

**PROYECTO PARA EL ESTUDIO DE LA EVOLUCION DE LOS COMPUESTOS DE NITROGENO EN EL SUELO Y SUBSUELO (1ª FASE)**

**TOMO 4. DESARROLLO DE LA EXPERIENCIA**

Este estudio ha sido realizado por la Compañía General de Sondeos, S.A., y Geomecánica y Aguas, S.A., en régimen de contratación con la División de Aguas Subterráneas y Geología Ambiental del Instituto Tecnológico Geominero de España.

## **DESARROLLO DE LA EXPERIENCIA**

## INDICE

	Pág.
<b>1. INTRODUCCION</b>	<b>1</b>
<b>2. EDAFOLOGIA</b>	<b>4</b>
2.1. Marco general	4
2.2. Estudio edafológico detallado	6
2.2.1. Propiedades del suelo	6
2.2.1.1. Análisis del tamaño de partículas. (Análisis mecánico)	6
2.2.1.2. Parámetros de humedad del suelo	7
2.2.1.3. Materia orgánica y sus componentes	7
2.2.1.4. pH	8
2.2.1.5. Salinidad	8
2.2.1.6. Capacidad de intercambio catiónico (C.I.C.)	9
2.2.2. Morfología del suelo	9
2.2.2.1. Color	9
2.2.2.2. Consistencia a varios contenidos de humedad	10
2.2.2.3. Estructura	10
2.2.2.4. Nódulos y concreciones	11
2.2.2.5. Poros	11



2.2.3. Clasificación	11
<b>3. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL</b>	<b>13</b>
3.1. Tensiómetros	13
3.2. Lisímetros de succión	18
<b>4. CONDICIONES DE ALMACENAMIENTO Y FLUJO</b>	<b>24</b>
4.1. Tensiometría	24
4.2. Niveles piezométricos	30
4.3. Cálculo del drenaje	31
4.3.1. Método del balance hídrico	33
4.3.2. Método del balance de cloruros	35
4.3.3. Método del balance en el perfil del suelo	39
<b>5. HIDROGEOQUIMICA</b>	<b>44</b>
5.1. Introducción	44
5.2. Metodología	45
5.3. Obtención de datos	46
5.3.1. Muestreo y análisis "in situ"	46
5.3.2. Resultados analíticos	47
5.3.3. Elección de la base de datos	55
5.4. Comportamiento de los lisímetros	56
5.4.1. Relación volumen de muestra-presiones residuales	56

5.4.2.	Efecto del potencial de succión	59
5.4.3.	Efecto de la componente de recarga	68
5.5.	El sistema acuoso general	72
5.6.	Variación de la composición química en profundidad	80
5.7.	Evolución temporal de la calidad del agua	117
<b>6.</b>	<b>MASA CONTAMINANTE DRENADA</b>	<b>149</b>
6.1.	Selección del método de cálculo del drenaje	149
6.2.	Estimación de la masa de $\text{NO}_3^-$ drenada	149
<b>7.</b>	<b>RESUMEN Y CONCLUSIONES</b>	<b>151</b>

## INDICE FIGURAS

- Fig. 1.1. Situación de las parcelas experimentales (Autor IRYDA)
- Fig. 3.1. Croquis de la parcela E-1
- Fig. 3.2. Croquis de la parcela E-2
- Fig. 3.3. Croquis de la parcela E-3
- Fig. 3.4. Esquema de un tensiómetro y aspecto que presenta
- Fig. 3.5. Aspecto de un tensiómetro instalado en el campo
- Fig. 3.6. Rango de funcionamiento de un tensiómetro - Varela, 1988 -
- Fig. 3.7. Esquema de un lisímetro de succión superficial - profundidad máxima de muestreo 1.8 m -
- Fig. 3.8. Extracción de muestras de agua en la zona no saturada. a. lisímetro superficial, b. profundo.
- Fig. 3.9. Extracción de una muestra de agua procedente de un lisímetro
- Fig. 3.10. Esquema de un lisímetro de succión profundo - hasta 16 m -
- Fig. 3.11. Rotura de un lisímetro de vacío-presión L17
- Fig. 4.1. Evolución temporal de la succión matricial en E-1, así como de las precipitaciones -P- más riego -R-
- Fig. 4.2. Evolución temporal de la succión matricial en E-2, así como de las precipitaciones -P- más riego -R-
- Fig. 4.3. Evolución temporal de la succión matricial en E-3, así como de las precipitaciones -P- más riego -R-

- Fig. 4.4. Evolución a lo largo del año 1988 de los niveles piezométricos de P1', P2' y P3', así como de las precipitaciones -P- más riego -R-
- Fig. 5.1. Relación Conductividad "GEOAGUA" - Conductividad "IRYDA"
- Fig. 5.2. Relación pH "GEOAGUA" - pH "IRYDA"
- Fig. 5.3. Relación bicarbonatos "GEOAGUA" - bicarbonatos "IRYDA"
- Fig. 5.4. Relación sulfatos "GEOAGUA" - sulfatos "IRYDA"
- Fig. 5.5. Relación cloruros "GEOAGUA" - cloruros "IRYDA"
- Fig. 5.6. Relación nitratos "GEOAGUA" - nitratos "IRYDA"
- Fig. 5.7. Relación calcio "GEOAGUA" - calcio "IRYDA"
- Fig. 5.8. Relación magnesio "GEOAGUA" - magnesio "IRYDA"
- Fig. 5.9. Relación sodio "GEOAGUA" - sodio "IRYDA"
- Fig. 5.10. Relación potasio "GEOAGUA" - potasio "IRYDA"
- Fig. 5.11. Representación volúmenes de muestra frente a presiones residuales para a. las muestras de todas las parcelas, b. las de E-1, c. de E-2 y d. de E-3
- Fig. 5.12. Evolución en el tiempo de las presiones residuales de L-1 y las succiones de T-1
- Fig. 5.13. Evolución en el tiempo de las presiones residuales de L-3 y las succiones de T-3
- Fig. 5.14. Evolución en el tiempo de las presiones residuales de L-5 y las succiones de T-5
- Fig. 5.15. Evolución en el tiempo de las presiones residuales de L-8 y las succiones de T-7
- Fig. 5.16. Evolución en el tiempo de las presiones residuales de L-10 y las succiones de T-9
- Fig. 5.17. Evolución en el tiempo de las presiones residuales de L-12 y las succiones de T-11

- Fig. 5.18.** Evolución en el tiempo de las presiones residuales de L-15 y las succiones de T-13
- Fig. 5.19.** Evolución en el tiempo de las presiones residuales de L-17 y las succiones de T-15
- Fig. 5.20.** Evolución temporal de los volúmenes de agua recogidos en los lisímetros de la parcela E-1, así como de las precipitaciones -P- y riegos -R- totales mensuales
- Fig. 5.21.** Evolución temporal de los volúmenes de agua recogidos en los lisímetros de la parcela E-2, así como de las precipitaciones -P- y riegos -R- totales mensuales
- Fig. 5.22.** Evolución temporal de los volúmenes de agua recogidos en los lisímetros de la parcela E-3, así como de las precipitaciones -P- y riegos -R- totales mensuales
- Fig. 5.23.** Diagrama de Schöeller para la parcela E-1 en febrero de 1988
- Fig. 5.24.** Diagrama de Schöeller para la parcela E-2 en febrero de 1988
- Fig. 5.25.** Diagrama de Schöeller para la parcela E-3 en junio de 1988
- Fig. 5.26.** Variación de la composición química en profundidad (Parcela 1, Enero)
- Fig. 5.27.** Variación de la composición química en profundidad (Parcela 1, Febrero)
- Fig. 5.28.** Variación de la composición química en profundidad (Parcela 1, Marzo)
- Fig. 5.29.** Variación de la composición química en profundidad (Parcela 1, Abril)
- Fig. 5.30.** Variación de la composición química en profundidad (Parcela 1, Mayo)
- Fig. 5.31.** Variación de la composición química en profundidad (Parcela 1, Junio)
- Fig. 5.32.** Variación de la composición química en profundidad (Parcela 1, Julio)
- Fig. 5.33.** Variación de la composición química en profundidad (Parcela 1, Agosto)
- Fig. 5.34.** Variación de la composición química en profundidad (Parcela 1, Septiembre)

- Fig. 5.35. Variación de la composición química en profundidad (Parcela 1, Octubre)
- Fig. 5.36. Variación de la composición química en profundidad (Parcela 1, Noviembre)
- Fig. 5.37. Variación de la composición química en profundidad (Parcela 1, Diciembre)
- Fig. 5.38. Variación de la composición química en profundidad (Parcela 2, Enero)
- Fig. 5.39. Variación de la composición química en profundidad (Parcela 2, Febrero)
- Fig. 5.40. Variación de la composición química en profundidad (Parcela 2, Marzo)
- Fig. 5.41. Variación de la composición química en profundidad (Parcela 2, Abril)
- Fig. 5.42. Variación de la composición química en profundidad (Parcela 2, Mayo)
- Fig. 5.43. Variación de la composición química en profundidad (Parcela 2, Junio)
- Fig. 5.44. Variación de la composición química en profundidad (Parcela 2, Julio)
- Fig. 5.45. Variación de la composición química en profundidad (Parcela 2, Agosto)
- Fig. 5.46. Variación de la composición química en profundidad (Parcela 2, Septiembre)
- Fig. 5.47. Variación de la composición química en profundidad (Parcela 2, Octubre)
- Fig. 5.48. Variación de la composición química en profundidad (Parcela 2, Noviembre)
- Fig. 5.49. Variación de la composición química en profundidad (Parcela 2, Diciembre)
- Fig. 5.50. Variación de la composición química en profundidad (Parcela 3, Enero)
- Fig. 5.51. Variación de la composición química en profundidad (Parcela 3, Febrero)
- Fig. 5.52. Variación de la composición química en profundidad (Parcela 3, Marzo)
- Fig. 5.53. Variación de la composición química en profundidad (Parcela 3, Abril)
- Fig. 5.54. Variación de la composición química en profundidad (Parcela 3, Mayo)
- Fig. 5.55. Variación de la composición química en profundidad (Parcela 3, Junio)

- Fig. 5.56. Variación de la composición química en profundidad (Parcela 3, Julio)
- Fig. 5.57. Variación de la composición química en profundidad (Parcela 3, Agosto)
- Fig. 5.58. Variación de la composición química en profundidad (Parcela 3, Septiembre)
- Fig. 5.59. Variación de la composición química en profundidad (Parcela 3, Octubre)
- Fig. 5.60. Variación de la composición química en profundidad (Parcela 3, Noviembre)
- Fig. 5.61. Variación de la composición química en profundidad (Parcela 3, Diciembre)
- Fig. 5.62. Evolución temporal de la concentración de nitritos, nitratos, amonio y sulfatos (Parcela 1, Lisímetro L01)
- Fig. 5.63. Evolución temporal de la concentración de nitritos, nitratos, amonio y sulfatos (Parcela 1, Lisímetro L03)
- Fig. 5.64. Evolución temporal de la concentración de nitritos, nitratos, amonio y sulfatos (Parcela 1, Lisímetro L04)
- Fig. 5.65. Evolución temporal de la concentración de nitritos, nitratos, amonio y sulfatos (Parcela 1, Lisímetro L05)
- Fig. 5.66. Evolución temporal de la concentración de nitritos, nitratos, amonio y sulfatos (Parcela 1, Lisímetro L06)
- Fig. 5.67. Evolución temporal de la concentración de nitritos, nitratos, amonio y sulfatos (Parcela 1, Lisímetro L07)
- Fig. 5.68. Evolución temporal de la concentración de nitritos, nitratos, amonio y sulfatos (Parcela 1, Piezómetro P1')
- Fig. 5.69. Evolución temporal de la concentración de nitritos, nitratos, amonio y sulfatos (Parcela 1, Piezómetro P1 )
- Fig. 5.70. Evolución temporal de la concentración de Litio (Parcela 1)

- Fig. 5.71.** Evolución temporal de la concentración de nitritos, nitratos, amonio y sulfatos (Parcela 2, Lisímetro L08)
- Fig. 5.72.** Evolución temporal de la concentración de nitritos, nitratos, amonio y sulfatos (Parcela 2, Lisímetro L10)
- Fig. 5.73.** Evolución temporal de la concentración de nitritos, nitratos, amonio y sulfatos (Parcela 2, Lisímetro L11)
- Fig. 5.74.** Evolución temporal de la concentración de nitritos, nitratos, amonio y sulfatos (Parcela 2, Lisímetro L12)
- Fig. 5.75.** Evolución temporal de la concentración de nitritos, nitratos, amonio y sulfatos (Parcela 2, Lisímetro L13)
- Fig. 5.76.** Evolución temporal de la concentración de nitritos, nitratos, amonio y sulfatos (Parcela 2, Lisímetro L14)
- Fig. 5.77.** Evolución temporal de la concentración de nitritos, nitratos, amonio y sulfatos (Parcela 2, Piezómetro P2')
- Fig. 5.78.** Evolución temporal de la concentración de nitritos, nitratos, amonio y sulfatos (Parcela 2, Piezómetro P2 )
- Fig. 5.79.** Evolución temporal de la concentración de Litio (Parcela 2)
- Fig. 5.80.** Evolución temporal de la concentración de nitritos, nitratos, amonio y sulfatos (Parcela 3, Lisímetro L15)
- Fig. 5.81.** Evolución temporal de la concentración de nitritos, nitratos, amonio y sulfatos (Parcela 3, Lisímetro L16)
- Fig. 5.82.** Evolución temporal de la concentración de nitritos, nitratos, amonio y sulfatos (Parcela 3, Lisímetro L18)
- Fig. 5.83.** Evolución temporal de la concentración de nitritos, nitratos, amonio y sulfatos (Parcela 3, Lisímetro L19)



- Fig. 5.84. Evolución temporal de la concentración de nitritos, nitratos, amonio y sulfatos (Parcela 3, Lisímetro L20)
- Fig. 5.85. Evolución temporal de la concentración de nitritos, nitratos, amonio y sulfatos (Parcela 3, Lisímetro L21)
- Fig. 5.86. Evolución temporal de la concentración de nitritos, nitratos, amonio y sulfatos (Parcela 3, Piezómetro P3')
- Fig. 5.87. Evolución temporal de la concentración de nitritos, nitratos, amonio y sulfatos (Parcela 3, Piezómetro P3 )
- Fig. 5.88. Evolución temporal de la concentración de Litio (Parcela 3)
- Fig. 5.89. Variación en profundidad de la concentración de nitratos (Parcela 1, Enero a Noviembre 1988)
- Fig. 5.90. Variación en profundidad de la concentración de nitratos (Parcela 2, Enero a Noviembre 1988)
- Fig. 5.91. Variación en profundidad de la concentración de nitratos (Parcela 3, Enero a Noviembre 1988)

#### **INDICE DE CUADROS**

- Cuadro 4.1. Balance hídrico diario (Enero 1988)
- Cuadro 4.2. Balance hídrico diario (Febrero 1988)
- Cuadro 4.3. Balance hídrico diario (Marzo 1988)
- Cuadro 4.4. Balance hídrico diario (Abril 1988)
- Cuadro 4.5. Balance hídrico diario (Mayo 1988)
- Cuadro 4.6. Balance hídrico diario (Junio 1988)
- Cuadro 4.7. Balance hídrico diario (Julio 1988)

## **ANEXOS**

**Anexo 1. Datos aportados por el IRYDA**

**Anexo 2. Catálogos instrumentación y distribuidoras**

**Anexo 3. Valores de la succión del terreno**

**Anexo 4. Datos climáticos: precipitaciones y temperaturas**

**Anexo 5. Nota técnica de los sondeos piezométricos perforados**

**Anexo 6. Niveles medidos en los piezómetros**

**Anexo 7. ETP calculada por el método de Penman**

**Anexo 8. Resultados analíticos de hidroquímica.**

**8.1. Análisis "in situ"**

**8.2. Análisis de laboratorio**

## **1. INTRODUCCION**

## 1 . INTRODUCCION

Las parcelas experimentales E-1, E-2 y E-3 se encuentran situadas en la zona central de la finca "El Palomar" (figura 1.1.). Son tres cuadrados de terreno de 10 m de lado que durante el período de estudio (año 1988) estuvieron cultivados con cebada.

En las parcelas E-1 y E-2 se regó con aspersores durante 2 días, (18 y 27 de marzo), con 10 mm de dotación en cada aplicación.

El Departamento de Control de la finca no registró ningún riego en la parcela E-3, pero las observaciones de campo indican que se regó por gravedad esta parcela durante fechas similares del mes de marzo, por lo que, a lo largo del informe se toma una dotación de riego prácticamente igual a las anteriores.

El abonado de las parcelas consistió en un total de 400 kg/ha de abono complejo 15-15-15 el 15 de diciembre de 1987 (abonado de fondo) y de 150 kg/ha de nitrato amónico cálcico con una riqueza del 26% de nitrógeno total, el 2 de febrero de 1988 (abonado de cobertera).

Dentro del contexto de las experiencias que se llevan a cabo en la finca "El Palomar", la parcela E-1 se planteó como parcela tipo en lo que a la dotación y frecuencia de aplicación de fertilizante se refiere. El riego se efectúa por aspersión.

Por otra parte la parcela E-2 iba a ser la parcela de optimización de dotación de fertilizante. Sin embargo, no se realizó abonado diferencial, por lo que en principio las dos parcelas E-1 y E-2 se pueden considerar equivalentes. Esto ha permitido el análisis de otro factor experimental, a priori considerado uniforme en toda la finca, que es el suelo y su variabilidad espacial.

El objeto de la parcela E-3 es cuantificar en qué forma el factor experimental del regadío afecta a la masa de contaminante nitrogenado que percola el acuífero. En esta parcela el regadío se realiza por gravedad. Como se verá más adelante, el efecto producido por la variable riego por aspersión-riego por gravedad queda enmascarado por la gran variación de condiciones litológicas en el medio.

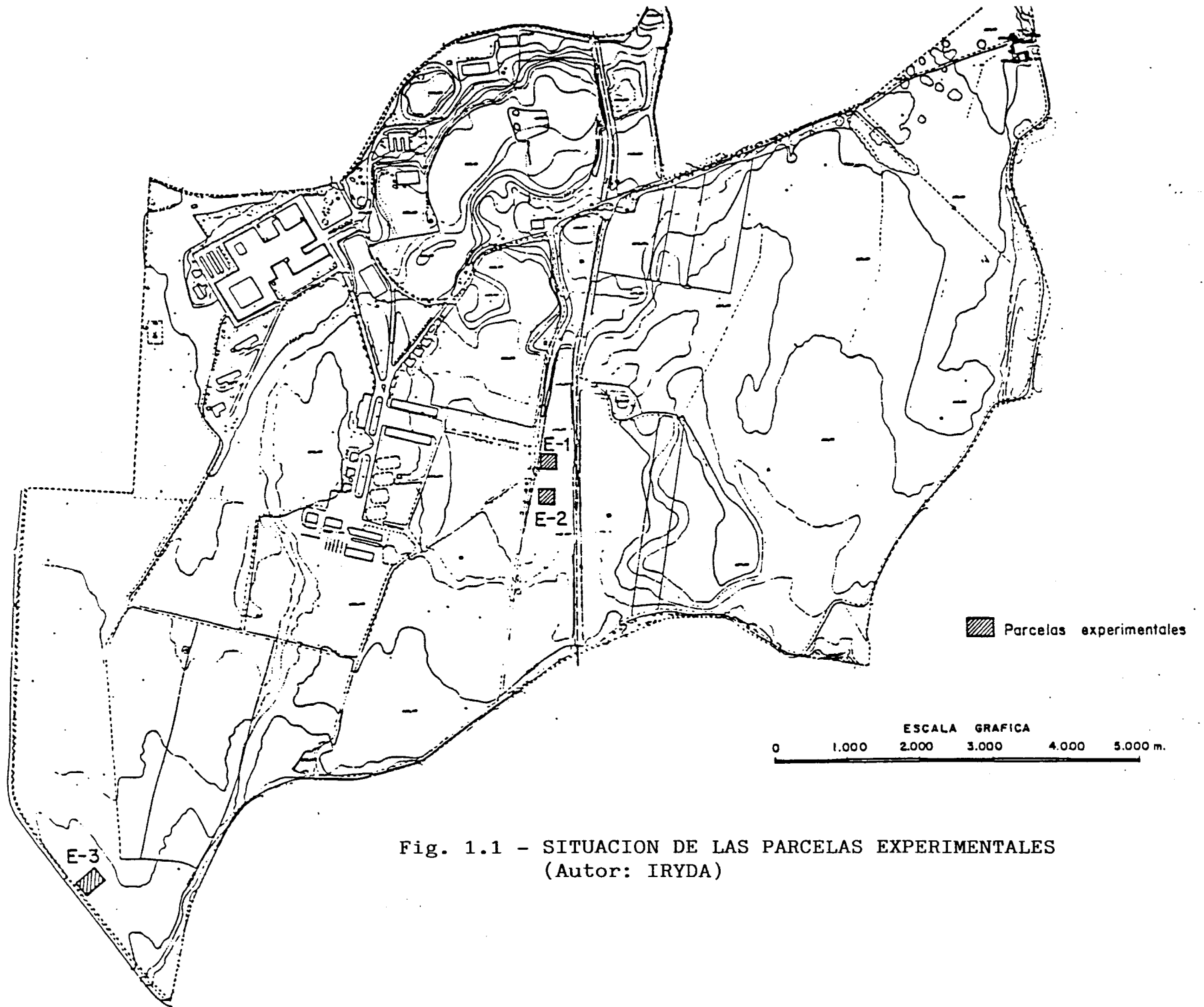


Fig. 1.1 - SITUACION DE LAS PARCELAS EXPERIMENTALES  
(Autor: IRYDA)

En los capítulos siguientes se presentan para las distintas parcelas, la edafología de detalle (Capítulo 2), el dispositivo experimental instalado (Capítulo 3), las condiciones de almacenamiento y flujo (Capítulo 4), la interpretación de la información hidrogeoquímica obtenida (Capítulo 5), una estimación de la masa de contaminante nitrogenada que es drenada hacia el acuífero (Capítulo 6), y por último una síntesis de las conclusiones más importantes (Capítulo 7).

## **2. EDAFOLOGIA**

## **2 . EDAFOLOGIA**

### **2.1 . MARCO GENERAL**

La finca está situada en la margen derecha del tramo final del valle aluvial del río Henares próximo al del río Jarama. En este tramo el valle es asimétrico, ya que el río ha erosionado los terrenos terciarios de la margen izquierda y ha sedimentado en la derecha varios niveles de terraza.

En la zona estudiada aparecen restos de la terraza baja ligeramente erosionada y una amplia llanura aluvial discontinua, ya que de norte a sur la atraviesan dos antiguos cauces bien diferenciados, que dejan terrenos ligeramente deprimidos respecto a la llanura. Entre las formaciones más altas de la llanura y de la antigua terraza y los cauces más bajos existen unas laderas de pendiente muy suave.

Los sedimentos de todas las formaciones están muy estratificados. Superficialmente existe un estrato de textura franco arenosa muy fina con capas de arena intercalada, situado sobre un lecho de grava y cantos rodados, de 3 a 4 m de espesor que a su vez descansa sobre el sustrato terciario de arcillas impermeables. El espesor de esa primera capa varía desde 4 m en la llanura hasta 2.5 m en las pequeñas unidades deprimidas.

Los suelos aluviales de las diferentes unidades geomorfológicas son bastante homogéneos, debido a la uniformidad del material parental del que proceden. Solamente existen diferencias en la profundidad efectiva y en la pedregosidad superficial de pequeñas áreas de los cauces, en la suave pendiente de las laderas en relación con el resto de las formaciones llanas y en la profundidad a la capa freática, que es más superficial en las formaciones deprimidas.

La textura de la capa superficial tiene una gran uniformidad; las diferencias texturales que puedan presentarse entre unidades son de menor cuantía que las variaciones especiales dentro de cada una de ellas.

La distribución del tamaño de las partículas en porcentaje y las texturas medias y más probables en los primeros 40 cm del suelo son:



Granulometría (%)				
Arena		Limo	Arcilla	Clase Textural
Gruesa	Fina			
2.0-0.2	0.2-0.05	0.05-0.002	< 0.002	
(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	
0-5	60-70	12-14	18-19	Fa mf (m)
0-5	53-62	18-20	20-22	FAa (h)

Por debajo de dicha profundidad, si bien se mantiene también la uniformidad, las texturas presentan más dispersión hacia el franco arenoso más ligero, con algunos casos de arena franca.

Es de destacar el gran predominio de la arena fina (0.2-0.05 mm) de la que es de esperar una mayor desviación hacia la arena muy fina (0.1-0.05 mm).

Al igual que la textura, la estructura es una propiedad casi constante en todos los suelos estudiados.

Los primeros 20 cm del suelo muestran una estructura fuerte migajosa de tamaño fino a medio. En los 20 cm siguientes la estructura es moderada con tendencia a bloques angulares de tamaño medio a grueso.

Por debajo de 40 cm la estructura se va debilitando hasta desaparecer en torno a los 60-80 cm de profundidad dejando horizontes masivos de consistencia friable. Muy localmente y en profundidad aparece en ocasiones una débil estructura laminar poco desarrollada que no merece ser tenida en consideración.

Es particularmente significativa la actividad de las lombrices en todo el espesor del perfil. Desde los primeros centímetros libres del laboreo hasta los 2-2.5 m, son abundantes los canales entrecruzados que afectan a un 70-100 % de la matriz del suelo. Esta actividad da lugar a una auténtica mezcla de horizontes, suavizando los límites de estos, disminuyendo la estratificación y destruyendo, probablemente, una estructura laminar más desarrollada. Si bien no es ésta

una auténtica estructura edáfica, contribuye a la agregación de las partículas y da un aspecto y propiedades distintas a las de los horizontes masivos, por lo que en la descripción de los perfiles se ha denominado estructura de lombrices.

Los suelos tienen un nivel de salinidad similar. Los primeros 40 cm están prácticamente desprovistos de sales ( $CE = 0.5-1 \text{ mS/cm}$ ) y se salinizan ligeramente en profundidad, alcanzando el máximo entre 80 y 120 cm ( $CE = 4-6 \text{ mS/cm}$ ). En uno y otro caso los niveles no son limitantes y pueden descender apenas se produzca lavado por riego.

## **2.2 . ESTUDIO EDAFOLOGICO DETALLADO**

Uno de los objetivos previos necesarios, en el proyecto de investigación de la Evolución de Compuestos Nitrogenados en el suelo y subsuelo, es el estudio edafológico detallado de las parcelas de experimentación situadas en la Finca "El Palomar" de San Fernando de Henares, para lo cual se realizaron cinco sondeos y una calicata en las parcelas E1 y E2, procediéndose a su descripción, así como a la toma de muestras de cada uno de los horizontes que constituyen el perfil del suelo. Las muestras obtenidas se enviaron al Laboratorio de Suelos y Aguas del IRYDA.

Los resultados analíticos a que se refiere este capítulo así como la descripción de las calicatas realizadas en las parcelas E1 y E2 se adjuntan como anexo 1 a este informe.

### **2.2.1 . PROPIEDADES DEL SUELO**

#### **2.2.1.1 . Análisis de tamaño de partículas. (Análisis mecánico)**

Este análisis determina la medida porcentual de los separados primarios: arena, limo y arcilla.

Este procedimiento tiene dos aspectos: dispersión del suelo, mediante agitación de la muestra, con una solución de Hexametafosfato Cálcico, y fraccionamiento en clases de tamaño de partículas; la determinación de arcilla y limo se realizó por el procedimiento de la pipeta de sedimentación,; el porcentaje de arena se determinó mediante tamizado.

En ambos perfiles se observa que la textura es franco-arenosa (Fa), en la zona superficial (< 40 cm); franco-arcillosa-arenosa (FAa) en la zona subsuperficial (> 40 cm), existiendo una zona intermedio (80-140 cm) en que la textura es arenosa, siendo en los horizontes más profundos del perfil la textura franco-arcillosa. Predominando en todos los horizontes de ambos perfiles un alto contenido en arena fina (0.2-0.05 mm).

En la parcela de experimentación (E3), en la que no se pudo realizar la calicata correspondiente, se observa en los sondeos una textura franco-arenosa en la zona superficial (< 40 cm), una textura arenosa con un alto contenido de arena fina (0.2-0.05 mm) en la zona subsuperficial (> 40 cm). A mayor profundidad (> 100 cm) la textura sigue siendo arenosa pero diferenciándose en su alto contenido de arena gruesa (1-0.5 mm).

#### **2.2.1.2 . Parámetros de humedad del suelo**

La retención de humedad de los suelos se realizó sobre muestras alteradas. Determinándose los contenidos de humedad, a la capacidad de campo (PF 2.5) y punto de marchitez (PF 4.2).

Considerando que, los valores medios obtenidos son PF 2.5-18.64%, PF 4.2-9.15% y que la densidad aparente es 1.5 gr/cm<sup>2</sup>, el valor de la humedad disponible expresada en % en volumen será 14.2%.

Por lo tanto, la retención de humedad, el agua útil al desarrollo de los cultivos puede tomarse, según criterios entre 1/2 y 2/3 de la humedad total disponible, lo que, en este caso, representa entre un 7.1 y 9.4%.

#### **2.2.1.3 . Materia orgánica y sus componentes**

Los principales componentes de la materia orgánica del suelo, de interés en las actividades generales de clasificación y formación de suelos, son el carbono y el nitrógeno. El contenido total de materia orgánica se mide comúnmente en forma indirecta, determinando el porcentaje de carbono orgánico y calculando el porcentaje de materia orgánica mediante el uso de un factor.

El carbono orgánico se determinó mediante el procedimiento de combustión húmeda (método de Walkley-Black), en el cual el suelo se digiere con un exceso de ácido crómico, con titulación del oxidante no utilizado.

El nitrógeno se determinó por el método de macro-kjeldhal.

Los suelos son pobres en materia orgánica (1-1.5%) y en nitrógeno (65-70%), la cantidad relativamente pequeña que contienen está concentrada principalmente en el horizonte superior, y con la profundidad disminuye bruscamente. Tal distribución de la materia orgánica es propia de los suelos donde la humificación transcurre sólo en la parte superior del perfil.

#### **2.2.1.4 . pH**

La determinación del pH, se realizó por electrometría, utilizándose una relación suelo-agua (1:1).

En todos los horizontes de los perfiles se observa la basicidad del suelo, poniéndose de manifiesto la presencia de carbonato cálcico ( $\text{Ca CO}_3$ ) libre en los horizontes más profundos. Así como el predominio del calcio y magnesio como cationes intercambiables.

#### **2.2.1.5 . Salinidad**

La salinidad se cuantificó, midiendo la conductividad del extracto de saturación, el cual se obtiene preparando una pasta saturada del suelo, y luego, filtrándola al vacío para obtener el extracto de saturación.

Los primeros 40 cm del suelo están prácticamente desprovistos de sales (C.E. -0.7 - 1.5 ds/m), salinizándose ligeramente en profundidad, alcanzando el máximo de salinidad (C.E. -3.0 - 5.0 ds/m) entre (80 - 240 cm) de profundidad. Predominando las sales cálcicas y magnésicas en forma de sulfatos y carbonatos.

### **2.2.1.6 . Capacidad de Intercambio catiónico (C.I.C)**

La capacidad de un suelo para absorber o retener cationes y para intercambiar especies de esos iones en reacciones químicas reversibles es una cualidad importante para la génesis de los mismos.

La determinación de (C.I.C.) se realizó por el método de saturación-desplazamiento con amonio a pH 7.

Por los resultados obtenidos (3-15 meq/100 g) en la determinación de la C.I.C., podríamos deducir, que la especie de mineral arcilloso presente en los suelos es la caolinita. Aunque sería necesario confirmar, mediante técnicas analíticas más adecuadas como la difracción por rayos X, análisis térmico diferencial (ATD) o microscopia electrónica.

## **2.2.2 . MORFOLOGIA DEL SUELO**

Se evaluó la morfología del suelo, examinando los perfiles "in situ".

Los horizontes se describieron con las siguientes propiedades: color, textura, consistencia, estructura, nódulos o concreciones, huecos vacíos característicos del límite y continuidad del horizonte, anotándose el espesor y la profundidad del mismo.

### **2.2.2.1 . Color**

El color es la expresión de los materiales que componen el suelo, de su evolución del contenido, calidad de la materia orgánica y del grado de humedad.

La cuantificación del color se realizó con el suelo húmedo y utilizando las tablas cromáticas de MUNSELL.

El color está compuesto de tres variables medibles: matiz, valor y tono cromático.

El matiz es el color espectral dominante y está relacionado con la longitud de onda de la luz; el valor es una medida del grado de oscuridad o claridad del color y está relacionado con la cantidad total de luz reflejada; el tono cromático es una medida de la pureza o fuerza del color espectral.

Observamos que, todos los horizontes de ambos perfiles, tienen un color pardo, cuyo matiz, valor y tono cromático en la zona superficial es de 7.5 y R 4/4, mientras que en la zona profunda del perfil el matiz es más intenso 10 y R 4/3, debido a los depósitos de arcilla, de humus o de óxidos fundamentalmente de hierro.

El moteado se describe en función de tres características: contraste, abundancia y tamaño del área de cada color.

En los horizontes más profundos del perfil, se aprecia un intenso moteado rojo amarillento (5 y R 4/6) debido a los depósitos de óxido de hierro.

#### **2.2.2.2 . Consistencia a varios contenidos de humedad**

La consistencia del material del suelo en cada horizonte tiene una clara relación con varias características del suelo.

- a) Consistencia en mojado: a la humedad de la capacidad de campo o ligeramente superior.
- b) Consistencia en húmedo: el contenido de humedad del suelo comprendido entre la sequedad y la humedad a la capacidad de campo.

En todos los horizontes superficiales del perfil, el suelo es ligeramente firme, pero ni es plástico ni adherente. Observándose que el suelo en profundidad adquiere mayor plasticidad y adherencia.

#### **2.2.2.3 . Estructura**

La estructura se refiere a la agregación de partículas individuales de suelo en unidades mayores con planos débiles entre ellas.

Generalmente se describen tres aspectos de la estructura en cada horizonte: grado, clase, tipo.

Los primeros centímetros del suelo muestran una estructura en bloques subangulares débiles y medios. Existiendo una zona intermedia en la que se observa una estructura masiva. En los últimos horizontes del perfil la estructura es de bloques subangulares, moderada, media.

#### **2.2.2.4 . Nódulos y concreciones**

La concreciones y nódulos del suelo están constituidos por concreciones locales de material. Describiéndose, su color, su dureza, su tamaño y su abundancia. La efervescencia al HCl indica cementación por carbonatos.

Todo el perfil es fuertemente calcáreo, incluso se llega a observar ligera acumulación de caliza y yeso en forma de micelios muy finos en los horizontes más profundos.

#### **2.2.2.5 . Poros**

Aproximadamente la mitad del volumen de un suelo es espacio poroso. El tamaño, la forma y la continuidad de los poros determinan en gran medida el movimiento de aire y agua en el suelo, y las características de los poros están en cierto modo determinadas por la estructura. De particular importancia son la forma y el grado de interconexión de los poros mayores, puesto que las características influyen en la infiltración y la permeabilidad.

El suelo es muy poroso en los horizontes profundos en ambos perfiles, apreciándose gran abundancia de raíces finas y muy finas.

Es particularmente significativo la actividad de las lombrices en todo el espesor del perfil.

### **2.2.3 . CLASIFICACION**

Son suelos aluviales (entisoles), formados sobre materiales depositados recientemente (aluviones).

Los procesos formadores del suelo no han modificado, o sólo lo han hecho débilmente al material primitivo, quedando reducida la modificación a una pequeña acumulación de materia orgánica en la superficie, observándose los siguientes horizontes morfogenéticos:

Un horizonte mineral A<sub>1</sub>P, que se forma en la superficie por acumulación de materia orgánica humificada, íntimamente asociada con la fracción mineral.

Un horizonte mineral A<sub>2</sub>P, en el cual el aspecto más importante es la pérdida de arcilla, con la concentración resultante de cuarzo u otros minerales de tamaño de arenas.

Un horizonte C, que está relativamente poco afectado por los procesos edafogénicos, pero que incluye materiales modificados, por acumulación de carbonatos de calcio y de sales solubles.



### **3. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL**

### **3 . DISPOSITIVO EXPERIMENTAL**

En los estudios realizados para controlar y prevenir la contaminación potencial de las aguas subterráneas es necesario caracterizar los procesos que se producen en las zonas saturada y no saturada mediante el análisis de muestras de agua y suelo.

En la zona no saturada tienen lugar una serie de procesos que determinan la composición química del agua que llega al acuífero, actuando en muchos casos como un filtro que retarda o elimina los contaminantes disueltos en el agua que percola.

Para conocer la evolución de los distintos parámetros en profundidad y así poder inferir las reacciones que se han producido y conocer la calidad del agua resultante, se ha instalado en cada parcela experimental una serie de tomamuestras que permiten extraer agua a distintas profundidades dentro de la zona no saturada (lisímetros de succión) y de la zona saturada (piezómetros), así como otros dispositivos que informan de la presión del agua del terreno.

La geometría de las parcelas E1, E2 y E3, y la situación de la instrumentación instalada en las mismas se recoge en la figuras 3.1., 3.2. y 3.3. En el Anexo 2 se incluyen catálogos del material necesario y algunas casas que los distribuyen.

A continuación se describen los tomamuestras de succión y tensiómetros utilizados en esta experiencia, los principios de funcionamiento y su rango de operatividad.

#### **3.1 . TENSIOMETROS**

En la zona no saturada el agua está sometida a una presión negativa, menor que la presión atmosférica, denominada tensión capilar o succión. Esta tensión es mayor cuanto menor sea el contenido de agua, toma valores muy pequeños en condiciones próximas a la saturación y llega a ser cero en la zona saturada.

Los tensiómetros son aparatos diseñados para medir la tensión del agua en el terreno. Un tensiómetro consta de una cápsula de cerámica porosa unida a un tubo de plástico rígido lleno de agua, conectado a su vez a un pequeño depósito y a un manómetro (fig. 3.4.). Una

INSTRUMENTACION

Denominación	Profundidad
L - 01	0,30 m.
L - 02	0,90 m.
L - 03	1,50 m.
L - 04	2,00 m.
L - 05	2,50 m.
L - 06	3,00 m.
L - 07	3,50 m.
T - 1	0,30 m.
T - 3	1,50 m.
T - 5	2,50 m.
P - 1	8,10 m.
P - 1'	5,50 m.

L : Lisímetro de succión

T : Tensiómetro

P : Piezómetro

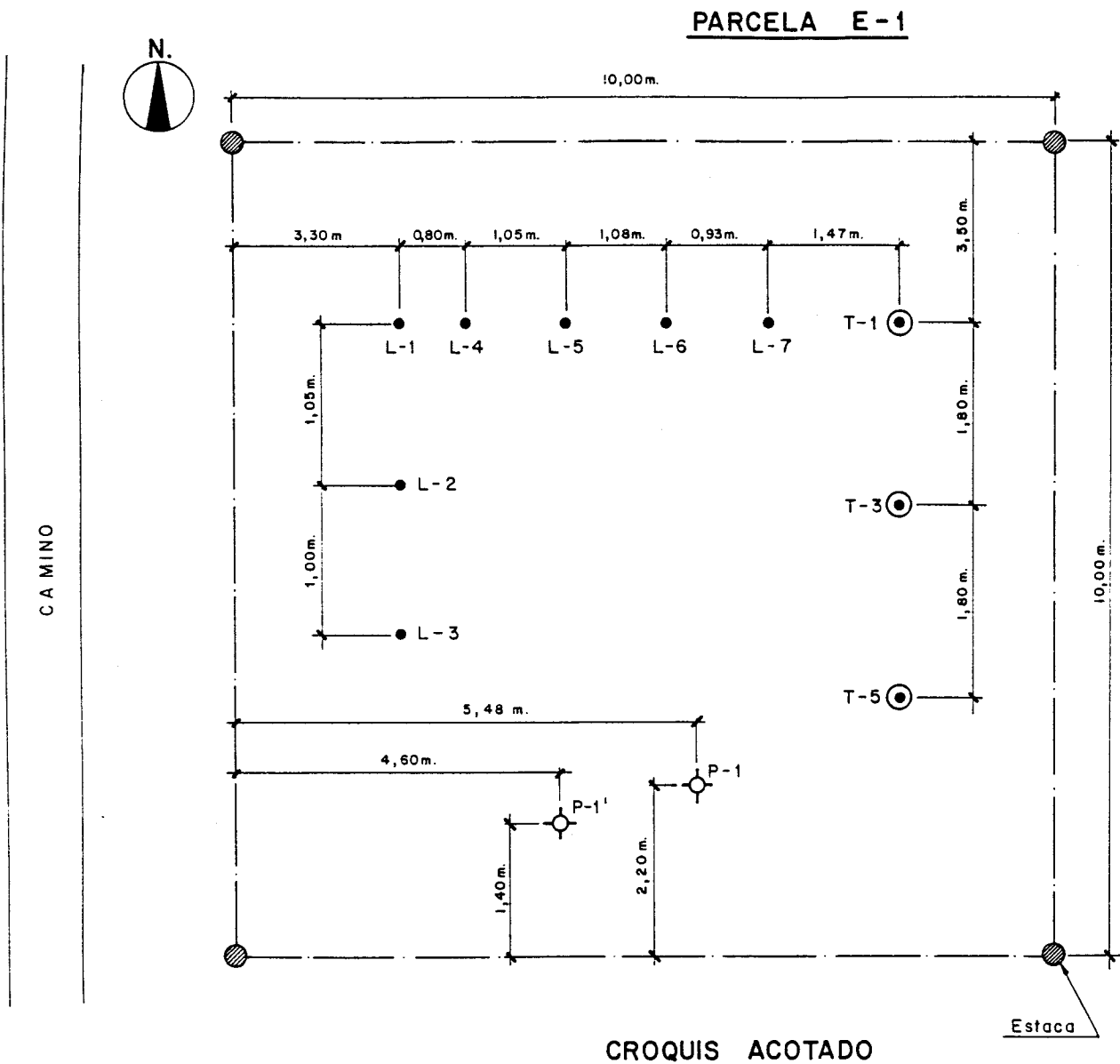


Figura 3.1. Croquis de la parcela E-1

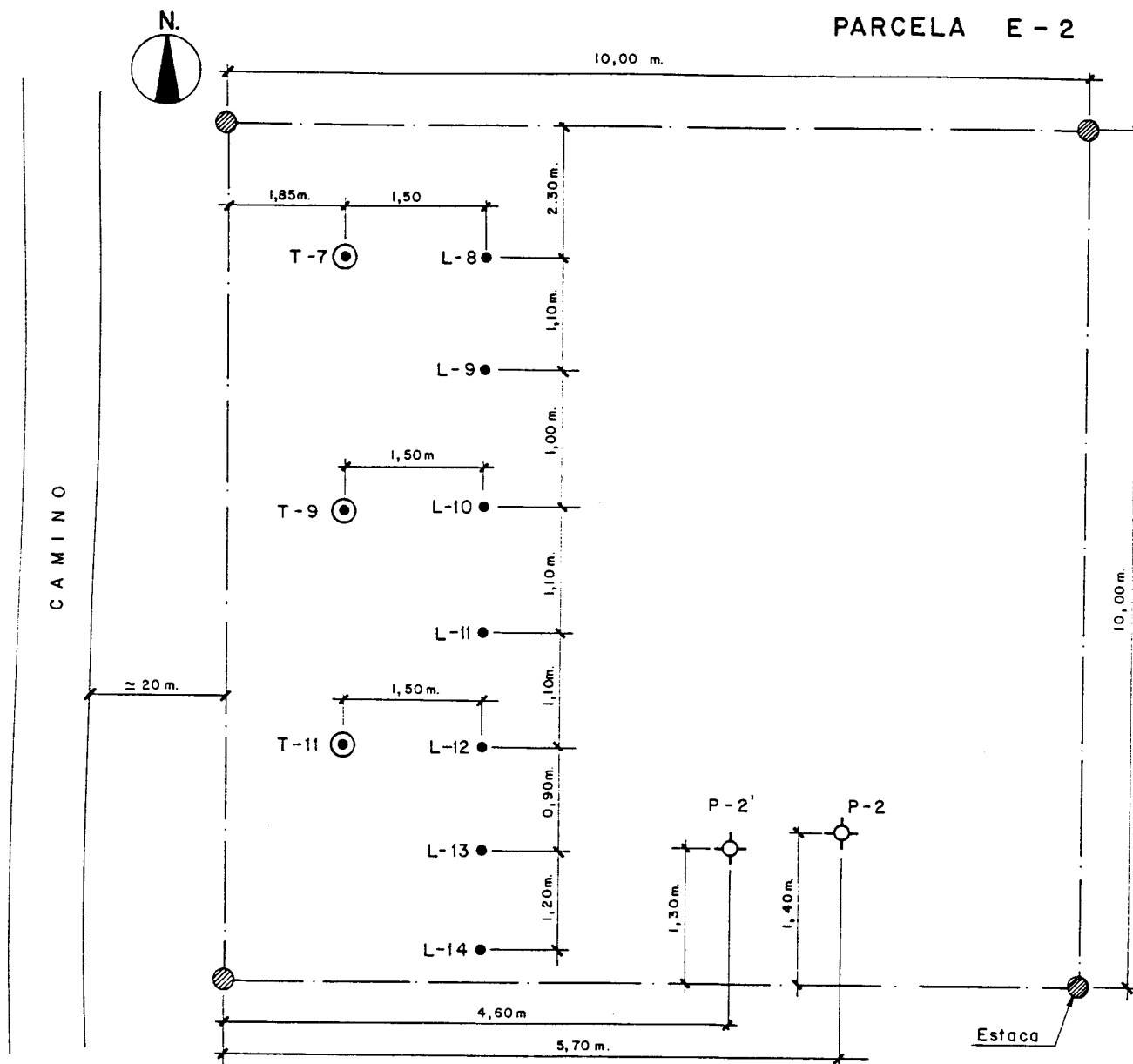
INSTRUMENTACION

Denominación	Profundidad
L - 08	0,30 m.
L - 09	0,90 m.
L - 10	1,50 m.
L - 11	2,00 m.
L - 12	2,50 m.
L - 13	3,00 m.
L - 14	3,50 m.
T - 7	0,30 m.
T - 9	1,50 m.
T - 11	2,50 m.
P - 2	8,00 m.
P - 2'	5,00 m.

L : Lisímetro de succión

T : Tensiómetro

P : Piezómetro



CROQUIS ACOTADO

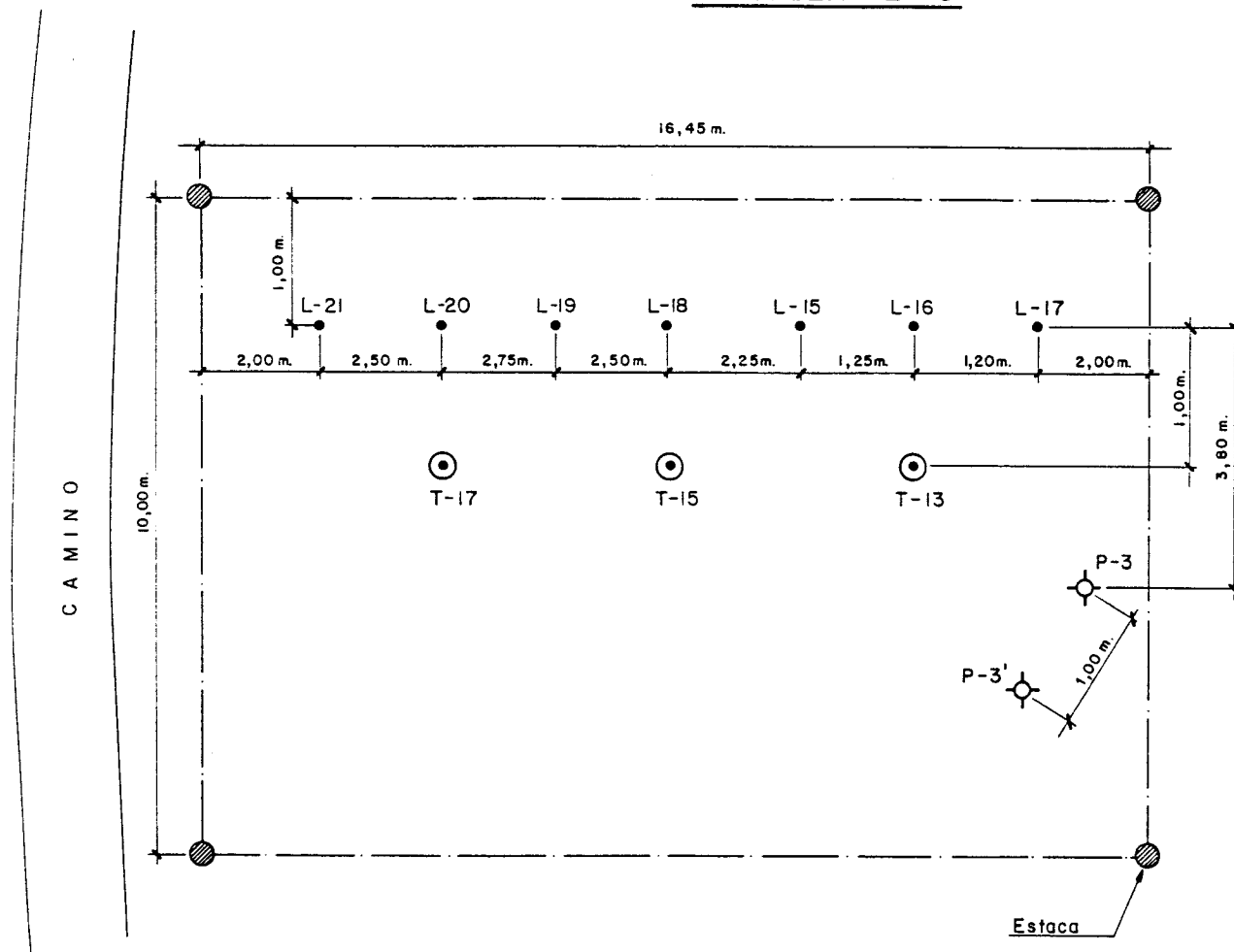
Figura 3.2. Croquis de la parcela E-2

INSTRUMENTACION

Denominación Profundidad

L - 15	0,30 m.
L - 16	0,90 m.
L - 17	1,50 m.
L - 18	2,00 m.
L - 19	2,50 m.
L - 20	3,00 m.
L - 21	3,50 m.
T - 13	0,40 m.
T - 15	1,50 m.
T - 17	2,50 m.
P - 3	8,20 m.
P - 3'	6,50 m.

