3342	-.3792	-.3642
283	-.0517	-.1187	-.1791	-.2517	-.3143	-.3685	-.3985
284	-.0472	-.1109	-.1664	-.2392	-.2969	-.3539	-.4366
285	-.0323	-.1067	-.1542	-.2280	-.2831	-.3373	-.4455
286	-.0232	-.1024	-.1427	-.2172	-.2714	-.3206	-.4274
287	-.0158	-.0976	-.1317	-.2065	-.2599	-.3055	-.4019
288	-.0102	-.0932	-.1252	-.1951	-.2483	-.2932	-.3829
289	-.0076	-.0880	-.1188	-.1827	-.2368	-.2832	-.3791
290	-.0352	-.0828	-.1147	-.1714	-.2252	-.2739	-.3682
291	-.0926	-.0797	-.1105	-.1608	-.2128	-.2639	-.3400
292	-.0681	-.0792	-.1051	-.1515	-.1989	-.2535	-.3197
293	-.0419	-.0806	-.0991	-.1432	-.1839	-.2424	-.3062
294	-.0339	-.0803	-.0948	-.1356	-.1735	-.2307	-.2986
295	-.0236	-.0776	-.0909	-.1286	-.1647	-.2180	-.2905
296	-.0148	-.0739	-.0882	-.1222	-.1560	-.2043	-.2786
297	-.0101	-.0707	-.0854	-.1165	-.1478	-.1890	-.2631
298	-.0044	-.0675	-.0823	-.1122	-.1401	-.1769	-.2498
299	.0006	-.0636	-.0793	-.1081	-.1330	-.1685	-.2374
300	-.0070	-.0597	-.0769	-.1047	-.1265	-.1600	-.2272
301	-.0251	-.0569	-.0751	-.1020	-.1206	-.1519	-.2163
302	-.0190	-.0548	-.0726	-.0995	-.1155	-.1443	-.2048
303	-.0085	-.0523	-.0698	-.0971	-.1110	-.1371	-.1896
304	-.0014	-.0533	-.0667	-.0949	-.1071	-.1304	-.1742
305	.0037	-.0513	-.0637	-.0926	-.1037	-.1244	-.1630
306	.0093	-.0489	-.0612	-.0904	-.1007	-.1189	-.1541
307	.0145	-.0463	-.0589	-.0881	-.0980	-.1140	-.1463

308	.0165	-.0435	-.0569	-.0860	-.0955	-.1096	-.1393
309	.0168	-.0410	-.0552	-.0840	-.0932	-.1057	-.1329
310	.0153	-.0381	-.0537	-.0820	-.0912	-.1023	-.1435
311	.0140	-.0361	-.0527	-.0800	-.0896	-.0993	-.1554
312	.0158	-.0336	-.0514	-.0781	-.0886	-.0966	-.1470
313	.0174	-.0312	-.0500	-.0761	-.0879	-.0943	-.1360
314	.0173	-.0284	-.0485	-.0742	-.0872	-.0923	-.1244
315	.0183	-.0281	-.0472	-.0723	-.0865	-.0908	-.1152
316	.0207	-.0285	-.0458	-.0705	-.0856	-.0897	-.1084
317	.0165	-.0267	-.0444	-.0688	-.0846	-.0890	-.1033
318	-.0207	-.0246	-.0434	-.0671	-.0836	-.0886	-.0993
319	-.1444	-.0237	-.0425	-.0654	-.0824	-.0882	-.0958
320	-.3342	-.0243	-.0416	-.0639	-.0812	-.0879	-.0930
321	-.3024	-.0306	-.0405	-.0623	-.0799	-.0875	-.0910
322	-.2779	-.0435	-.0395	-.0609	-.0785	-.0871	-.0896
323	-.2632	-.0576	-.0388	-.0595	-.0772	-.0866	-.0886
324	-.3481	-.0682	-.0385	-.0582	-.0757	-.0860	-.0878
325	-.4770	-.0771	-.0387	-.0569	-.0743	-.0854	-.0872
326	-.8312	-.0924	-.0394	-.0557	-.0729	-.0846	-.0867
327	-1.0653	-.1397	-.0406	-.0546	-.0714	-.0838	-.0863
328	-.6433	-.2864	-.0420	-.0535	-.0700	-.0830	-.0858
329	-.3440	-.3580	-.0445	-.0525	-.0686	-.0820	-.0854
330	-.3713	-.3088	-.0511	-.0516	-.0671	-.0810	-.0849
331	-.7762	-.2983	-.0639	-.0507	-.0657	-.0800	-.0844
332	-.5343	-.3848	-.0839	-.0501	-.0644	-.0789	-.0838
333	-.2680	-.3741	-.1140	-.0496	-.0630	-.0778	-.0834
334	-.2909	-.3182	-.1605	-.0496	-.0617	-.0767	-.0835

- Flujo descendente + Flujo ascendente

En general los resultados concuerdan bastante bien con los obtenidos en el modelo de flujo, excepto para el período agosto-septiembre, donde el valor estimado según el ensayo de trazador es un orden de magnitud superior al flujo medio calculado con el modelo, pero del mismo orden que las velocidades máximas en esos meses.

**4. CONCLUSIONES SOBRE EL ESTUDIO DEL FLUJO EN ZONA NO
SATURADA**

4. CONCLUSIONES SOBRE EL ESTUDIO DEL FLUJO EN ZONA NO SATURADA

1. A partir de la interpretación de los datos tensiométricos y piezométricos se puede concluir que:

- el análisis de potenciales es un método muy efectivo para la estimación cualitativa de velocidades y sentidos de flujo (ascendentes-descendentes)
- los niveles someros del perfil (T-07) responden más rápidamente a las variaciones de humedad que los profundos (T-09 y T-11), donde se observa una clara amortiguación del proceso
- las oscilaciones piezométricas no parecen ser resultado del movimiento de agua en la zona no saturada

2. El resultado de la modelización de los datos experimentales obtenidos indica que:

- el proceso de modelización es muy eficaz en el análisis cuantitativo de la situación real, reproduciendo con buena aproximación la suposición de un perfil heterogéneo. Los balances de agua calculados tienen un error muy aceptable
- la transmisión de agua en el perfil no saturado se ve más favorecida por la frecuencia de la entrada de agua que por su abundancia
- el comportamiento del flujo depende directamente del cultivo, ésto es, de la aplicación de riegos asociados, profundidad de raíces, etc.

a) durante el cultivo de la veza, sólo hay flujo apreciable hasta aproximadamente 1.5 m. La velocidad máxima calculada es de 0.7 cm/día descendente.

No se aprecia apenas flujo ascendente.

b) para el caso del maíz, y debido a la intensa y continua aplicación de riegos, se observó movimiento de agua en todo el perfil. Las velocidades máximas llegaron incluso a ser de más de 4.5 cm/día descendente en la parte superior del perfil.

En las épocas de gran evapotranspiración, se calcularon flujos ascendentes.

3. La realización de un ensayo de trazador durante la época de cultivo del maíz ha permitido contrastar sus resultados semicuantitativos con los obtenidos por otros métodos. En general, se puede decir que hay un grado de coincidencia bastante bueno. Por ejemplo, las velocidades calculadas con el ensayo de trazador se mantienen en las órdenes de magnitud de las obtenidas con el modelo.