L : Lisímetro de succión  
 T : Tensiómetro  
 P : Piezómetro



CROQUIS ACOTADO

Figura 3.3. Croquis de la parcela E-3

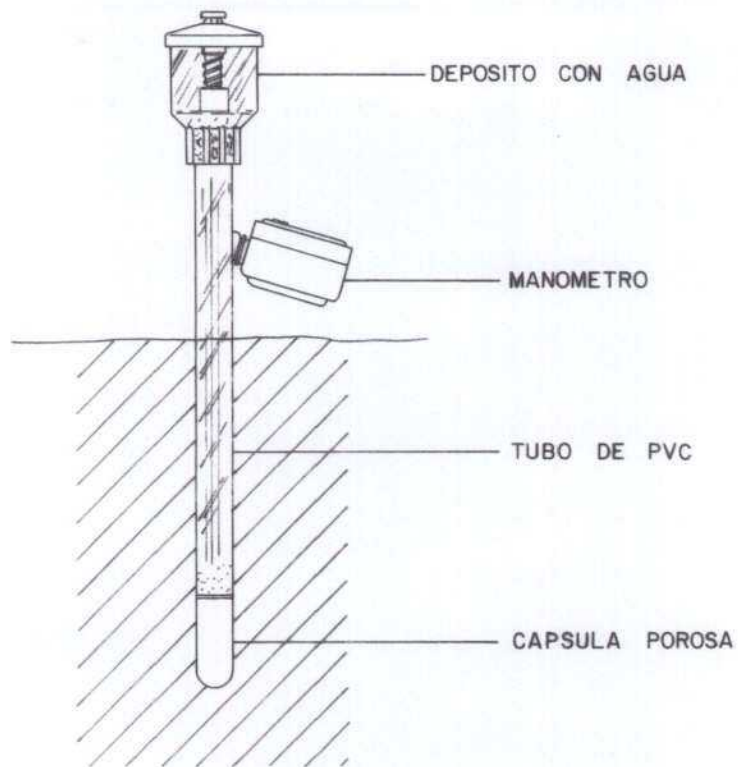


Fig. 3.4. Esquema de un tensiómetro y aspecto que presenta.

vez instalado a la profundidad deseada, la succión del suelo alrededor de la cápsula provoca la salida de una cierta cantidad de agua, hasta que las presiones a ambos lados de las paredes de la cápsula se equilibran. En ese momento la lectura del manómetro indica la tensión capilar en ese punto (fig. 3.5.).

Las ventajas de los tensiómetros estriban en que proporcionan medidas continuas, exactas y de coste reducido. Entre los inconvenientes que presentan, cabe destacar que;

- solo pueden instalarse a profundidades menores de 8,7 m (figura 3.6.)
- son sensibles a cambios de temperatura.
- los resultados están sujetos a histéresis (varían dependiendo de si el terreno está en fase de humedecimiento o de secado).

Las medidas de succión del terreno informan acerca del funcionamiento de los lisímetros de succión, así como de la presión de vacío necesaria en los mismos para obtener muestras de agua. Los tensiómetros instalados son de Soil Moisture Corporation, modelo 2725. Sus características técnicas y modo de instalación se recogen en el Anexo 2.

Se han situado tres tensiómetros por parcela, denominados, T1, T3 y T5 en la E1, a profundidades de 0.3, 1.5 y 2.5 m respectivamente; T7, T9 y T11 en la E2, a iguales profundidades que el caso anterior, y, T13, T15 y T17 en la E3 con profundidades respectivas de 0.4, 1.5 y 2.5 m. Los resultados obtenidos en las lecturas efectuadas se adjuntan en el Anexo 3.

Tras proceder a la lectura de la succión que indican, se rellena el interior del tensiómetro con agua del depósito superior, quedando así preparado para la siguiente lectura.

### **3.2 . LISIMETROS DE SUCCION**

Se utilizan para caracterizar la calidad química del agua en la zona no saturada.

El mecanismo es semejante en funcionamiento a los tensiómetros. Consta de una cápsula porosa unida a un tubo de plástico rígido de longitud igual a la profundidad de muestreo deseada.



Fig. 3.5. Aspecto de un tensiómetro instalado en el campo.

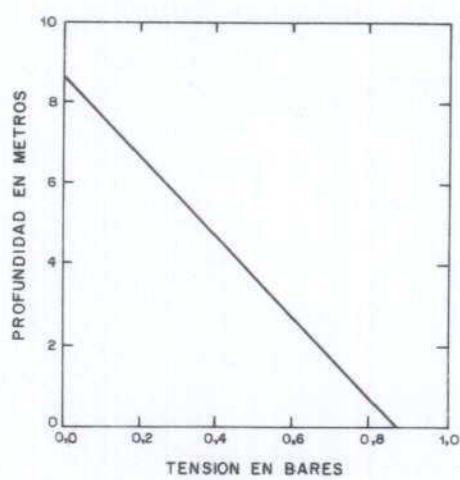


Fig. 3.6. Rango de funcionamiento de un tensiómetro  
- Varela, 1988-



Cuando se instalan de forma adecuada, los poros de la cápsula constituyen una prolongación del espacio poroso del material que la rodea, con lo cual el agua intersticial del terreno está sometida a la misma presión que la contenida en los poros del tomamuestras. Si se provoca un vacío parcial en el interior se origina un gradiente de presión a ambos lados de las paredes de la cápsula que obliga a la solución del suelo a fluir hacia el interior de la misma.

Las principales limitaciones que presentan estriban en que, no son aptos para profundidades superiores a 16 m, y el reducido volumen de agua generalmente acumulado, que obliga a seleccionar los parámetros de análisis.

Los lisímetros instalados son de dos tipos, en uno de ellos (fig. 3.7.) existe un solo tubo que conecta el interior del tomamuestras con la superficie del terreno (lisímetros de vacío). Permite obtener agua de profundidades inferiores a 1.8 m.

En los lisímetros utilizados se aplica un vacío de 0.7 bares y se lleva a cabo la extracción de la muestra, una vez que se ha acumulado un volumen suficiente para su análisis, mediante una bomba manual provista de un manómetro y con la ayuda de un capilar introducido hasta el fondo de la cápsula (fig. 3.8a; fig. 3.9.).

La otra variedad, (lisímetros de vacío-presión), apropiada para muestrear a profundidades inferiores a 16 m, tiene dos tubos, uno de los cuales llega hasta el fondo de la cápsula (fig. 3.10.). Para extraer el agua acumulada se introduce aire desde el tubo superficial y se recoge la solución por el profundo (fig. 3.8b). La presión del aire introducido ha de ser menor que la presión de burbujas de la cápsula porosa. En los tomamuestras de vacío-presión utilizados en este estudio las especificaciones de las cápsulas indican una presión de burbujas de 2 bares, si la presión del aire aplicado es superior se puede perder parte de la muestra almacenada o incluso puede romperse la cápsula.

En las parcelas experimentales de la finca "El Palomar" se han instalado siete lisímetros, dos de vacío: L01 y L02 en la parcela E1; L08 y L09 en la E2 y, L15 y L16 en la E3, a profundidades respectivas de 0.3 y 0.9 m en cada caso; y cinco de vacío-presión: L03, L04, L05, L06 y L07 (en E1), L10, L11, L12, L13 y L14 (en E2) y L17, L18, L19, L20 y L21 (en E3), situados a 1.5,

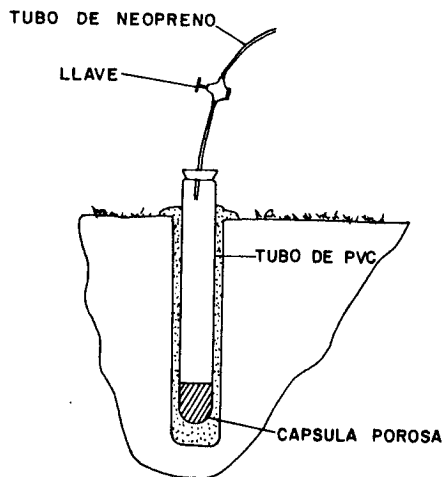


Fig. 3.7. Esquema de un lisímetro de succión superficial - profundidad máxima de muestreo 1.8 m -.

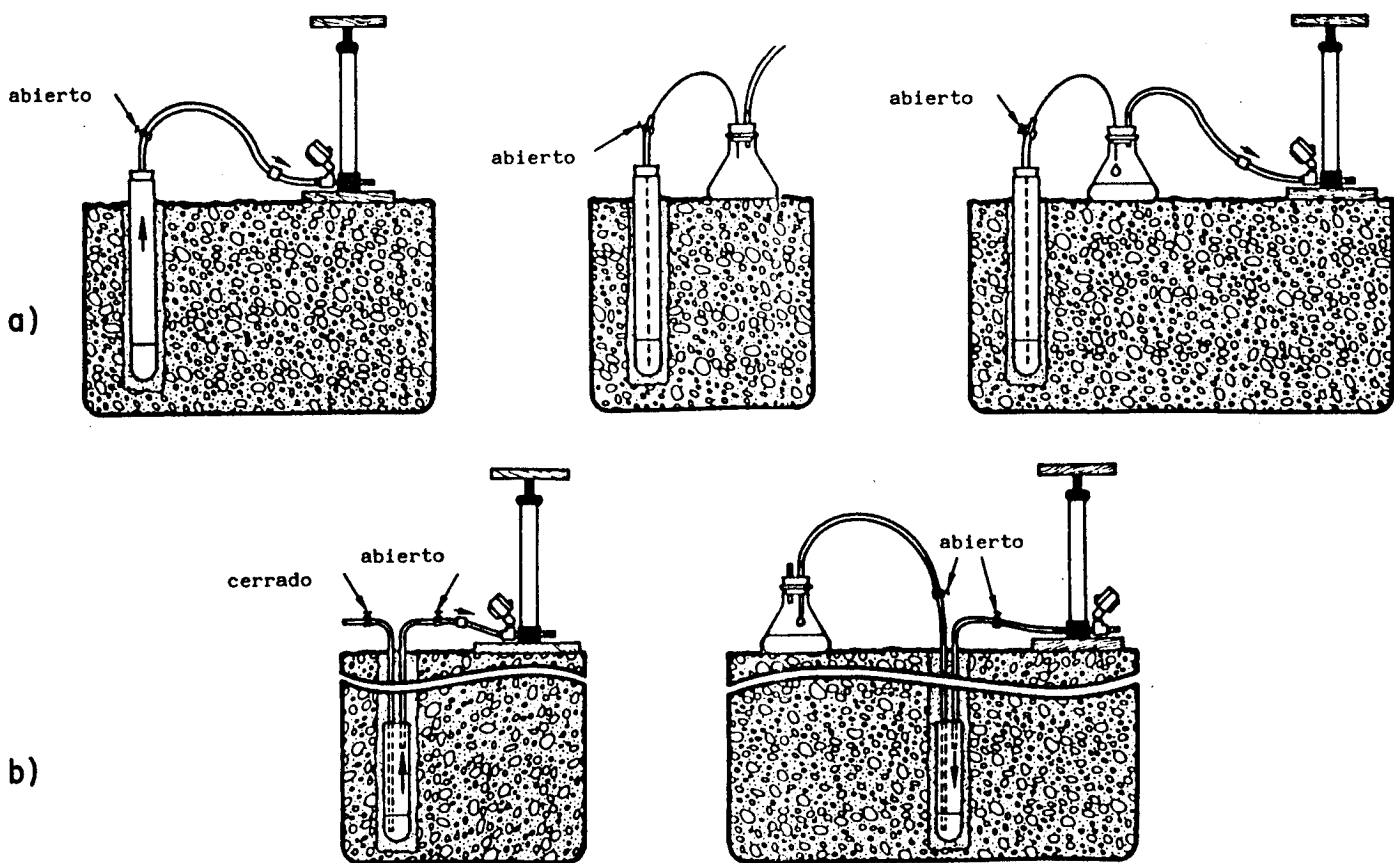


Fig. 3.8. Extracción de muestras de agua en la zona no saturada. a. Lisímetro superficial; b. profundo.



Fig. 3.9. Extracción de una muestra de agua procedente de un lisímetro de vacío.

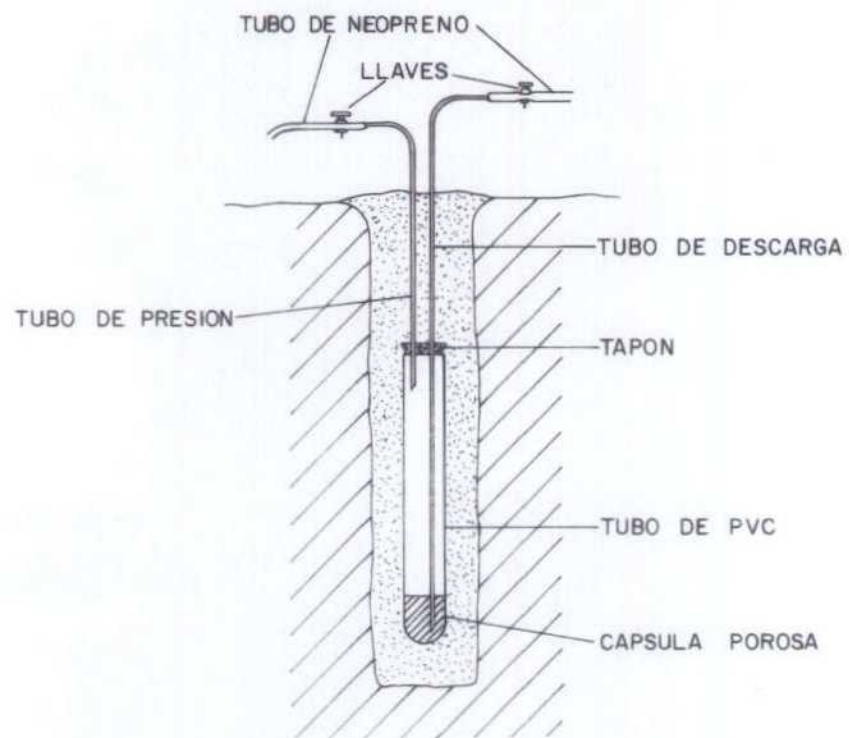


Fig. 3.10. Esquema de un lisímetro de succión profundo - hasta 16 m -.

2.0, 2.5, 3.0 y 3.5 m respectivamente, según se recoge en las figuras 3.1., 3.2. y 3.3. En cada parcela, los dos primeros son del tipo 1900 de Soil Moisture Corporation, mientras que los restantes son de la misma marca, aunque del modelo 1920.

Durante el muestreo del mes de Mayo, al evacuar la muestra almacenada en el lisímetro L17, la elevada presión del aire introducido rompió la cápsula (fig. 3.11.).



Fig. 3.11. Rotura del lisímetro de vacío-presión L17.

#### **4. CONDICIONES DE ALMACENAMIENTO Y FLUJO**

## 4 . CONDICIONES DE ALMACENAMIENTO Y FLUJO

### 4.1 TENSIOMETRIA

En cada una de las 3 parcelas experimentales de esta investigación se instalaron 3 tensiómetros a las profundidades de 0.3 y 1.5 y 2.5 m (figuras 3.1., 3.2. y 3.3.). La denominación que se les asignó corresponde al siguiente esquema:

Tensiómetro	Parcela	Profundidad
T1	E-1	0.3 m
T3	E-1	1.5 m
T5	E-1	2.5 m
T7	E-2	0.3 m
T9	E-2	1.5 m
T11	E-2	2.5 m
T13	E-3	0.4 m
T15	E-3	1.5 m
T17	E-3	2.5 m

Se dispone de registro de medidas desde febrero de 1988 para E-1 y E-2 y desde abril para E-3. En principio las lecturas se realizaron con frecuencia semanal, posteriormente, desde el 14 de abril, fueron diarias (a excepción de los días festivos). Los valores registrados se recogen en el anexo 3. Es conveniente recordar que los datos son succiones, es decir se refieren a potenciales negativos.

Para la interpretación posterior se depuraron los valores anómalos que podían deberse a errores de transcripción o problemas en la instrumentación (valores 0 por secado del aparato,...).

En las figuras 4.1., 4.2. y 4.3. se representa la evolución de la succión matricial en el tiempo para las distintas parcelas. Así mismo, para su mejor comprensión se ha incluido la evolución temporal de las precipitaciones registradas (P en mm) para la estación meteorológica de "El Palomar", a los que se han sumado los riegos realizados (R, en mm).

En una primera observación resulta claro que las variaciones en el tiempo son tan acusadas que se puede considerar correcta la asignación de un registro de medidas diario. Esto es especialmente evidente en los tensiómetros someros T1 y T7 de las parcelas E1 y E2, y en todos los de la parcela E3 (T13, T15, T17).

En estos casos, las condiciones de humedecimiento/secado del suelo se acusa fuertemente en los valores de succión matricial.

Otro rasgo que destaca en la evolución de medidas, son los valores anómalos de finales de diciembre, coincidiendo con el comienzo de la época de heladas (en el anexo 4 se adjuntan los valores de temperaturas medidos en la estación meteorológica existente en la finca). Las bajas temperaturas provocaron la congelación del agua en el interior de alguno de los tensiómetros, y así su funcionamiento incorrecto. Los constructores de los instrumentos Soil Moisture recomiendan por este motivo desmontar los dispositivos durante el invierno.

La evolución de los tensiómetros de las parcelas E-1 y E-2 posee ciertas analogías entre sí. Mientras a 0.3 m (T1 y T7) las oscilaciones son intensas, a 1.5 m se han moderado considerablemente, y a 2.5 m apenas hay variaciones.

Durante los meses de abril, mayo y junio se suceden acusados máximos y mínimos en T1 y T7, pero sin una buena correlación entre E-1 y E-2. En este período hubo numerosas precipitaciones intercaladas con días cálidos. A esto hay que unir las necesidades de agua del cultivo en esta etapa, así como las heterogeneidades litológicas del terreno (diferentes grados de retención de humedad por arcillas, etc...).



### Tensiometros Parcela E-1

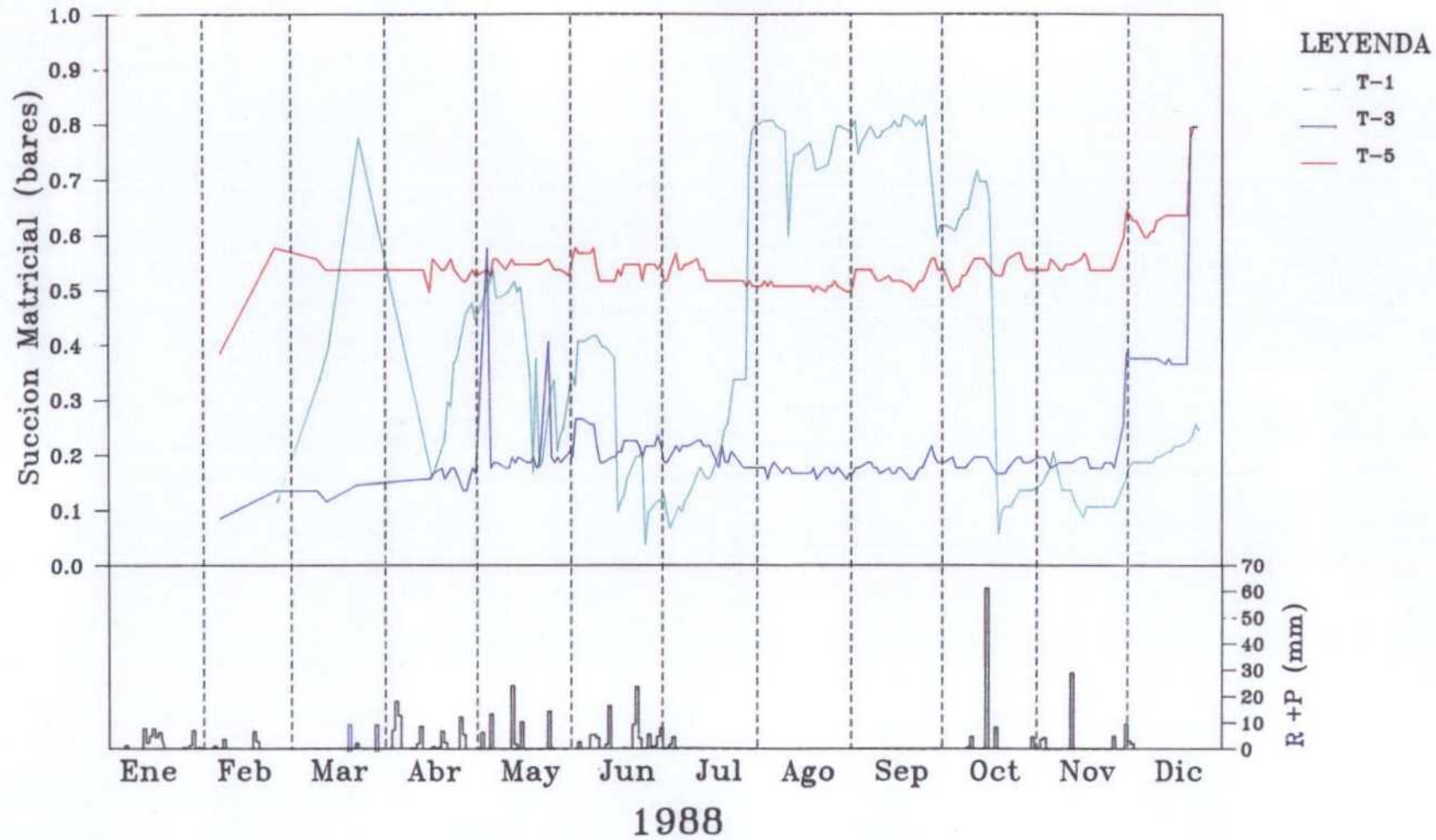


Fig. 4.1. Evolución temporal de la succión matricial en E-1, así como de las precipitaciones -P- más riego -R-



## Tensiometros Parcela E-2

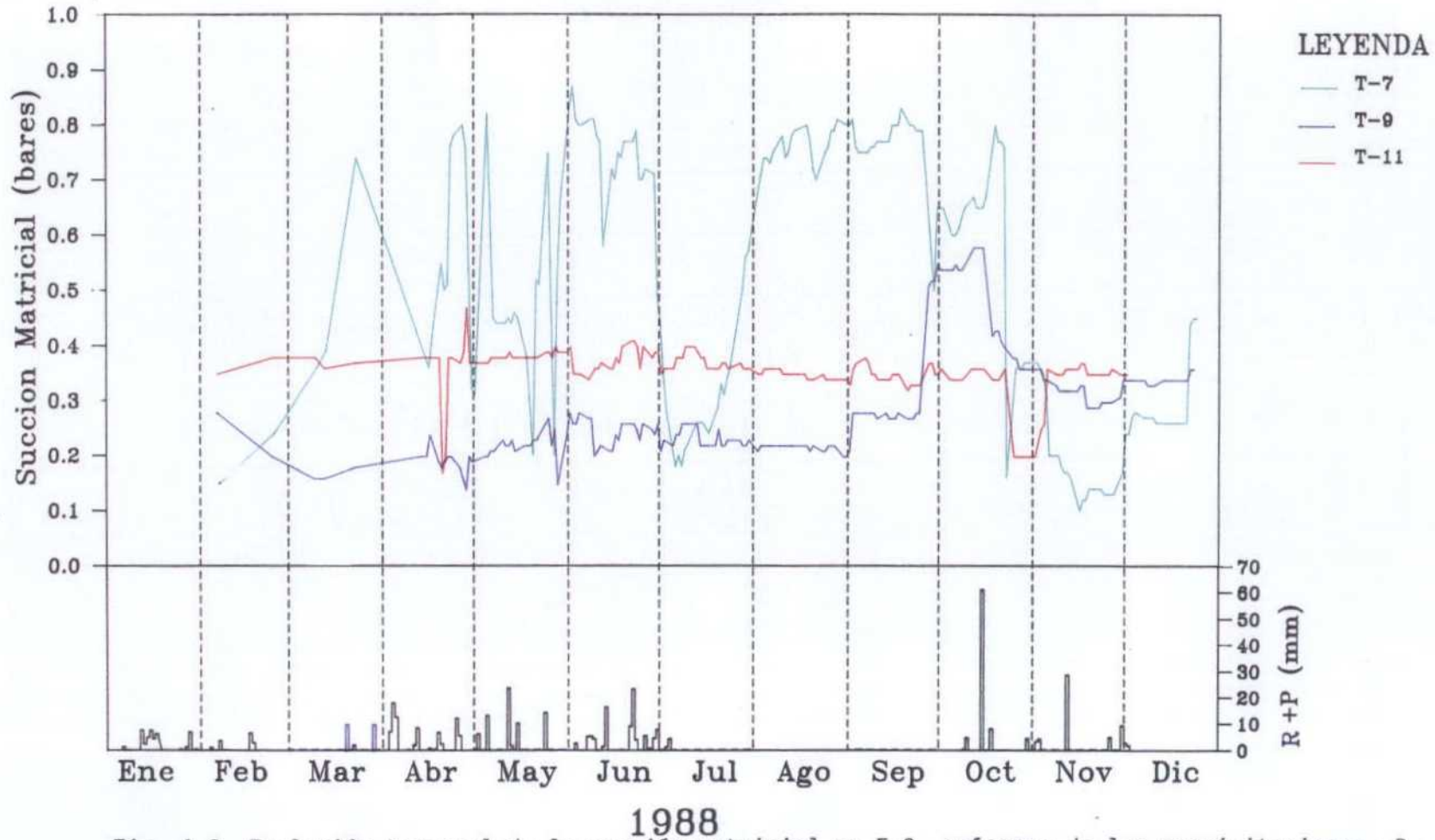


Fig. 4.2. Evolución temporal de la succión matricial en E-2, así como de las precipitaciones -P- más riego -R-.

### Tensiometros Parcela E-3

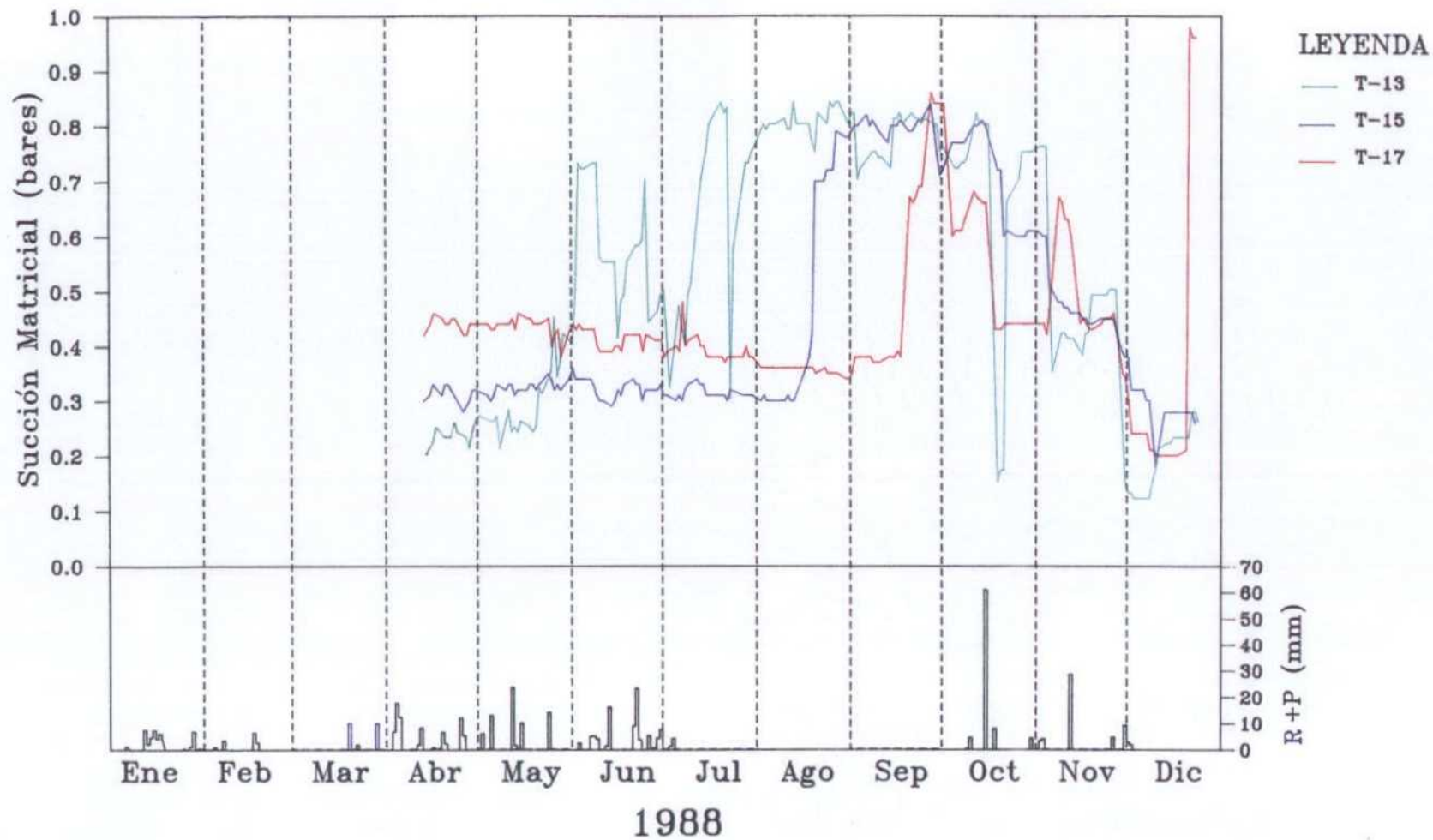


Fig. 4.3. Evolución temporal de la succión matricial en E-3, así como de las precipitaciones -P- más riego -R-.

Por todo lo anterior, se puede inferir que la evolución en este período es resultado de la combinación del comportamiento físico del medio (humedecimiento/secado en diferentes proporciones arcilla:arena) y las demandas biológicas del cultivo.

Para los mismos tensiómetros T1 y T7, a finales de julio comienza una "meseta" de valores de succión elevados que se prolonga hasta mediados de octubre y que coincide con el período de estiaje. Puede observarse que el proceso de desecación, desde mediados a finales de julio, es una curva gradual, mientras que el humedecimiento se realiza de forma más abrupta, coincidiendo con la precipitación de 61 mm de mediados de octubre. Esto indica que la histéresis es grande, y debe ser un fenómeno fundamental para la comprensión del comportamiento en la parte más superficial de la zona no saturada. Una vez concluida la sequía, se registra un aumento de humedad y disminución de temperatura en el suelo, que se traduce en valores de succión mínimos.

Respecto a los tensiómetros situados a 1.5 m ya se ha comentado su mayor constancia en el tiempo. En E-1 y E-2 presenta valores pequeños de succión (alrededor de 0.2 bares), lo que indica un nivel bastante húmedo, posiblemente arcilloso, y que no se afecta por condiciones de sequía (en T3) o lo hace con un retraso considerable (unos 2 meses en T9).

Los tensiómetros T5 y T11, situados a 2.5 m, son los que menores variaciones presentan en el tiempo. Los valores absolutos son diferentes entre T5 y T11, sin embargo, los dos registran la tendencia hacia mayores succiones que T3 y T9, es decir una zona de menor retención de humedad.

La parcela E-3 se comporta de manera diferente a las E-1 y E-2 anteriormente comentadas. El tensiómetro más somero, es decir T13 sigue siendo el más sensible a las oscilaciones de humedad en el suelo, pero los situados a niveles más profundos, T15 y T17, también acusan el período de estío, aunque con diferentes tiempos de retardo (más de 1 mes para T15 a 1.5 m y más de 2 meses para T17 situado a 2.5 m).

La mayor proporción de arenas en esta parcela, así como el hecho de que carezca de cubierta edáfica protectora, son las causas más probables de la facilidad de transmisión de las variaciones de humedad.

Es de destacar el comportamiento de los tensiómetros de esta parcela después de las lluvias de mediados de octubre. A 0.3 m (T13) el humedecimiento es muy rápido, aunque con igual rapidez recupera altos valores de succión. Esto abunda en la hipótesis de rápida transmisión, y además parece indicar una histéresis menor que en las parcelas E-1 y E-2.

Los valores mínimos de la secuencia estudiada se presentan en invierno, después de un período relativamente húmedo, y coincidiendo con bajas temperaturas.

En el apartado 4.3.3. se volverán a tratar los datos de tensiometría haciendo hincapié en los estados de humedad del suelo.

Es conveniente para el próximo período de muestreo, realizar la calibración y puesta a punto de todos estos tensiómetros con el fin de lograr medidas comparables con este muestreo de 1988.

## 4.2 NIVELES PIEZOMETRICOS

Cada una de las tres parcelas en estudio posee 2 piezómetros a diferentes profundidades. Su descripción técnica así como los detalles de su ejecución se detallan en el anexo 5.

La situación, denominación y profundidad se incluye en las figuras 3.1., 3.2. y 3.3., y los datos más importantes se resumen en el esquema siguiente:

Piezómetros	Parcela	Profundidad (m)
P-1	E-1	8.1
P-1'	E-1	5.5
P-2	E-2	8.0
P-2'	E-2	5.0
P-3	E-3	8.2
P-3'	E-3	6.5

El registro de niveles piezométricos en 1988 comienza el 22 de enero y termina el 22 de diciembre, y son de carácter diario desde el 13 de abril hasta finales de año (excepto en días festivos). La información se incluye en el anexo 6.

En la figura 4.4 se ha representado la evolución de niveles registrada en los piezómetros someros P1', P2' y P3', así como la de las precipitaciones.

Hay algunos rasgos que cabe destacar en este gráfico:

- En primer lugar, la falta de correlación entre los niveles de P-1' y P-2' con P-3', y entre los niveles de cualquiera de ellos con las precipitaciones. Además, y tratándose de una zona de descarga, la acusada variación de niveles y las pequeñas oscilaciones a nivel diario.

- Es probable que las medidas no sean realmente niveles piezométricos, y que respondan más a tensiones locales producidas por la abundante presencia de arcillas (tensiones intersticiales). Esto podría indicar también la presencia de una franja capilar importante. También podría pensarse en una respuesta retardada de los niveles a las fluctuaciones de la zona de recarga, aunque parece menos probable.

- Destaca también la proximidad de los niveles de P-1' y P-2' a los lisímetros más profundos (especialmente P-1' a L-7 a 3.5 m). Este hecho será de especial relevancia en el capítulo 5, para interpretar la calidad química observada en el agua de los lisímetros.

### **4.3 CALCULO DEL DRENAJE**

En este apartado se realiza el cálculo del drenaje de agua hacia el acuífero en las distintas parcelas de experimentación. Entre la bibliografía consultada se seleccionaron como más idóneos los métodos:

1. del balance hídrico
2. del balance de cloruros
3. del balance en el perfil del suelo

No obstante, el tercero de estos métodos no ha podido llevarse a cabo por falta de la instrumentación necesaria.

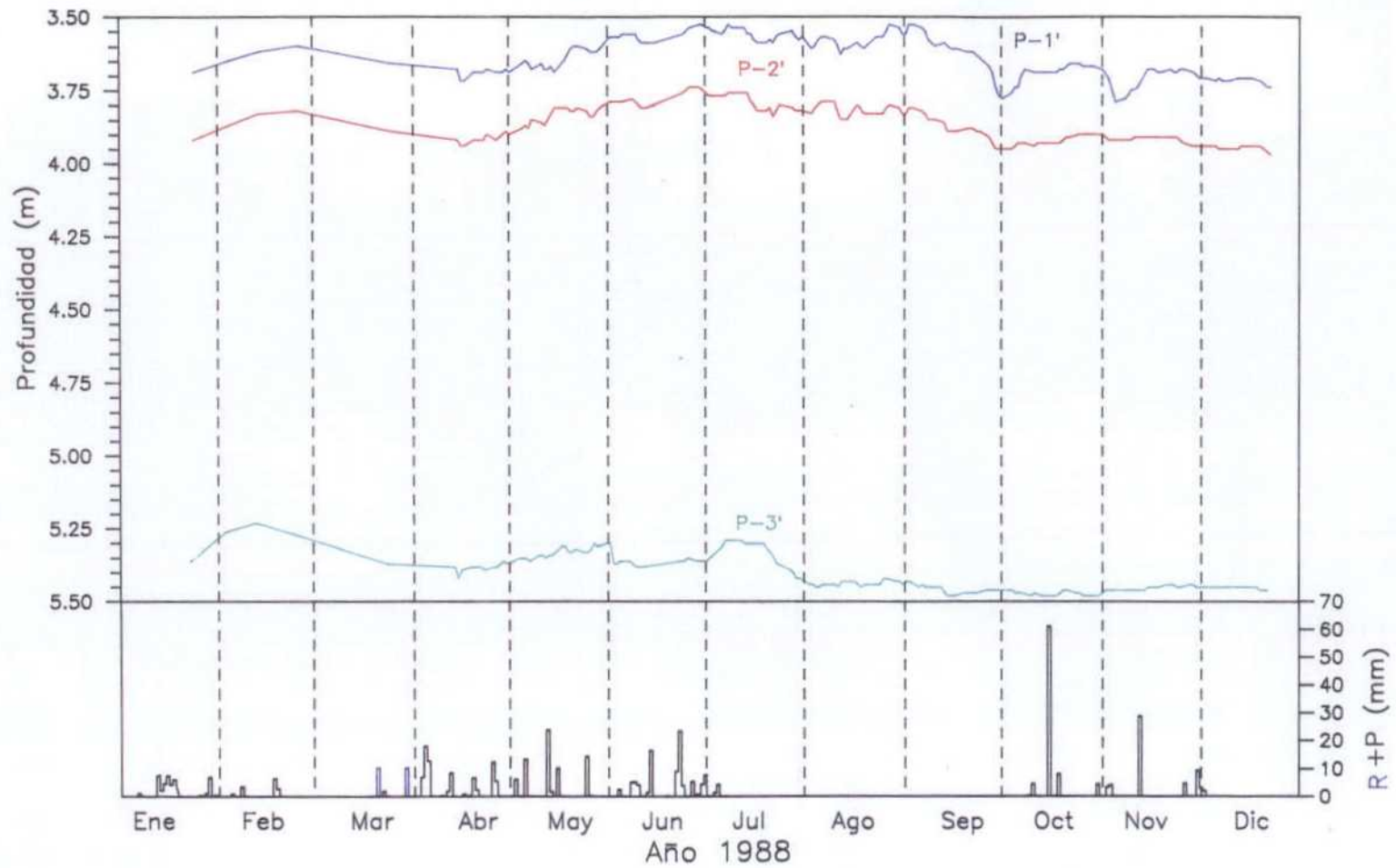


Fig. 4.4. Evolución a lo largo del año 1988 de los niveles piezométricos de P1', P2' y P3', así como de las precipitaciones -P- más riego -R-.

### 4.3.1 METODO DEL BALANCE HIDRICO

La ecuación del Balance Hídrico (válida para las 3 parcelas), planteada es a escala diaria, la siguiente:

$$R = P + I - ETR - D$$

en donde:

R (mm) =Reserva de agua utilizable por el cultivo

P (mm) =Precipitación

I (mm) =Dotación de riego

ETR (mm) =Evapotranspiración real

D (mm) =Drenaje o percolación profunda

La obtención de la componente de Drenaje se realiza a partir de la ecuación planteada, previa estima o medida del resto de componentes, como a continuación se indica.

Reserva de agua utilizable por el cultivo (R)

A partir de los valores de capacidad de campo (26.3%) y marchitamiento permanente (15.6%) se obtiene una humedad total disponible del 10.7% en volumen. Teniendo en cuenta el período de crecimiento del cultivo de cebada existente y una profundidad de 0.9 m en su época de máximo desarrollo se han estimado las siguientes reservas:

$$R_{\text{máx}} = 0.107 \times 0.9 \times 10^3 \text{ mm} = 96.3 \text{ mm en marzo a junio}$$

$$R_1 = 3/4 R_{\text{máx}} = 72.2 \text{ mm en enero-febrero}$$

$$R_2 = 1/4 R_{\text{máx}} = 24.1 \text{ mm en octubre a diciembre y julio a septiembre}$$

Teniendo en cuenta el período de estudio (enero-julio) se ha considerado como valor de la Reserva durante el mismo el de  $R_1$ , es decir, 72.2 mm. En el caso de abordar el cálculo para períodos más largos (2 ó 3 años) sería conveniente considerar la variación real existente de la Reserva.

### Precipitación (P)

La precipitación se ha medido en la estación termopluviométrica existente en la finca. En los cuadros 4.1. a 4.7. se presentan los valores diarios y totales mensuales durante el período de estudio.

### Dotación de riego (I)

La dotación de riego total para las parcelas E-1 y E-2 ha sido de 20 mm distribuidos en dos aplicaciones en aspersor de 10 mm los días 18 y 27 de marzo. En el cuadro 4.3. figuran estos valores incluidos en la columna correspondiente a la precipitación.

En el caso de la parcela E-3 la información es contradictoria. El control de riegos de la finca de "El Palomar" indica que no se realizó ninguna aplicación, sin embargo, el día 24 de marzo, durante la instalación de los tensiómetros de E-3 se observó que esta parcela estaba regada. Consultados los responsables de control de riegos, cabe la posibilidad de que durante estas fechas se efectuase algún regadío por gravedad de forma manual. A efectos de cálculo se considera una aplicación de 20 mm, esto es, igual a los casos anteriores.

### Evapotranspiración Real (ETR)

La evapotranspiración real se obtiene a partir de la evapotranspiración potencial o teórica (ETP) cuando no existe déficit de agua en el suelo. Si hay déficit, la ETR es inferior a la ETP, y se obtiene como suma de las componentes P, I y R.

La ETP se ha calculado por el método de Penman modificado midiéndose los valores de temperatura, humedad relativa y horas de sol en la estación de Barajas Aeropuerto y los de velocidad del viento en el observatorio de Madrid-Retiro (Anexo 7). Los valores calculados presentan en general buena concordancia con los medios disponibles para un período comprendido entre 1961 y 1984 (ver Estudio Hidrogeológico):

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio
ETP (mm) 61-84	18.5	29.3	63.1	78.7	122.2	154.1	167.0
ETP (mm) 88	15.5	28.8	69.3	68.4	104.8	107.3	185.2

Los valores de ETR diarios y totales mensuales se presentan en los cuadros 4.1. a 4.7.



El cálculo de drenaje efectuado a partir de los componentes mencionados proporciona un valor de 33 mm para el período de estudio, producido íntegramente en el mes de enero.

En la figura 4.5. se han representado las principales componentes del Balance Hídrico (incluyendo en la componente de precipitación el riego de marzo) a escala semanal, siendo la primera semana la del 4 al 10 de enero y la 30ª, del 25 al 31 de julio. El hecho de que en los meses de febrero y marzo, en los que la ETR es baja, la precipitación haya sido muy débil ha impedido que se haya producido en ellos algún drenaje, como cabía esperar.

#### **Consideraciones sobre el método:**

El Balance Hídrico es un método sencillo de llevar a la práctica en el sentido de que sólo precisa datos climáticos y no necesita datos físicos o químicos del suelo.

Es un método suficientemente correcto siempre que el cálculo de la ETP se realice a su vez por un método preciso e indicado para la zona de aplicación y a partir de datos representativos de la misma.

El mayor inconveniente del método se produce cuando existen déficits reales de agua en el suelo, ya que en estas situaciones los valores de drenaje resultan subestimados a favor de otras componentes del balance.

### **4.3.2 METODO DEL BALANCE DE CLORUROS**

La ecuación del Balance de Masa de Cloruros, planteada para el período enero-julio de 1988, es la siguiente:

$$S = P (Cl)_p + I (Cl)_i + F - D (Cl)_x - C$$

en donde:

S (mg) =	cambio en la masa de cloruro almacenada en el suelo
P (l) =	volumen de precipitación
(Cl) <sub>p</sub> (mg/l) =	concentración en cloruro del agua de lluvia
I (l) =	dotación de riego
(Cl) <sub>i</sub> (mg/l) =	concentración en cloruro del agua de riego

F (mg) =	masa de cloruro aportada por el fertilizante
D (l) =	volumen de drenaje
(Cl) <sub>x</sub> (mg/l) =	concentración en cloruro del agua del suelo, a x m de profundidad. En nuestro caso x = 1.5 m excepto en E-3 donde fue de 2 m
C (mg) =	masa de cloruro consumida por el cultivo

La obtención del volumen de drenaje D se realiza a partir de la ecuación planteada previa estima o medida del resto de componentes, como a continuación se indica.

#### **Cambio en la masa de cloruro almacenada en el suelo (S)**

La determinación de esta componente debe realizarse a partir de muestreos destructivos del suelo al comienzo y final del período de estudio y ubicados en los primeros 1.5 m.

Puesto que no se dispone de dichos datos, se han considerado dos hipótesis de trabajo: primera, que el suelo se encuentra en régimen permanente y por tanto S es una componente nula, y segunda, que el suelo actúa como fuente de cloruros y que S es un cierto porcentaje de la masa de cloruros drenada hacia el acuífero.

#### **Masa de cloruro aportada por la lluvia**

A partir de un volumen de precipitación de 304.1 mm y una concentración en cloruro del agua de lluvia de 2 mg/l se estima esta componente en 60820 mg.

#### **Masa de cloruro aportada por el riego**

A partir de una dotación de riego de 20 mm y una concentración en cloruro en el agua de riego de 109.74 mg/l (mayo 88) se estima esta componente en 219480 mg.

#### **Masa de cloruro aportado por el fertilizante (F)**

El cloruro está presente en el abonado de fondo de diciembre de 1987 en forma de cloruro potásico. A partir de la fórmula del abono y su dotación resulta una masa de cloruro de 600000 mg.

### Concentración de cloruro en el agua del suelo

La evolución de la concentración de cloruro en el agua del suelo durante el período de estudio se puede observar en las figuras 5.26 a 5.61 del capítulo 5. Dentro de las profundidades de muestreo más someras se ha tomado la de 1.5 m por ser la de mayor número de datos en E-1 y E-2, y la de 2 m para el caso de E-3 (Anexo 8).

En la parcela E-1 la máxima concentración a 1.5 m es de 4102 mg/l en junio, y el valor medio representativo del período de estudio es de 3129 mg/l.

En la parcela E-2 la máxima concentración a 1.5 m corresponde también a junio, con 1847 mg/l, y el valor medio utilizado es de 576 mg/l.

En la tercera parcela, no hay información a la profundidad de 1.5 m (rotura de L17). A 2.0 m (L18) se dispone de 8 datos, con un máximo de concentración de 191 mg/l y una media de 127 mg/l.

### Masa de cloruro consumida por el cultivo (C)

Esta componente no ha sido determinada habida cuenta de que la bibliografía consultada indica que, en cualquier caso, esta es una componente despreciable frente al resto de componentes del balance.

Los valores de drenaje obtenidos a partir de las componentes mencionadas son las siguientes:

#### - Hipótesis de Régimen Permanente (S=0)

$$D(l) = \frac{P(Cl^-)_p + I(Cl^-)_l + F}{(Cl^-)_x}$$

$$D(l) = \frac{60820 \text{ mg} + 219480 \text{ mg} + 600000 \text{ mg}}{(Cl^-)_x} = \frac{880300 \text{ mg}}{(Cl^-)_x}$$

## a. Parcela E-1

$$D(l) = \frac{880300 \text{ mg}}{3129 \text{ mg/l}} = 281.3l \text{ a } 1.5 \text{ m}$$

Como la superficie de terreno es de 100 m<sup>2</sup>, este valor representa un volumen de drenaje de 2.81 mm.

## b. Parcela E-2

$$D(l) = \frac{880300 \text{ mg}}{576 \text{ mg/l}} = 1528.3l \text{ a } 1.5 \text{ m}$$

Lo que indica un volumen de drenaje de 15.28 mm para la parcela E-2 de 100 m<sup>2</sup>.

## c. Parcela E-3

$$D(l) = \frac{880300 \text{ mg}}{127 \text{ mg/l}} = 6931.5l \text{ a } 2.0 \text{ m}$$

Que representa un volumen de drenaje de 69.3 mm para E-3, de 100 m<sup>2</sup>.

**- Hipótesis de Régimen Transitorio**

Suponiendo que la masa de cloruro liberada por el suelo representa un 20% de la masa de cloruro drenada, dato puramente teórico al ser tomado de una experiencia (Hill, 1986) realizada en otro tipo de suelo y cultivo, el volumen de drenaje sería de 3.51 mm en E-1, 19.1 mm en E-2 y 86.6 mm en E-3.

**Consideraciones sobre el método:**

El Balance de Cloruros se presenta más complejo que el Balance Hídrico dado que además de tener en cuenta volúmenes (precipitación, riego) precisa de datos químicos de todas las componentes en juego.

En particular la determinación de la componente S y de la concentración de cloruro en el agua del suelo entrañan los mayores inconvenientes, pues debido a la propia variabilidad espacial de los suelos será preciso realizar muestreos amplios y costosos para tener datos representativos en superficies grandes.

En el caso concreto de las parcelas E-1 y E-2 la consideración de un régimen permanente ( $S=0$ ) sería incorrecto ya que la exagerada diferencia que existe en los contenidos en cloruro del agua del suelo de las dos parcelas, sometidas a iguales tratamientos de riego, fertilización, etc., sólo puede explicarse a partir de la existencia de un régimen transitorio, es decir, a un aporte de cloruros del suelo. Este aporte es, debido a la variabilidad espacial del suelo, muy distinto en las distintas parcelas.

La estimación teórica del aporte de cloruros del suelo en un 20% de la masa de cloruro drenada puede ser válida en el caso de la parcela E-2, pues proporciona 19.1 mm de drenaje frente a los 33 mm obtenidos por el método del Balance Hídrico. Para la parcela E-1 este aporte debe ser mucho mayor, dada la gran discrepancia en los volúmenes de drenaje obtenidos por ambos métodos.

#### **4.3.3 METODO DEL BALANCE EN EL PERFIL DEL SUELO**

Este método permite estimar los volúmenes de evapotranspiración real y drenaje, a escala semanal, asumiendo la hipótesis de flujo vertical y empleando la presencia de un plano teórico de flujo nulo en el suelo. Se emplean como datos básicos el contenido de humedad y la succión matricial del suelo a diferentes profundidades.

Para su aplicación el método tiene en cuenta tres estados de humedad diferentes en el suelo, no simultáneos: 1) redistribución, cuando el contenido de humedad en el perfil del suelo está disminuyendo; 2) saturación, cuando las medidas de succión matricial son mayores o iguales a cero y 3) recarga o humedecimiento, cuando el contenido de humedad en el perfil del suelo aumenta.

El cálculo de los volúmenes de evapotranspiración y drenaje se efectúa de manera diferente para cada estado:

### 1) Redistribución

En ausencia de saturación o recarga, el contenido de humedad en el suelo disminuye debido a la evapotranspiración y el drenaje. Para discernir ambas componentes en el perfil, se emplea el concepto teórico del plano de flujo nulo, definido a partir de las medidas de succión matricial para un cierto tiempo  $t$  a una profundidad ZFP ( $t$ ).

El flujo de drenaje, es decir, volumen que durante un tiempo  $\Delta t$  atraviesa una sección horizontal unitaria es:

$$V_{DREN}(t) = \int_{t_1}^{t_1 + \Delta t} \int_{ZFP}^{ZB} \theta(z, t) dz dt$$

en donde:

$\theta (Z,t) =$	contenido de humedad
$Z =$	coordenada cartesiana, en dirección vertical
$t_1 =$	tiempo inicial entre medidas
$\Delta t =$	intervalo de tiempo entre medidas
$ZB =$	profundidad final de muestreo, definida como profundidad en donde la succión no varía apreciablemente tras una precipitación.

El flujo de evapotranspiración real para el mismo intervalo de tiempo  $\Delta t$  es:

$$Q_{DREN}(t) = \sum_{k=1}^I (V_{DREN}^k \Delta t^k)$$

$$Q_{ETR} = \sum_{k=1}^I (V_{ETR}^k \Delta t^k)$$

## 2) Saturación

Cuando el suelo está a saturación o cerca de dicho estado, los valores de succión matricial son nulos a lo largo del perfil del suelo de forma que el movimiento del agua se debe exclusivamente a la gravedad. Bajo estas condiciones, el método asume un gradiente unidad y estima el flujo de drenaje

$$V_{DREN} = K_{sat}$$

de forma que, con la limitación de la precipitación (u otras entradas de agua), el flujo de drenaje queda definido por el valor de la permeabilidad del suelo saturado. De forma análoga al estado anterior se calcularía el correspondiente volumen de drenaje  $Q_{DREN}$ .

## 3) Recarga

En este estado se considera que el plano de flujo nulo está en la superficie del terreno, existiendo un contenido de humedad creciente en el perfil del suelo y siendo despreciable la evapotranspiración.

El flujo de drenaje es estimado para un intervalo  $\Delta t$

$$V_{DREN}(t) = \int_{t_1}^{t_1+\Delta t} \int_0^{ZB} \theta(z, t) dz dt$$

obteniéndose como ya se ha comentado el correspondiente volumen de drenaje  $Q_{DREN}$  para un cierto período de recarga de duración  $L$ .

Finalmente y como contraste de los valores obtenidos se plantea para el período anual de estudio la ecuación del balance hídrico del suelo

$$R + P + I = Q_{DREN} + Q_{ETR} + e \quad (\text{volúmenes en mm})$$

en donde se representaría el error de cierre del balance, cuantificando la bondad del método y siendo el significado de las variables restantes ya conocido.

**Consideraciones sobre el método:**

El método del Balance en el Perfil del Suelo está considerado como el más preciso de los tres seleccionados en el presente Estudio, al estar apoyado en medidas directas de la humedad y la succión matricial del suelo.

La necesidad de efectuar dichas medidas a escala semanal hace del método el más complejo y costoso de llevar a la práctica. El contenido de humedad en volumen es determinado por medio de una sonda de neutrones cuya calibración semanal en campo requiere personal especializado; las medidas de succión matricial realizadas por medio de tensiómetros deben obtenerse dentro de la profundidad ZB con suficiente detalle para estimar con precisión la posición del plano de flujo nulo. A todo ello debe unirse el problema de la propia variabilidad espacial del suelo, lo que implicará la aplicación del criterio de repetición para que las medidas de humedad y succión sean representativas. Por lo que respecta al conocimiento de la permeabilidad del suelo saturada, debe mencionarse que áquel no debe ser muy detallado siempre que  $K_{sat}$  sea lo suficiente grande.

#### **Análisis de los datos disponibles**

En las figuras 4.1., 4.2. y 4.3. del apartado 4.1. se presentan los valores de succión matricial del suelo proporcionado por los tensiómetros de las parcelas E-1, E-2 y E-3, junto con los valores de precipitación (que incluye además los riegos efectuados en el mes de marzo) para el año 1988.

Como ya se ha comentado en el apartado 4.1., en las parcelas E-1 y E-2, la succión matricial a profundidades superiores a 1.5 m resulta insensible a la precipitación por lo que la profundidad ZB en la que se aplicaría este método sería inferior a 1.5 m. La determinación de la situación del plano de flujo nulo durante los períodos de redistribución exigirá la colocación de nuevos tensiómetros entre 0.3 y 1.5 m.

En estas dos parcelas, y a partir de la succión en T-1 y T-7 se han definido las diferentes etapas de humedad en el suelo. Existen una serie de períodos de recarga, que son fundamentalmente:



- finales de marzo y principios de abril
- de mediados a finales de mayo
- de mediados a finales de junio
- a mediados de octubre

Estos episodios se correlacionan bien con las precipitaciones registradas. Se puede considerar que a principios de abril el suelo estaba a saturación como consecuencia de los riegos de marzo, si bien no hay suficientes datos de succión como para confirmarlo. Los períodos restantes corresponden al estado de redistribución, con disminución progresiva del contenido de humedad en el suelo.

En el caso de la parcela E-3, la succión matricial a profundidades superiores a 1.5 m sí que es sensible a las precipitaciones en algunos momentos, incluso a 2.5 m. La determinación de la situación del plano de flujo nulo durante los períodos de redistribución exigirá la colocación de nuevos tensiómetros entre los ya existentes, y aún más abajo de 2.5 m.

A partir de los valores de T13 se han distinguido los períodos de recarga durante:

- el mes de junio
- a mediados de octubre
- desde principios de noviembre a finales del año

que, como cabía esperar, se correlacionan bien con las épocas más lluviosas. Los períodos restantes corresponden al estado de redistribución, con disminución progresiva del contenido de humedad en el suelo.

Los valores del contenido de humedad del suelo, imprescindible para la ejecución del método, no están disponibles en esta 1ª Fase del Estudio, al no haber contado con el instrumental necesario (sonda de neutrones).

Por último, se dispone de un valor de permeabilidad del suelo de  $4.17 \cdot 10^{-4}$  cm/s, suficientemente grande respecto a la precipitación existente, por lo que una descripción más detallada de la misma no será precisa.

## **5. HIDROGEOQUIMICA**

## **5 . HIDROGEOQUIMICA**

### **5.1 . INTRODUCCION**

La información geoquímica de la que dispone esta investigación representa un gran volumen de datos, entre los que se encuentran parámetros de gran sensibilidad en el estudio.

El objetivo final que se pretende alcanzar es, como ya se ha comentado, describir el comportamiento de contaminantes nitrogenados. En cualquier caso, y especialmente en esta primera fase, el estudio aborda el sistema geoquímico en conjunto como marco imprescindible para una comprensión total.

El estudio posee dos vertientes fundamentales: a) la primera trata de aspectos físicos del flujo (advección, dispersión) y b) la segunda se enfoca hacia la caracterización de los procesos geoquímicos involucrados en la evolución. En este capítulo se hace énfasis especial en el segundo punto, aunque también tratará de apoyar algunos aspectos del primero.

Es conveniente recordar las principales peculiaridades del sistema que se va a tratar:

- se enmarca en zona no saturada, de gran complejidad y donde se incluye la activa zona edáfica.
- es un sistema alterado, ésto es, está relacionado con la respuesta del medio ambiente a la introducción de dosis altas de especies nitrogenadas (contaminantes). Es posible, pues, que no sea estacionario, y aún esté evolucionando hacia su equilibrio.
- litológicamente hay heterogeneidades de importancia, que deben tenerse en cuenta en la interpretación posterior.

## 5.2 . METODOLOGIA

La sistemática que ha sido empleada para la aplicación de técnicas hidrogeoquímicas a esta investigación ha consistido fundamentalmente en las siguientes etapas:

- a. Muestreo. La extracción de muestras ha tenido una frecuencia mensual y se ha realizado en zona no saturada, mediante lisímetros de succión, y en zona saturada, tomando agua de los piezómetros instalados.
- b. Análisis de muestras. Se llevaron a cabo algunas determinaciones "in situ" de constituyentes inestables (temperatura, conductividad, pH, O<sub>2</sub>, Eh, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> y NO<sub>3</sub><sup>-</sup>). Los análisis de laboratorio se efectuaron en GEO-AGUA, S.A., y en IRYDA, siempre que hubo volumen de muestra suficiente. A partir de sus resultados se estableció una única base de datos (en este caso, GEO-AGUA).
- c. Interpretación de datos. Se obtuvieron datos sobre los volúmenes y presiones residuales de las muestras recogidas y sobre la calidad química del agua. Esta información se analiza con objeto de conocer las variables que rigen su comportamiento. Se hace especial énfasis en la dependencia con el tiempo y con la profundidad.
- d. Síntesis de resultados. Las conclusiones obtenidas en cada apartado se resumen e integran, con el fin de obtener una visión global. Estas conclusiones servirán de punto de partida al planteamiento del trabajo en fases sucesivas del estudio.

## **5.3 . OBTENCION DE DATOS**

### **5.3.1 . MUESTREO Y ANALISIS "IN SITU"**

Aunque los lisímetros constituyen el medio más eficaz de recogida de muestras de agua intersticial, en ocasiones ha de transcurrir un período de tiempo elevado para obtener un volumen suficiente que permita el análisis de los parámetros de interés. En el estudio que nos ocupa se optó por extraer la solución acumulada en los lisímetros con una periodicidad mensual.

Después de evacuar la muestra de agua, se aplicaba a los tomamuestras una presión de vacío de 0.7 bares, y transcurridos aproximadamente treinta días se medía la presión residual (para comprobar si perdían presión), y se procedía a la recogida del agua existente en el lisímetro. En muchos casos la succión en el terreno fue superior a la del interior de la cápsula porosa y se encontraban vacíos; en otras ocasiones, el ascenso del nivel freático hizo que el lisímetro más profundo de la parcela E-1 (L07) quedara inundado perdiendo la presión de vacío para, después de un descenso del nivel, perder el agua almacenada por efecto del goteo producido a través de la cápsula.

En la muestras obtenidas a partir de lisímetros y piezómetros se analizaron "in situ", desde julio de forma sistemática, aquellos parámetros inestables cuyo valor experimenta un cambio importante en función de las condiciones de presión y temperatura a que están sometidas las muestras. Tal es el caso del pH, Eh, oxígeno disuelto y temperatura. Además, se han determinado las principales especies nitrogenadas disueltas en las aguas subterráneas: nitratos, nitritos y amonio y, la conductividad, con el fin de poder detectar posibles precipitaciones o disoluciones en las muestras, durante el período de tiempo comprendido entre su recogida y el análisis en laboratorio.

Los análisis realizados en campo (anexo 8) incluyen métodos potenciométricos y colorimétricos. Las concentraciones medidas para las especies nitrogenadas son aproximadas, ya que se basan en tests poco precisos.

Los valores de pH medidos "in situ" oscilan entre 6.7 y 7.8 en la parcela E-1, entre 6.9 y 7.6 en la E-2 y entre 6.8 y 7.5 en la E-3, y en todos los casos se encuentran próximos a la neutralidad, aunque con un rango algo más amplio para la primera parcela.

El Eh (referido al electrodo de referencia de Ag/AgCl varía entre 65 y 302 mV en la E-1, entre 75 y 247 mV en la E-2 y entre 141 y 256 mV en la E-3. El potencial redox tiene un comportamiento similar en todos los lisímetros, con unos valores mínimos en el mes de octubre en E-1 y E-3, y en noviembre en E-2. El tomamuestras situado a 1.5 m de profundidad en E-1 y E-2 es el que presenta los valores más bajos a través del tiempo.

Hay que destacar el comportamiento de los piezómetros respecto al Eh, donde se acusan las mayores oscilaciones, alcanzando valores mínimos en los meses de septiembre y octubre.

En cuanto al oxígeno disuelto, el rango de variación observado va desde 0.6 a 4.7 mg/l en la primera parcela, desde 1.0 a 3.8 mg/l en la segunda y desde 0.6 a 12.2 mg/l en la tercera (medio más oxigenado). Las concentraciones más elevadas se registran en E-3, durante el muestreo de diciembre, alcanzando el máximo en el piezómetro P3' (12.2 mg/l de O<sub>2</sub> disuelto).

Las temperaturas medidas oscilan entre 1.8 y 25°C para E-1, entre 10.4 y 24.4°C para E-2 y entre 3.5 y 23.9°C para E-3, y están influidas por las temperaturas registradas en superficie, especialmente en los lisímetros someros, como cabía esperar.

Para el caso de las especies nitrogenadas se observan las mayores concentraciones de nitratos en la segunda parcela; son superiores a 500 mg/l en el mes de diciembre.

### **5.3.2 . RESULTADOS ANALITICOS**

Las muestras de agua, procedentes de lisímetros y piezómetros, se analizaron en el laboratorio de GEO-AGUA y posteriormente en el del IRYDA, para contrastar resultados. En el primero de ellos apenas transcurrían unas horas desde el muestreo hasta el inicio del análisis. Una vez concluido éste, se enviaban las muestras de las que quedaban aún volumen al segundo laboratorio. En general se observa buena coincidencia en los resultados, si bien en ciertos

constituyentes existe una variación significativa (pH, bicarbonatos, calcio y magnesio) que puede explicarse considerando precipitaciones de carbonatos que se han podido producir durante el almacenamiento de las muestras, especialmente en los meses de verano.

Los resultados analíticos obtenidos en ambos laboratorios se adjuntan en el anexo 8 de este informe.

Las determinaciones realizadas incluyen la medida de los siguiente parámetros: conductividad, pH,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ , en ambos laboratorios y además,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{Li}^+$  sólo en GEO-AGUA.

Los métodos analíticos utilizados para el análisis de los distintos parámetros son:

#### GEO-AGUA

Potenciometría:	pH, $\text{NH}_4^+$ , $\text{NO}_3^-$ (*), conductividad
Colorimetría:	$\text{SO}_4^{2-}$ , $\text{NO}_2^-$ , $\text{NO}_3^-$ (**)
Titrationes:	$\text{Cl}^-$ , $\text{HCO}_3^-$ , $\text{CO}_3^{2-}$
Absorción:	$\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$
Emisión:	$\text{Li}^+$ , $\text{Na}^+$ , $\text{K}^+$

(\*) hasta Octubre inclusive

(\*\*) a partir de Noviembre

#### IRYDA

Potenciometría:	pH, $\text{NO}_3^-$ , $\text{Cl}^-$ , conductividad, $\text{HCO}_3^-$ , $\text{CO}_3^{2-}$
Turbidimetría:	$\text{SO}_4^{2-}$
Complexometría:	$\text{Ca}^{2+}$ (***), $\text{Mg}^{2+}$ (***), (por diferencia entre dureza y calcio)
Absorción:	$\text{Ca}^{2+}$ (***), $\text{Mg}^{2+}$ (***), B
Fotometría de llama:	$\text{K}^+$ y $\text{Na}^+$

(\*\*\*) Indistintamente

En las figuras 5.1. a 5.10. se comparan los resultados obtenidos en los dos laboratorios para las determinaciones realizadas. La figura 5.1. relaciona los valores de conductividad, y refleja una buena correlación ( $r = 0.9941$ ), salvo en un grupo de muestras con conductividades elevadas, superior a  $17000 \mu\text{S}/\text{cm}$ , que proceden del piezómetro P1. En los piezómetros la extracción del agua se lleva a cabo mediante tomamuestras clásicos, después de introducirlos

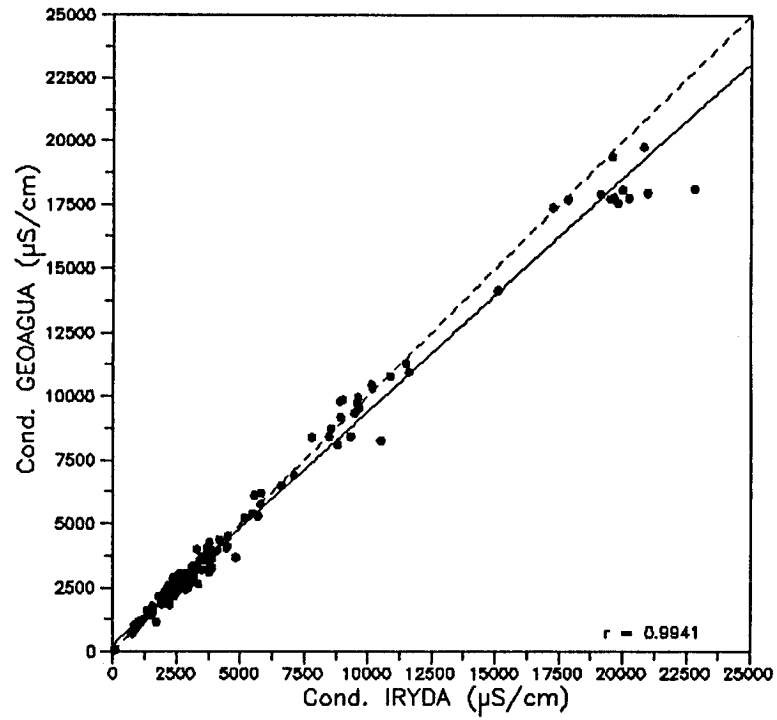


Fig. 5.1. Relación Conductividad "GEOAGUA" - Conductividad "IRYDA".

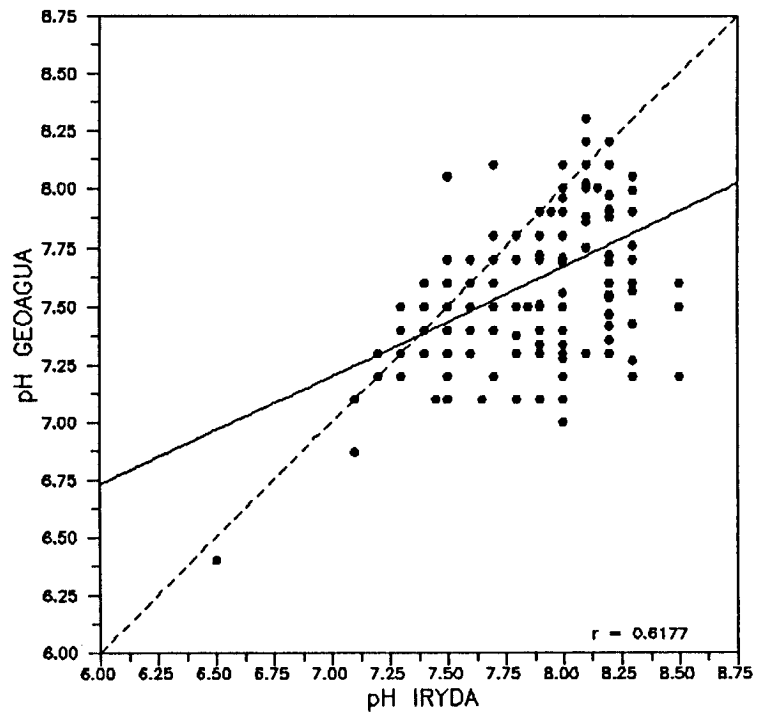


Fig. 5.2. Relación pH "GEOAGUA"- pH "IRYDA".



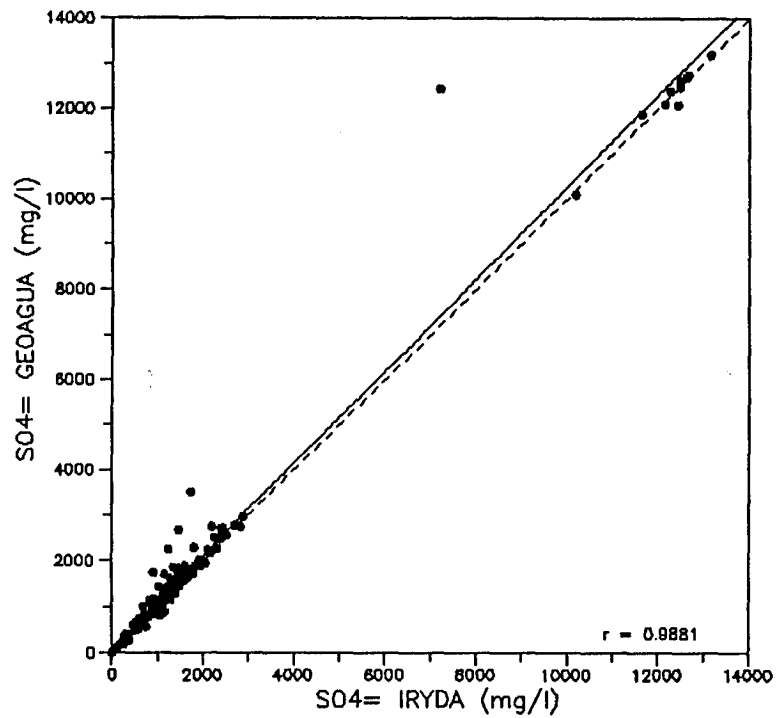


Fig.5.4. Relación Sulfatos "GEOAGUA" - Sulfatos "IRYDA".

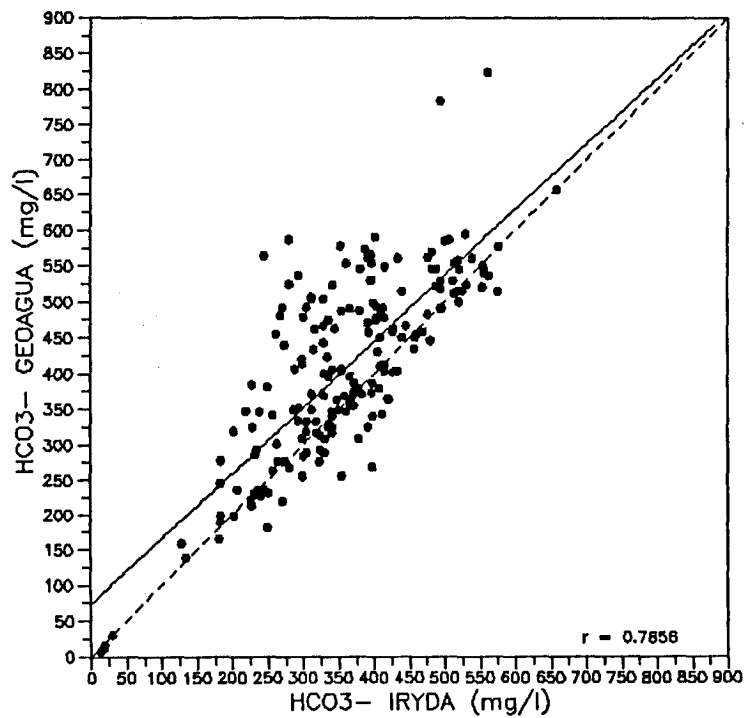


Fig.5.3. Relación bicarbonatos "GEOAGUA" - bicarbonatos "IRYDA".

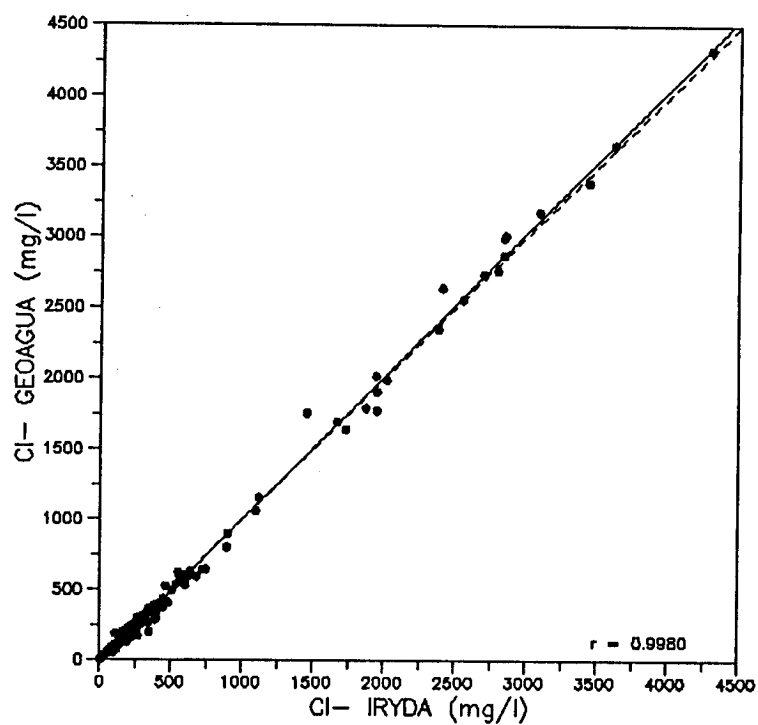


Fig. 5.5. Relación cloruros "GEOAGUA" - cloruros "IRYDA".

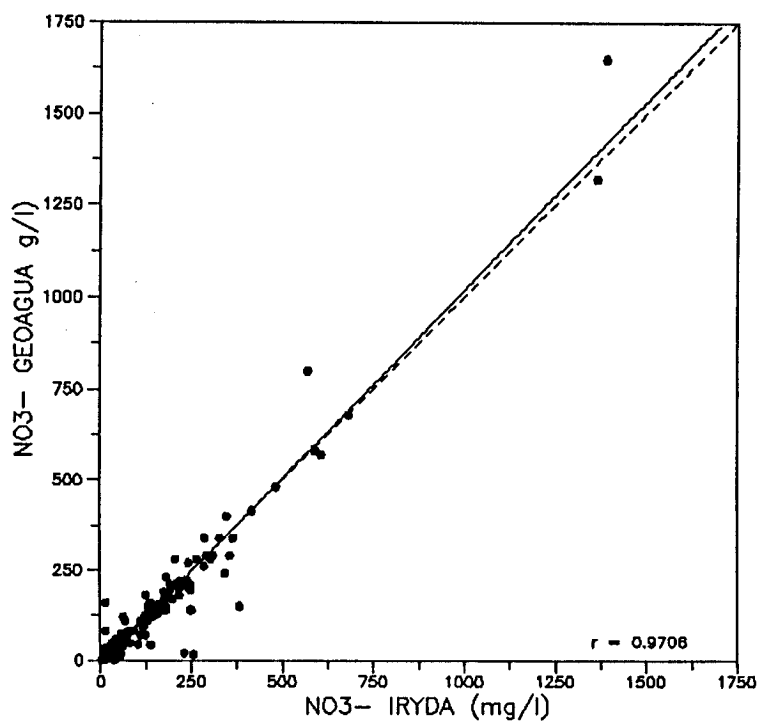


Fig. 5.6. Relación nitratos "GEOAGUA" - nitratos "IRYDA".

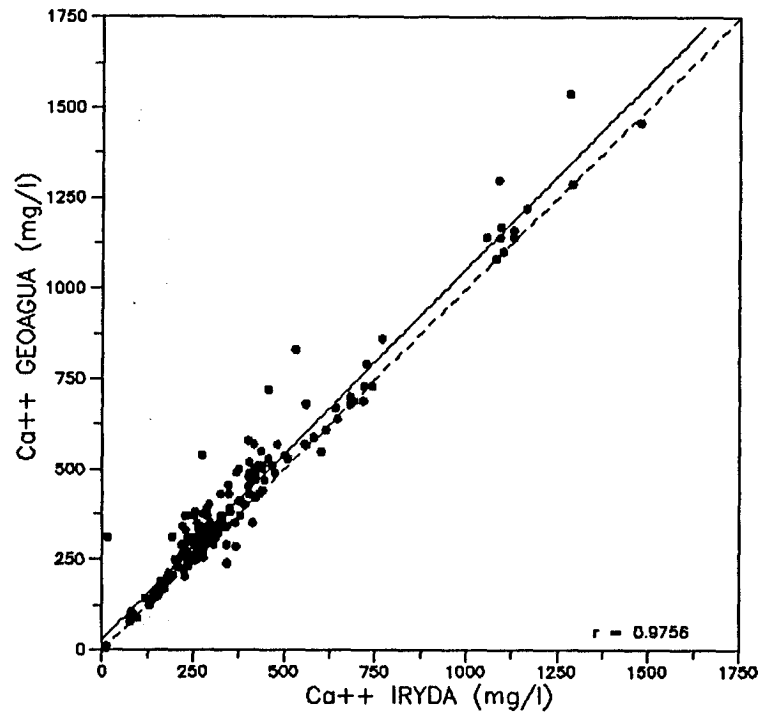


Fig. 5.7. Relación Calcio "GEOAGUA" - Calcio "IRYDA".

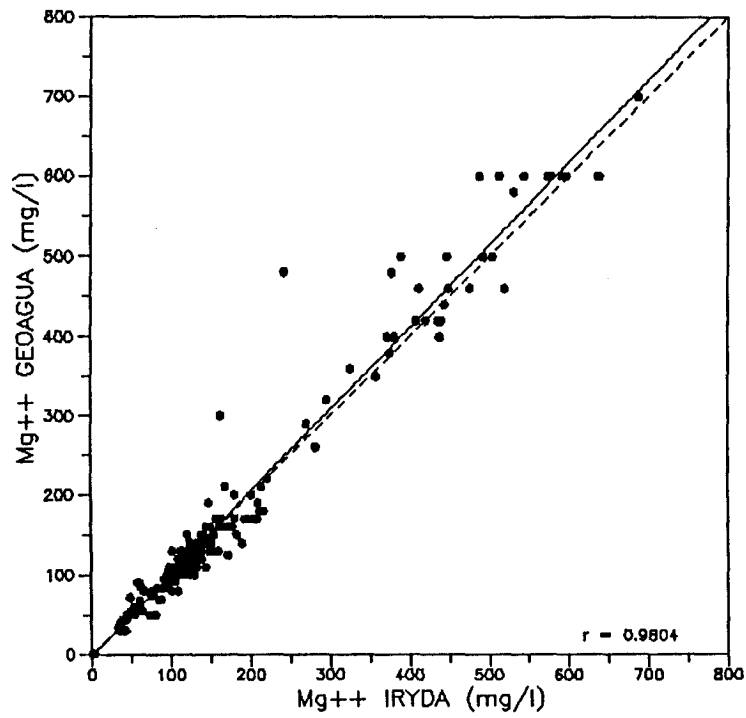


Fig. 5.8. Relación magnesio "GEOAGUA" - magnesio "IRYDA".

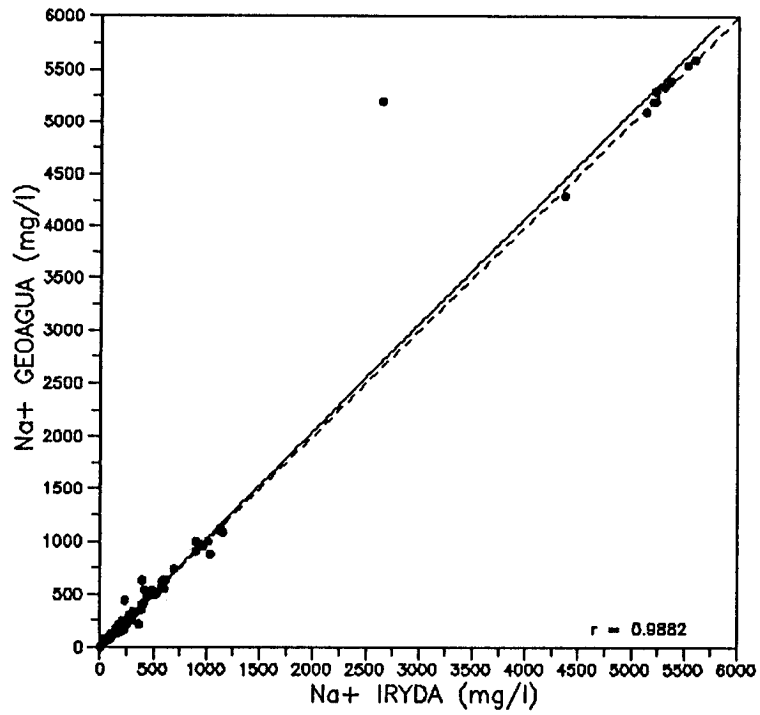


Fig. 5.9. Relación sodio "GEOAGUA" - sodio "IRYDA".

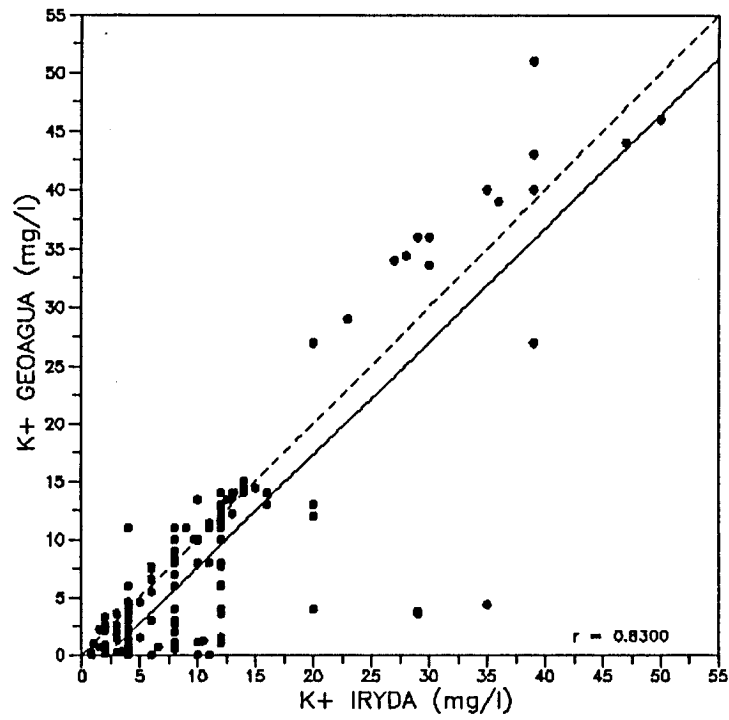
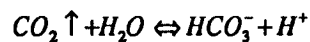


Fig. 5.10. Relación potasio "GEOAGUA" - potasio "IRYDA".

repetidas veces hasta obtener un volúmen próximo a un litro. Por este procedimiento se arrastran gran cantidad de partículas en suspensión que son susceptibles de disolverse con el tiempo. Esta puede ser la causa de las diferencias observadas.

En la figura 5.2. los valores de pH presentan una gran dispersión. Se observa la tendencia a formar una cuadrícula como consecuencia de la escala utilizada y la precisión con que se expresan los datos (redondeo de cifras). A pesar de la nube obtenida, se puede apreciar la tendencia de aumento de pH con el tiempo (en IRYDA los valores son más altos), que puede explicarse atendiendo a posibles desgasificaciones que también afectan a los equilibrios carbonatados:



La disminución de la concentración de bicarbonatos (fig.5.3.) y de calcio (fig. 5.7.) apoya la hipótesis de formación de calcita en el medio, que se describe en el capítulo 2.

En lo que respecta a los sulfatos (fig. 5.4.), la tendencia observada es semejante, se produce un descenso en los valores de este ion que puede responder a procesos de precipitación de sulfatos. En el caso del piezómetro P1, donde se llegó al sustrato de margas, hay condiciones de saturación en yeso, que apoyan la hipótesis anterior.

En cuanto a las determinaciones de cloruros, sodio y nitratos (fig. 5.5., 5.9. y 5.6.), existe una buena relación entre los dos laboratorios con coeficientes de correlación respectivos de 0.9980, 0.9882 y 0.9706.

Los datos que presentan una mayor dispersión son los de magnesio (fig. 5.8.) y potasio (fig. 5.10.), donde los resultados aparecen formando alineaciones en la horizontal para el magnesio, o en la vertical para el potasio. En estos casos, la variación se debe a los métodos analíticos empleados y a la precisión con que se expresan las concentraciones de estos iones.

### **5.3.3 . ELECCION DE LA BASE DE DATOS**

De acuerdo con las comparaciones efectuadas en el apartado anterior y, puesto que en general presentan una buena correlación, en principio podría utilizarse tanto una base de datos como otra. No obstante, la elección de los datos a estudiar se ha llevado a cabo siguiendo los criterios siguientes:

- el tiempo transcurrido entre muestreo y análisis ha de ser mínimo.
- el volumen de datos ha de ser el máximo posible.

Con el primero, se pretende evitar las alteraciones producidas en las muestras durante su almacenamiento, y con el segundo, disponer del mayor número posible de resultados para así poder realizar una interpretación más completa. Así pues, y de acuerdo con el Director del Proyecto, se ha optado por utilizar la base de datos de GEO-AGUA ya que cumple ambos requisitos al ser el primer laboratorio en analizar las muestras de agua recogidas (menor lapso de tiempo y mayor número de determinaciones, ya que como consecuencia del volumen reducido de agua de que se dispone, después de realizar los análisis en GEO-AGUA, no quedaba muestra suficiente para poder enviarla al IRYDA).

En los apartados y gráficos que a continuación se estudian, los valores reflejados proceden, por tanto, del laboratorio de GEO-AGUA.

## **5.4 . COMPORTAMIENTO DE LOS LISIMETROS**

Como ya se ha mencionado en el apartado 5.3., las muestras de agua de la zona no saturada se han recogido por medio de lisímetros de succión.

Durante el año de muestreo, se han tomado datos sobre los volúmenes de agua recogidos, así como de las presiones residuales después del período de succión, con el fin de evaluar su eficiencia, así como las variables que determinan su comportamiento.

### **5.4.1 . RELACION VOLUMEN DE MUESTRA-PRESIONES RESIDUALES**

En la figura 5.11. se ha representado los volúmenes de agua frente a las presiones residuales que quedaban en el momento del muestreo.

Hay que tener en cuenta que la presión inicial que se aplicaba a los lisímetros era de -0.7 bares, y que la máxima capacidad de los lisímetros es de 1 l. Las presiones residuales son en realidad de signo negativo (de succión).

En principio cabe esperar que las muestras se sitúen guardando una relación más o menos lineal de aumento de volumen con la progresiva disminución de presión. En la figura citada se observa que la mayoría de las muestras se encuentran en esta tendencia o en valores inferiores de volumen (triángulo inferior del diagrama).

Se ha comprobado en ensayos de laboratorio que una vez llenos, los lisímetros pueden perder el volumen que antes habían succionado (incluso en 1 día). De hecho, en la bibliografía se menciona un tipo especial de lisímetros que evitan este fenómeno (lisímetros de vacío-alta presión).

Es posible entonces considerar que ésta es la causa del comportamiento observado en las parcelas de experimentación. La parcela E-3 parece ser la que más lo acusa, y debido a su litología (de mayor porcentaje en arenas) puede indicar que la permeabilidad del terreno es un factor importante en el funcionamiento de los lisímetros.

Sería conveniente comprobar este hecho reduciendo el período de muestreo en esta parcela.

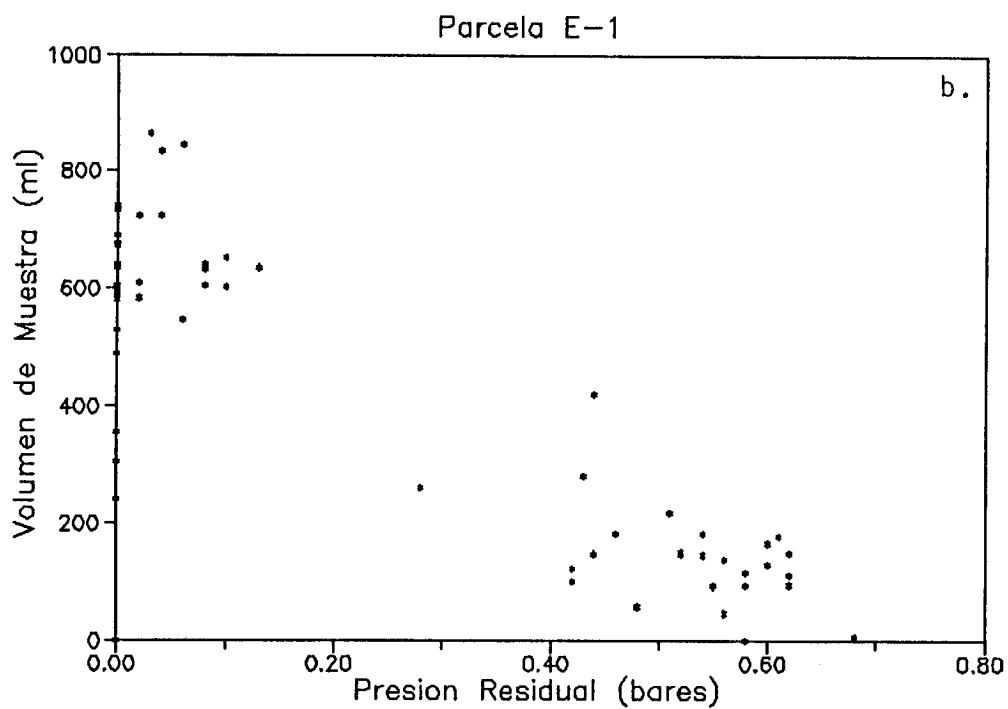
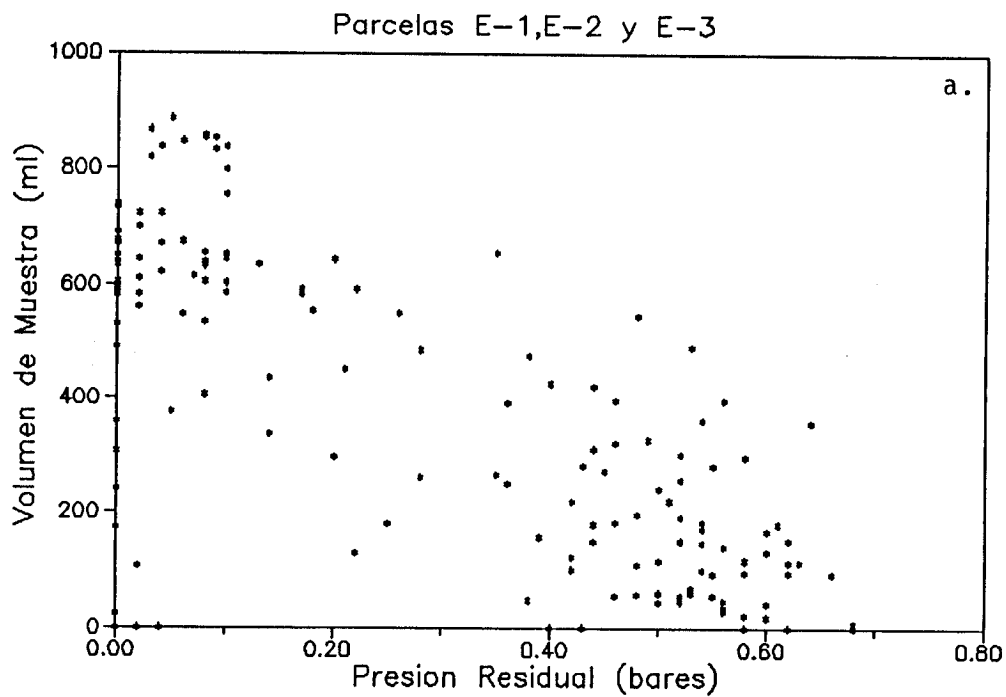


Fig. 5.11. Representación volúmenes de muestra frente a presiones residuales para a. las muestras de todas las parcelas, b. las de E-1, c. de E-2 y d. E-3.



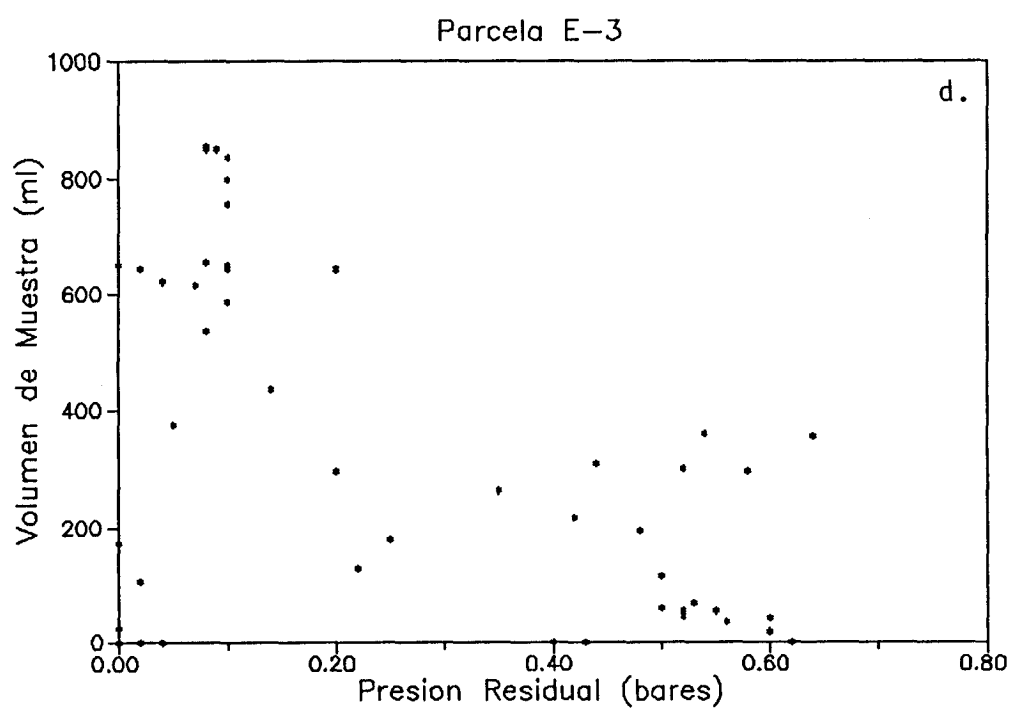
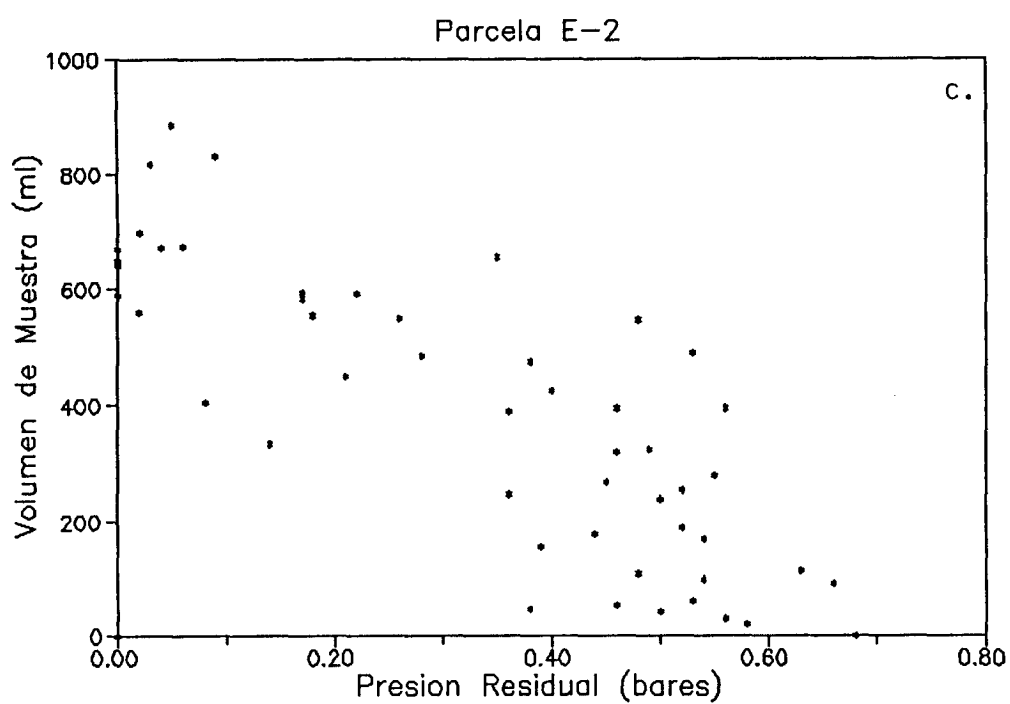


Fig. 5.11. Representación volúmenes de muestra frente a presiones residuales para a. las muestras de todas las parcelas, b. las de E-1, c. de E-2 y d. E-3.

#### 5.4.2 . EFECTO DEL POTENCIAL DE SUCCION

Con objeto de estimar la influencia de esta variable en el funcionamiento de los lisímetros se han realizado las figuras 5.12. a 5.19., en las que se representan las succiones matriciales de los tensiómetros junto con los valores de presión residual obtenidos en los lisímetros de profundidad semejante.

Para su interpretación se debe tener en cuenta de nuevo que la presión inicial de los lisímetros es de -0.7 bares.

Analizando estos gráficos se pueden señalar los siguientes puntos:

- \* La presión dentro de los lisímetros no evoluciona hasta llegar al equilibrio con el terreno, sino que en algunos casos continua hasta valores de succión 0. Dejando aparte las consideraciones físicas sobre la inercia del proceso de absorción y la pérdida de vacío por los tubos que llegan al exterior, el hecho más importante en nuestro estudio, es que, una vez sobrepasado el estadio de equilibrio, el fenómeno puede ser inverso (succión de agua por el terreno).
- \* Como cabía esperar las mayores variaciones en succión y presiones residuales se registran en el nivel más somero, a 0.3 m (figuras 5.12., 5.15. y 5.18.). A esta misma profundidad, durante los meses de estiaje, y coincidiendo con las succiones de terreno más pronunciadas, se registran presiones residuales de 0. Es posible que en este período las altas succiones matriciales impidieran el proceso de absorción, descargando poco a poco la presión de los lisímetros.
- \* A 1.5 m (figuras 5.13. y 5.16.) se observa que los valores de presión residual se mantienen superiores a los de succión del terreno. Esto es, no se había llegado al equilibrio entre las presiones exterior e interior, y el lisímetro aún continuaba en lenta succión cuando se extrajo la muestra.

Como se verá más tarde, a esta profundidad se obtuvo muestra excepto en los meses de estiaje, aunque no fueron volúmenes altos.

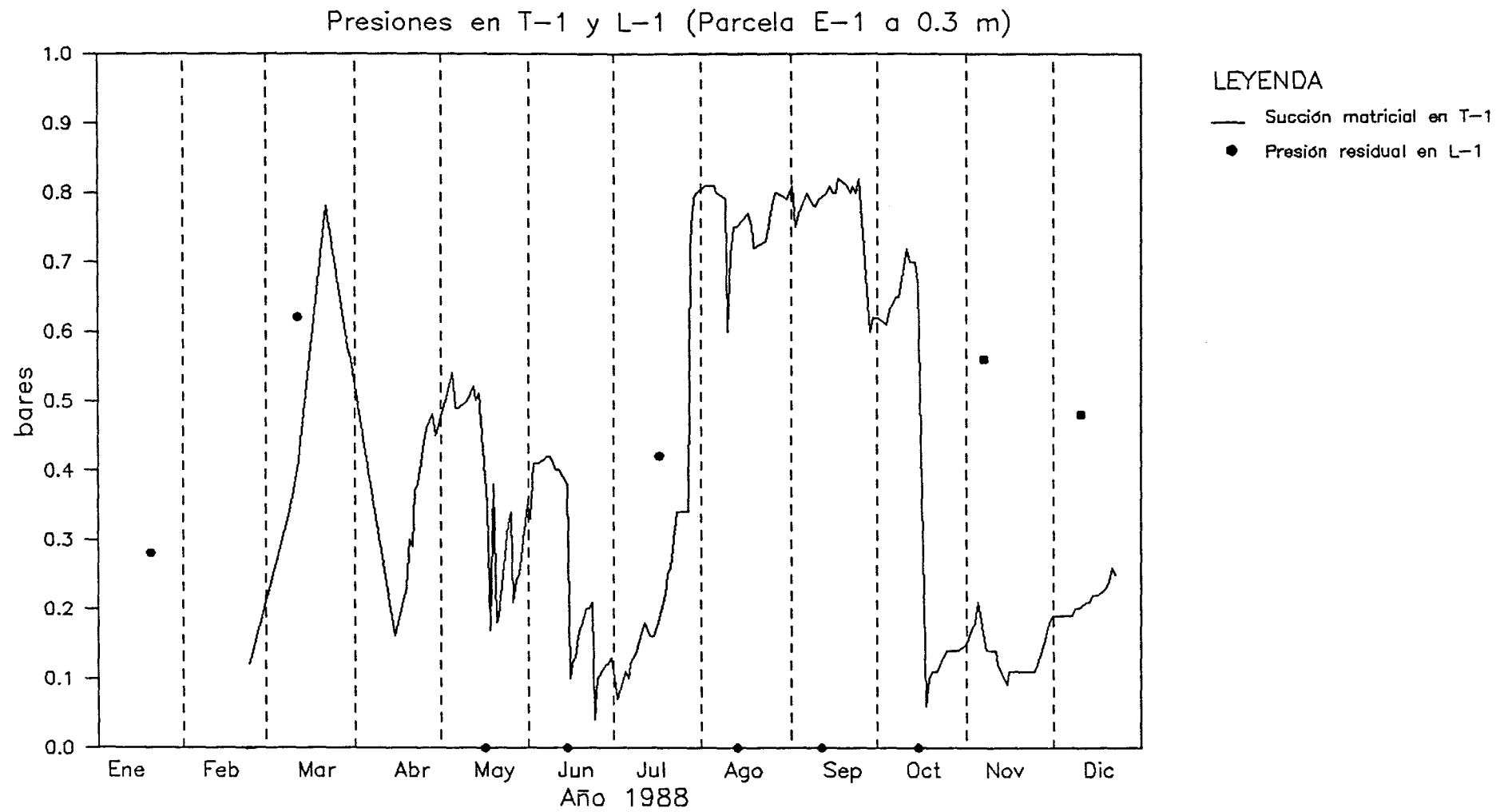


Fig. 5.12. Evolución en el tiempo de las presiones residuales de L-1 y las succiones de T-1.

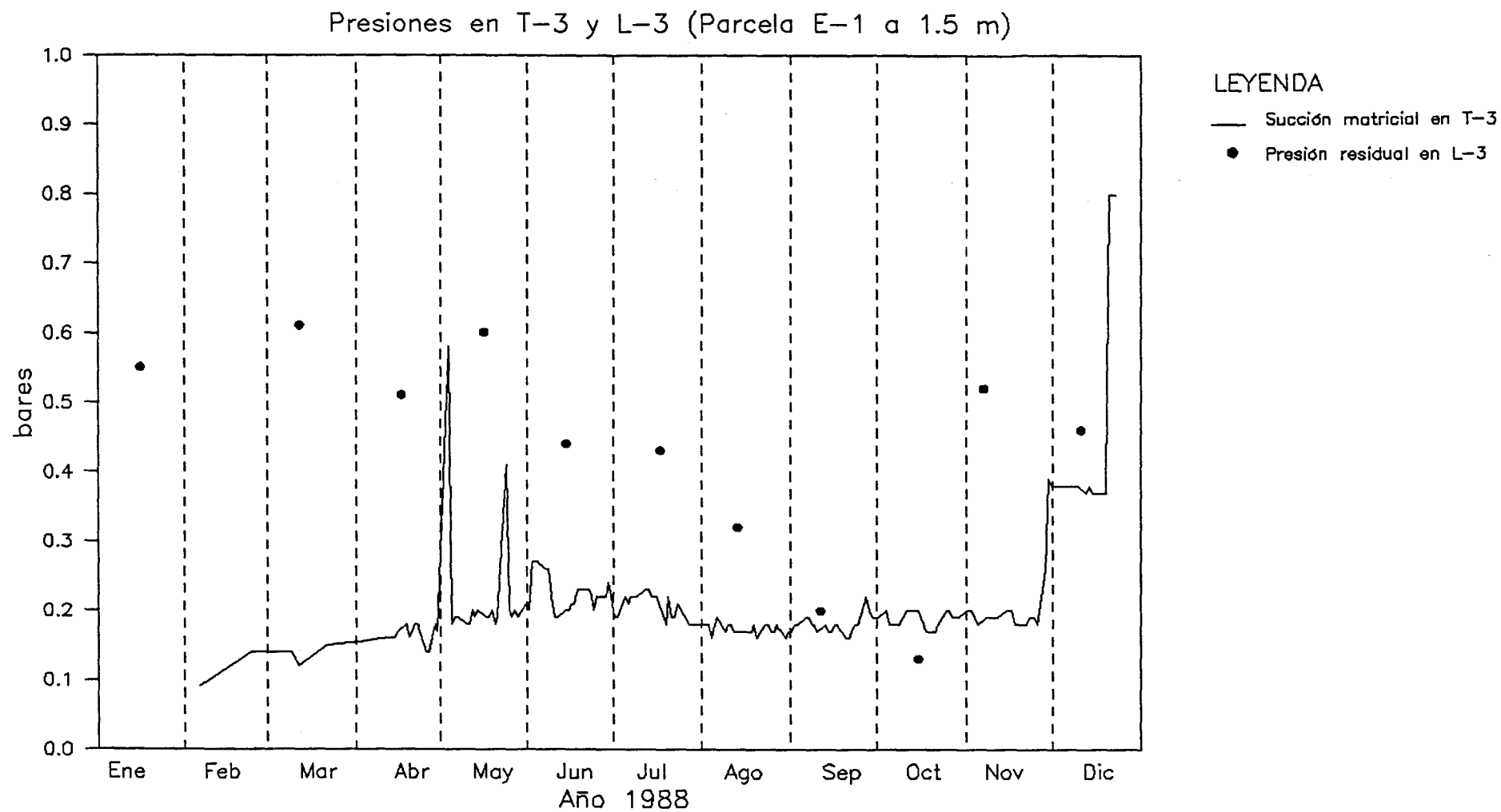


Fig. 5.13. Evolución en el tiempo de las presiones residuales de L-3 y las succiones de T-3.

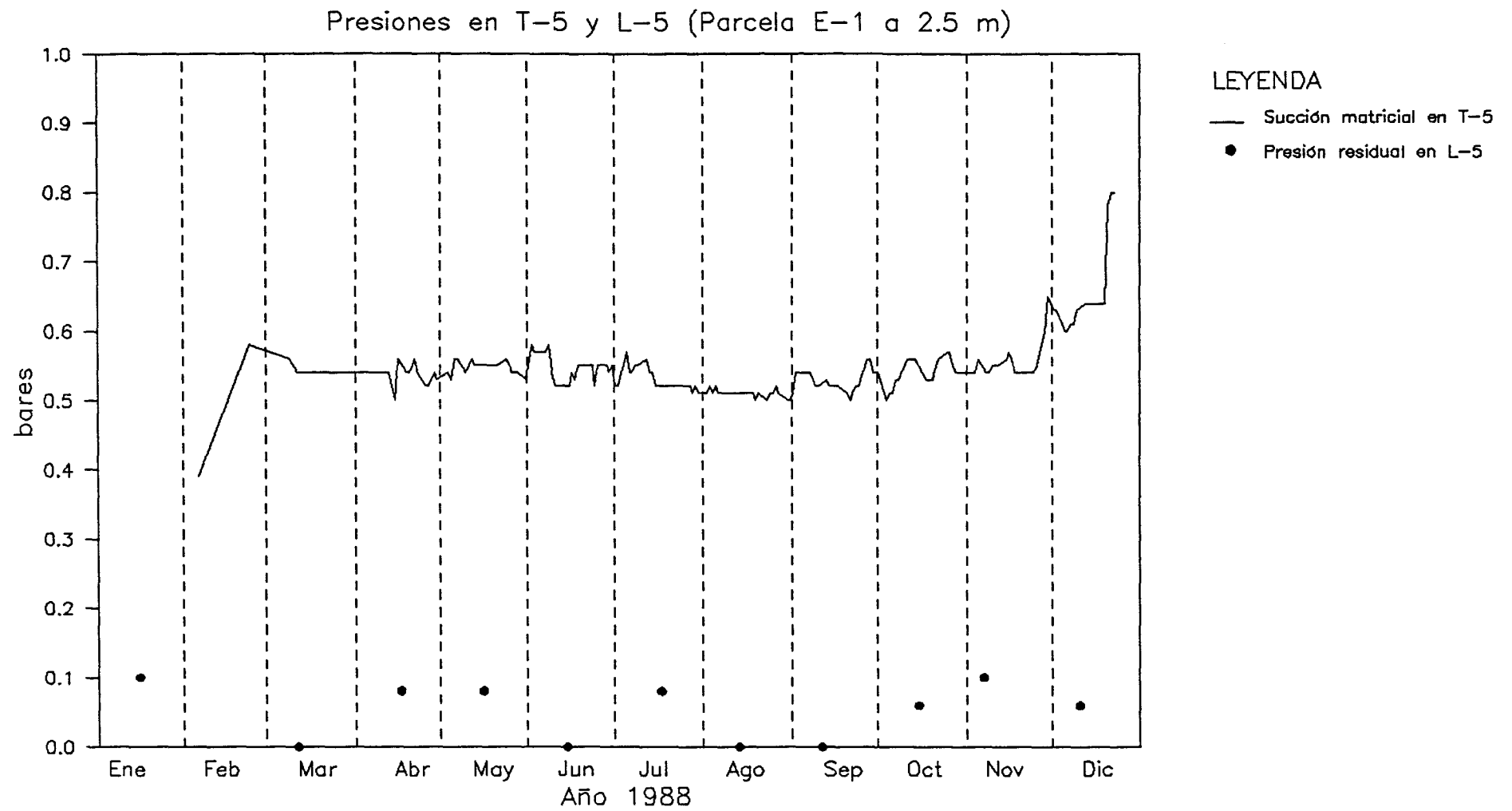


Fig. 5.14. Evolución en el tiempo de las presiones residuales de L-5 y las succiones de T-5.

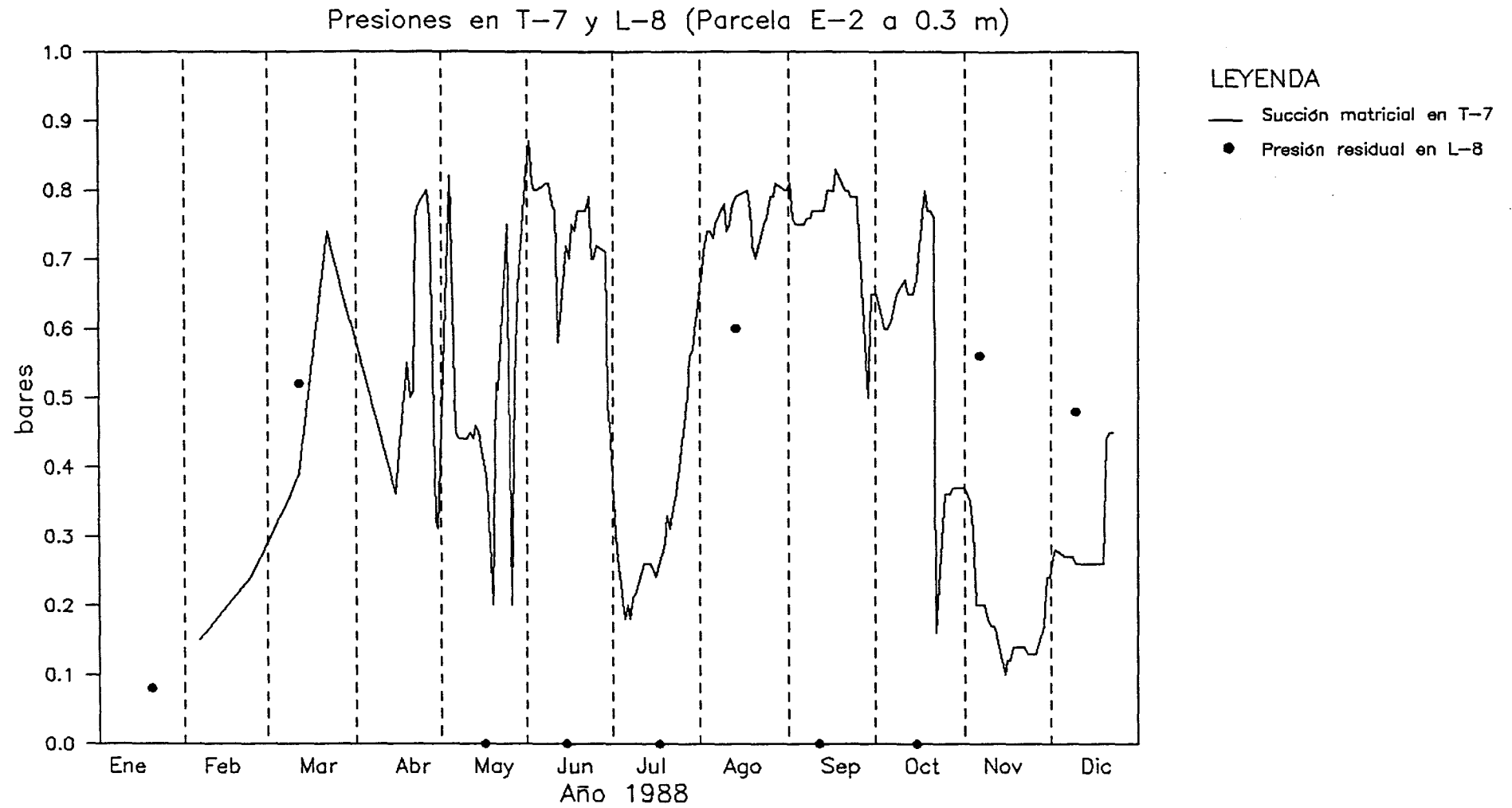


Fig. 5.15. Evolución en el tiempo de las presiones residuales de L-8 y las succiones de T-7.

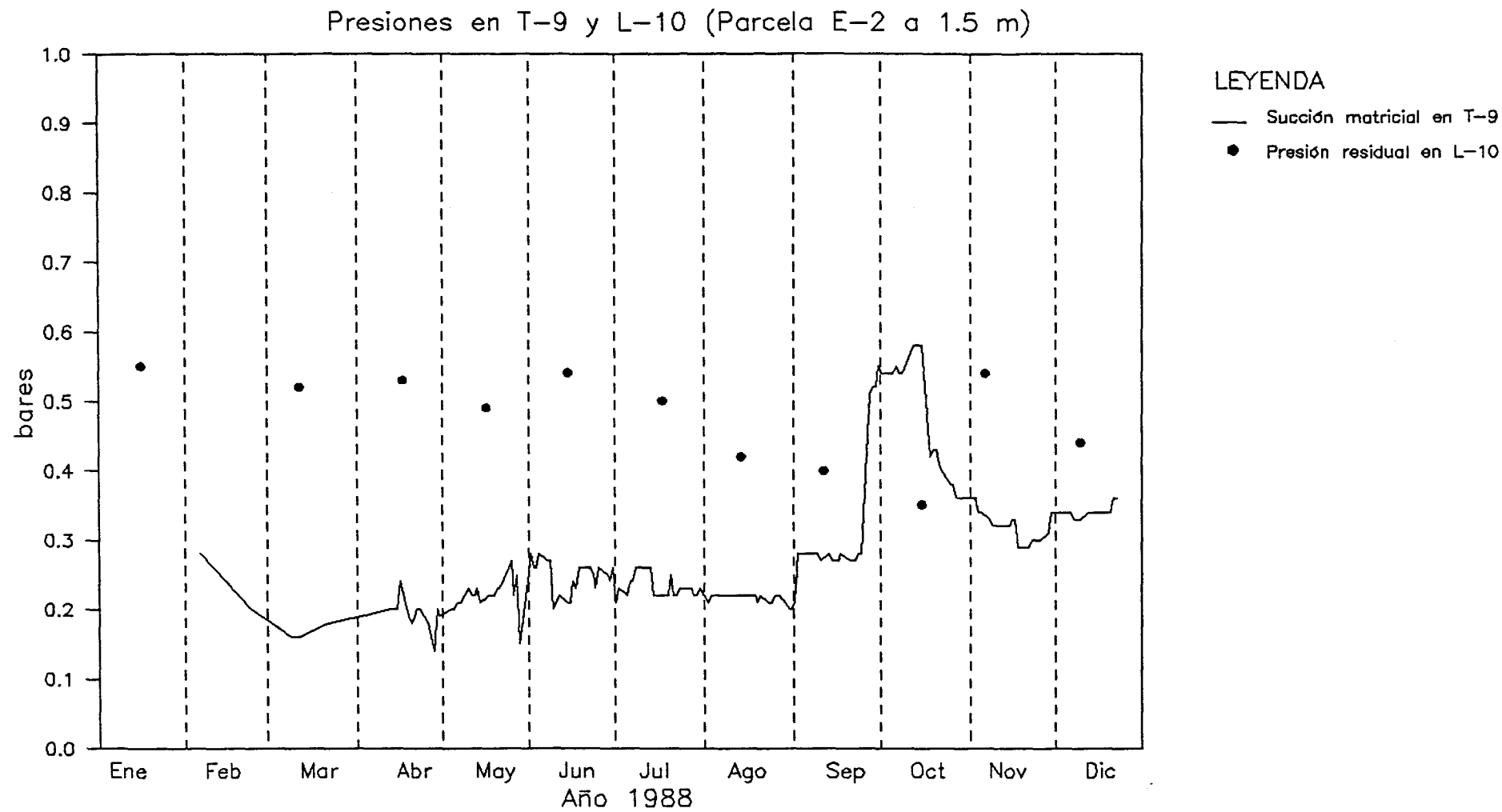


Fig. 5.16. Evolución en el tiempo de las presiones residuales de L-10 y las succiones de T-9.

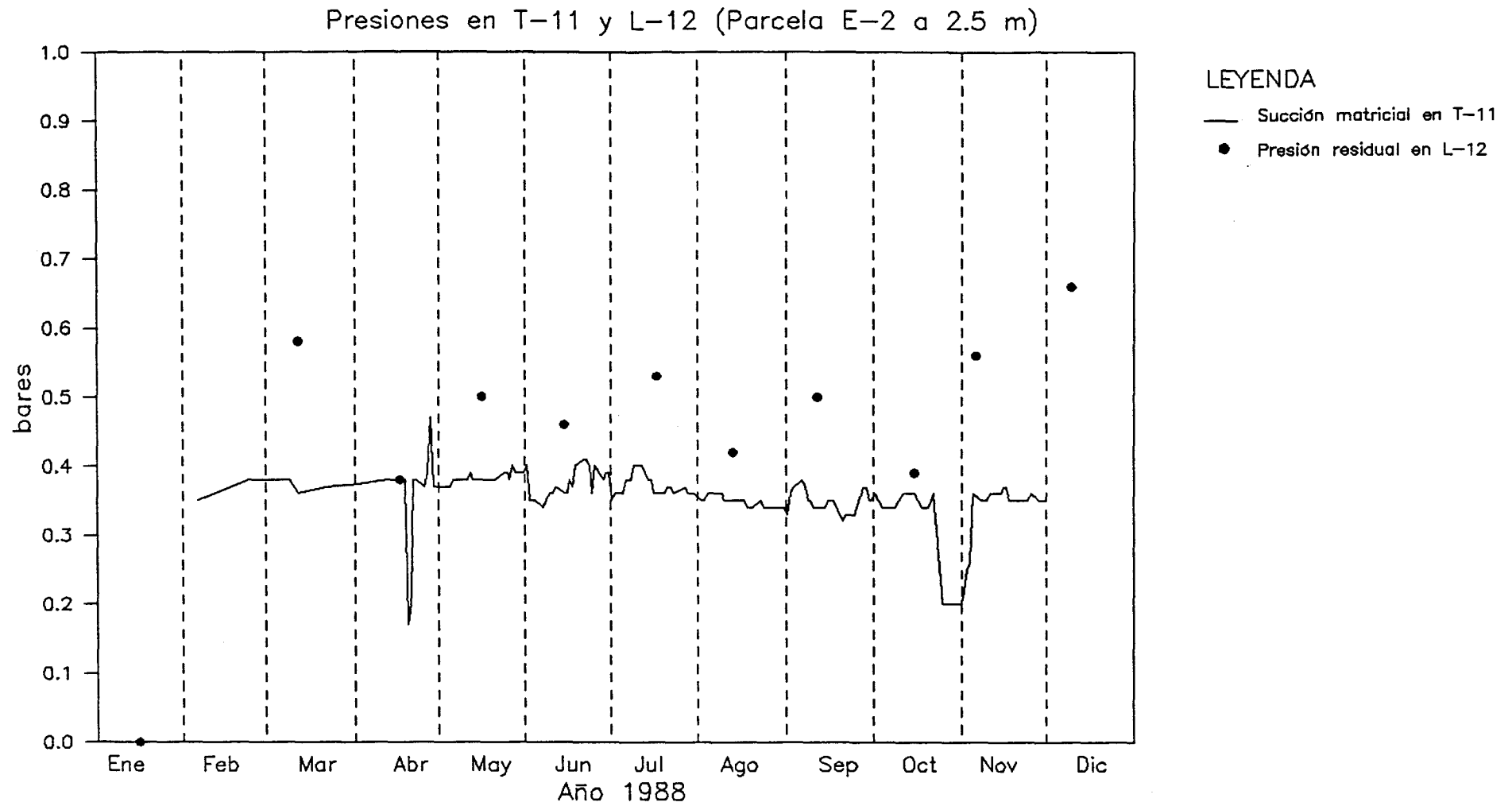


Fig. 5.17. Evolución en el tiempo de las presiones residuales de L-12 y las succiones de T-11.



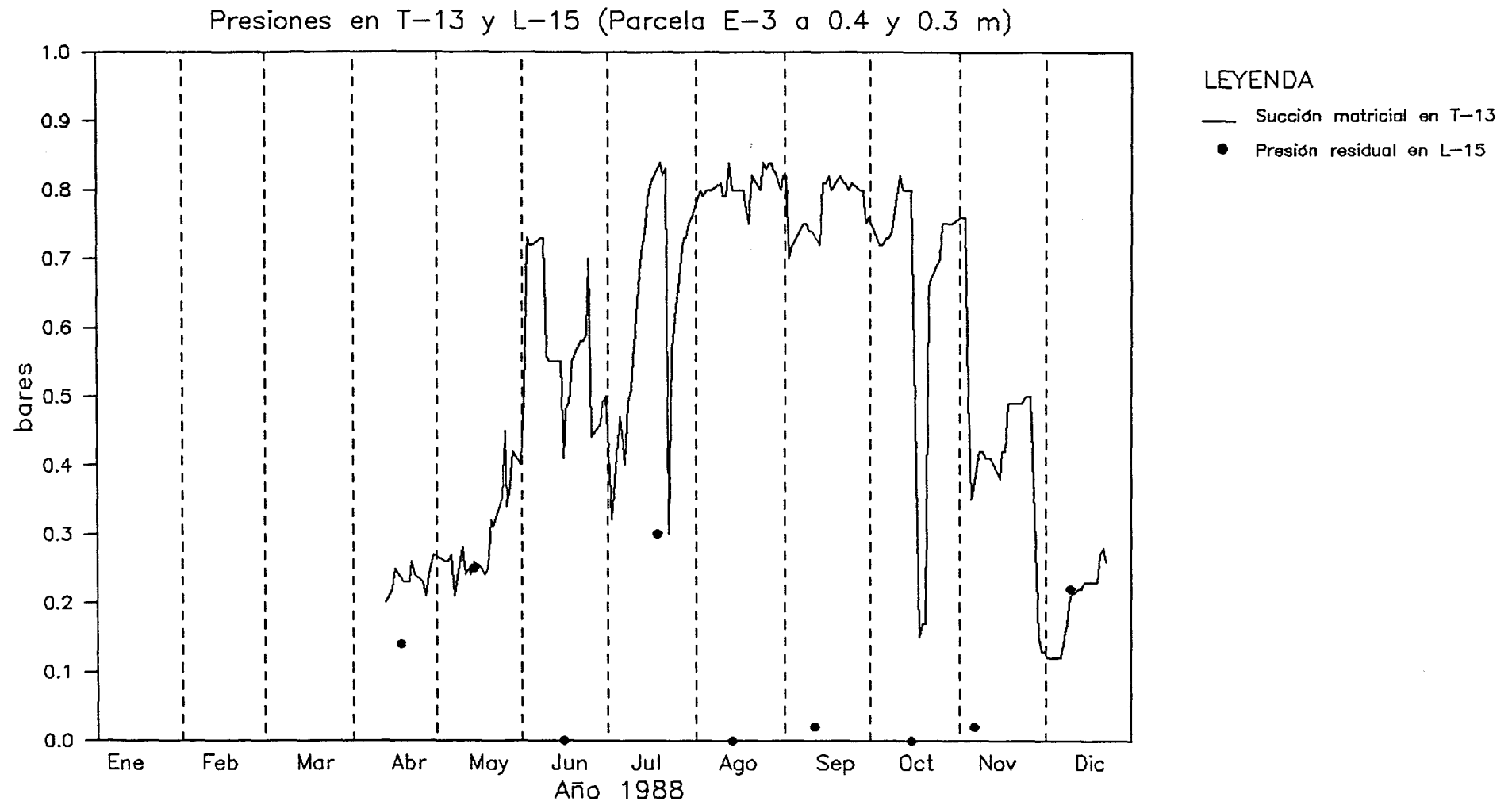


Fig. 5.18. Evolución en el tiempo de las presiones residuales de L-15 y las succiones de T-13.

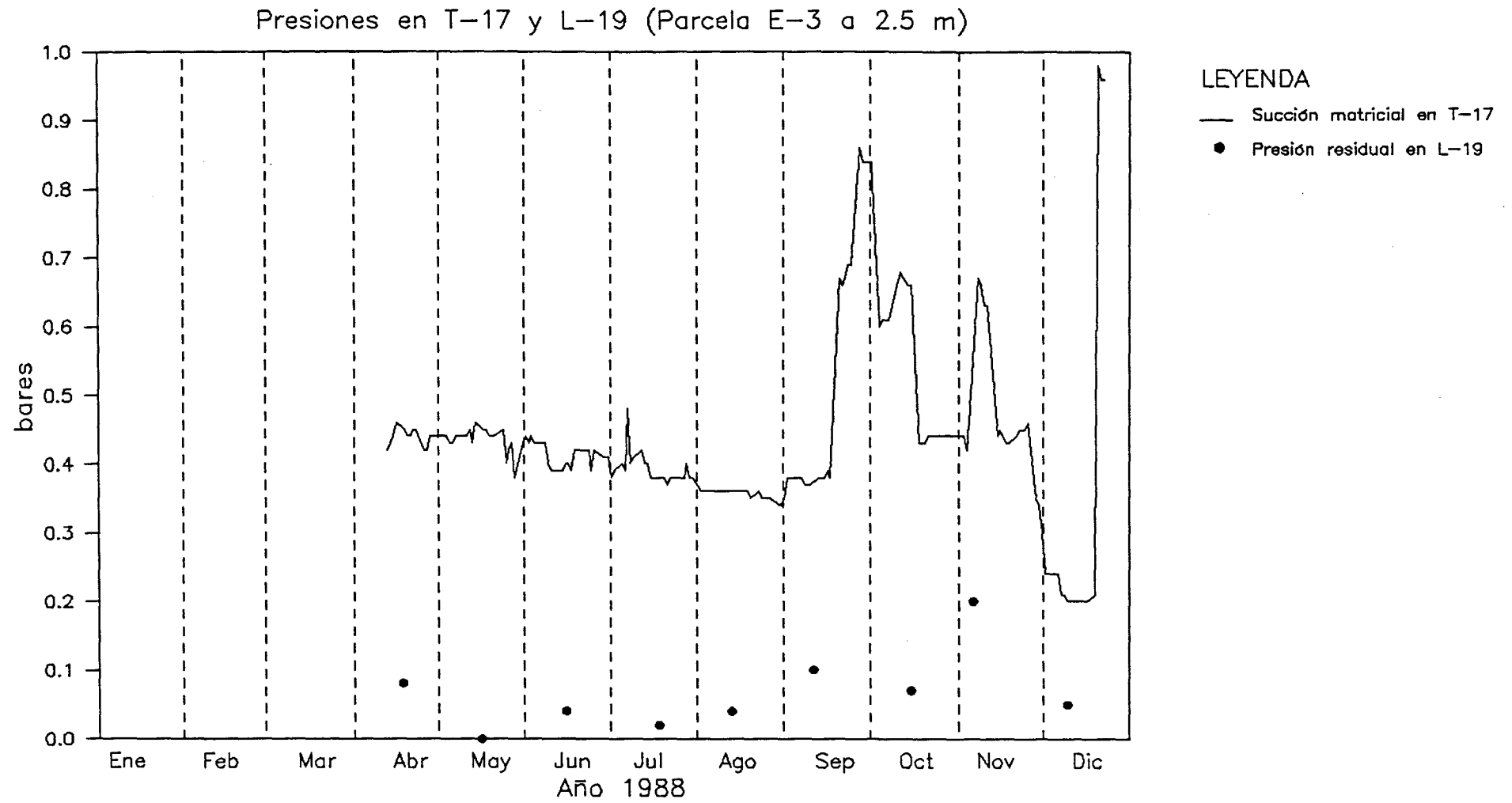


Fig. 5.19. Evolución en el tiempo de las presiones residuales de L-17 y las succiones de T-15.

- \* Los lisímetros situados a 2.5 m presentan para la parcela E-1 y la E-3 valores de presión residual muy bajos, y además muy inferiores a los valores de succión del terreno (figuras 5.14. y 5.19.). El proceso de absorción se realiza más rápidamente que a 1.5 m, y por los altos volúmenes recogidos, no ha habido tiempo para su descarga.

En el caso de E-2 (figura 5.17.), el lisímetro L-12 parece tener más problemas en el proceso de succión, como también se verá más adelante, parece existir algún impedimento para su correcto funcionamiento (obturación de poros, etc.).

### **5.4.3 . EFECTO DE LA COMPONENTE DE RECARGA**

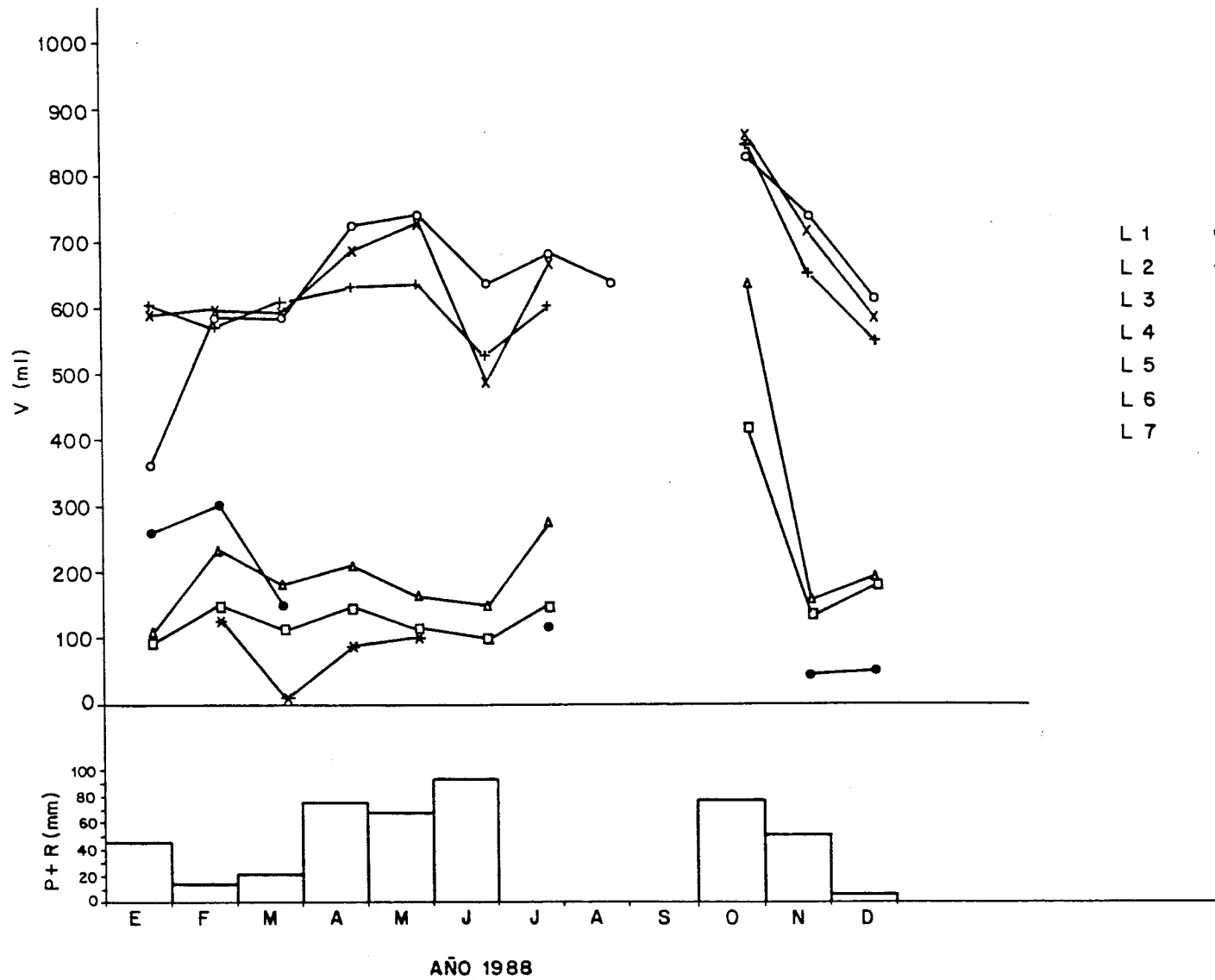
Con el fin de poder visualizar el efecto de las precipitaciones y riegos sobre los volúmenes de agua recogidos, se han dibujado las figuras 5.20., 5.21. y 5.22. En ellas se ha representado la evolución de los volúmenes recogidos en los diferentes lisímetros frente al tiempo, así como los totales mensuales de lluvia (P) más regadíos (R). A partir de las mismas se pueden hacer algunas observaciones de interés.

En primer lugar hay una mala correlación con las precipitaciones, en especial en la parcela E-3, donde apenas existe. Las parcelas E-1 y E-2 registran máximos en octubre después de las lluvias del final del estiaje. En cambio, las precipitaciones de primavera no se manifiestan en un aumento considerable de volúmen.

La parcela E-3 parece no acusar estos episodios meteorológicos más húmedos. Sin embargo, un estudio más detallado indica que cuando no se encontró volúmen en octubre coincidió con una presión residual 0, es decir el lisímetro debió primero absorber agua, y luego la perdió. (Habría que aumentar la frecuencia de muestreo en E-3).

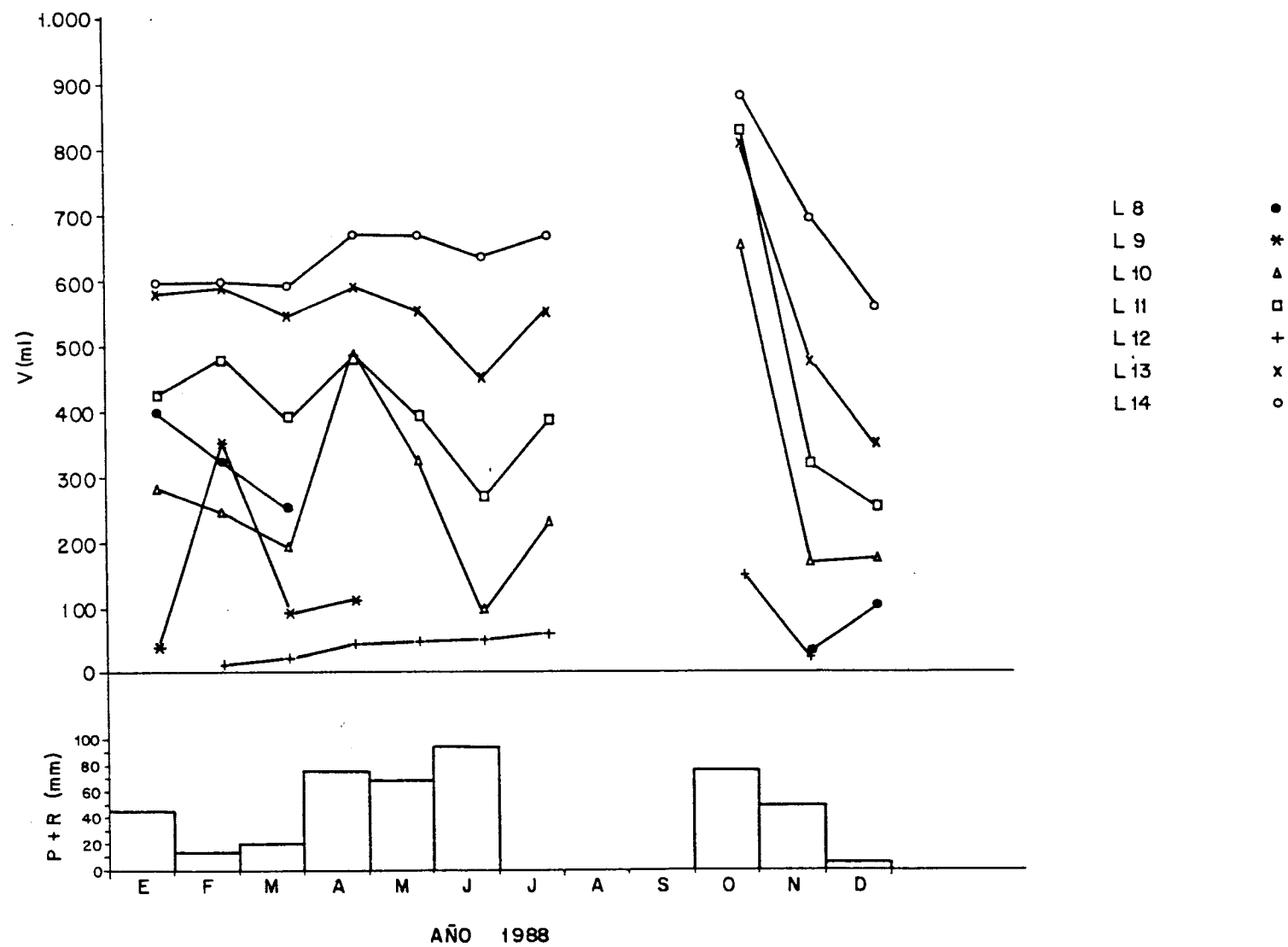
Es común para todas las parcelas los bajos volúmenes obtenidos en verano (agosto y septiembre), que incluso llegan a afectar a los lisímetros más profundos (L07, muy cercano a los niveles piezométricos medidos). En la parcela E-3, los cuatro lisímetros más profundos (a más de 2 m) obtienen cantidades considerables en septiembre, y en la misma parcela, el L16 obtuvo un buen volumen durante el mes de agosto.

Fig. 5.20. Evolución temporal de los volúmenes de agua recogidos en los lisímetros de la parcela E-1, así como de las precipitaciones -P- y riegos -R- totales mensuales.



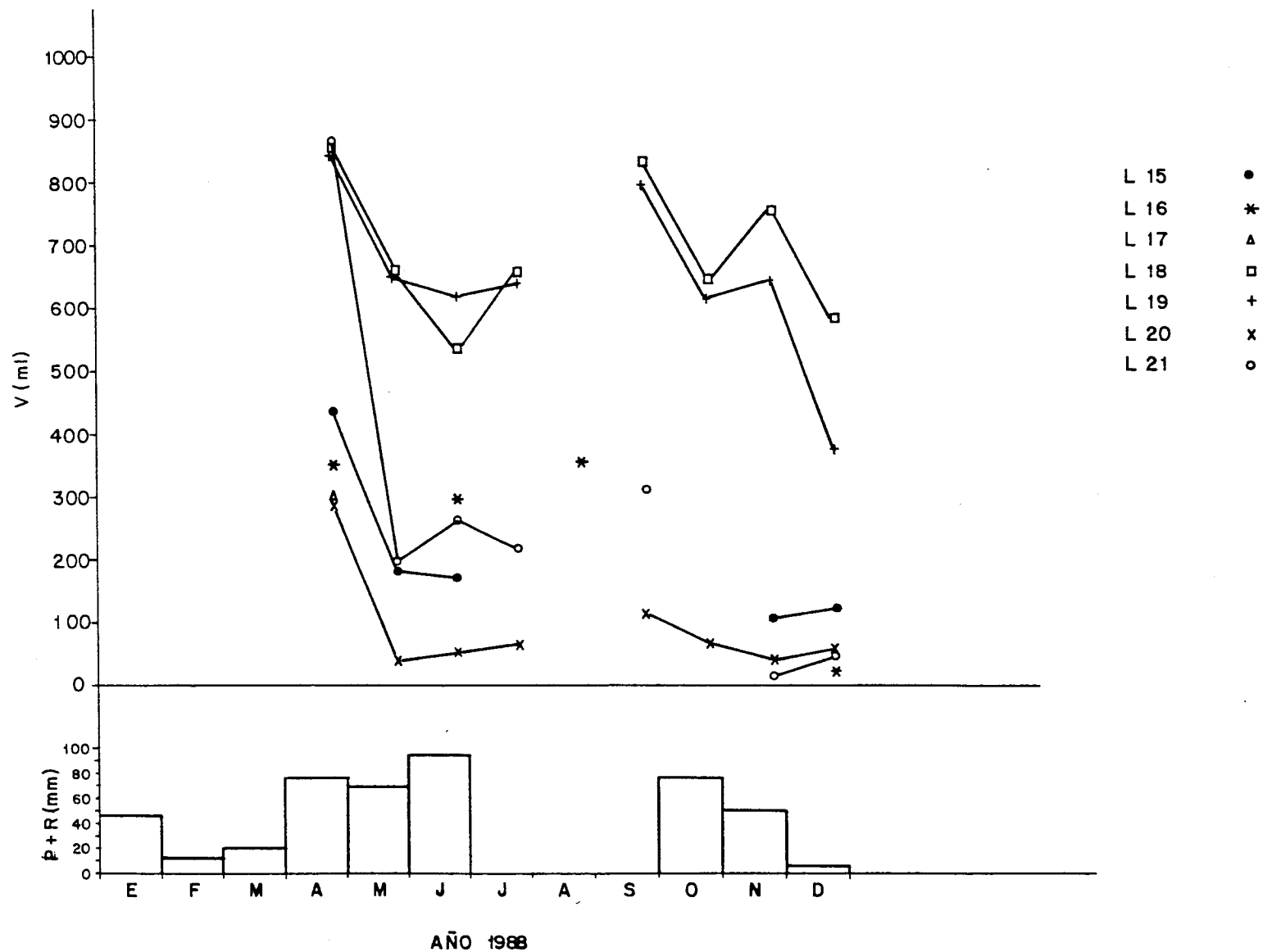
PARCELA E1

Fig. 5.21. Evolución temporal de los volúmenes de agua recogidos en los lisímetros de la parcela E-2, así como de las precipitaciones -P- y riegos -R- totales mensuales.



PARCELA E2

Fig. 5.22. Evolución temporal de los volúmenes de agua recogidos en los lisímetros de la parcela E-3, así como de las precipitaciones -P- y riegos -R- totales mensuales.



PARCELA E3

Estas razones hacen suponer que el perfil del suelo no se encuentra "seco", sino que que los lisímetros no son capaces de extraer eficientemente la solución intersticial del suelo durante este período. Es posible que la intensa evapotranspiración en superficie que origina flujos ascendentes desde profundidades considerables sea responsable de estas anomalías.

La semejanza en la evolución de niveles entre E-1 y E-2, y su diferencia con E-3, indica de nuevo que el factor litológico es fundamental en el funcionamiento de los tomamuestras de succión.

Cabe destacar también que los lisímetros profundos de las parcelas E-1 y E-2 (L05, L06, L07, L13 y L14) son los que más volúmen de agua recogen, indicando la presencia de niveles muy húmedos a partir de 2.5 m, que incluso se podría relacionar con la existencia de una franja capilar (cerca del nivel piezométrico). El lisímetro L12 muestra problemas para succionar, quizá debido a una deficiente porosidad de la cápsula de porcelana.

Por último, indicar que los lisímetros a 0.3 y 0.9 m (modelo 1900 de Soil Moisture Corporation) son los que presentan un funcionamiento más deficiente, de lo que se puede inferir que los lisímetros de vacío tienen una descarga más fácil que los de vacío-presión, aunque es difícil concluir esto debido a que en estos niveles hay complejos fenómenos físicos de succión del terreno.

## **5.5 . EL SISTEMA ACUOSO GENERAL**

La caracterización química global de las muestras obtenidas es un paso fundamental para la comprensión de los procesos involucrados en la zona no saturada. A continuación se intentan establecer los rasgos más significativos de las aguas recogidas por los lisímetros de cada parcela.

Hasta el momento, no se ha realizado ninguna descripción similar en la zona, por lo que no se parte de ningún esquema preconcebido anterior. Por este motivo es interesante hacer una interpretación cualitativa fundamentalmente gráfica.

Se han utilizado diagramas de Schöeller con este fin, puesto que en ellos se visualizan relaciones iónicas de importancia que constituyen verdaderas "huellas dactilares" de las características de un agua.

La composición química de las muestras de los lisímetros y piezómetros dentro de cada parcela se mantiene más o menos constante en el tiempo. A modo de ejemplo se incluyen las figuras 5.23., 5.24. y 5.25. que corresponden a E-1 en febrero, E-2 en febrero y E-3 en junio. La elección del mes representado se basa principalmente en haber obtenido el mayor número de muestras de los lisímetros.

En cuanto al campo de mineralización que ocupan las 3 figuras dentro del diagrama, se puede señalar una gradación. La parcela E-1 es la que mayor mineralización presenta, en la E-2 la salinidad total es menor, y en E-3 se registran los valores más bajos. También es conveniente hacer resaltar la semejanza de calidad en todos los piezómetros de las tres parcelas de experimentación, a excepción de P1, que por estar en contacto directo con margas, presenta rasgos muy peculiares.

En la parcela E-1 (figura 5.23.) se observa un rango de variación acusado, así como calidades químicas muy diferentes entre las muestras.

Como se acaba de mencionar el piezómetro P1 resalta por su marcado carácter sulfatado sódico, pero su estudio detenido no es tema principal de esta investigación. Exceptuando pues esta muestra, el resto se agrupa en dos zonas, una inferior con L01, L06, L07 y P1', y otra superior que reúne a L02, L03, L04 y L05.

Hay que destacar la gran similitud entre P1' y L07. En febrero de 1988 se midió un nivel piezométrico en P1' de aproximadamente 3.7 m, y L07 se encuentra instalado a 3.5 m. Es bastante probable que este lisímetro se encuentre influido por las variaciones de nivel y la franja capilar. Aunque con mayores concentraciones, también se aprecia esta influencia en L06 (relaciones iónicas similares). Estas tres muestras tienen bajos niveles de Cl<sup>-</sup>, y altas concentraciones de sulfatos. Son aguas sulfatadas cálcicas.



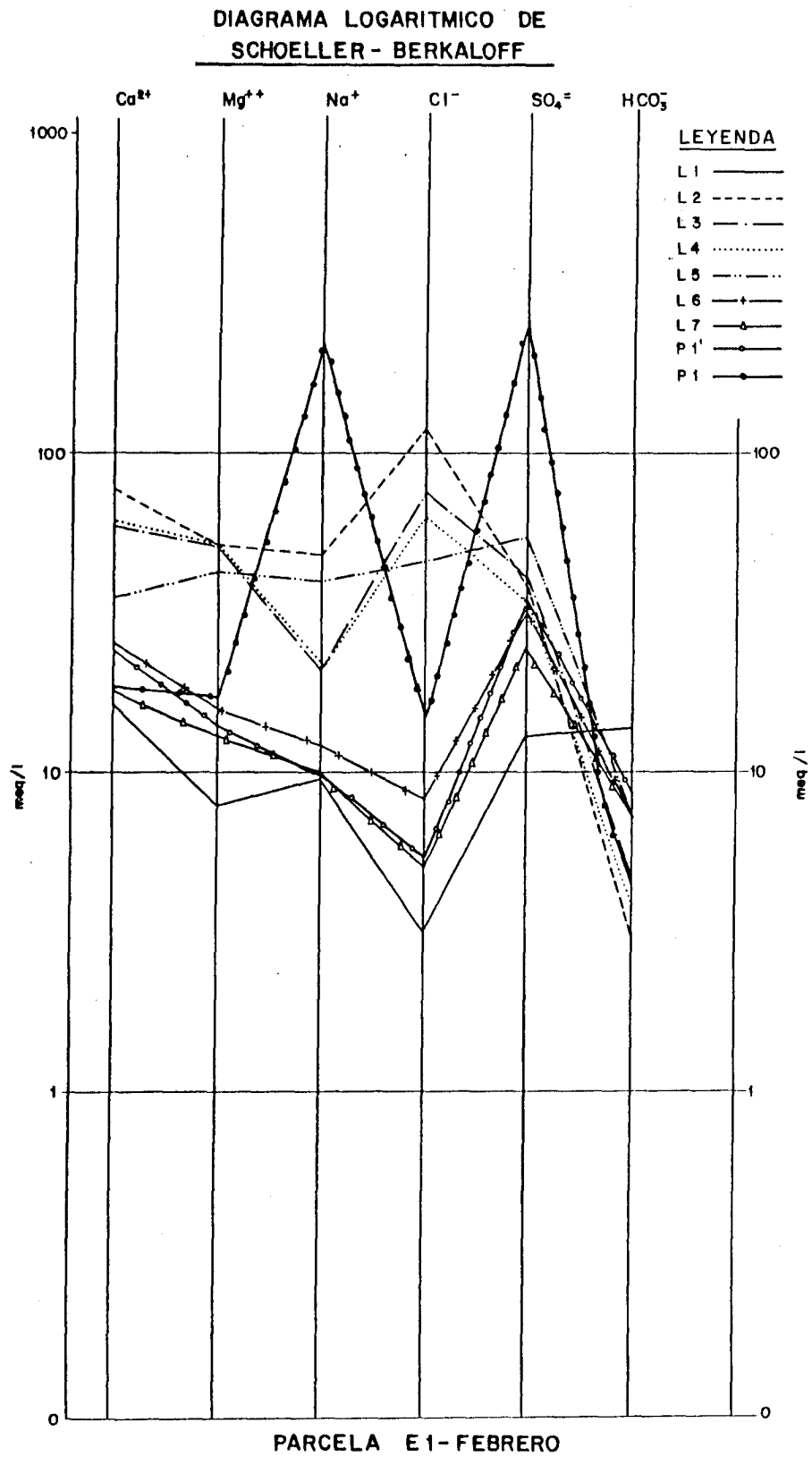


Fig. 5.23. Diagrama de Schöeller para la parcela E-1 en febrero de 1988.

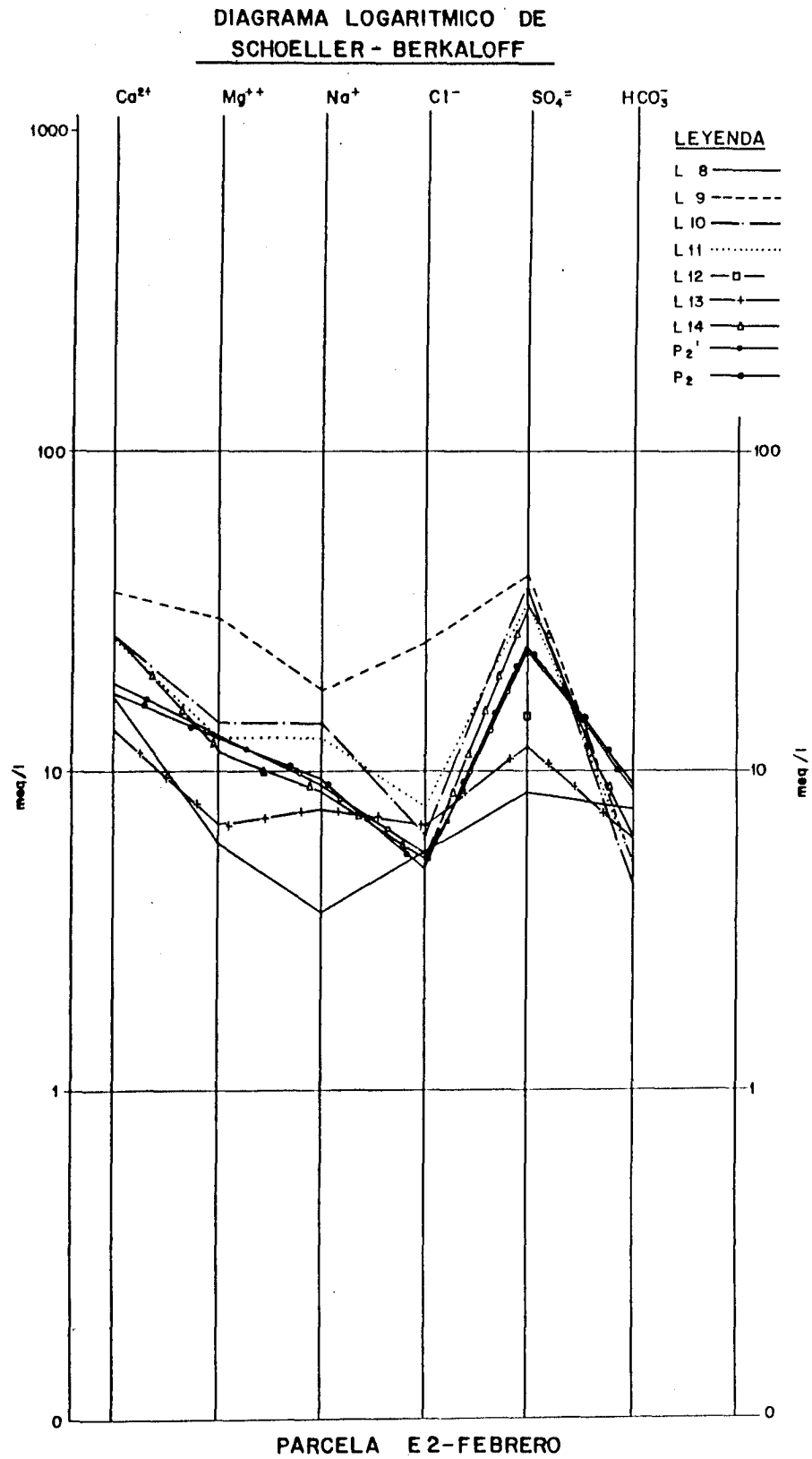


Fig. 5.24. Diagrama de Schöeller para la parcela E-2 en febrero de 1988.

DIAGRAMA LOGARITMICO DE  
SCHOELLER - BERKALOFF

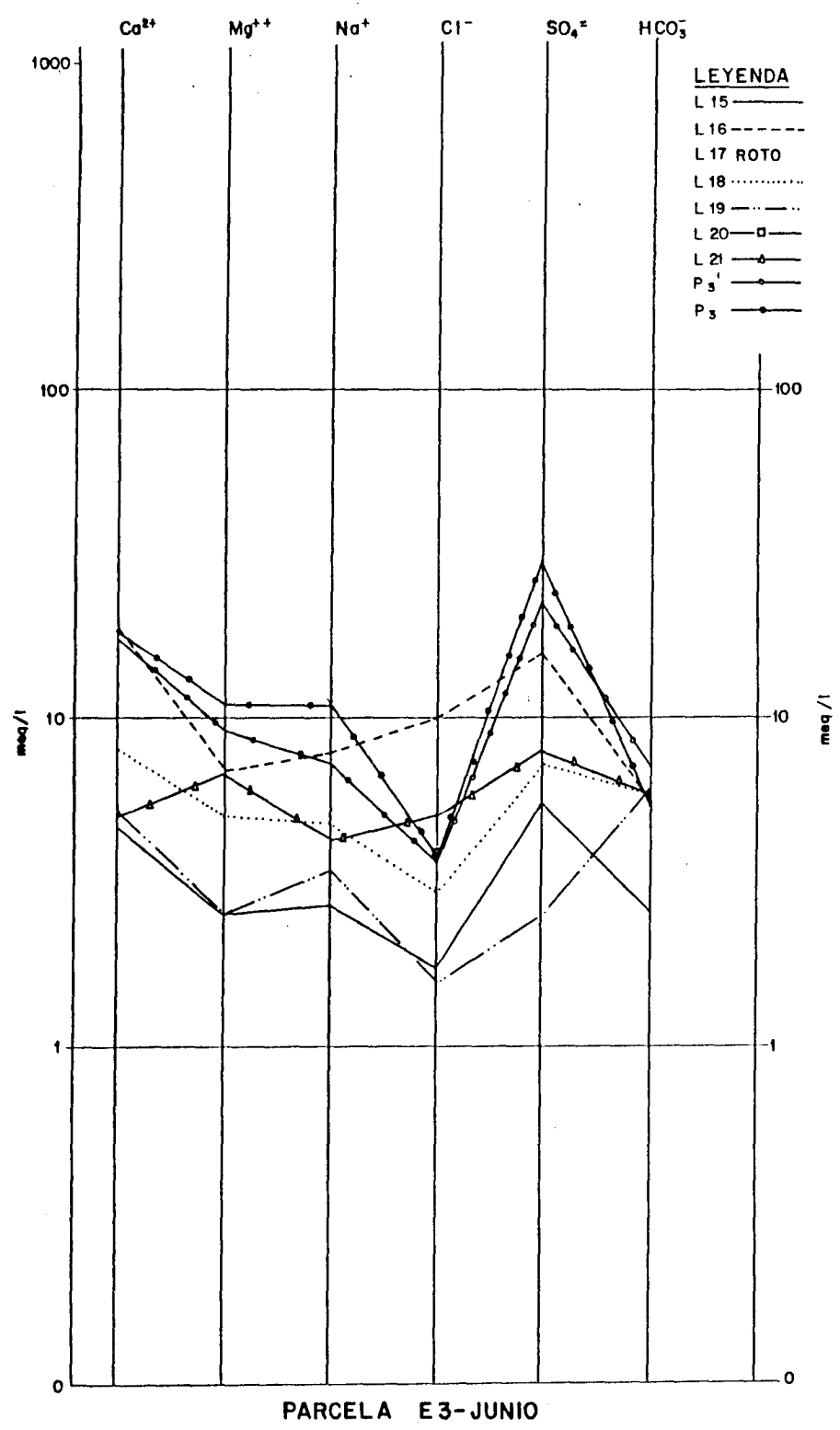


Fig. 5.25. Diagrama de Schöeller para la parcela E-3 en junio de 1988.

A pesar de tener concentraciones parecidas, L01 muestra peculiaridades que la distinguen de las anteriores. En primer lugar, la elevada concentración en  $\text{HCO}_3^-$  frente a su menor mineralización. El lisímetro L01 se sitúa a 0.3 m, por lo que debe registrar la influencia de la activa zona edáfica, donde la  $P_{\text{CO}_2}$  es muy considerable. La alta concentración de  $\text{CO}_2$  en agua confiere agresividad del agua. Por otra parte la matriz sólida debe contener un porcentaje alto de sales solubles, de manera que ya a 0.3 m se encuentra un agua de alta conductividad ( $> 2000 \mu\text{S/cm}$ ).

En el mismo diagrama, se observa un importante "salto" de concentraciones entre L01 y L02, que únicamente supone una diferencia de profundidades de 0.6 m. En estos niveles se producen procesos biológicos de gran importancia (rizosfera) y originan un horizonte acumulador que el lisímetro L02 acusa. El aumento de salinidad general, en especial  $\text{Cl}^-$ , puede provocar la precipitación de  $\text{HCO}_3^-$ , y debe estar influido por las características litológicas del terreno.

Al aumentar la profundidad, este carácter se mantiene (con una conductividad algo menor y con ciertas variaciones en los porcentajes catiónicos) hasta 2.5 m donde L05 presenta un tipo de agua diferente, que podría representar la transición hacia el término freático.

La presencia de un paquete arcilloso identificado durante la instalación del instrumental en E-1, puede constituir el nivel de retención de sales responsable de las altas concentraciones en L02, L03, L04 y L05.

Respecto a la parcela de experimentación E-2 ya se ha comentado que a pesar de su cercanía geográfica presenta diferencias de consideración con la E-1. La calidad de P1', P2 y P2' es muy similar, es decir el agua en el nivel freático es prácticamente igual.

Sin embargo, en la parcela E-2 las conductividades no son tan elevadas como en E-1, y además el rango de variación de concentraciones no es tan amplio. En todo el perfil estudiado, a pesar de algunas diferencias, las muestras poseen características similares (ver figura 5.24.). Es decir se puede considerar al conjunto como una única población con términos más o menos evolucionados.

Si se compara el diagrama de Schöeller de E-2 con el de E-1, también queda patente que en términos generales, el agua en la parcela E-2 se parece más a los términos de influencia piezométrica de E-1. Esto es, los contenidos en Cl<sup>-</sup> no son altos, y el carácter global es sulfatado cálcico.

También aquí el lisímetro a 0.3 m (L08) posee una alta concentración de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> en proporción a su salinidad, que puede explicarse por enriquecimiento de CO<sub>2</sub> en la zona edáfica. Así mismo, a 0.9 m, L09 registra las mayores concentraciones del perfil, presumiblemente atribuibles a procesos de acumulación relacionado con la rizosfera.

El resto de niveles, como ya se ha señalado, es un grupo muy próximo en calidades, con algunas diferencias en las concentraciones de SO<sub>4</sub><sup>-</sup> (en L13) y en algunas proporciones iónicas. Es clara la similitud química entre este grupo y las muestras de la zona saturada.

La parcela E-3, es de las tres en estudio la que registra menores contenidos iónicos en la zona no saturada. Además hay que señalar que las conductividades en los lisímetros son menores que en los piezómetros, con excepción del L16, dentro del horizonte acumulador a 0.9 m.

En contra de lo que en principio podía suponerse (por la mayor permeabilidad de E-3), son aguas que difícilmente podrían agruparse dentro de una misma familia geoquímica.

De nuevo se aprecia con claridad la existencia de un horizonte muy salino en L16, coincidiendo con la zona de actividad de las raíces vegetales.

En esta parcela y durante la instalación del instrumental se pudo reconocer un nivel de gravas a partir de 1.5 m. Esta puede ser la razón por la que los lisímetros L18 y L19 poseen una conductividad y concentración de cloruros bajas. En este caso, el lisímetro profundo, L21 a 3.5 m, no percibe influencia de la zona saturada en su calidad química, ya que el nivel se encuentra a mayor profundidad, 5.4 m.

La falta de muestra de agua en algunos niveles, así como la ausencia de datos litológicos precisos, son un impedimento insalvable a la hora de una interpretación fiable y representativa.

Sería conveniente recabar información sobre estos aspectos, mediante la realización de calicatas/sondeos de detalle, reposición del L17 y optimización de tiempos de muestreo de lisímetros.

## 5.6 . VARIACION DE LA COMPOSICION QUIMICA EN PROFUNDIDAD

### Parcela E-1

En las figuras 5.26. a 5.37. se ha representado la variación de la composición química en profundidad para las muestras procedentes de los lisímetros y piezómetros instalados.

Se observa que, en el caso de los cationes, las concentraciones medidas no experimentan cambios apreciables con el aumento de la profundidad, excepto para el caso del sodio, que acusa un aumento brusco en la zona saturada, desde P1' a P1. Este mismo fenómeno se observa en los valores de sulfatos y conductividad, ya que como se ha visto en el apartado 5.5., el piezómetro profundo alcanza ya las margas del sustrato impermeable.

En cuanto a las especies nitrogenadas, los iones  $\text{NO}_2^-$  y  $\text{NH}_4^+$  experimentan una variación considerable en los distintos períodos de muestreo.

La concentración de nitratos experimenta un aumento brusco, de forma regular, a una profundidad de 2 m y disminuye paulatinamente hasta llegar al piezómetro (8.1 m), donde se miden valores comprendidos entre 10 y 40 mg/l de  $\text{NO}_3^-$ .

### Parcela E-2

La variación de la composición química en profundidad para la parcela E-2 se representa en las figuras 5.38 a 5.49. En este caso las concentraciones de  $\text{K}^+$  y  $\text{Na}^+$  no experimentan cambios importantes. El calcio evoluciona de la misma forma que los sulfatos.

El amonio experimenta un aumento en los meses de abril, junio y julio. En cuanto a los nitratos se observan concentraciones máximas a profundidades de 0.9 y 2.5 m.

### Parcela E-3

No se dispone de análisis de muestras de lisímetros en los meses de enero, febrero y marzo, ya que se instalaron durante el mes de abril. En las figuras 5.50. a 5.61. se recoge la evolución de la composición química en profundidad.

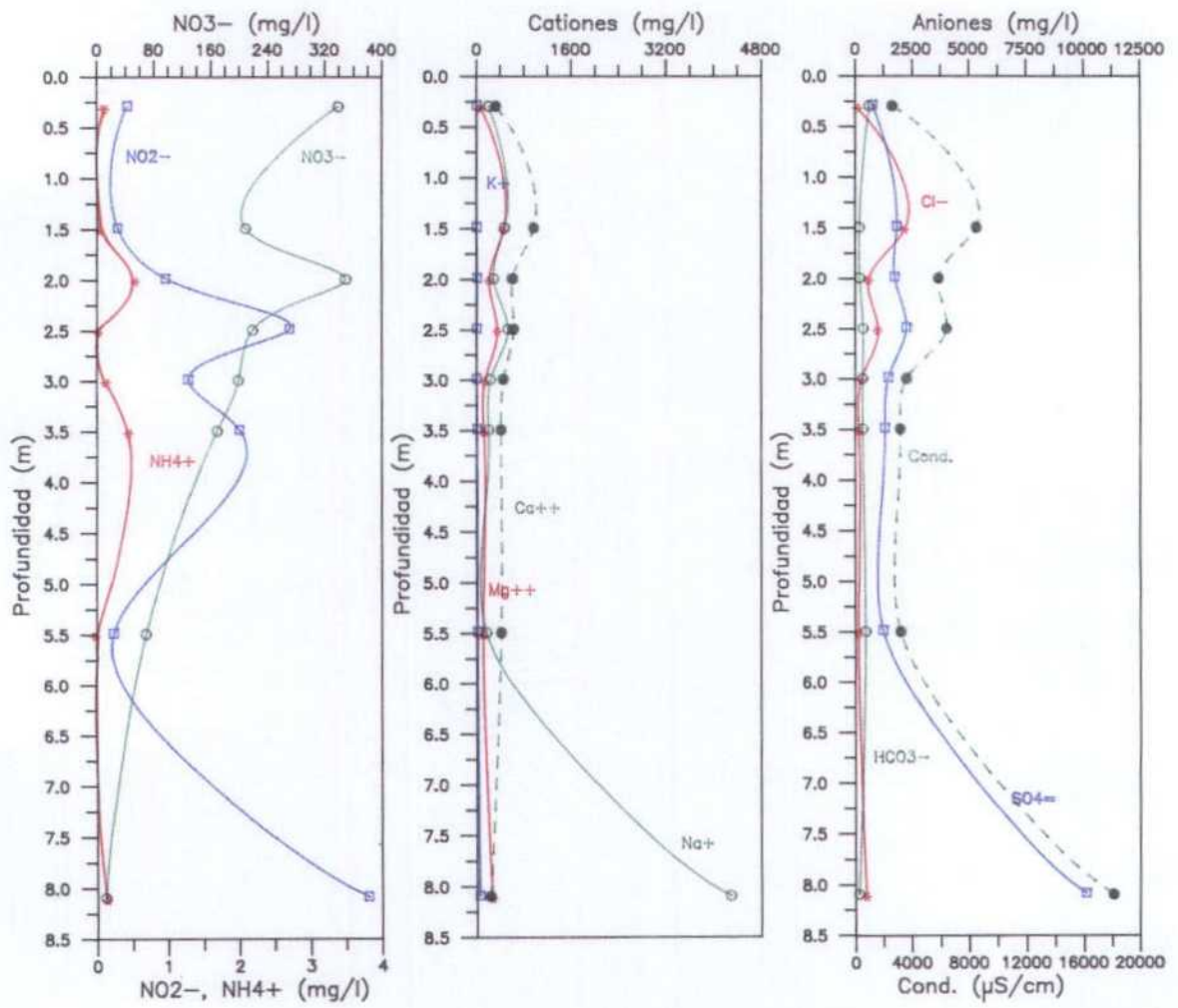


Fig. 5.26 . Variación de la composición química en profundidad (Parcela 1, Enero)



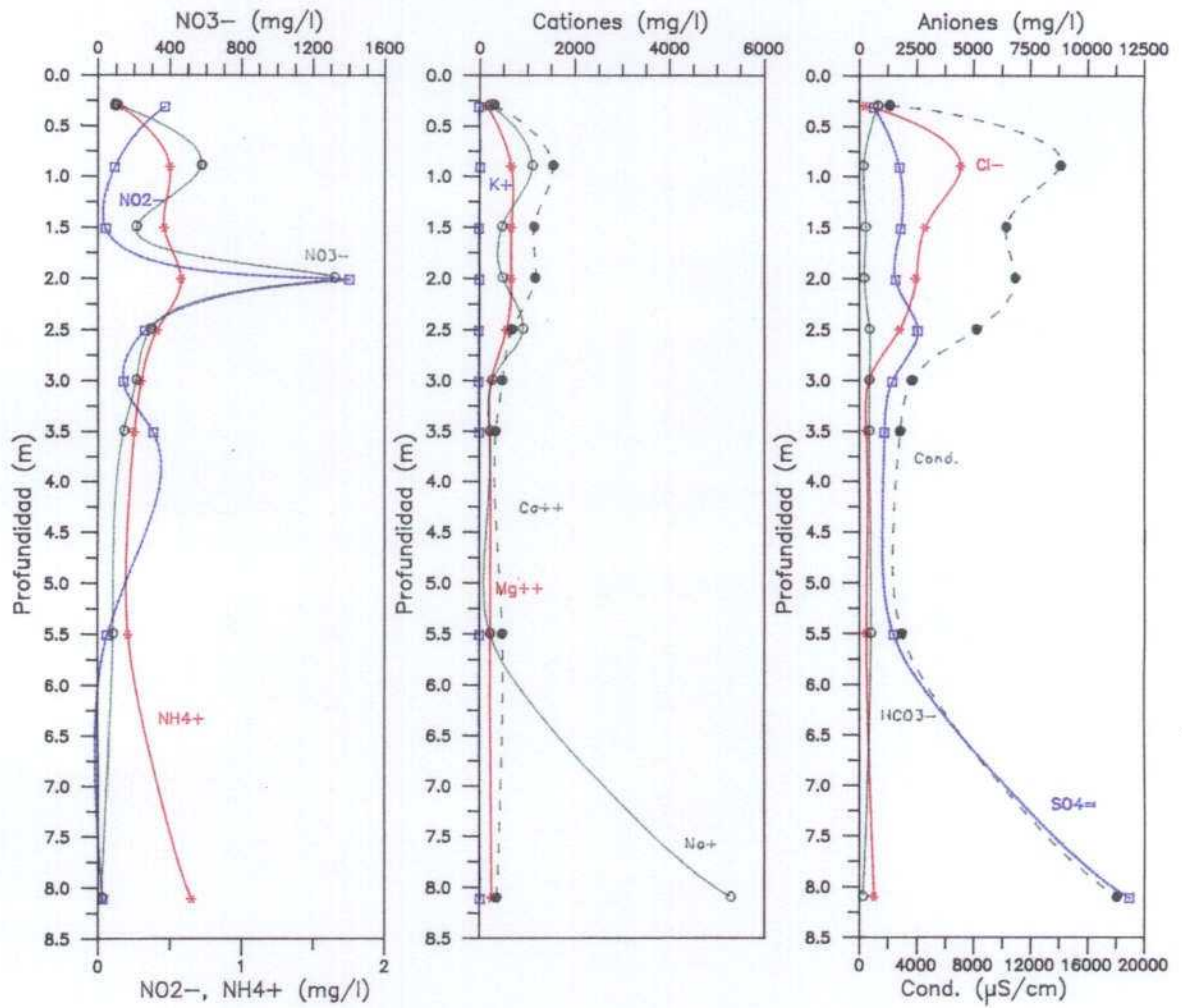


Fig.5.27.Variación de la composición química en profundidad  
(Parcela 1, Febrero)

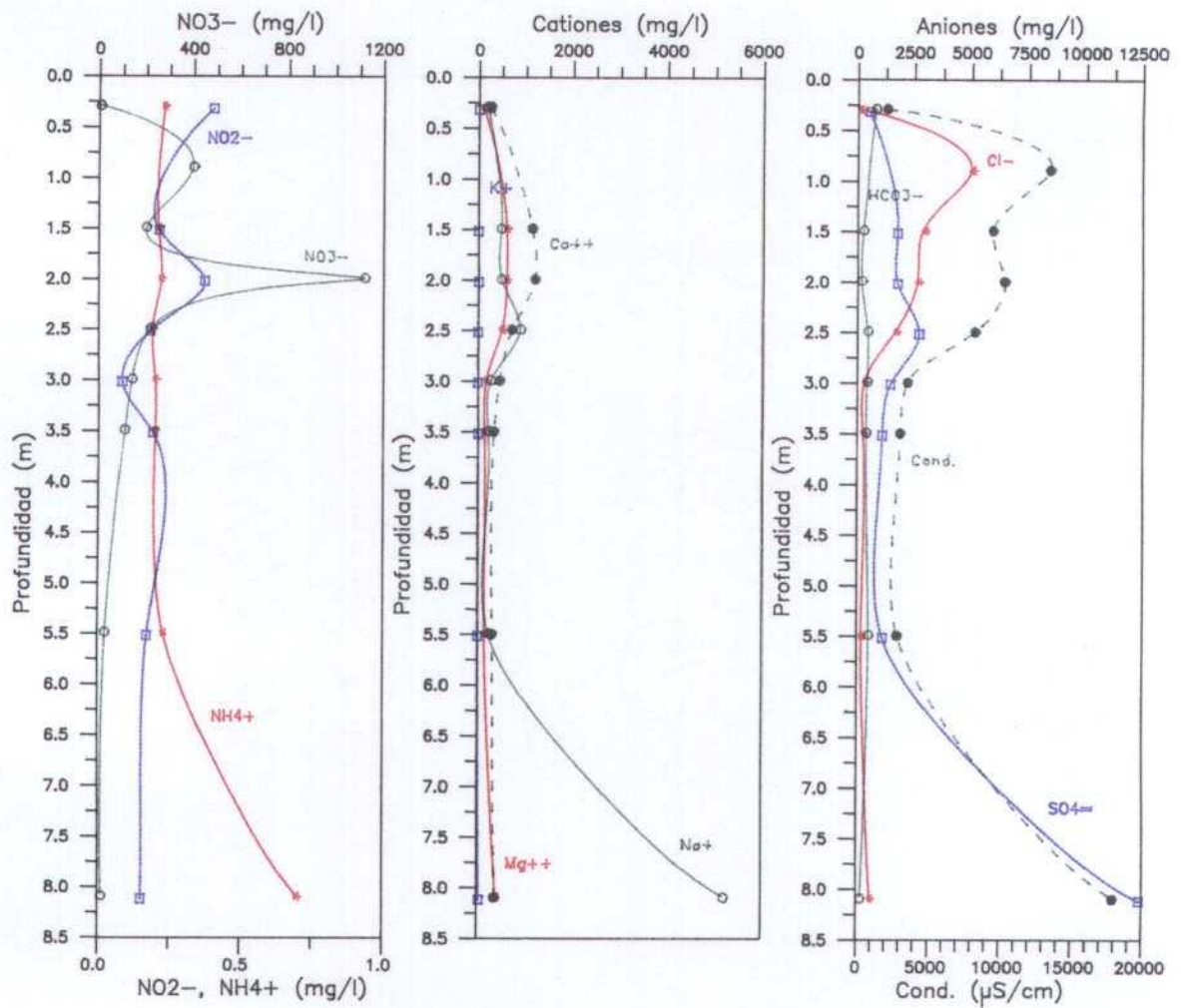


Fig.5.28 . Variación de la composición química en profundidad (Parcela 1, Marzo)

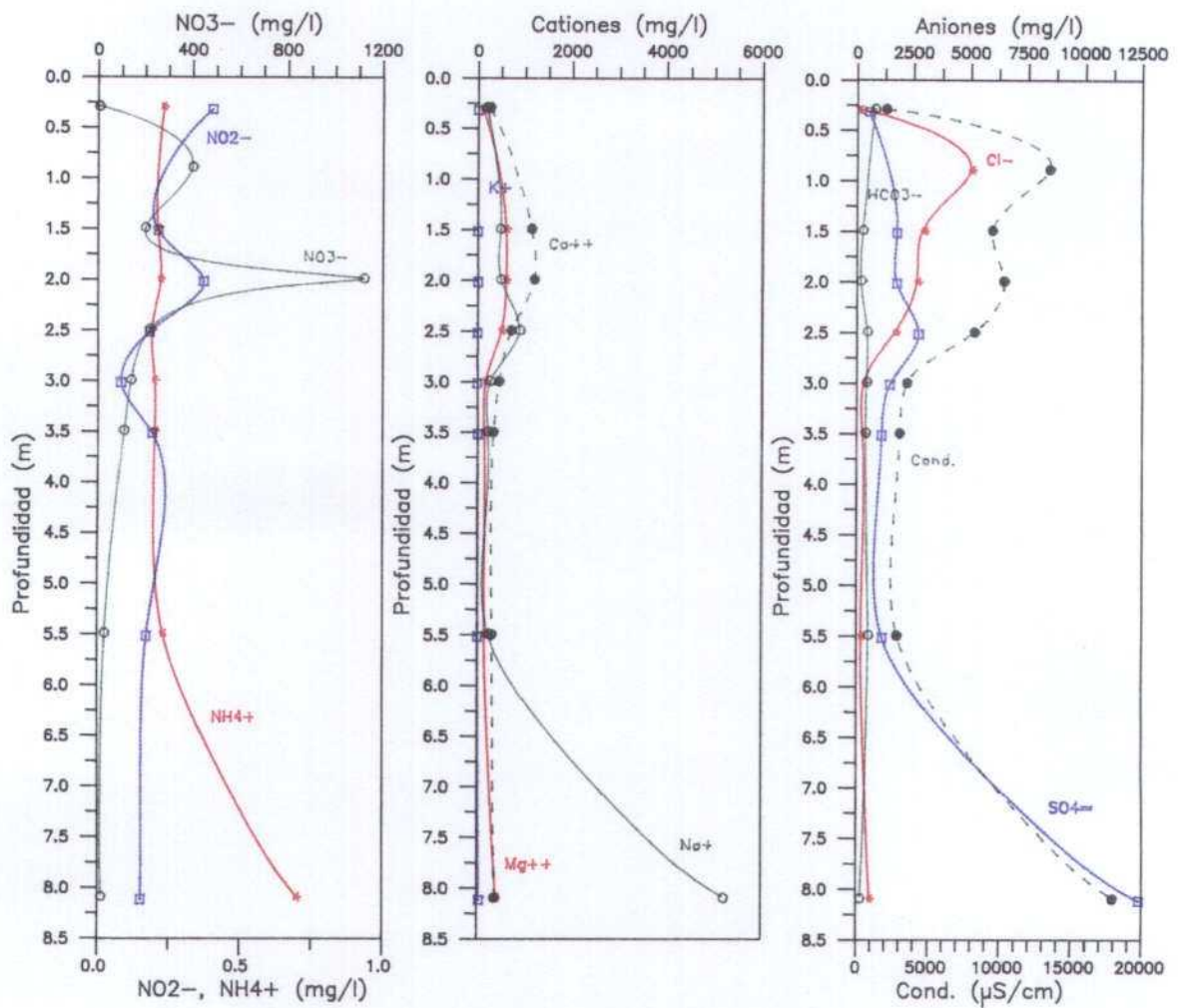


Fig.5.28 . Variación de la composición química en profundidad (Parcela 1, Marzo)

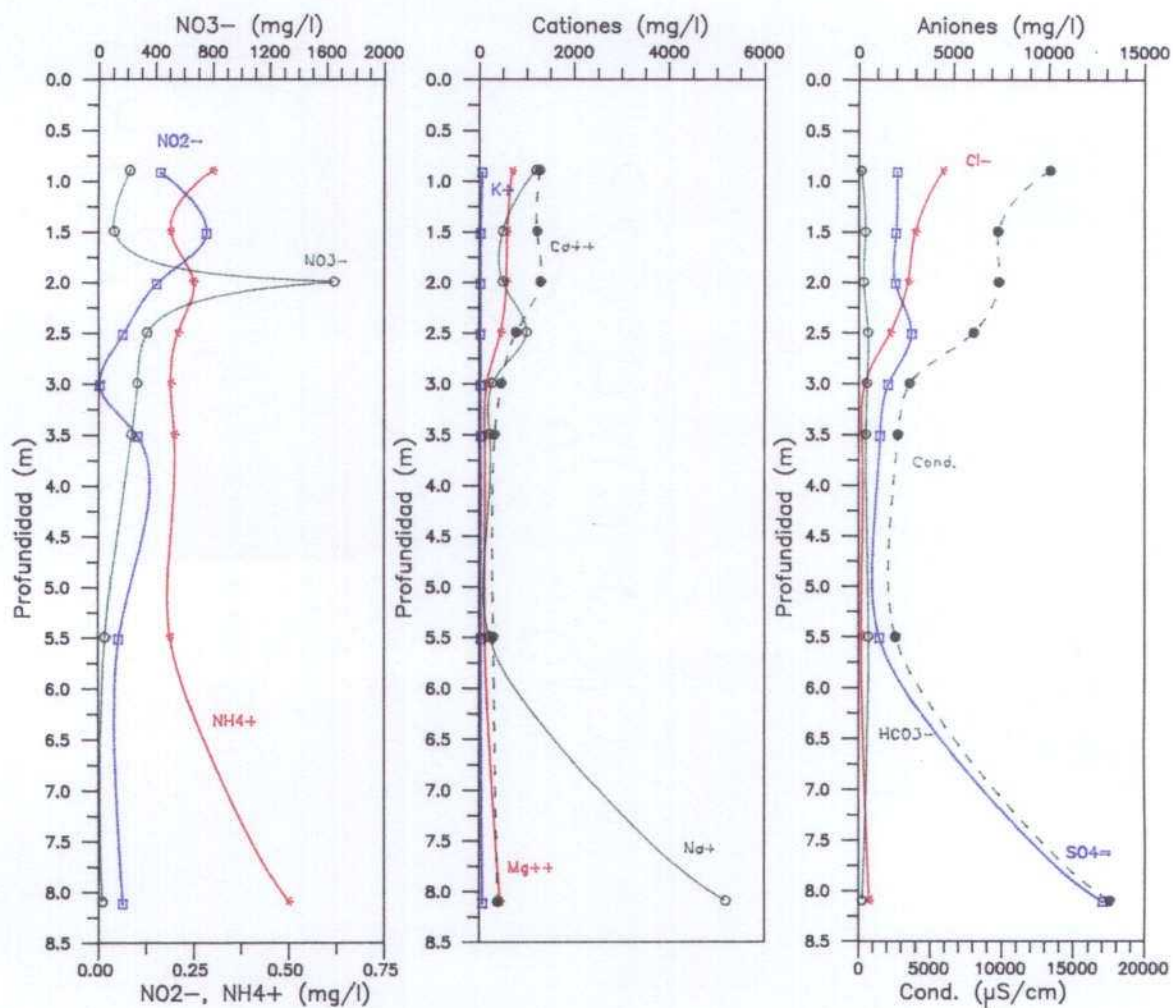


Fig. 5.29 . Variación de la composición química en profundidad (Parcela 1, Abril)



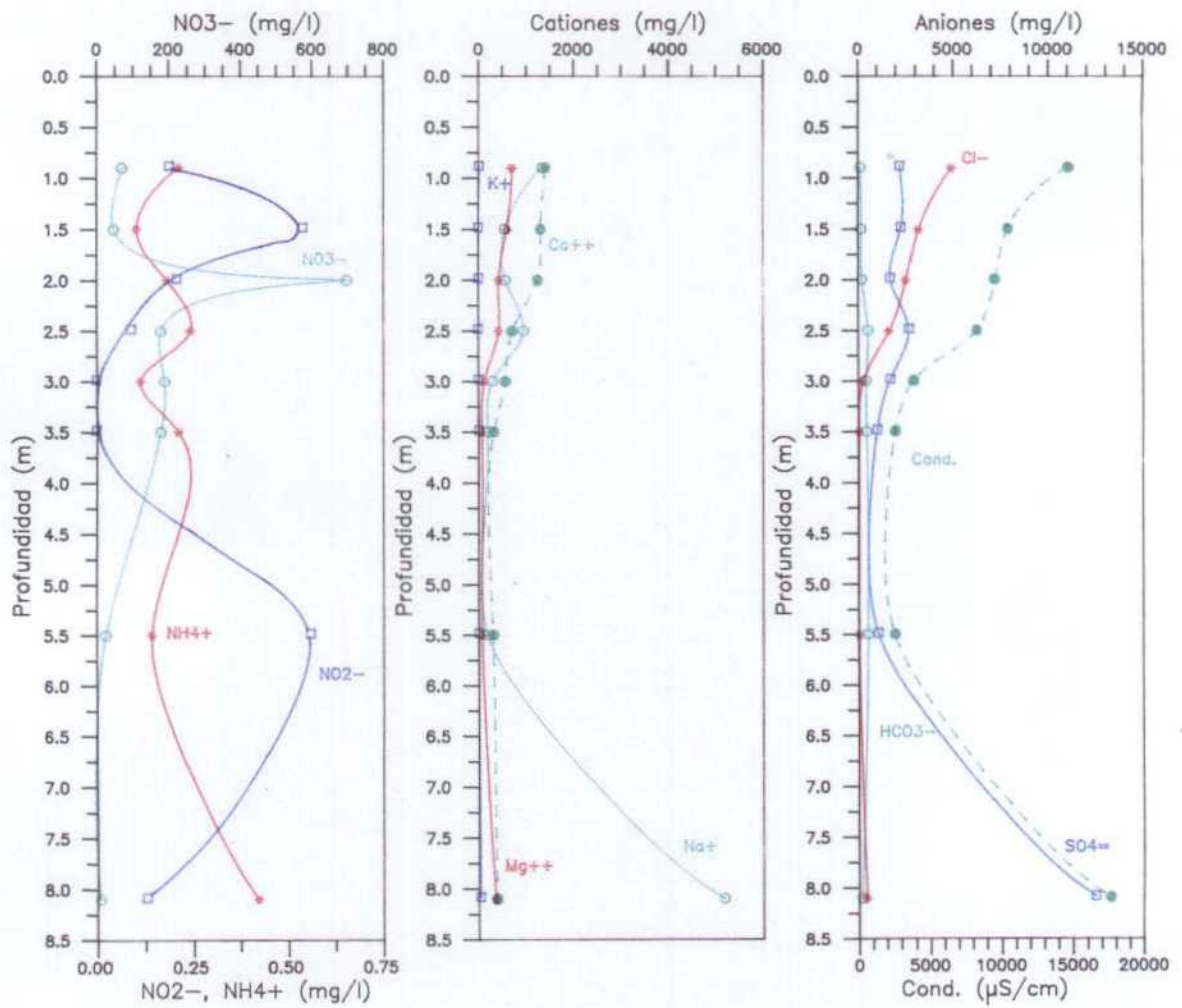


Fig. 5.30 . Variación de la composición química en profundidad (Parcela 1, Mayo)

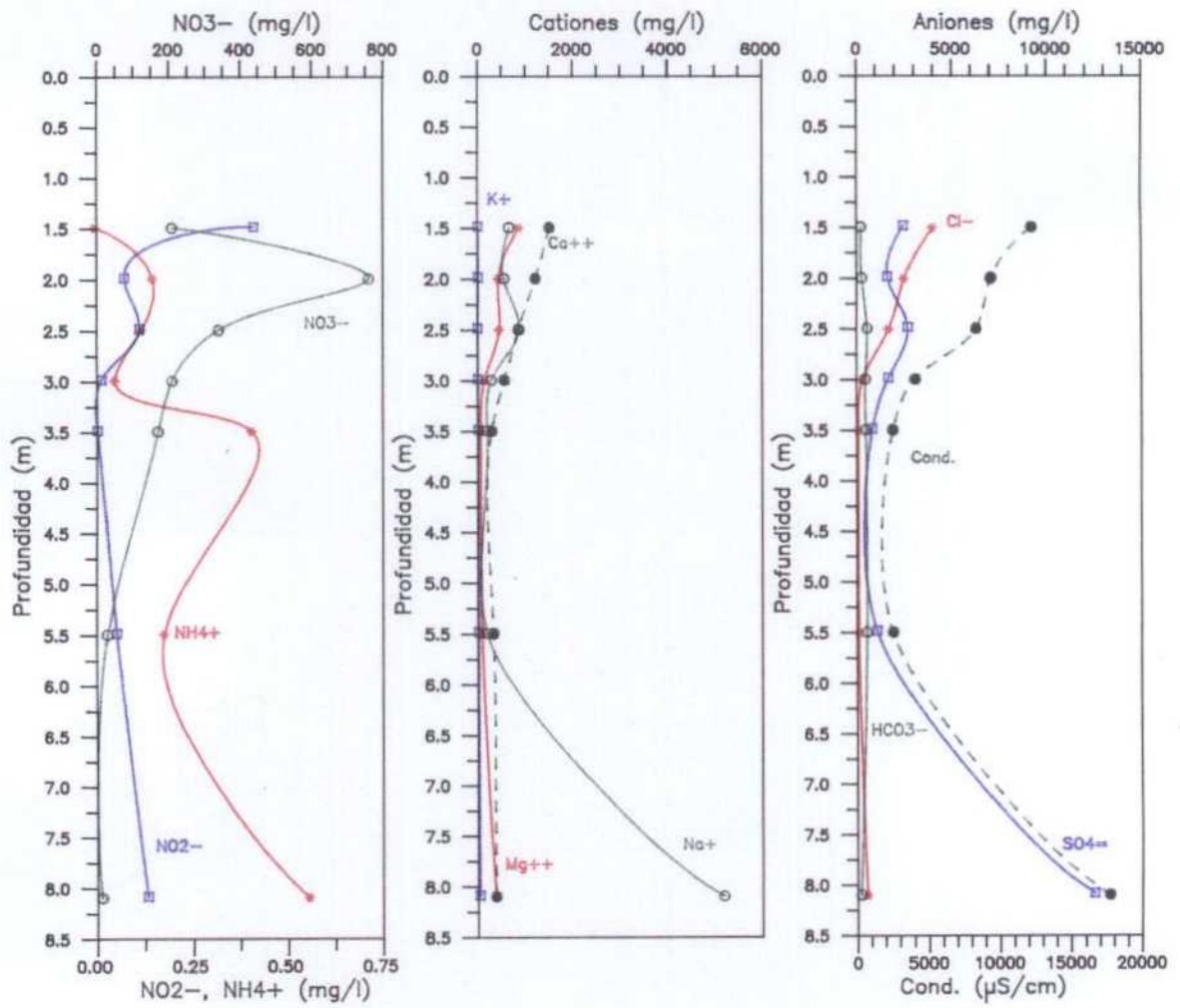


Fig. 5.31. . Variación de la composición química en profundidad (Parcela 1, Junio)

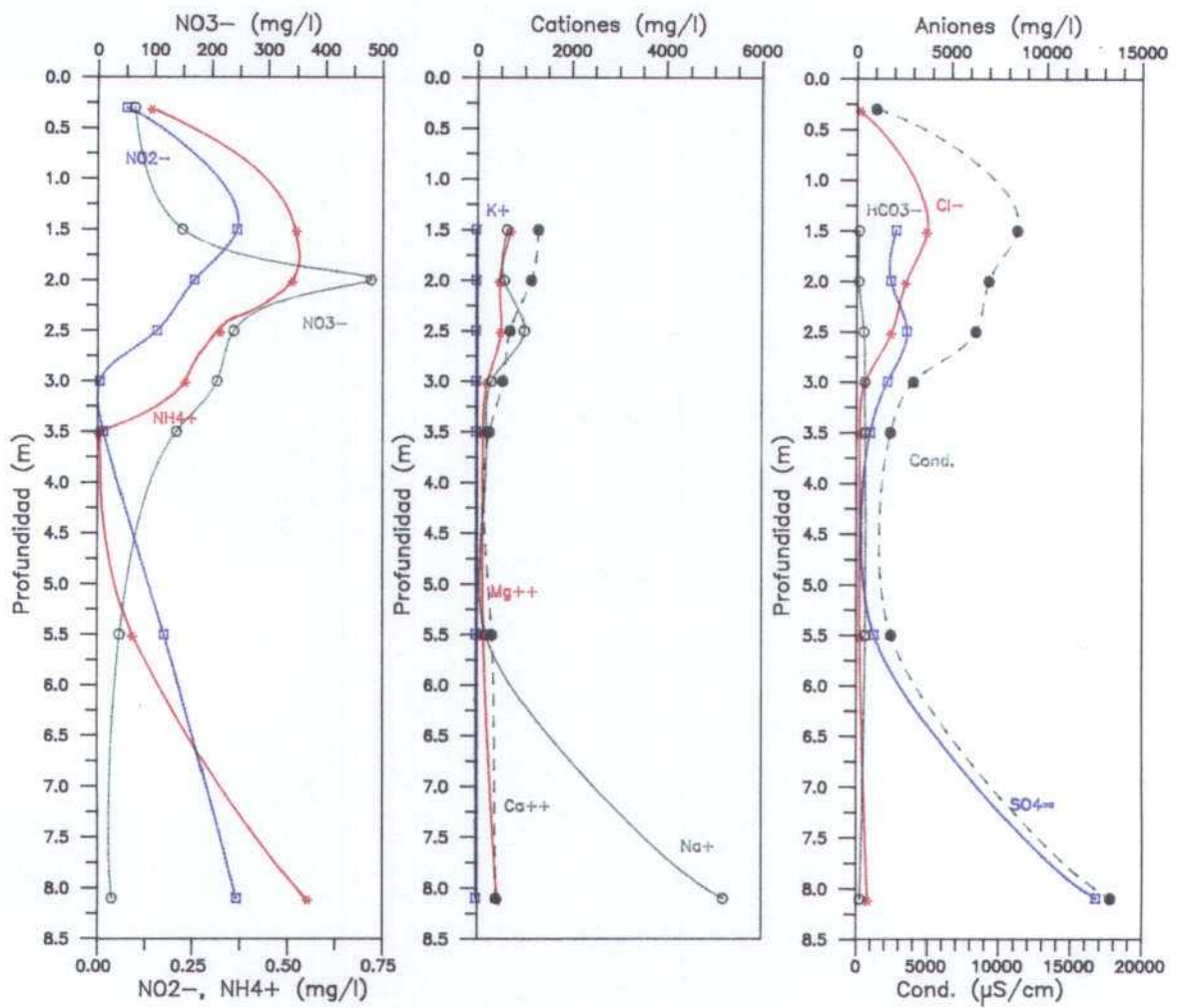


Fig. 5.32 . Variación de la composición química en profundidad (Parcela 1, Julio)

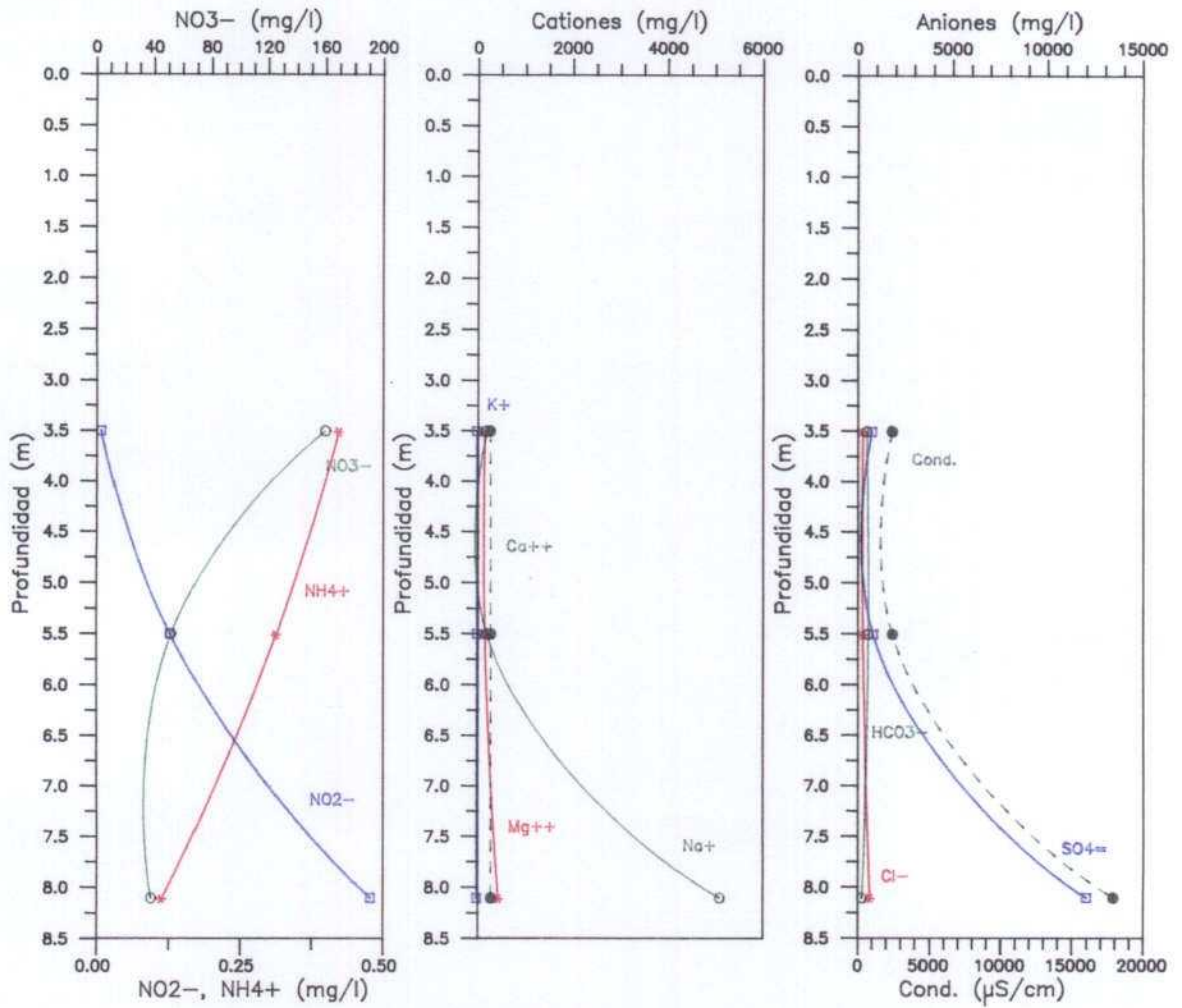


Fig. 5.33 . Variación de la composición química en profundidad (Parcela 1, Agosto)



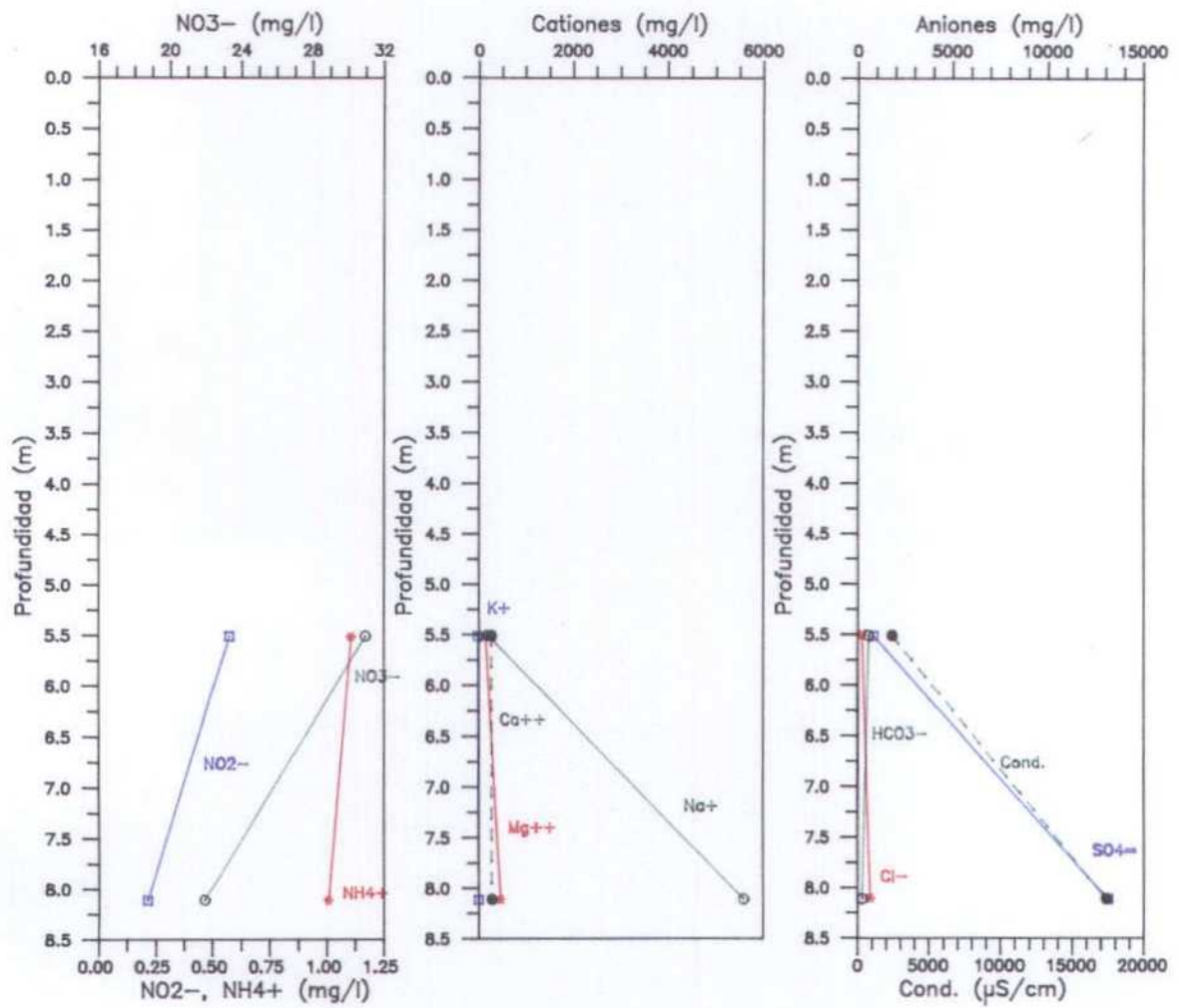


Fig. 5.34 . Variación de la composición química en profundidad (Parcela 1, Septiembre)

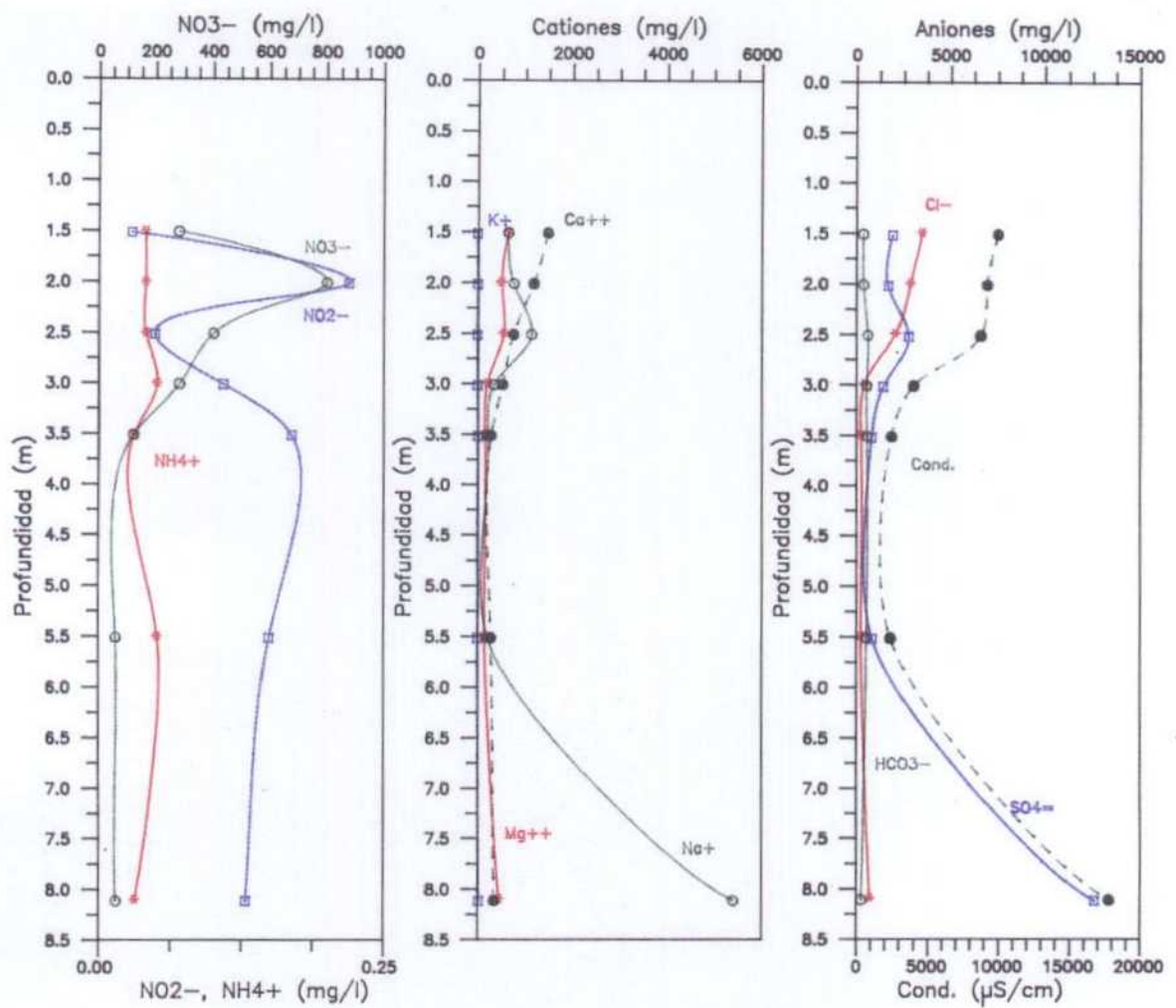


Fig. 5.35 . Variación de la composición química en profundidad (Parcela 1, Octubre)

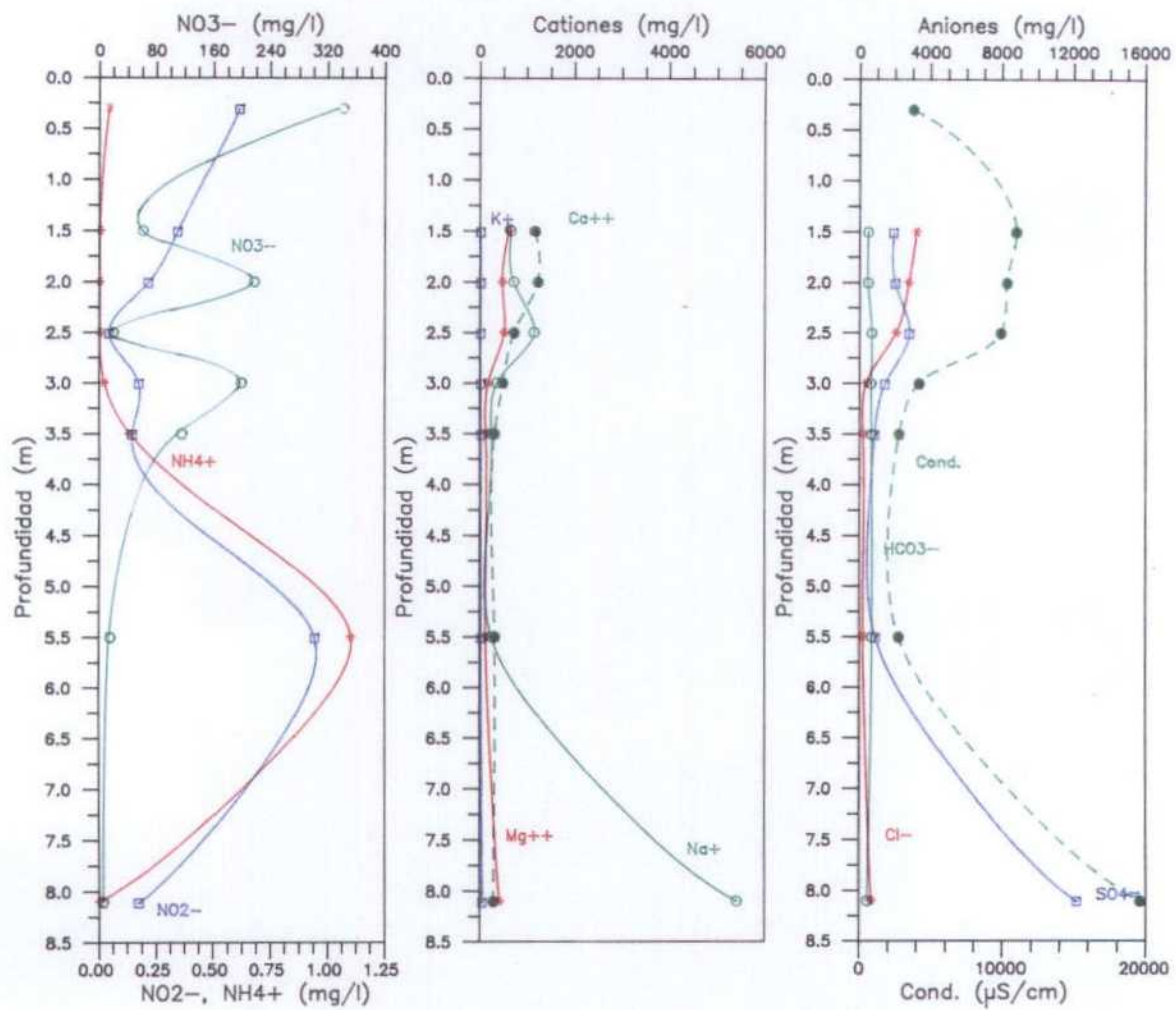


Fig. 5.36. Variación de la composición química en profundidad  
(Parcela 1, Noviembre)

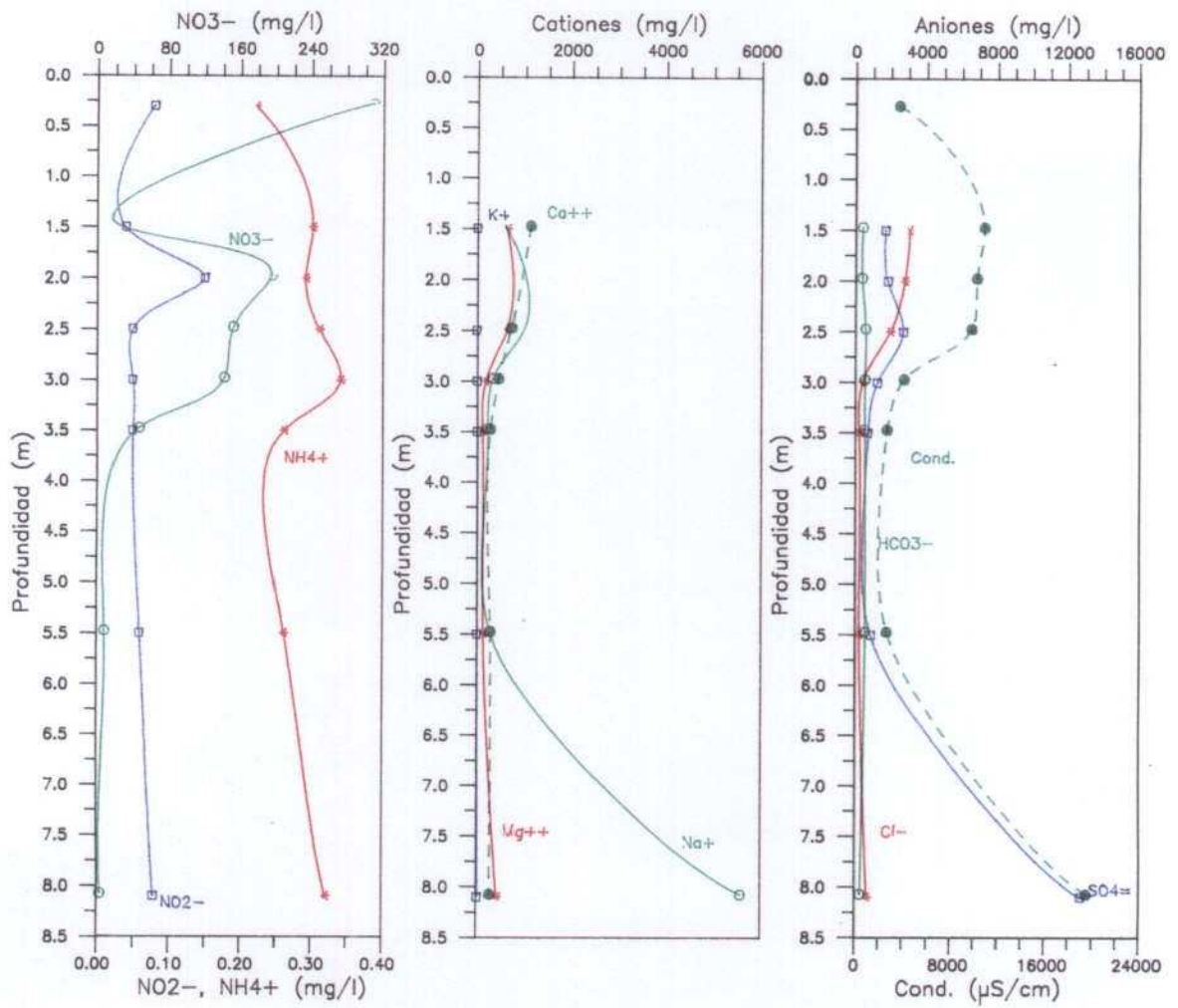


Fig. 5.37 Variación de la composición química en profundidad (Parcela 1, Diciembre)

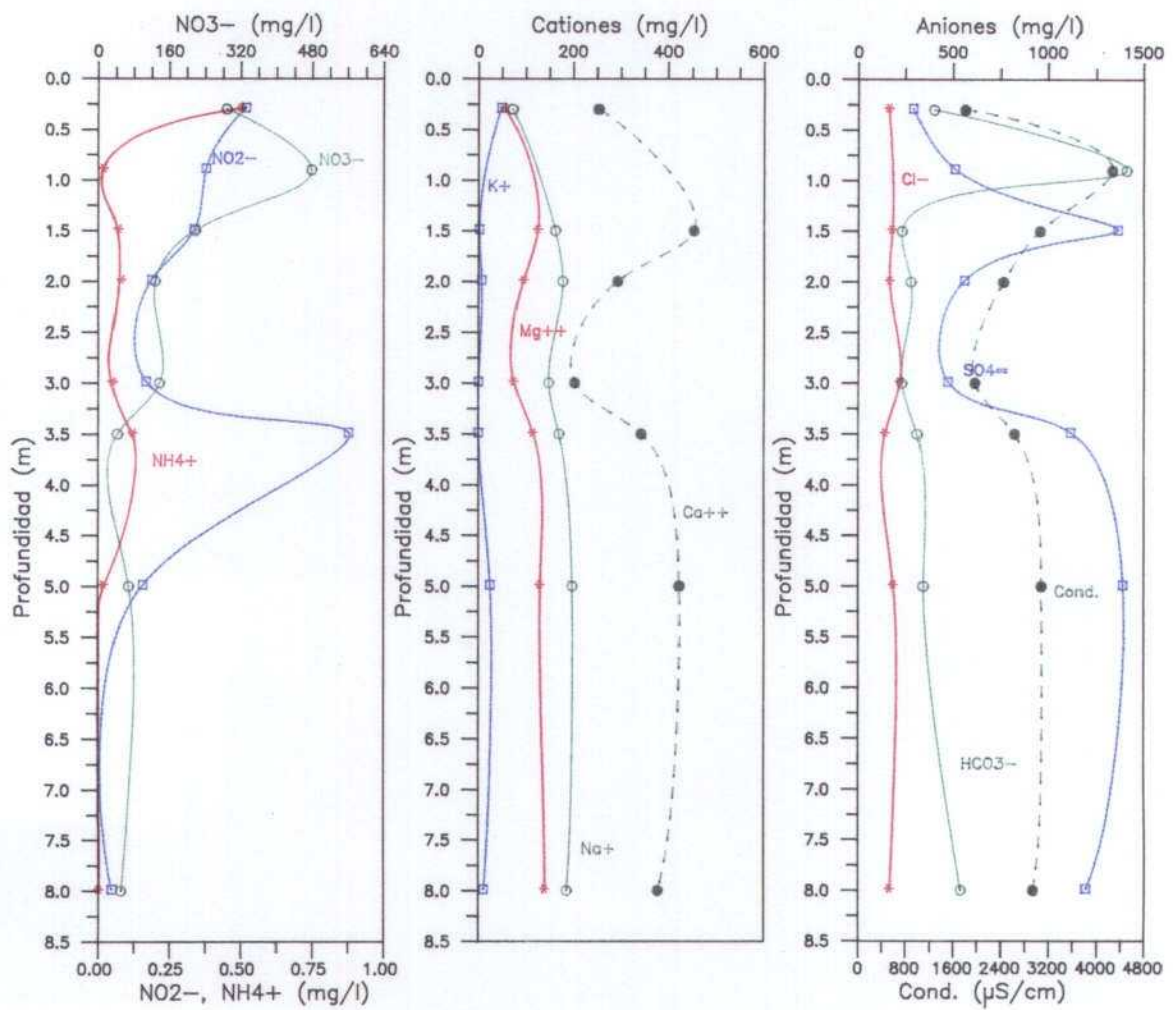


Fig. 5.38 . Variación de la composición química en profundidad (Parcela 2, Enero)



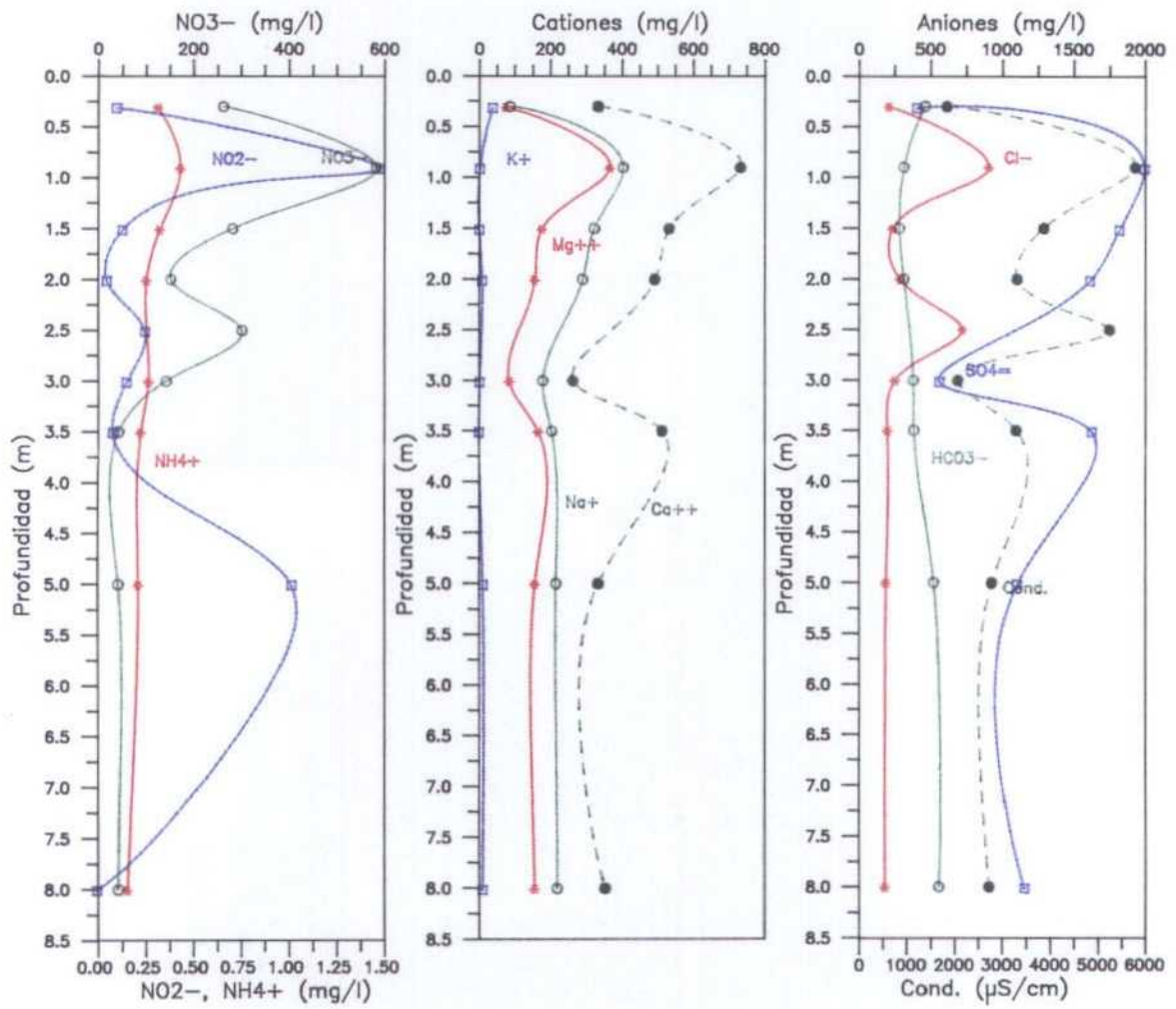


Fig. 5.39 . Variación de la composición química en profundidad (Parcela 2, Febrero)

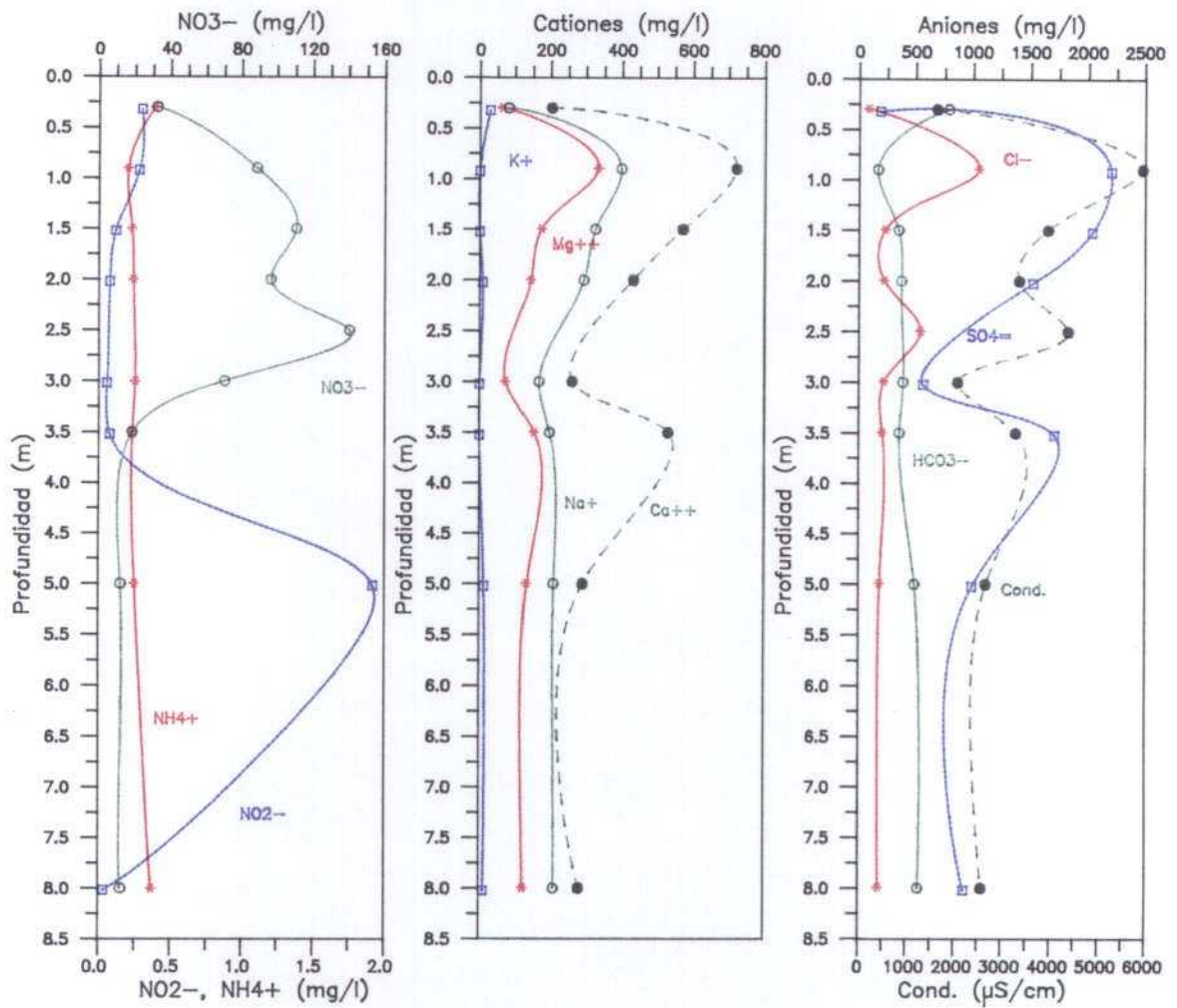


Fig. 5.40 . Variación de la composición química en profundidad (Parcela 2, Marzo)

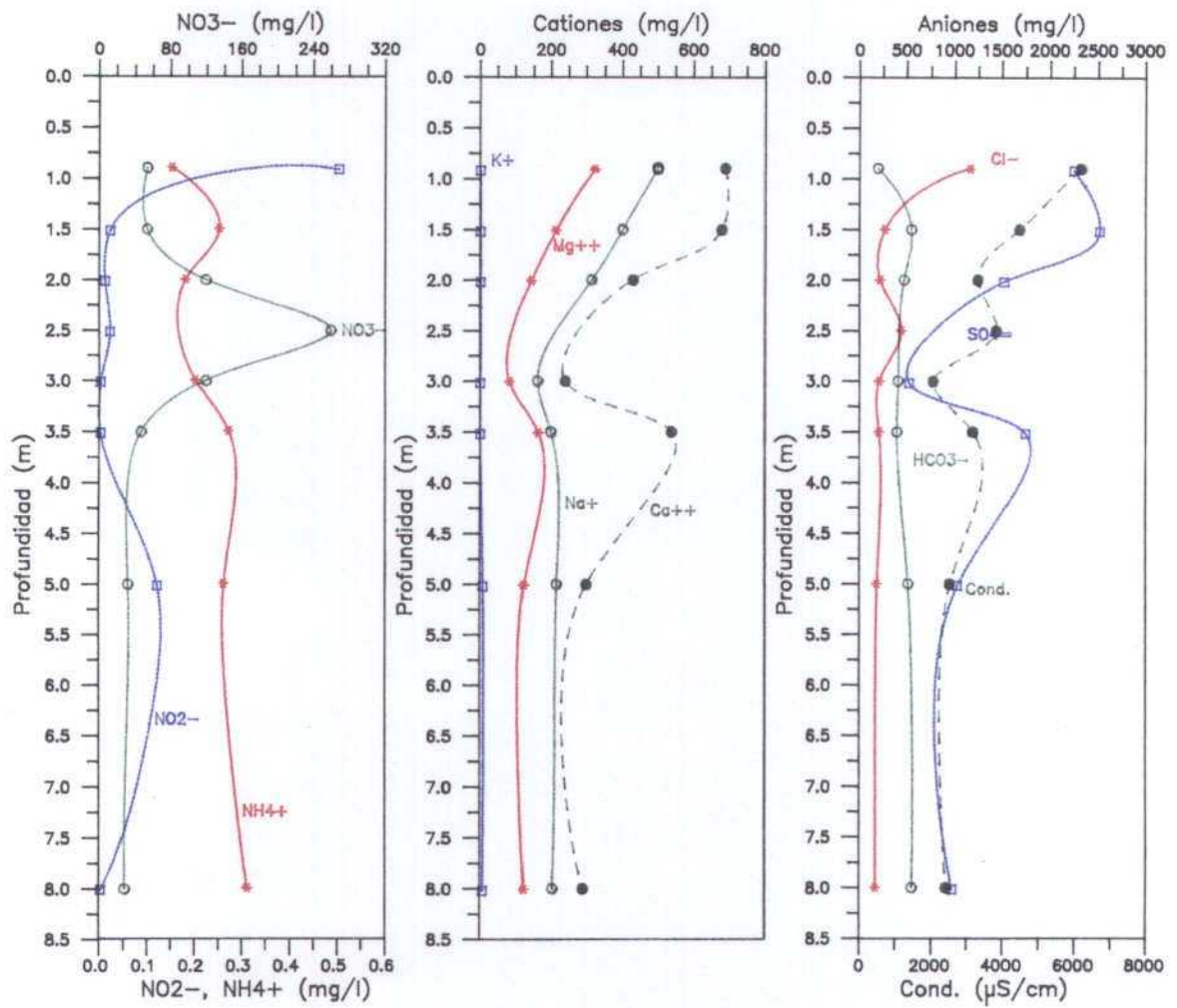


Fig. 5.41 . Variación de la composición química en profundidad (Parcela 2, Abril)



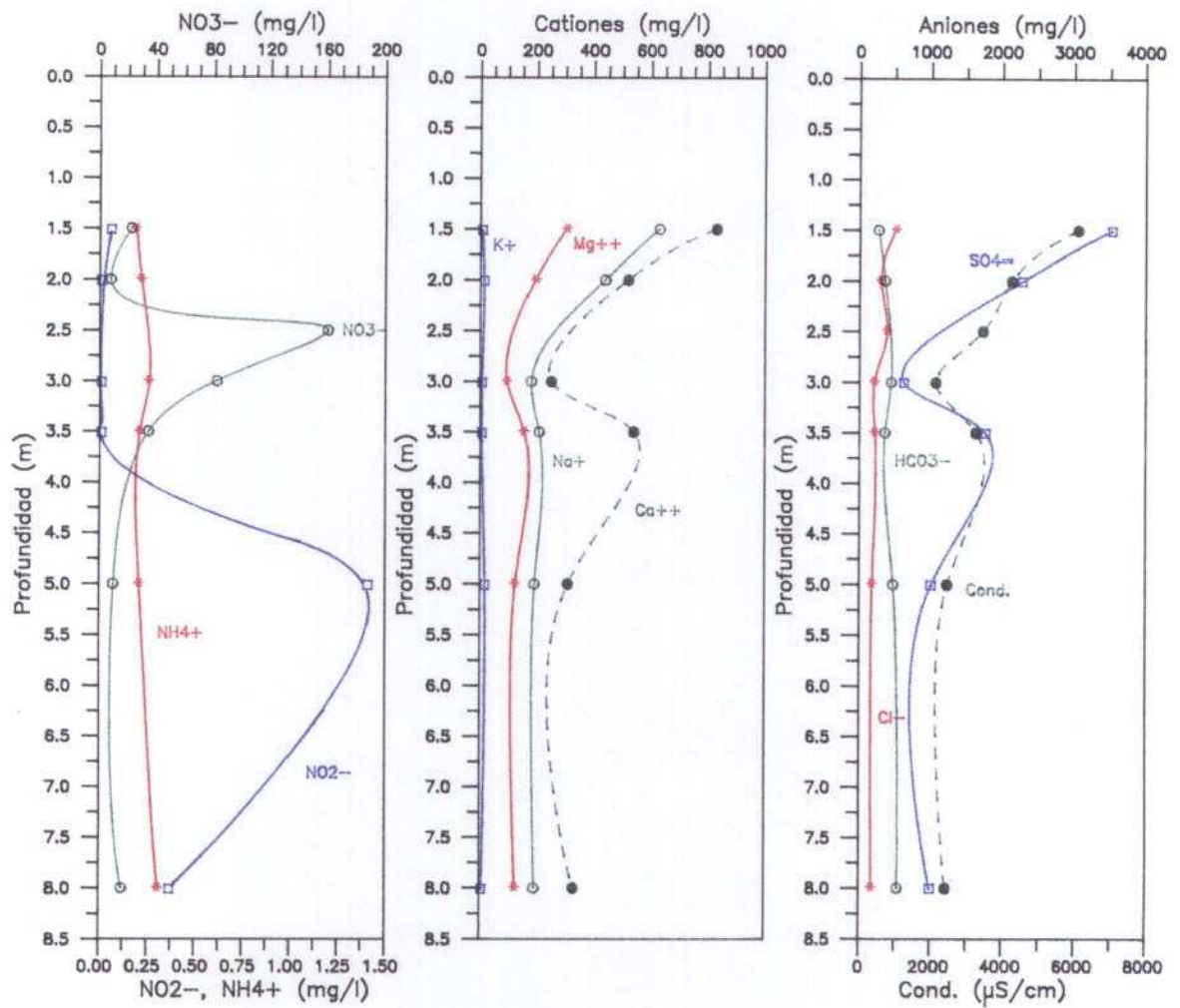


Fig. 5.42 . Variación de la composición química en profundidad (Parcela 2, Mayo)

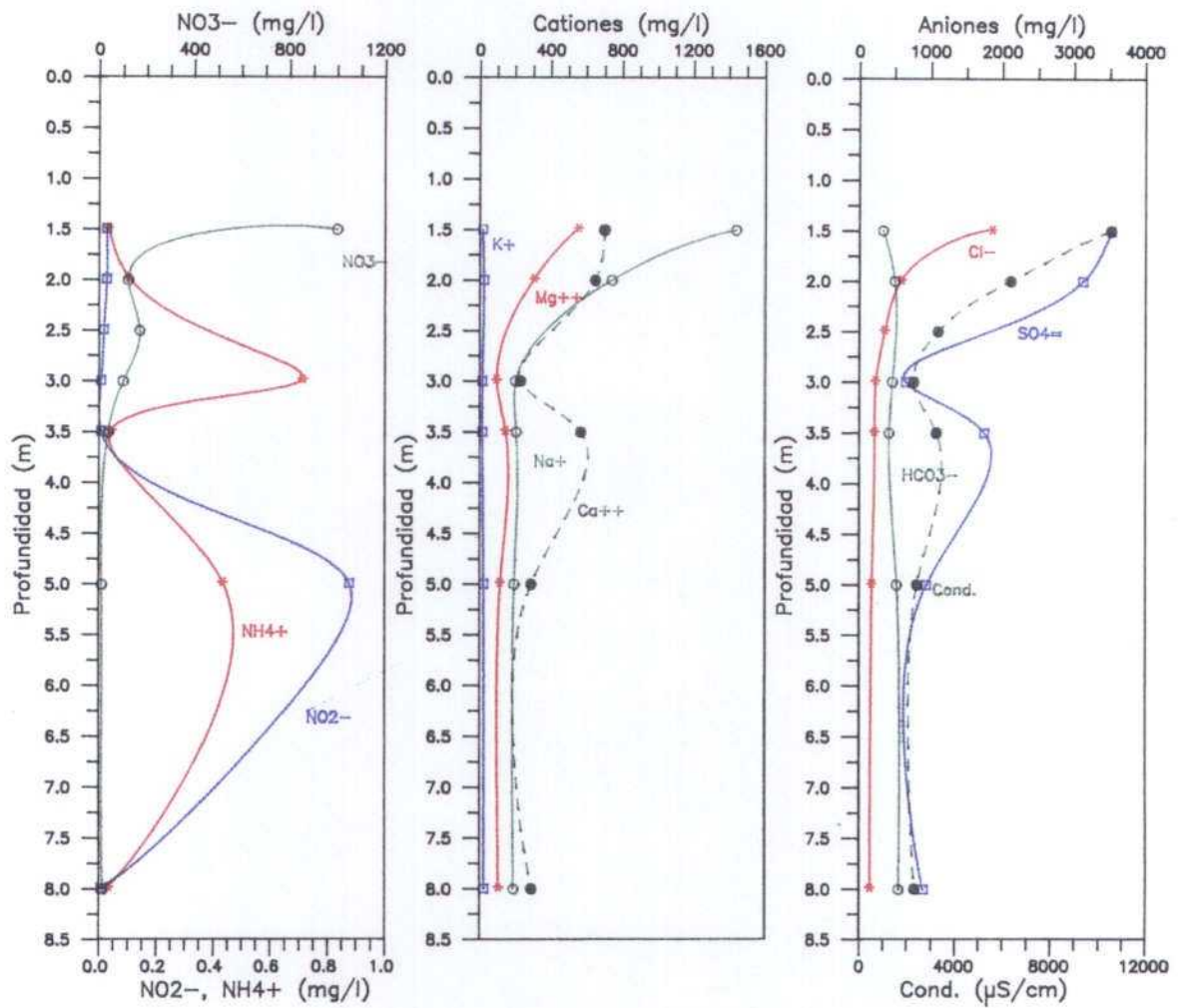


Fig. 5.43 . Variación de la composición química en profundidad (Parcela 2, Junio)

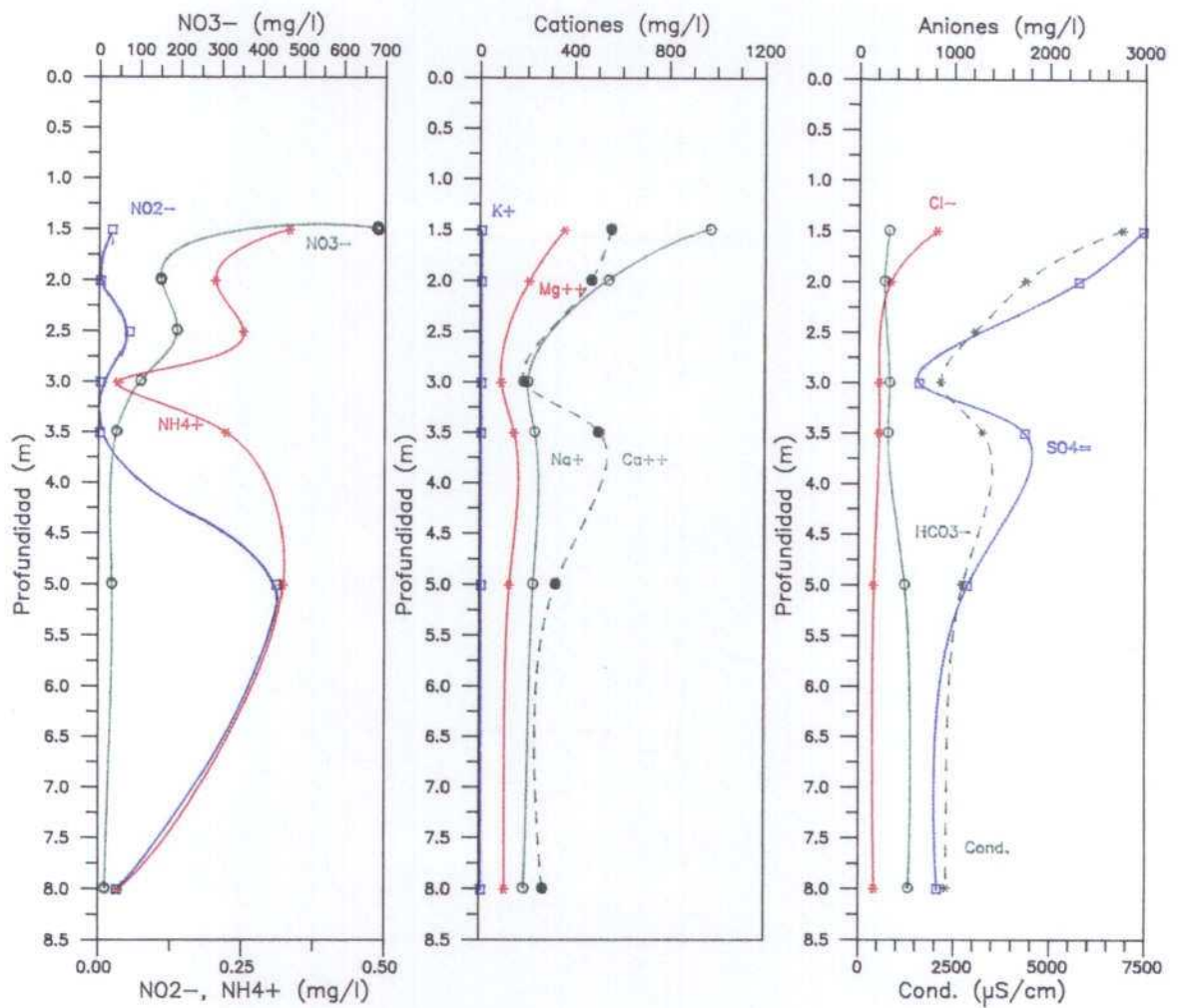


Fig. 5.44 . Variación de la composición química en profundidad (Parcela 2, Julio)

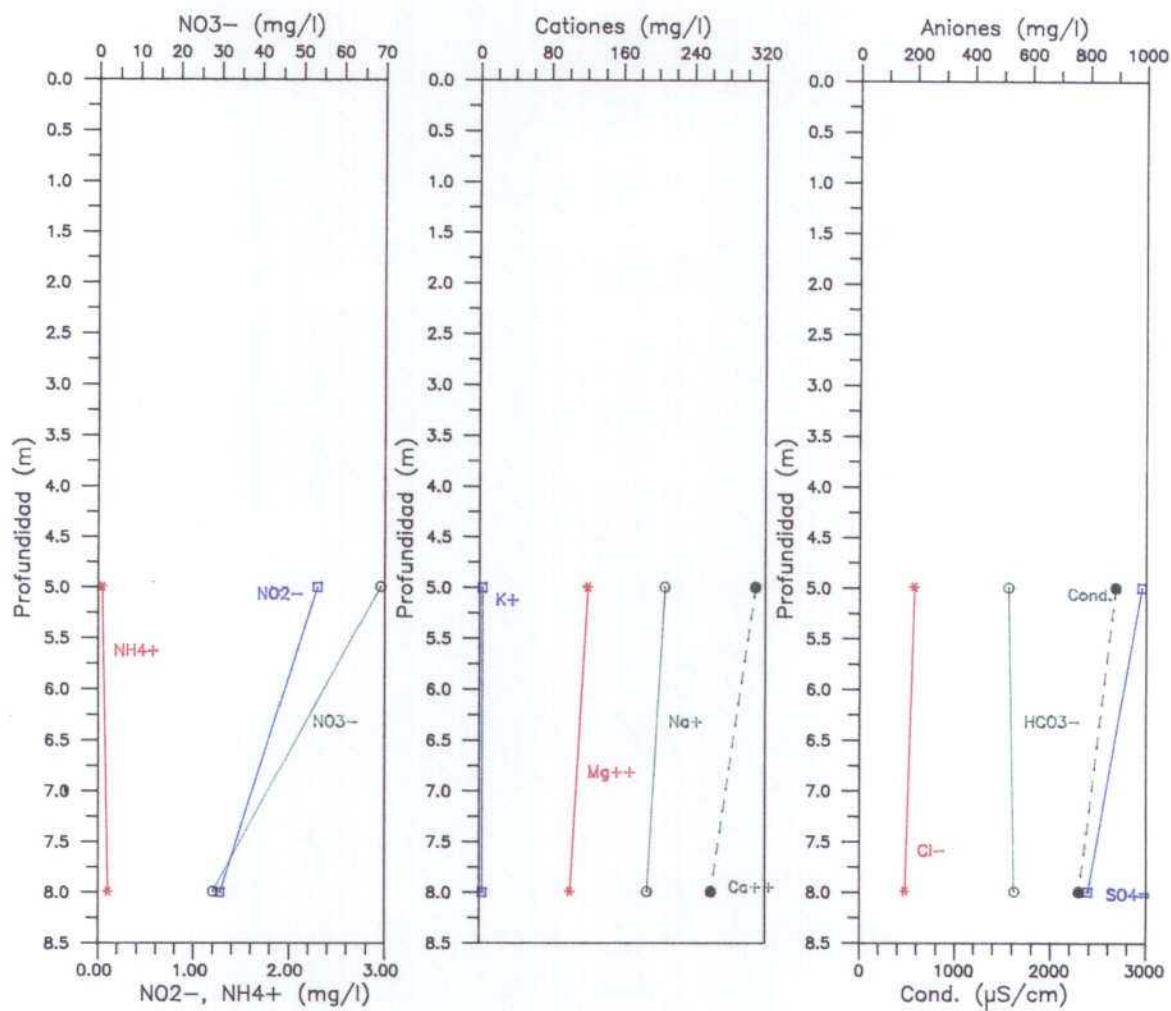


Fig. 5.45 . Variación de la composición química en profundidad (Parcela 2, Agosto)

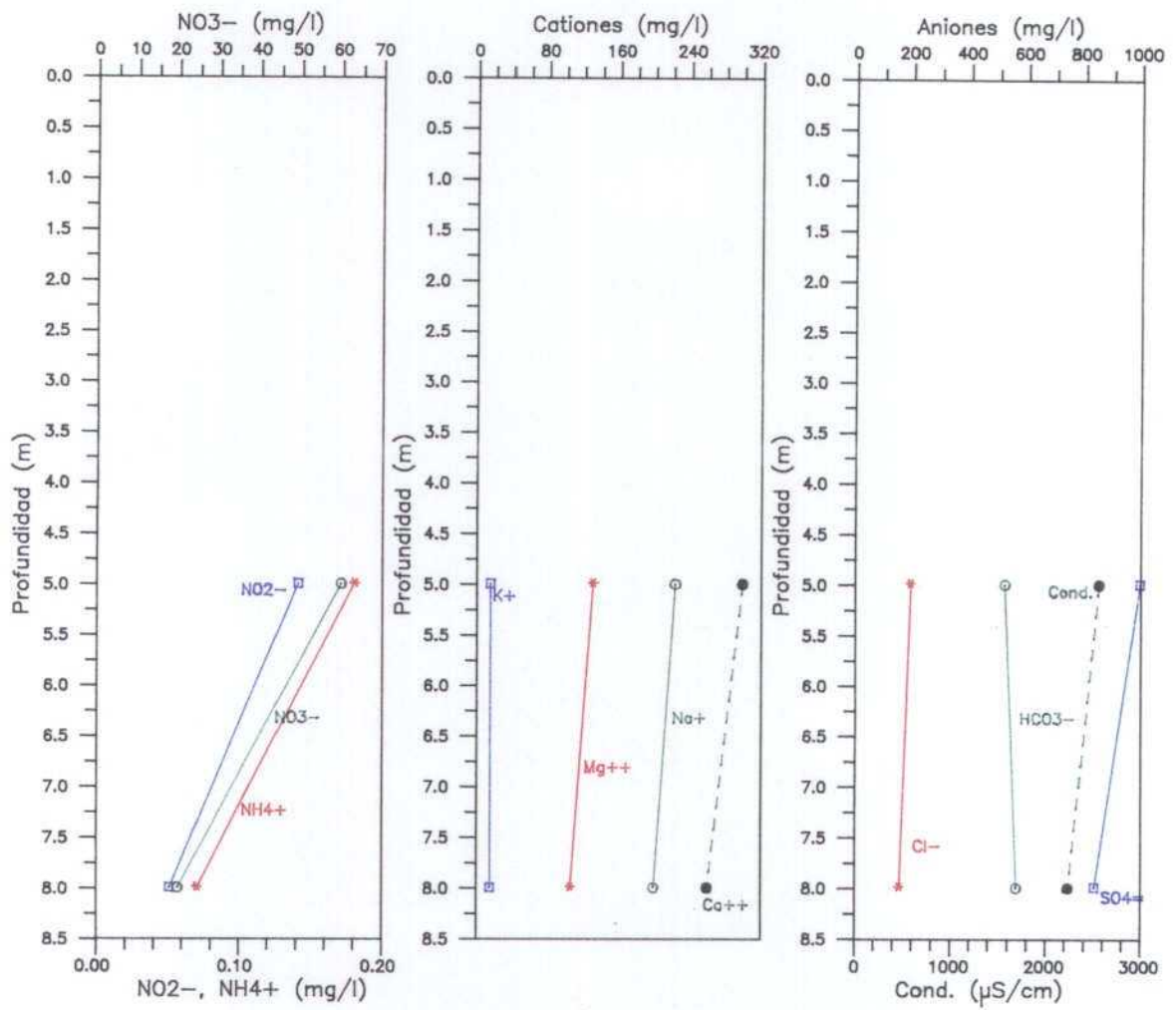


Fig. 5.46 . Variación de la composición química en profundidad (Parcela 2, Septiembre)



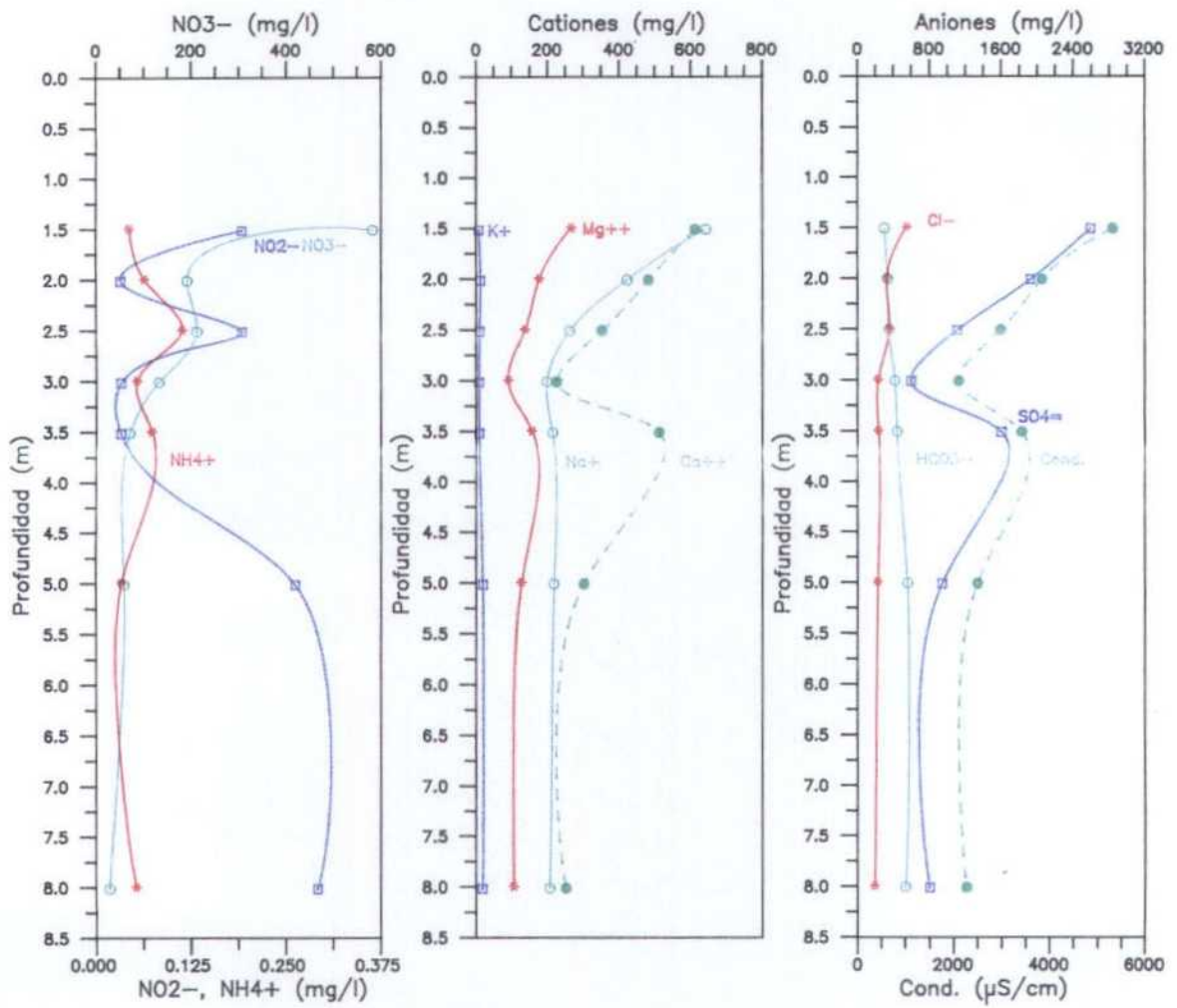


Fig. 5.47. . Variación de la composición química en profundidad (Parcela 2, Octubre)

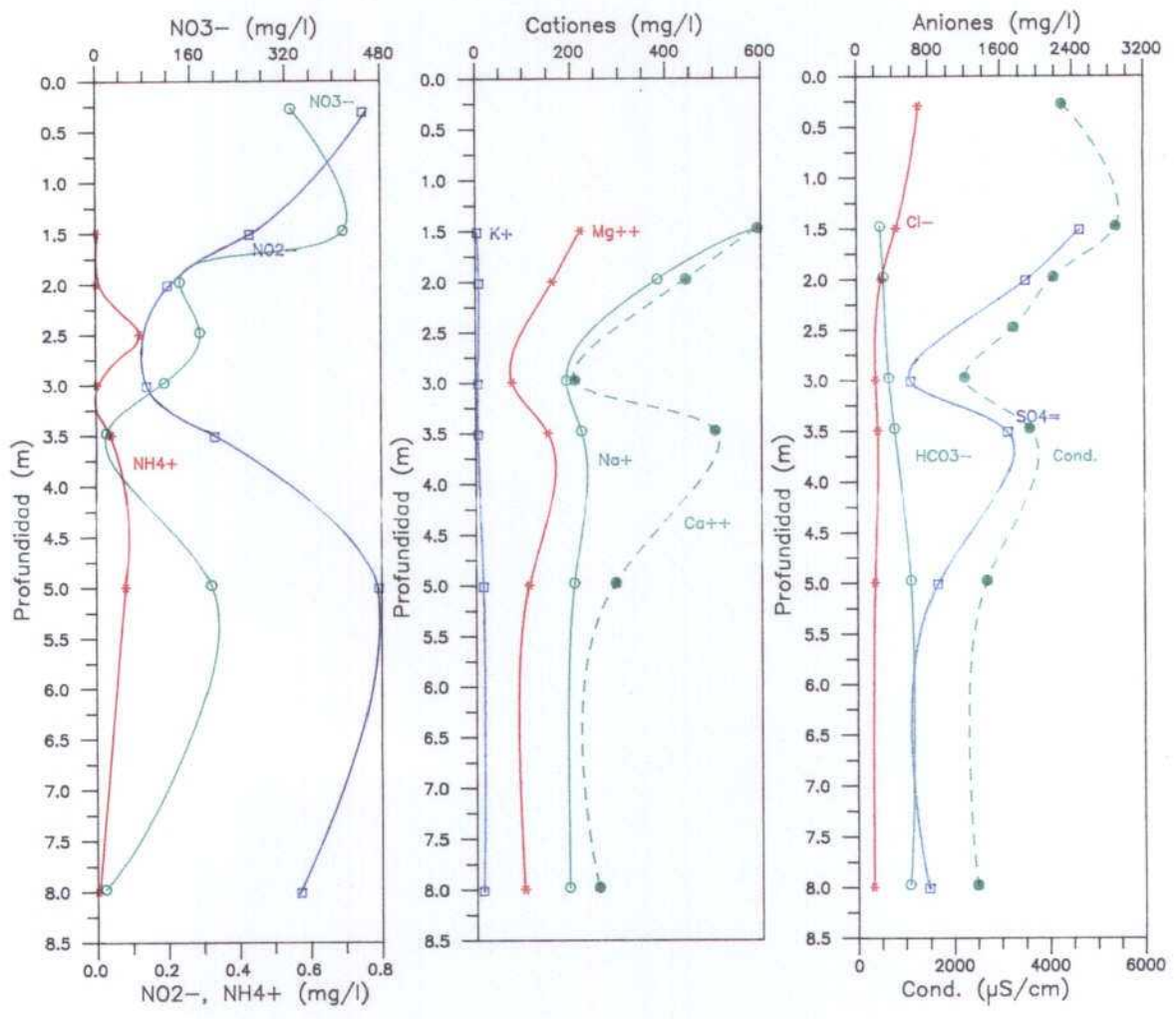


Fig. 5.48 Variación de la composición química en profundidad (Parcela 2, Noviembre)

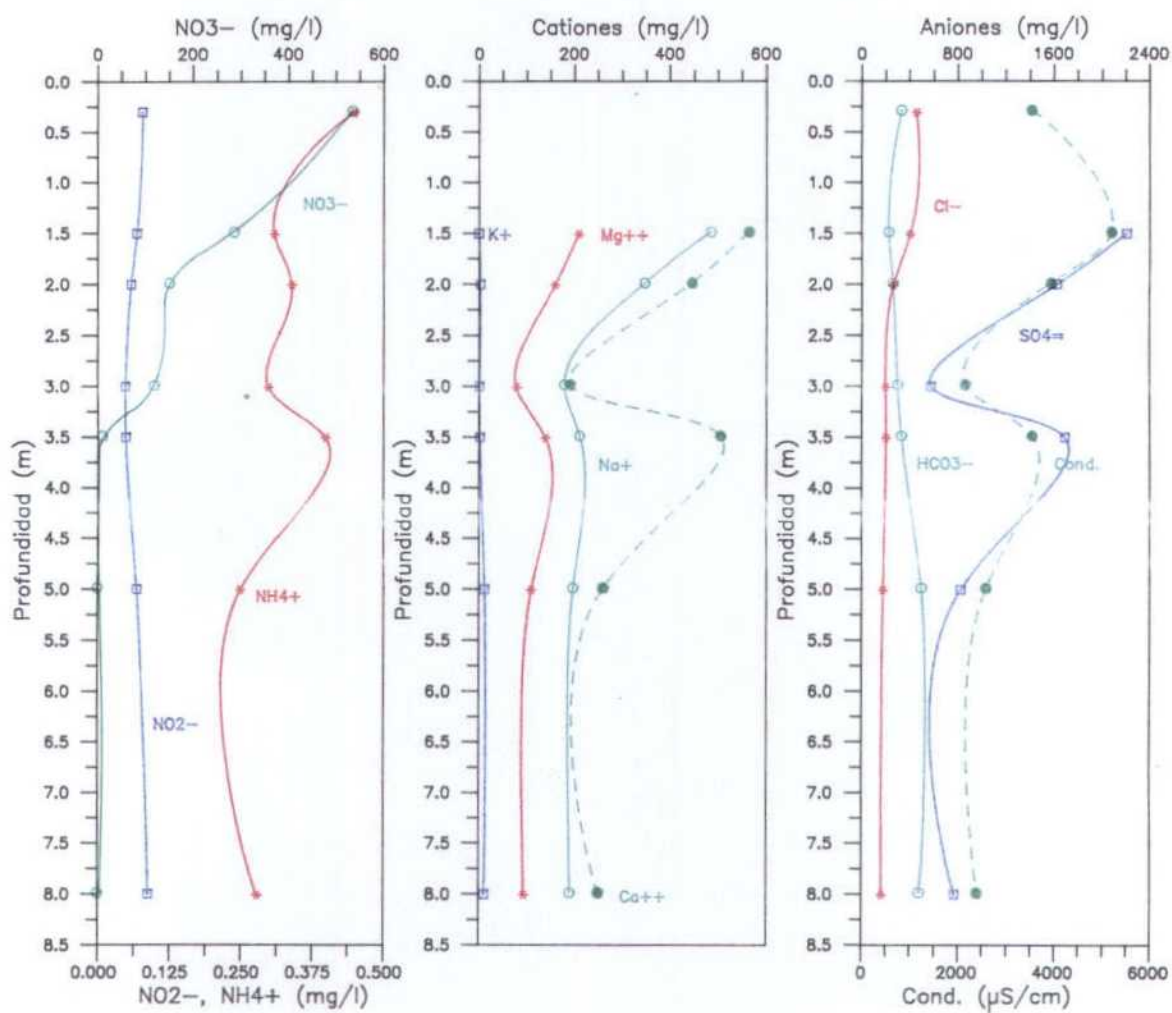


Fig.5.49 Variación de la composición química en profundidad (Parcela 2, Diciembre)



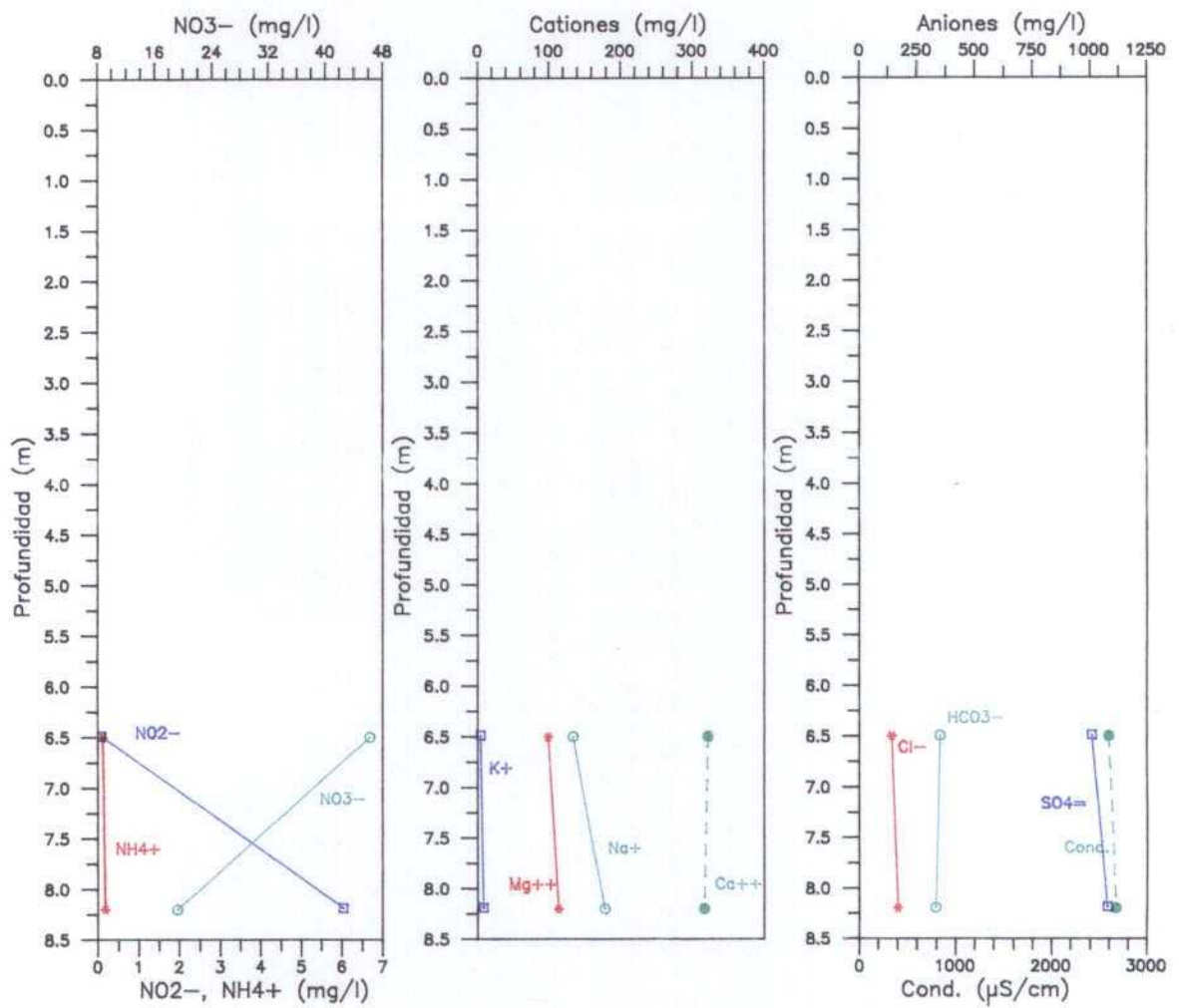


Fig. 5.50 . Variación de la composición química en profundidad (Parcela 3, Enero)

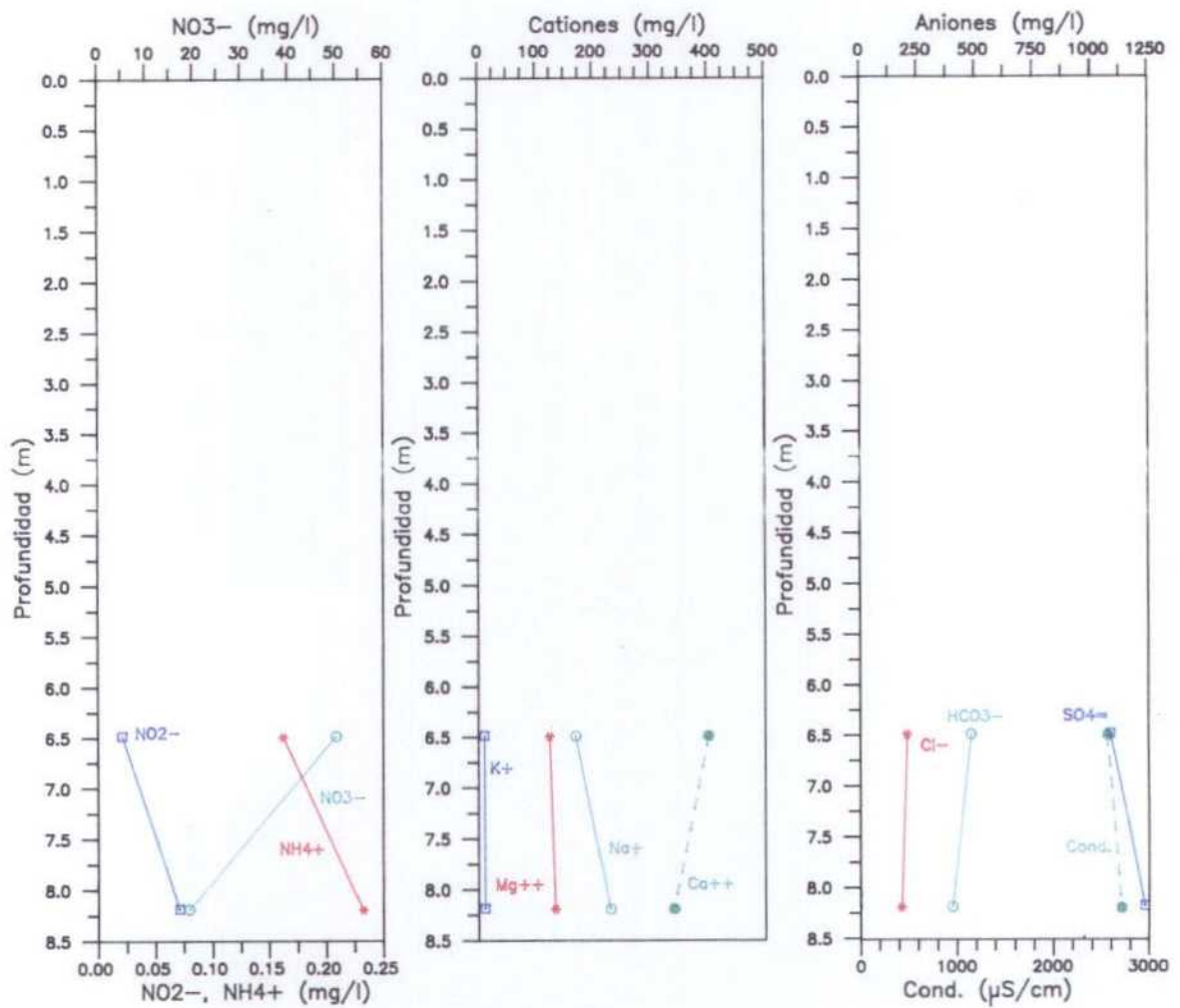


Fig. 5.51 . Variación de la composición química en profundidad (Parcela 3, Febrero)

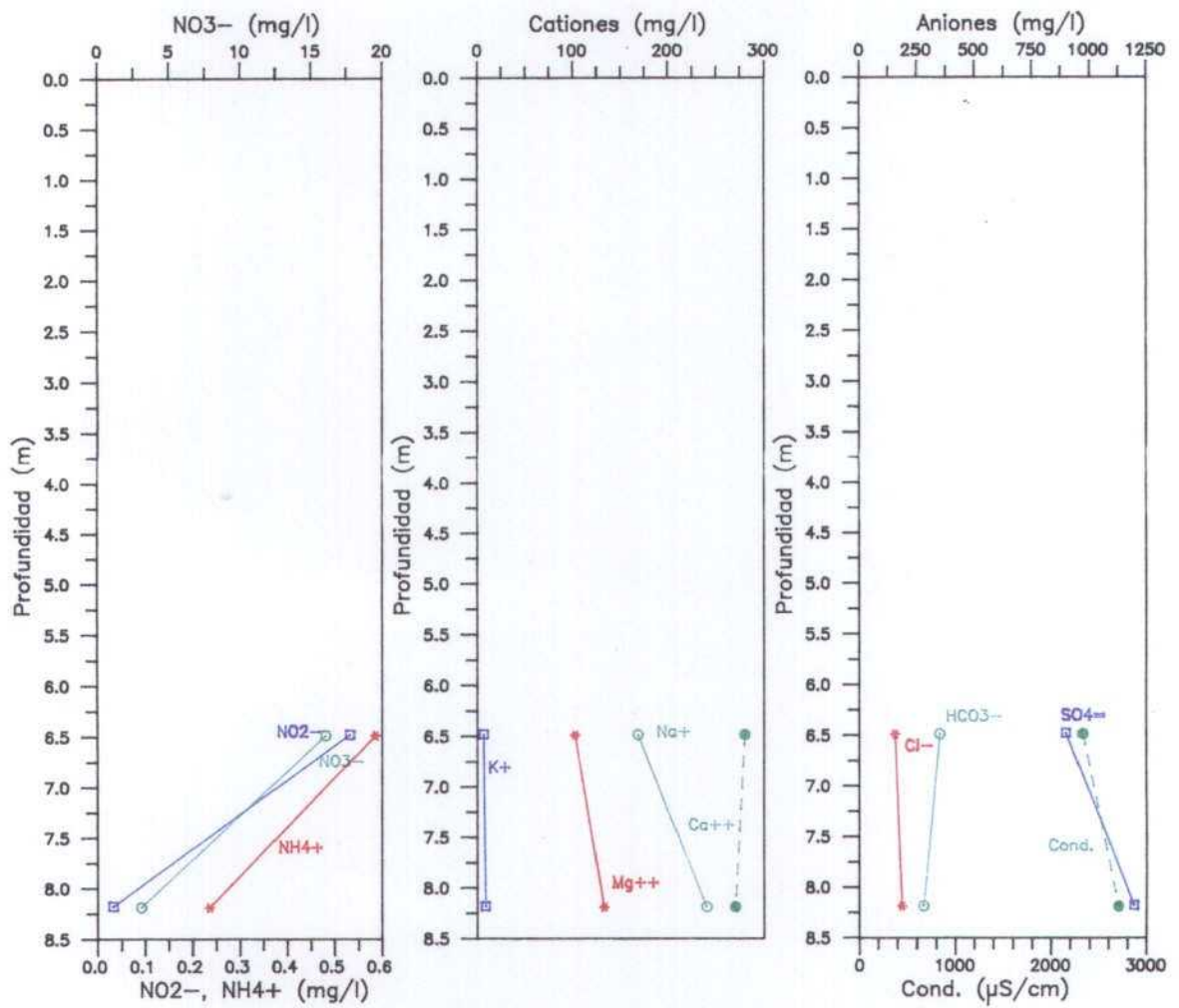


Fig. 5.52 . Variación de la composición química en profundidad (Parcela 3, Marzo)

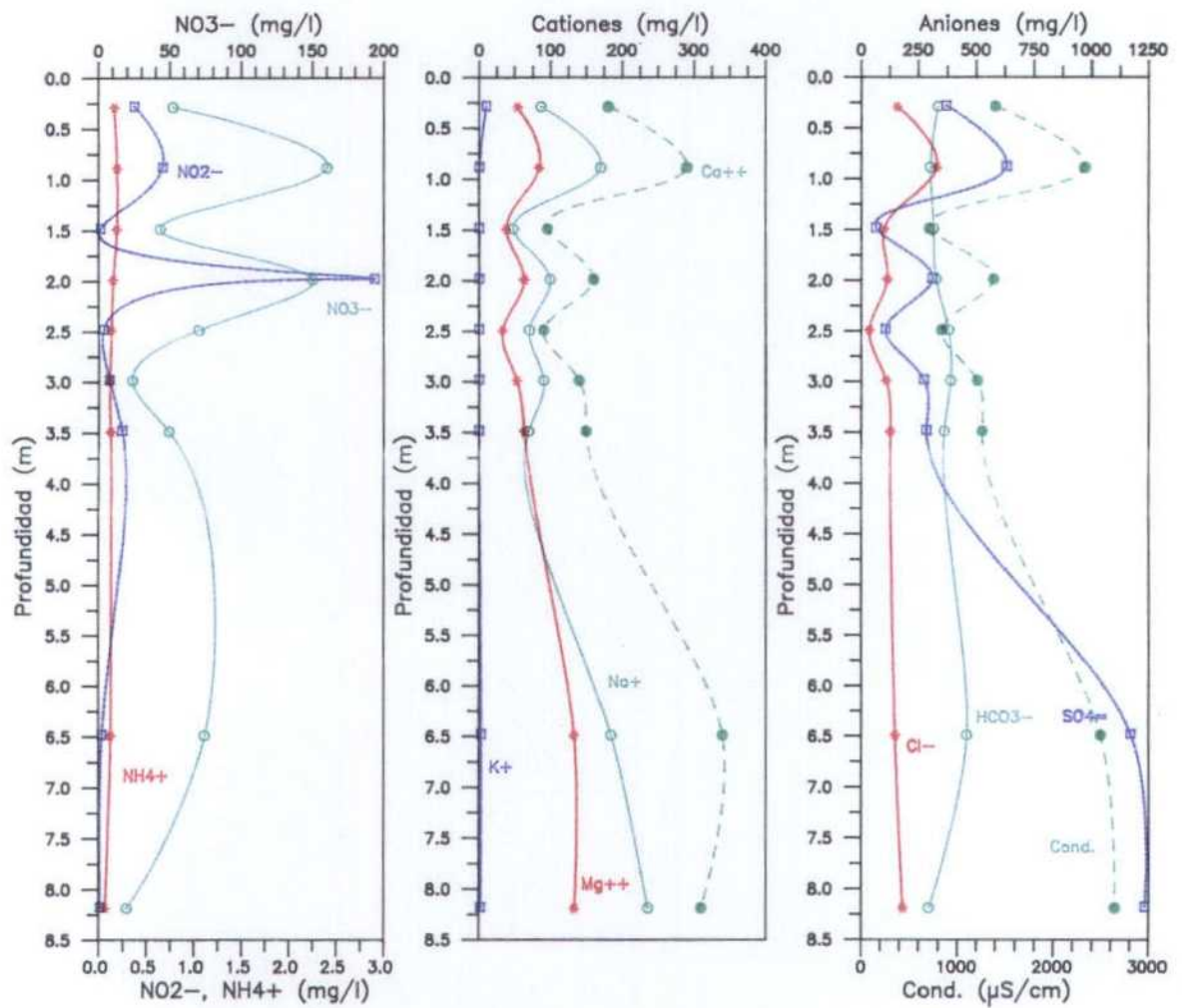


Fig. 5.53 . Variación de la composición química en profundidad (Parcela 3, Abril)

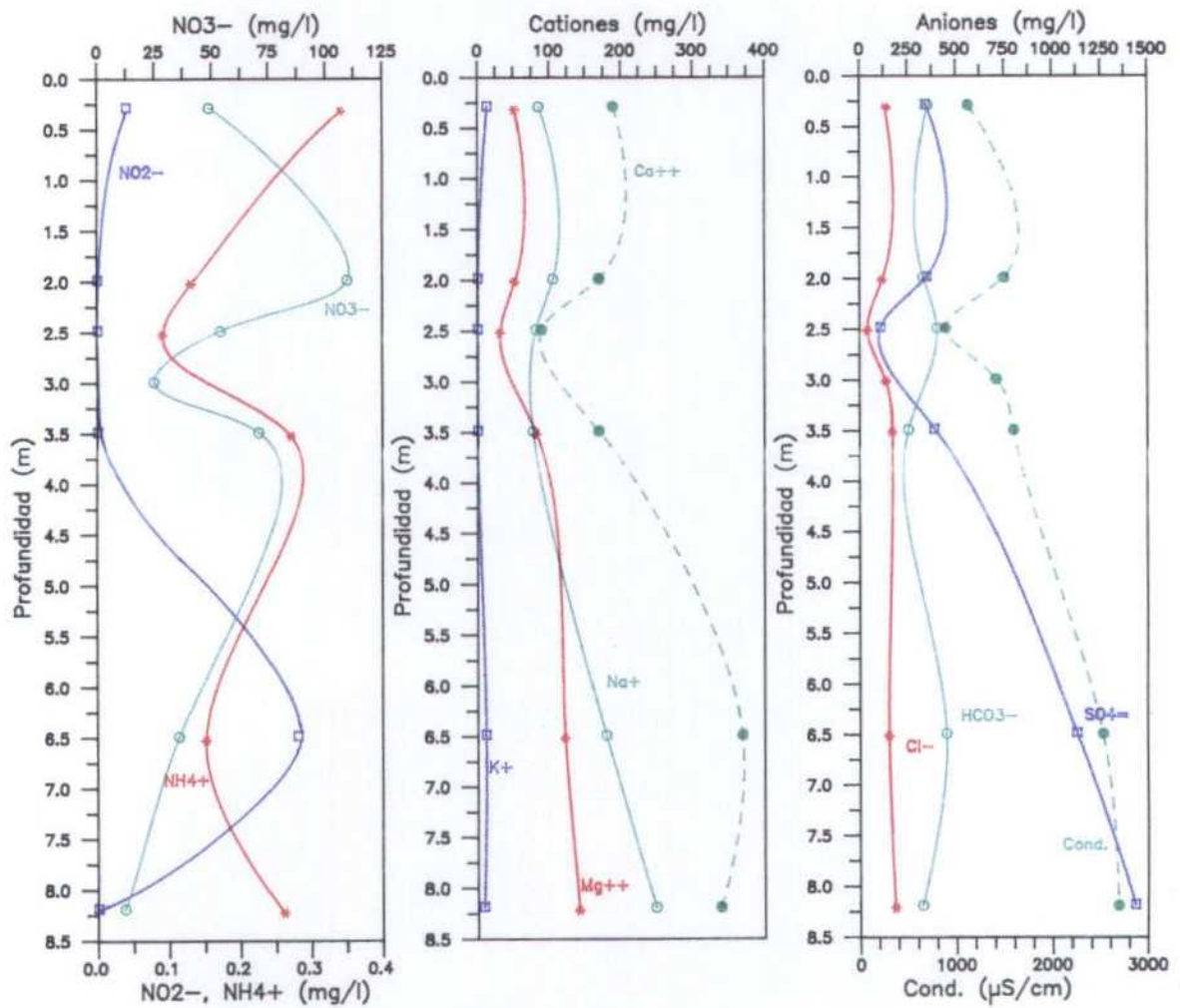


Fig. 5.54 . Variación de la composición química en profundidad (Parcela 3, Mayo)



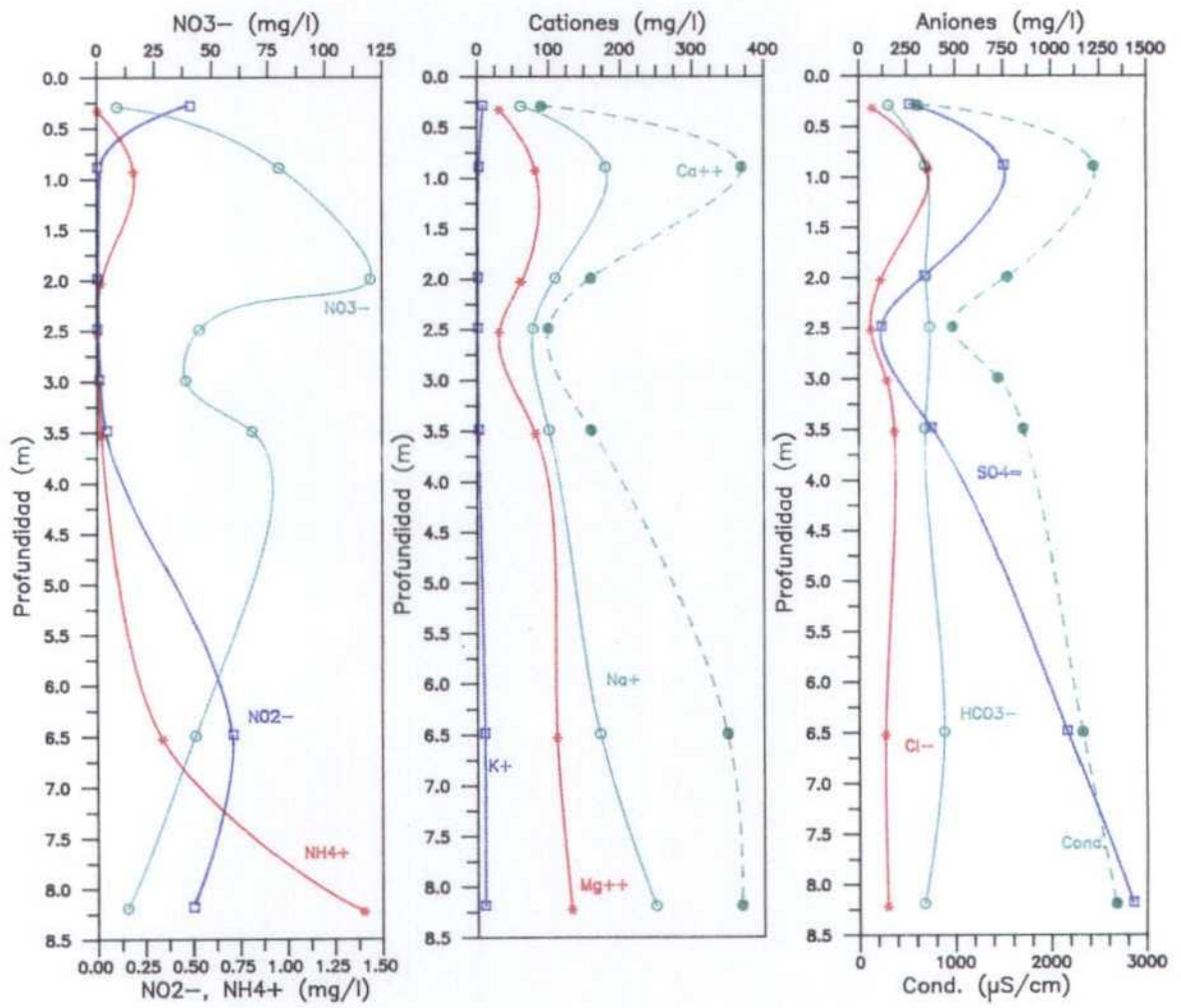


Fig. 5.55 . Variación de la composición química en profundidad (Parcela 3, Junio)

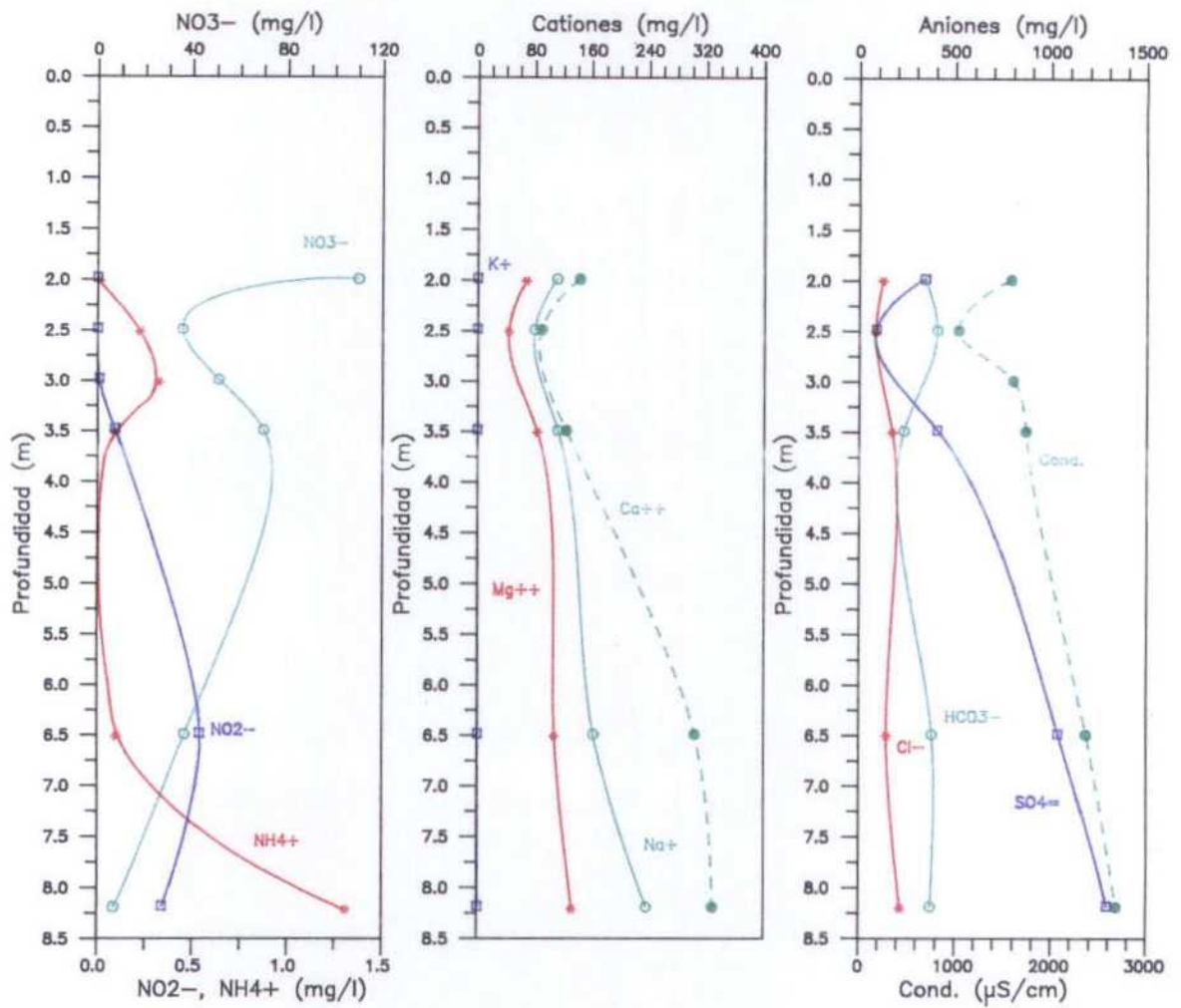


Fig. 5.56 . Variación de la composición química en profundidad (Parcela 3, Julio)

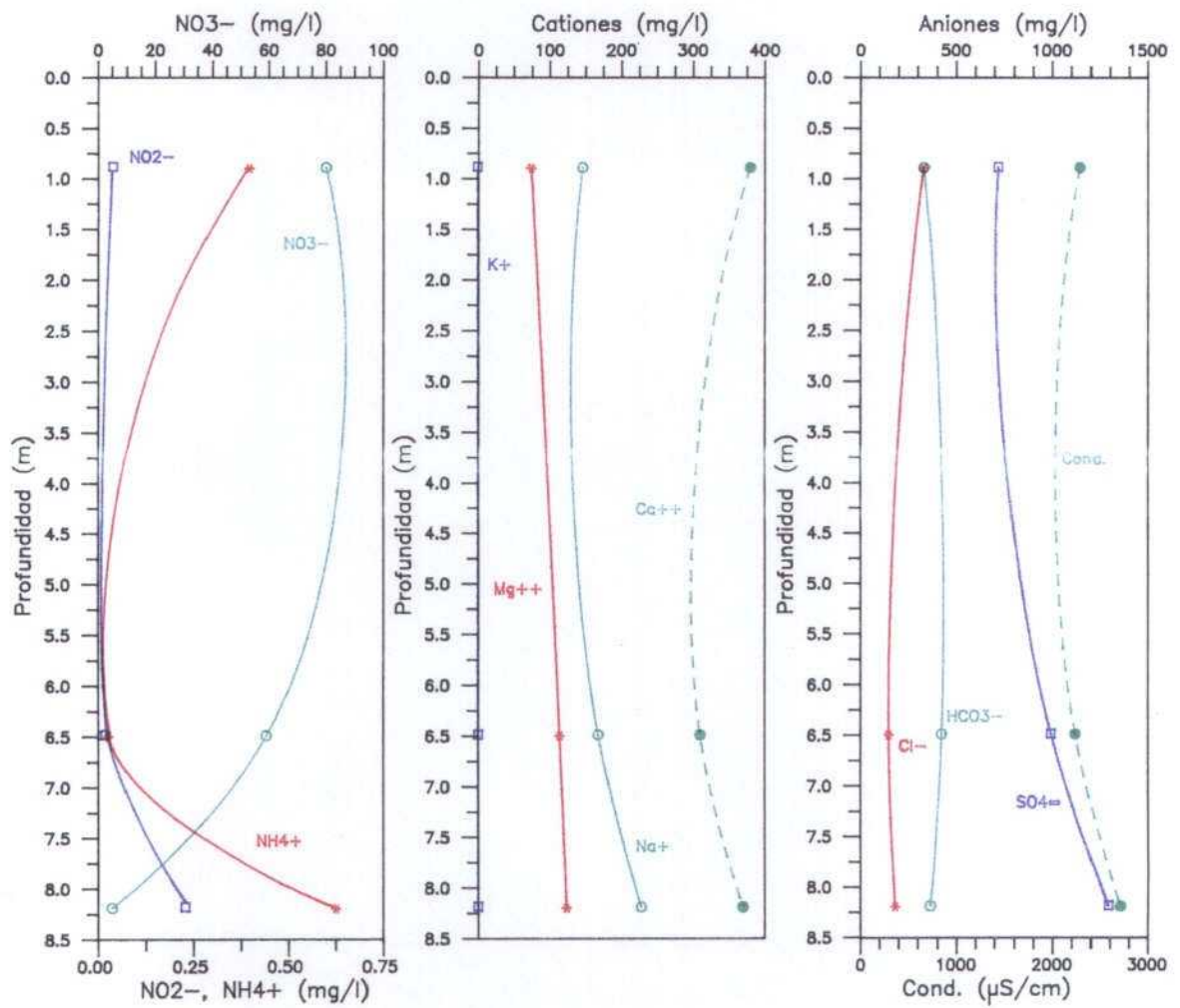


Fig. 5.57 . Variación de la composición química en profundidad (Parcela 3, Agosto)



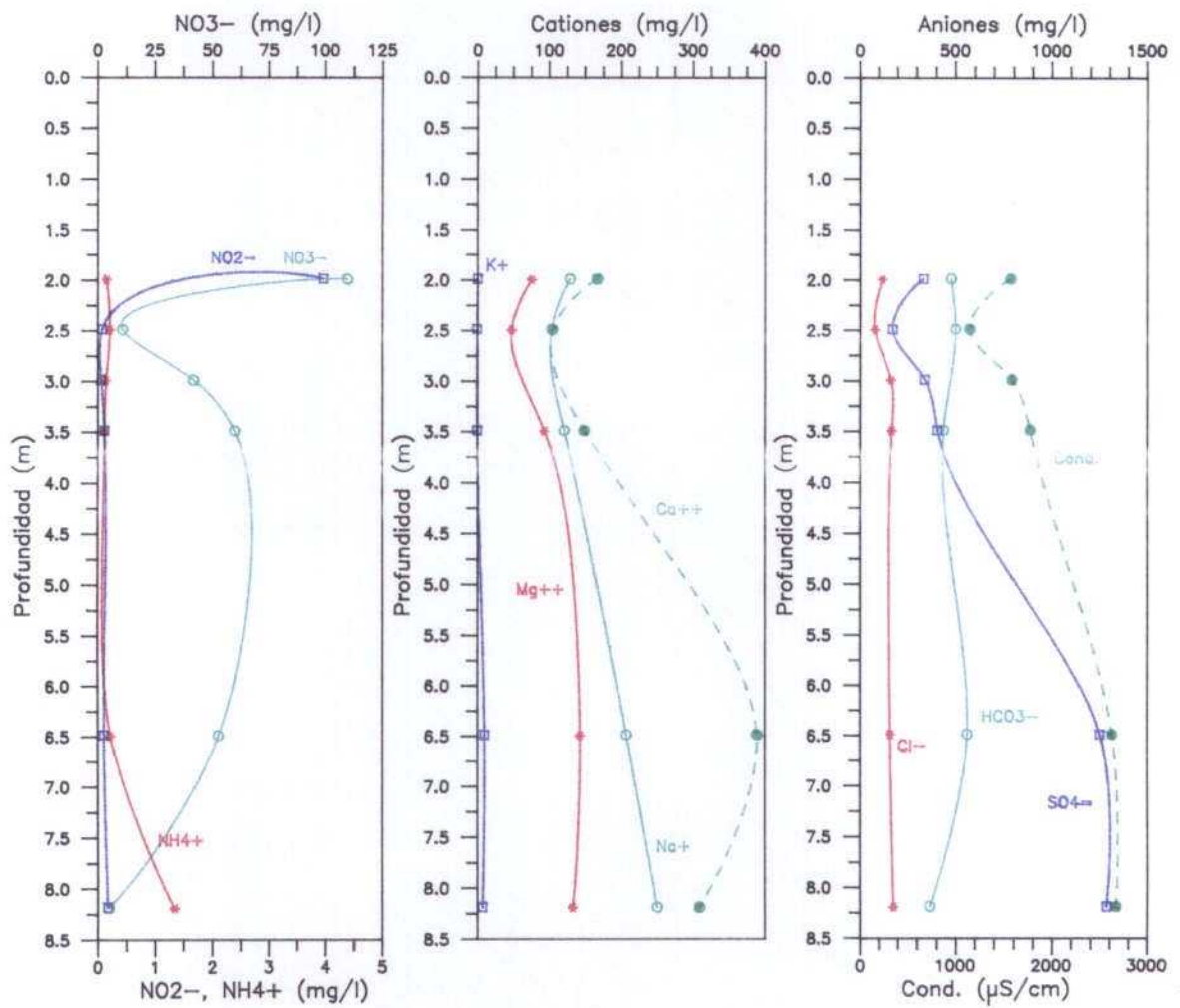


Fig. 5.58 . Variación de la composición química en profundidad (Parcela 3, Septiembre)

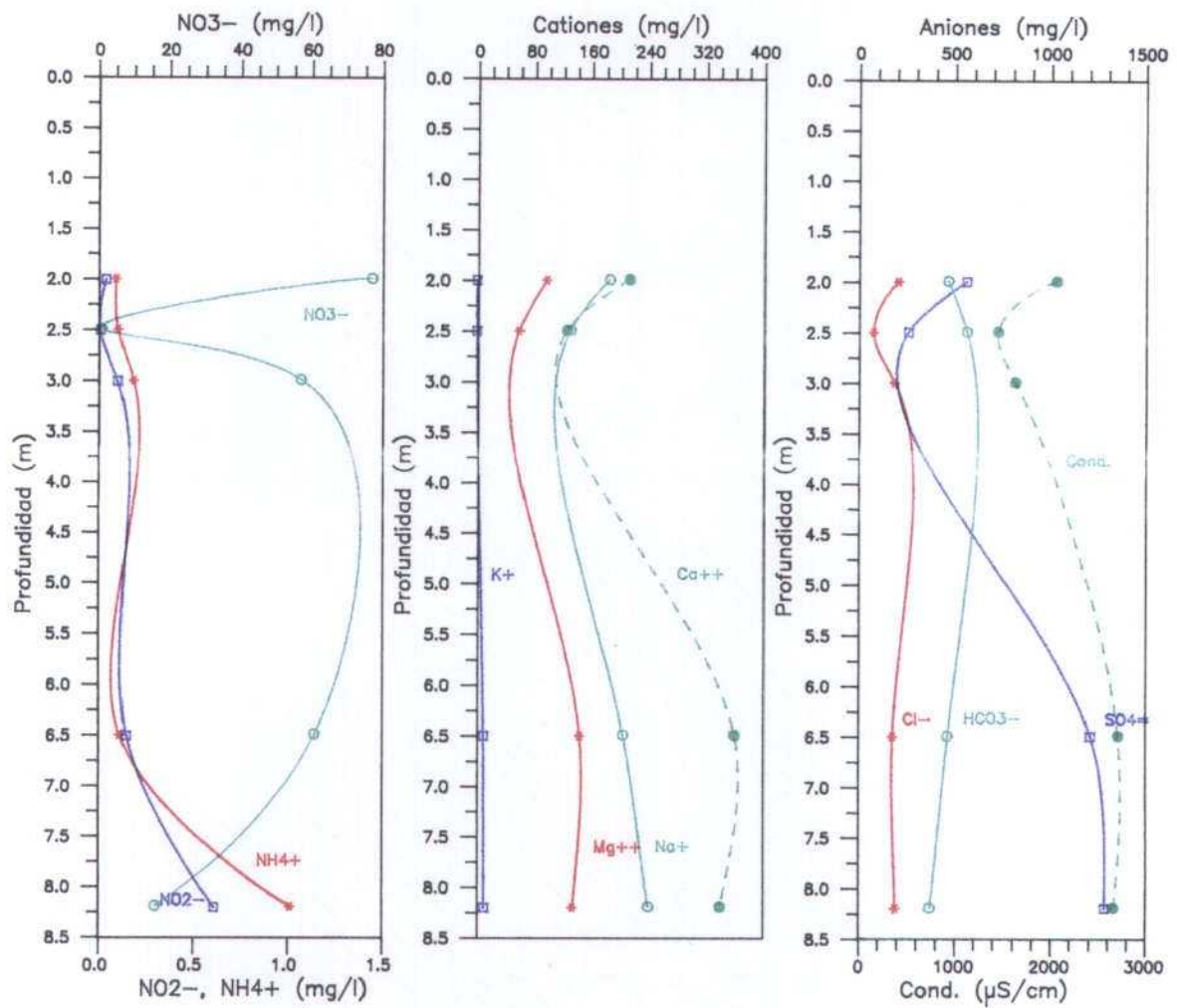


Fig. 5.59 . Variación de la composición química en profundidad (Parcela 3, Octubre)

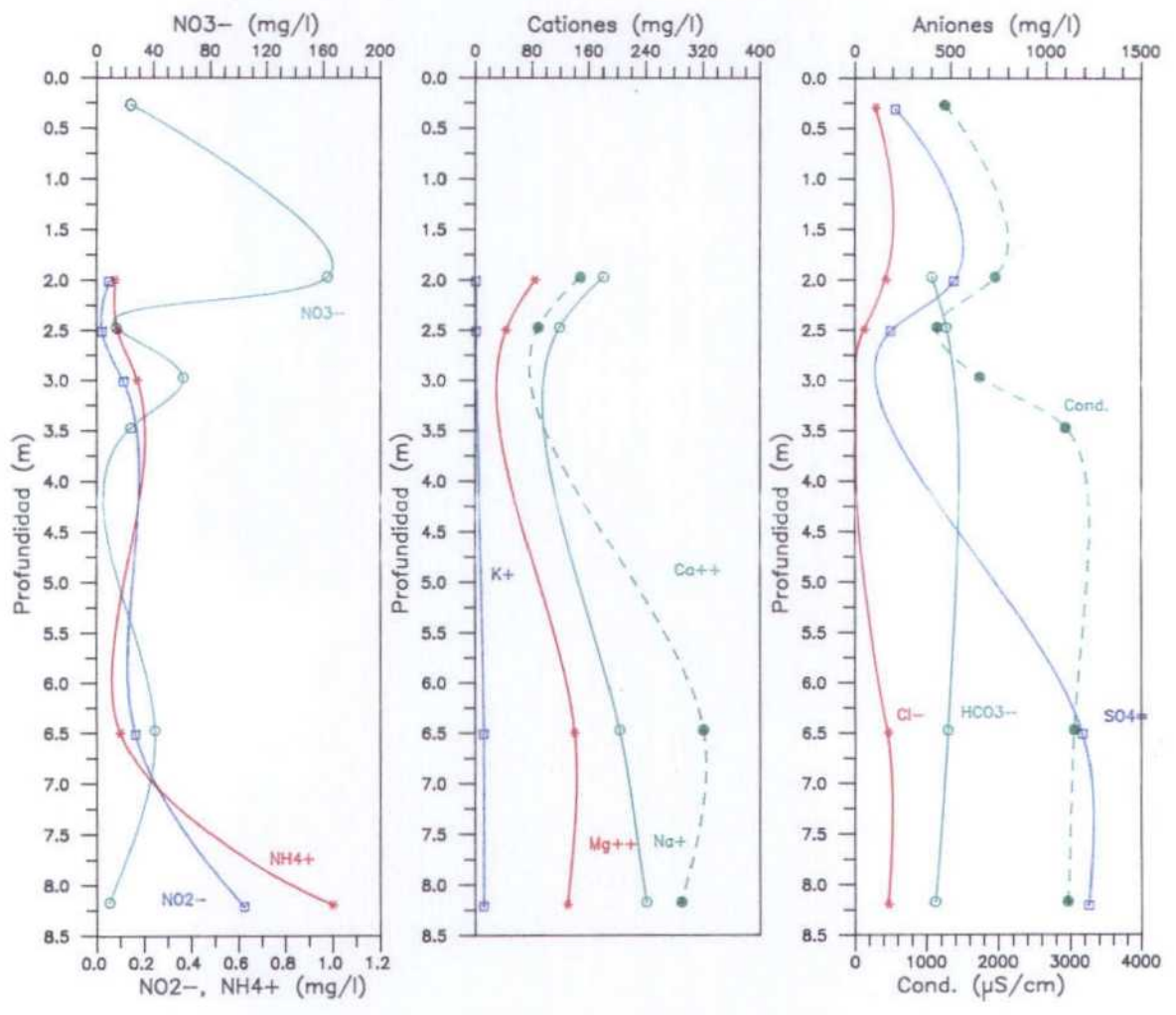


Fig. 5.60 Variación de la composición química en profundidad (Parcela 3, Noviembre)

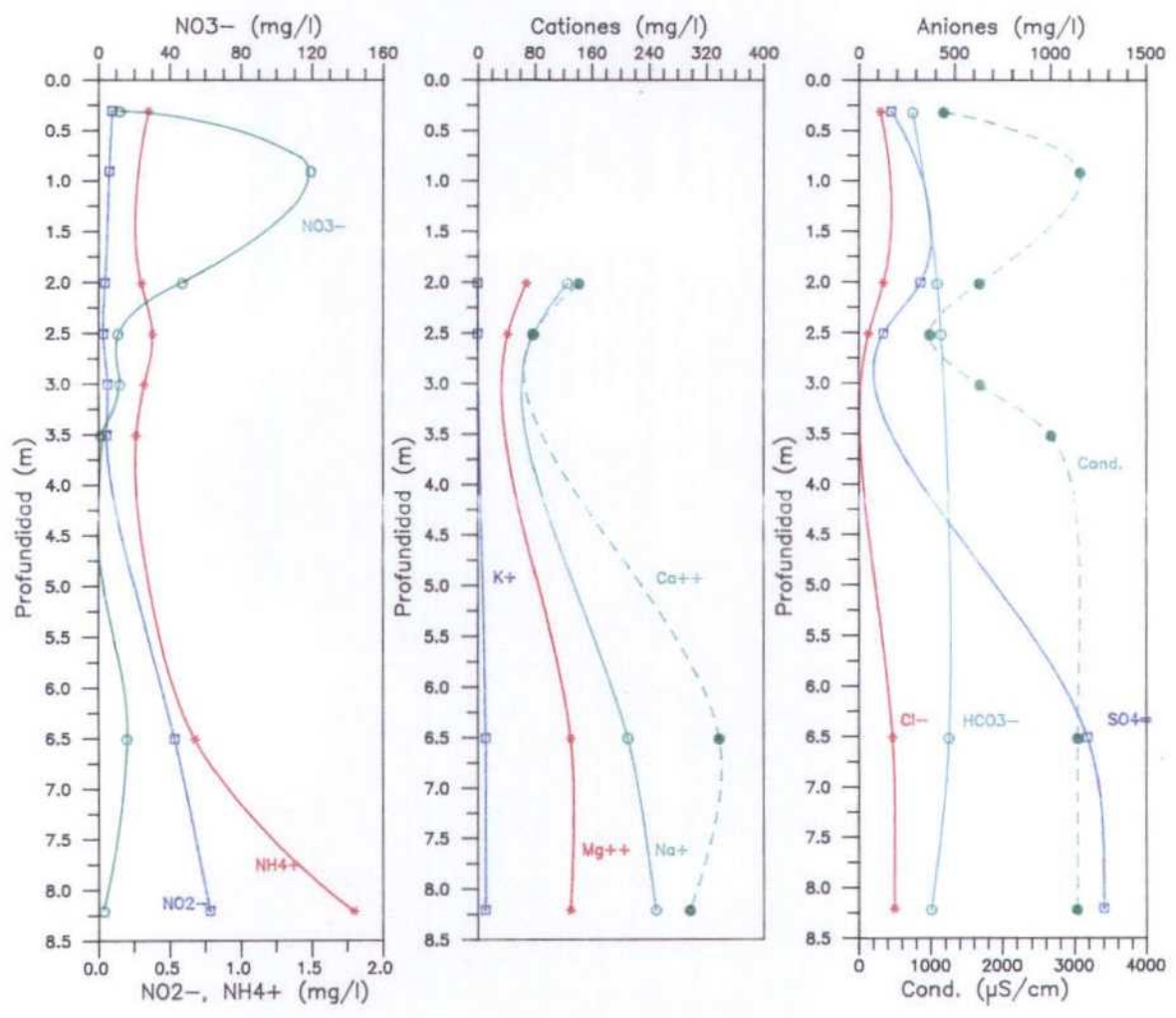


Fig. 5.61 Variación de la composición química en profundidad (Parcela 3, Diciembre)

En el caso de los cationes se observa que la concentración de  $K^+$  no varía apenas en profundidad. La de calcio sigue una tendencia similar a sulfatos y conductividad, y, el  $Na^+$  tiende a aumentar, alcanzando los valores máximos en el piezómetro profundo.

En el mes de agosto (figura 5.57.), solo se dispone de la composición química de un lisímetro (L16) y de los piezómetros.

Los valores más altos de nitratos se obtienen a una profundidad de 2 m (L18).

## 5.7 . EVOLUCION TEMPORAL DE LA CALIDAD DEL AGUA

Se analizan aquí las variaciones que se observan en los distintos puntos de muestreo (lisímetros y piezómetros), para el caso de las especies nitrogenadas, sulfatos y litio, figuras 5.62 . a 5.70. en la parcela E-1, figuras 5.71. a 5.79. en la E-2 y figuras 5.80. a 5.88. en la E-3.

Se representan sulfatos junto a las especies nitrogenadas para estudiar la influencia que los sulfatos procedentes de los fertilizantes ejercen en la variación de las especies nitrogenadas.

En la parcela E-1 se observa una disminución en los valores de  $NO_3^-$  durante los cinco primeros meses, para el caso de los lisímetros L01, L02 y L03. En el tomamuestras de mayor profundidad, siguen una tendencia similar nitratos y sulfatos.

El amonio se mantiene sin variación apreciable en los lisímetros y aumenta en septiembre en los piezómetros, donde alcanza un valor similar (la escala utilizada es distinta en ambos casos).

En la figura 5.70. se refleja la evolución temporal de la concentración de litio, que parte de 0 mg/l en los primeros meses de muestreo, alcanza un valor máximo de 23 mg/l durante septiembre-octubre, y desde ahí disminuye. Esta tendencia de aumento de la concentración hasta llegar a octubre y disminución desde este mes, se manifiesta también en los lisímetros (en éstos el valor máximo se registra en L05 situado a 2.5 m de profundidad).

En la parcela E-2 se observa una disminución en los valores de  $NO_3^-$  durante los cinco primeros meses, para el caso de los lisímetros L08, L09, L10 y L11.

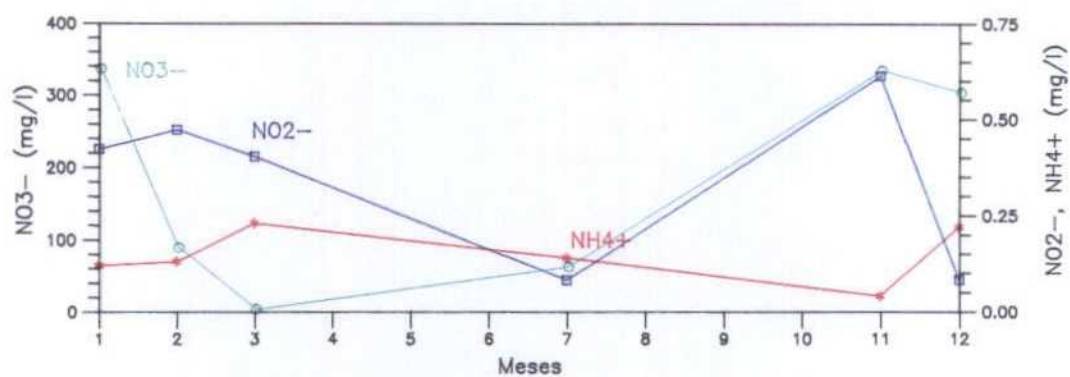
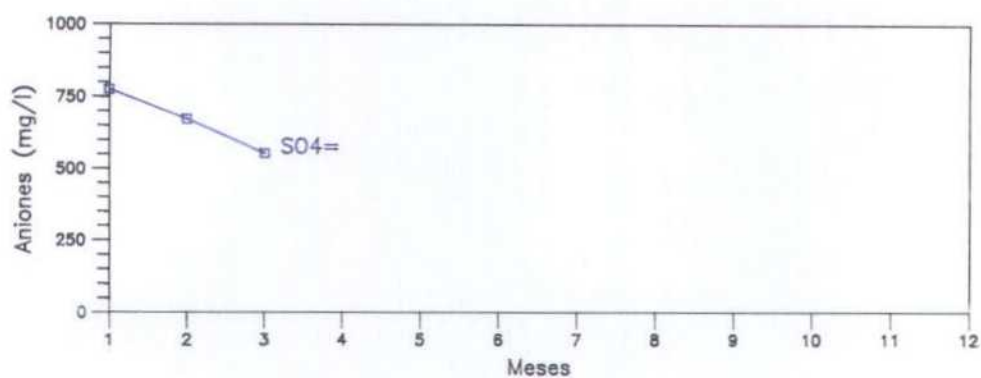


Fig. 5.62. Evolución temporal de la concentración de nitritos, nitratos, amonio y sulfatos. (Parcela 1, Lisímetro L01)



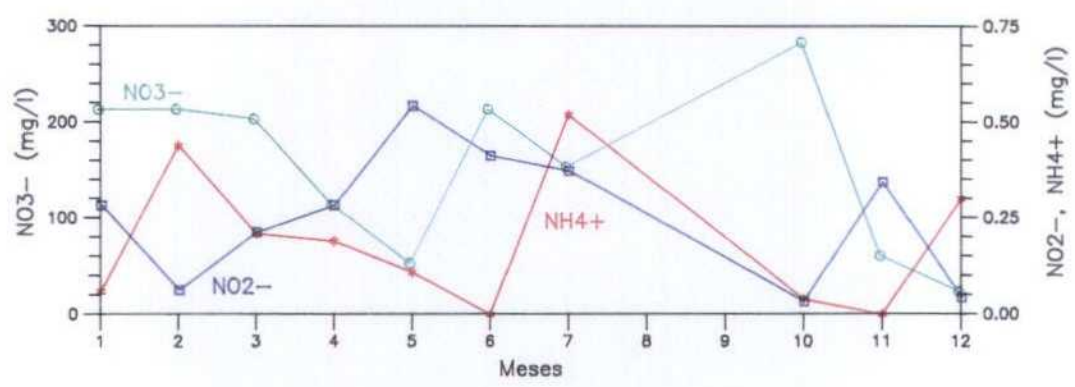
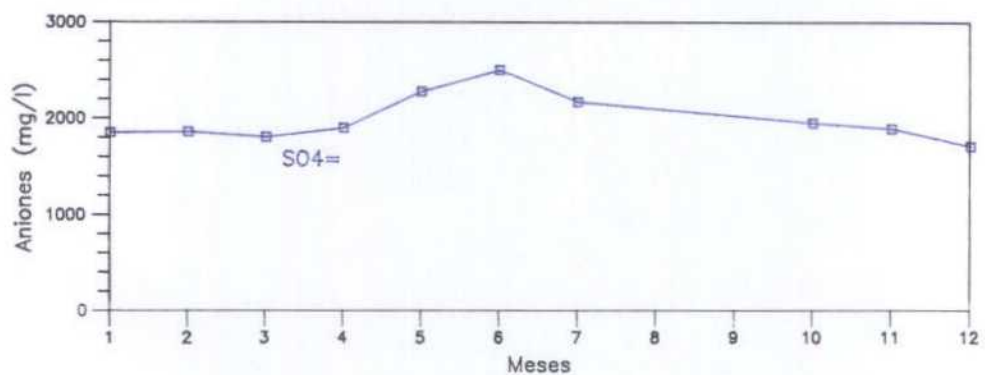


Fig. 5.63. Evolución temporal de la concentración de nitritos, nitratos, amonio y sulfatos. (Parcela 1, Lisímetro L03)

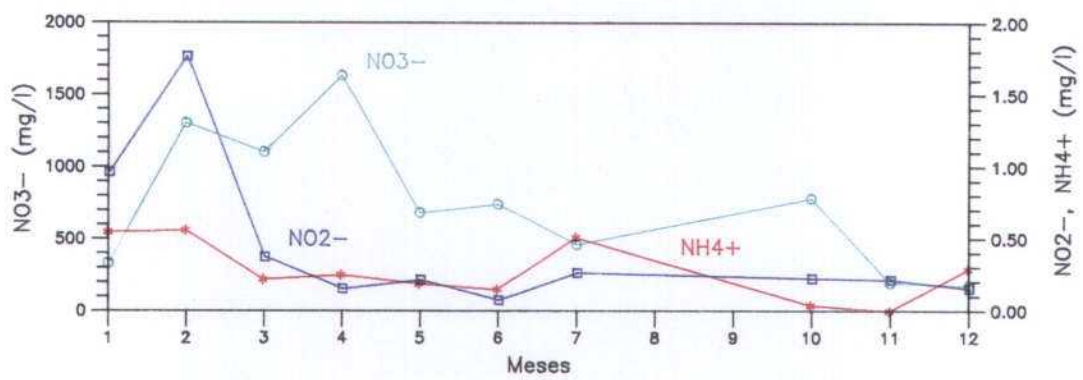
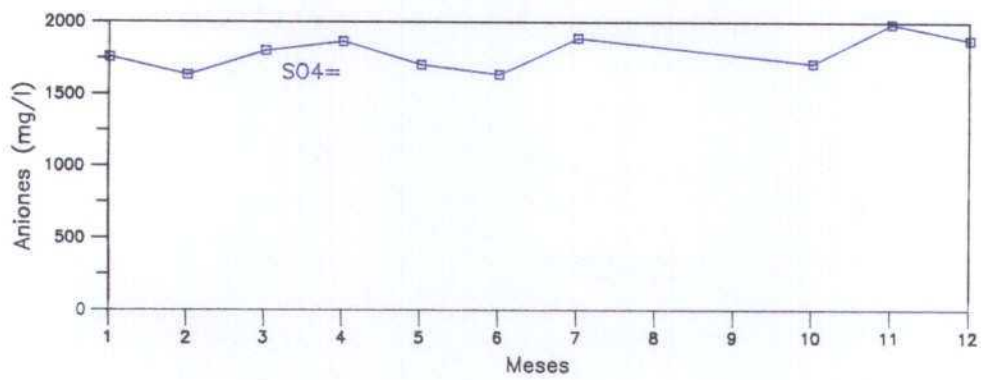


Fig. 5.64 Evolución temporal de la concentración de nitritos, nitros, amonio y sulfatos.  
(Parcela 1, Lisímetro L04)



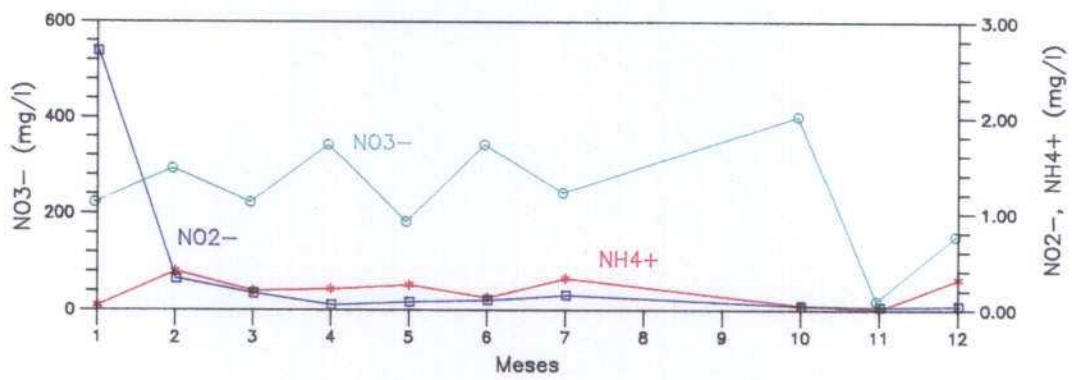
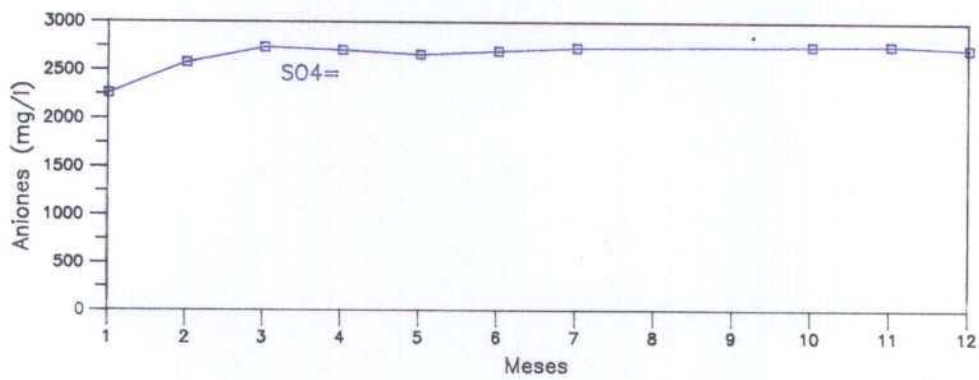


Fig.5.65. Evolución temporal de la concentración de nitritos, nitros, amonio y sulfatos.  
(Parcela 1, Lisímetro L05)

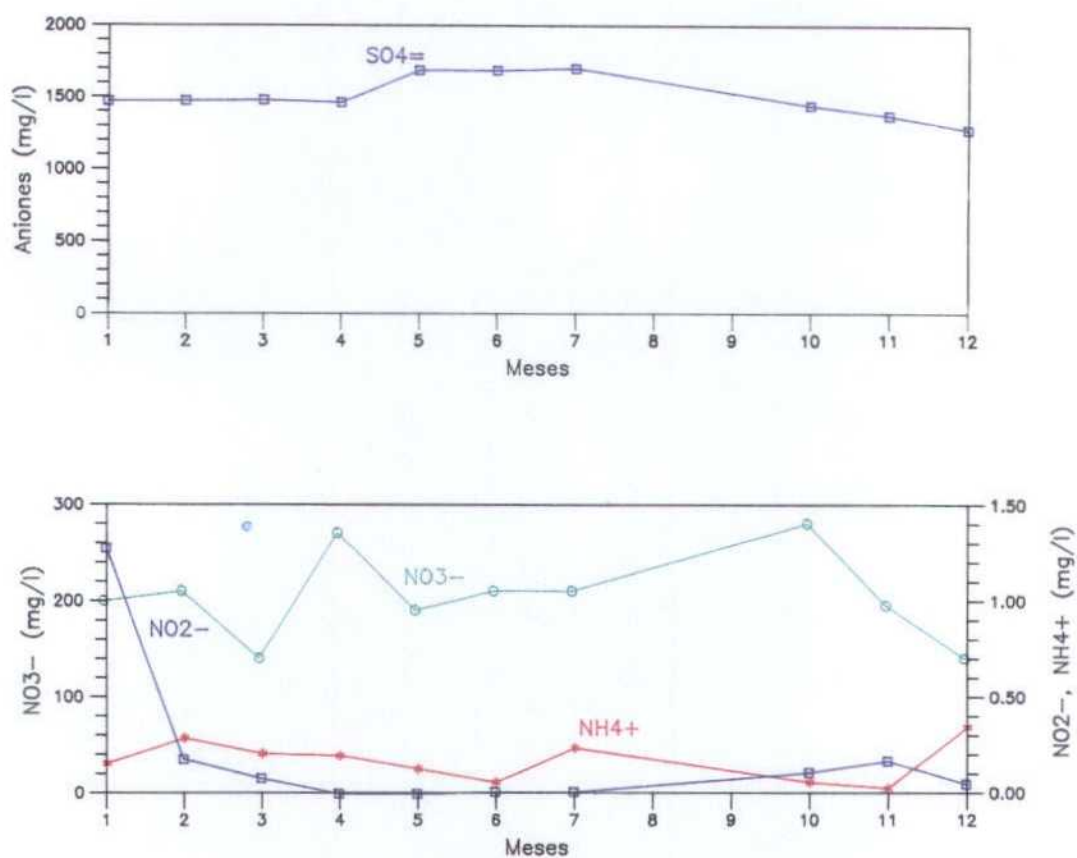


Fig. 5.66. Evolución temporal de la concentración de nitritos, nitratos, amonio y sulfatos. (Parcela 1, Lisímetro L06)

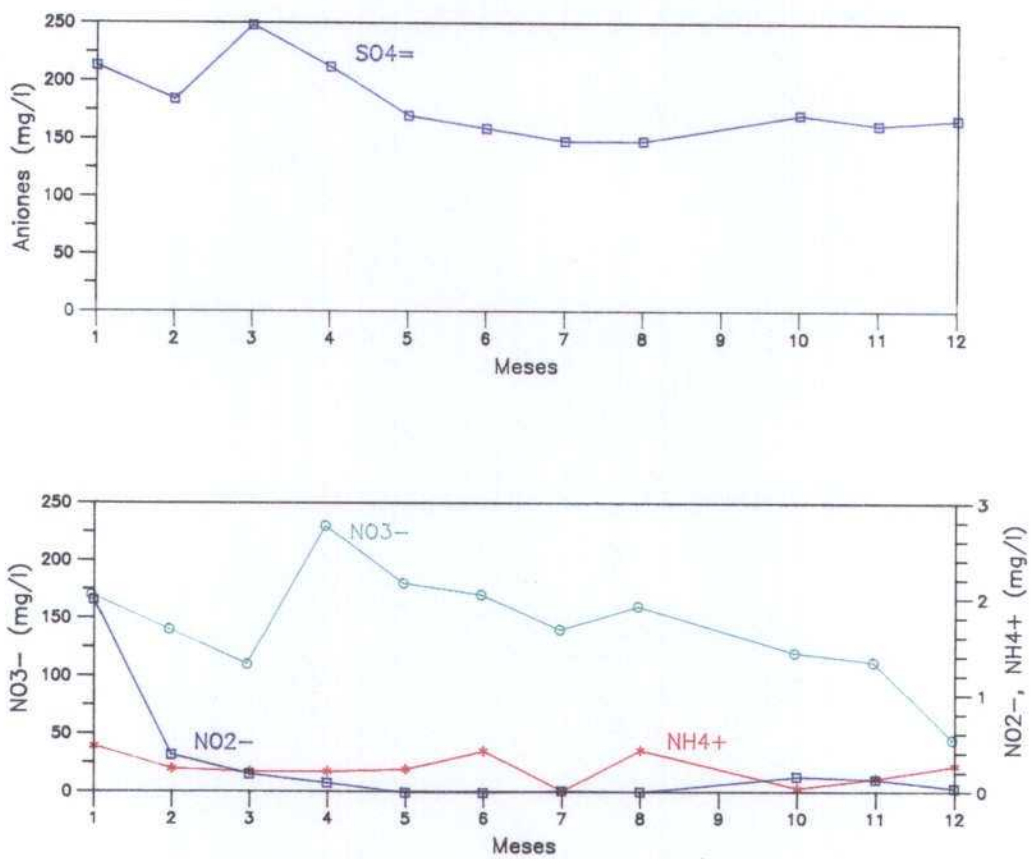


Fig. 5.67. Evolución temporal de la concentración de nitritos, nitratos, amonio y sulfatos.  
(Parcela 1, Lisímetro L07)

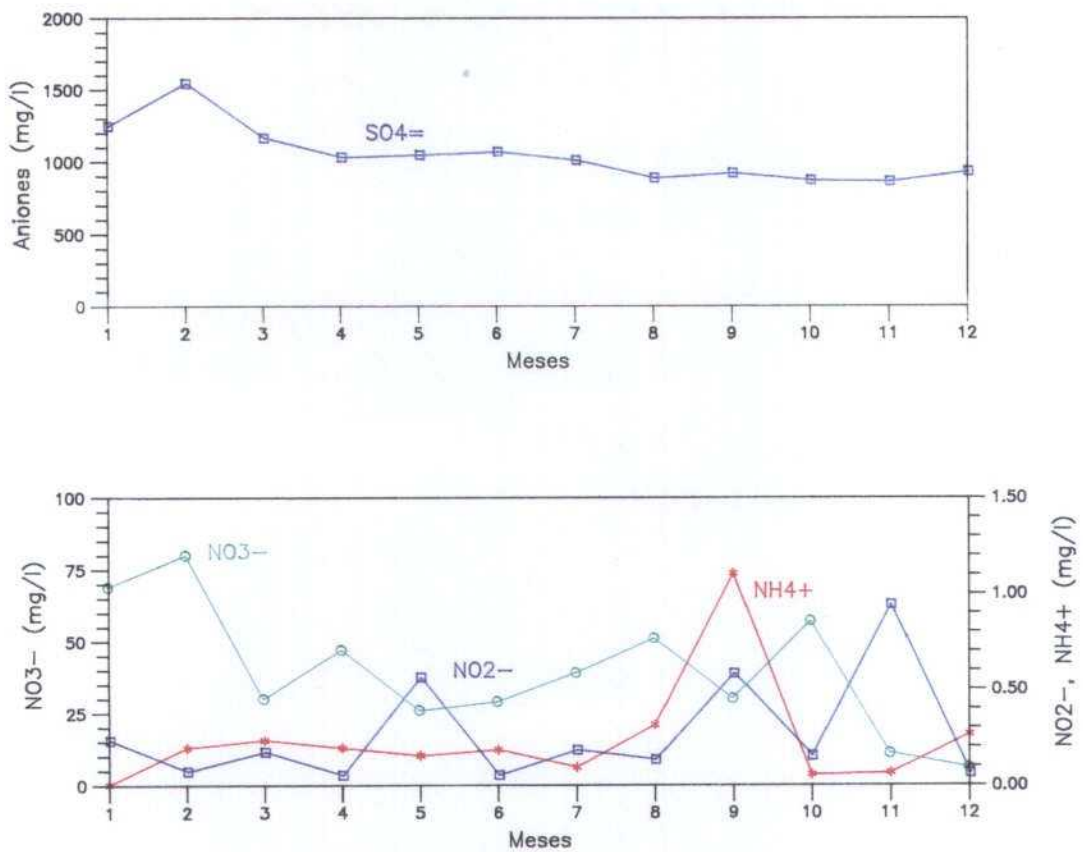


Fig. 5.68 Evolución temporal de la concentración de nitritos, nitratos, amonio y sulfatos. (Parcela 1, Piezómetro P1')

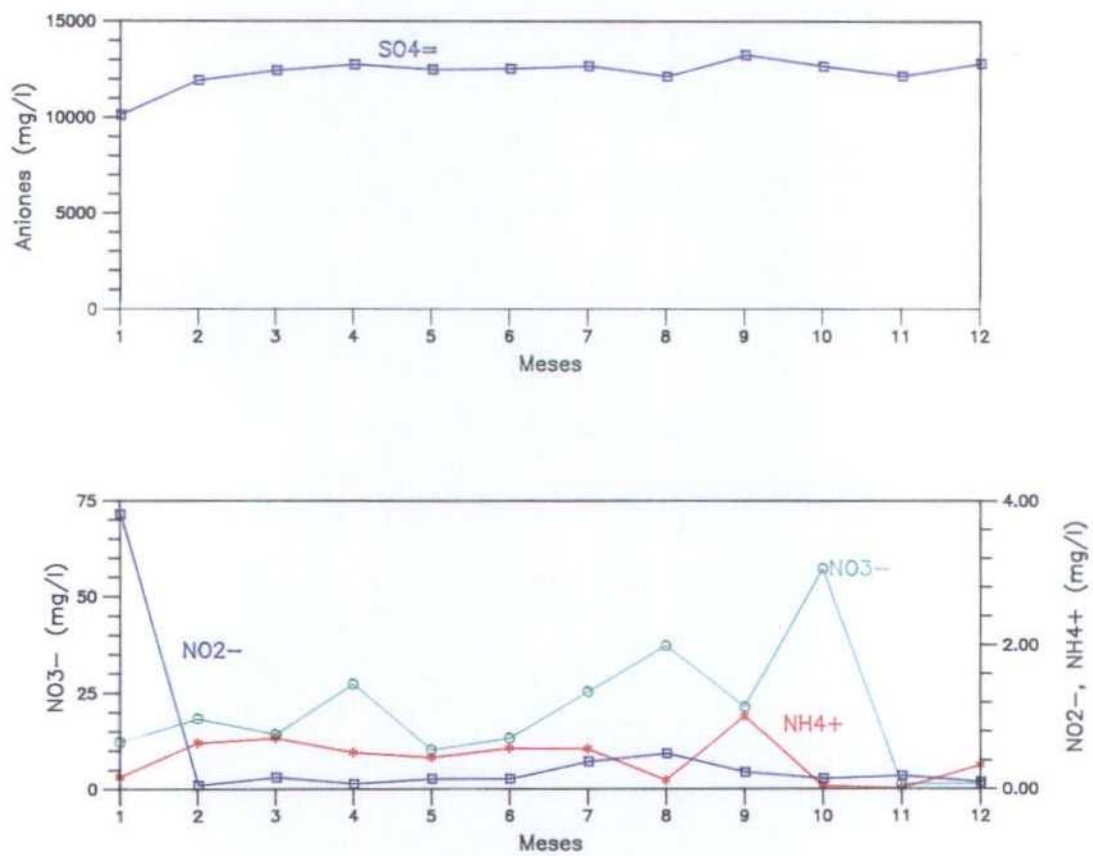


Fig. 5.69. Evolución temporal de la concentración de nitritos, nitratos, amonio y sulfatos. (Parcela 1, Piezómetro P1)

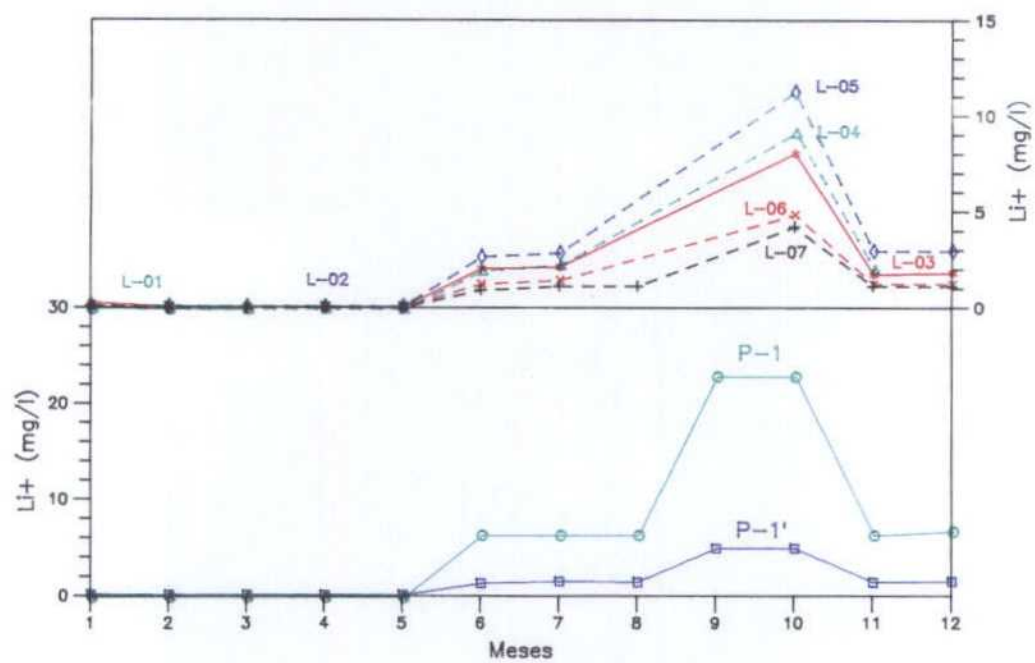


Fig. 5.70. Evolución temporal de la concentración de Litio. (Parcela 1)

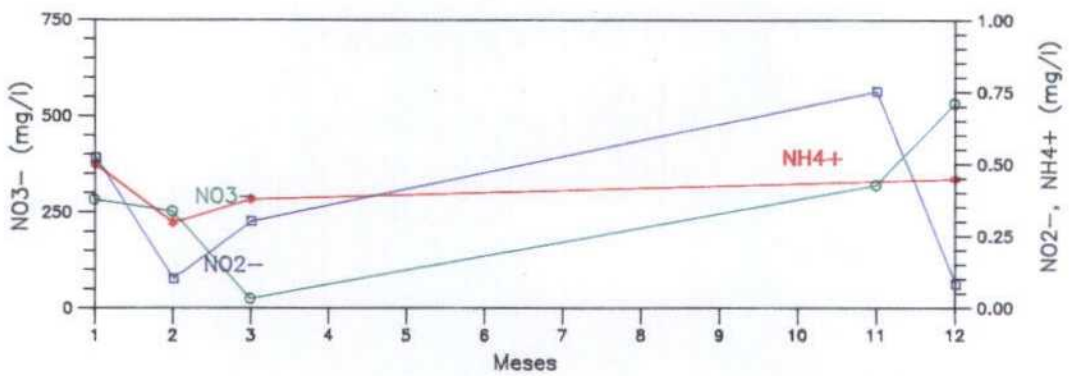
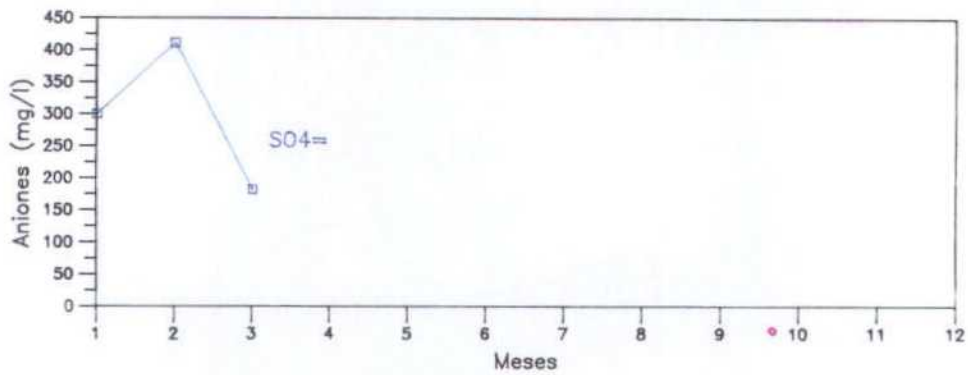


Fig. 5.71. Evolución temporal de la concentración de nitritos, nitratos, amonio y sulfatos. (Parcela 2, Lisímetro L08)

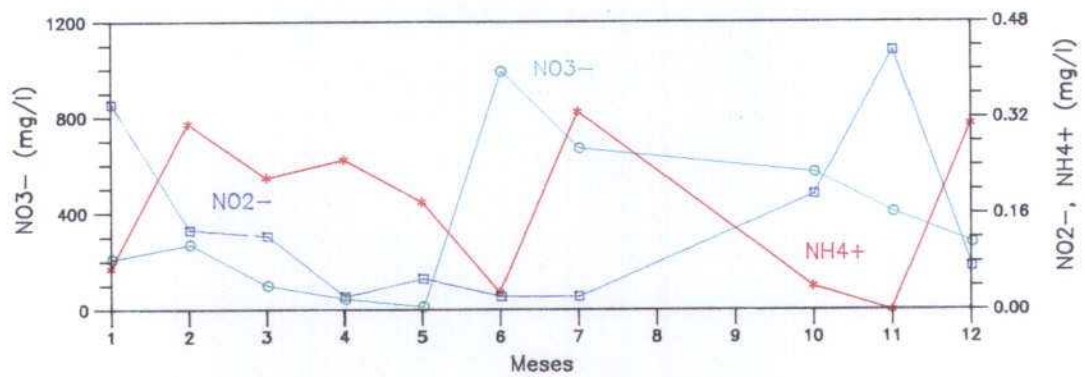
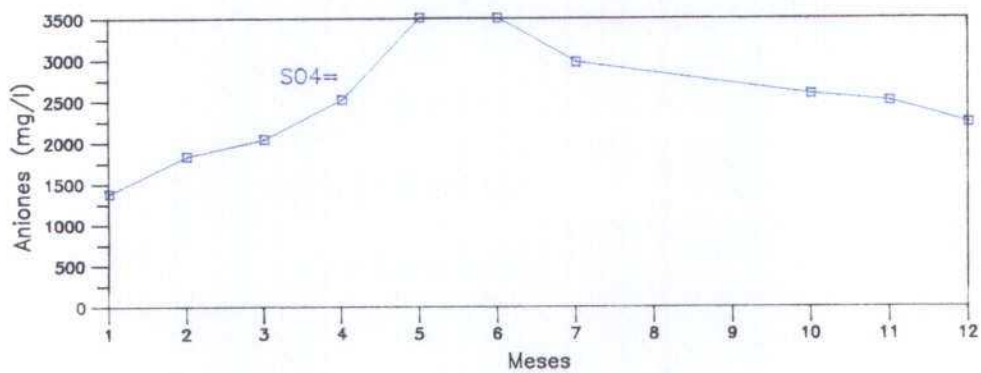


Fig. 5.72. Evolución temporal de la concentración de nitritos, nitratos, amonio y sulfatos. (Parcela 2, Lisímetro L10)



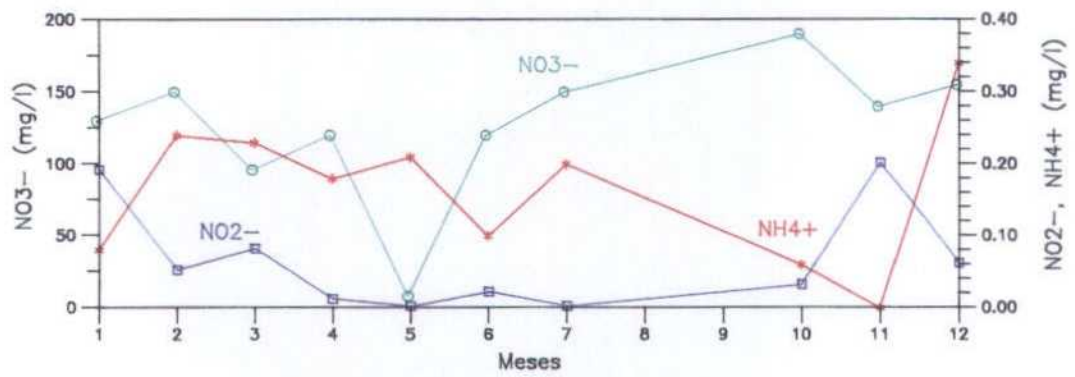
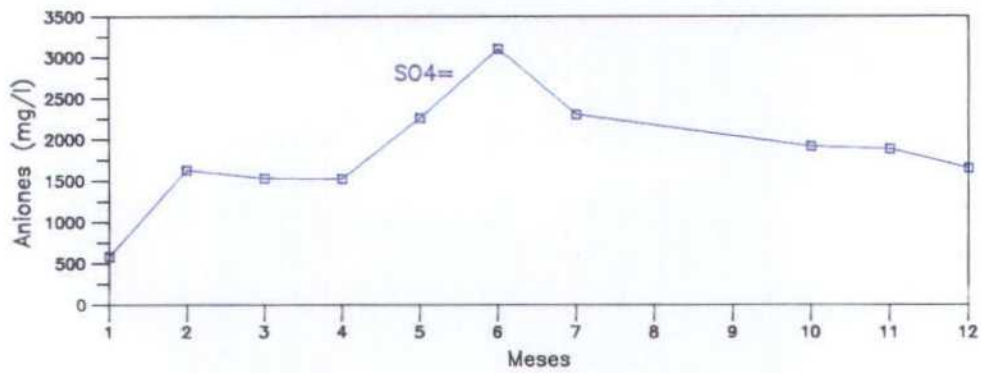


Fig. 5.73. Evolución temporal de la concentración de nitritos, nitratos, amonio y sulfatos. (Parcela 2, Lisímetro L11)

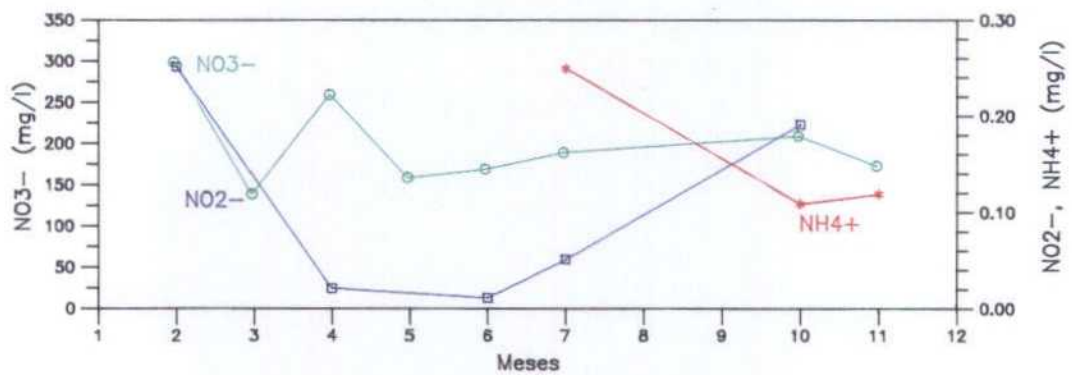
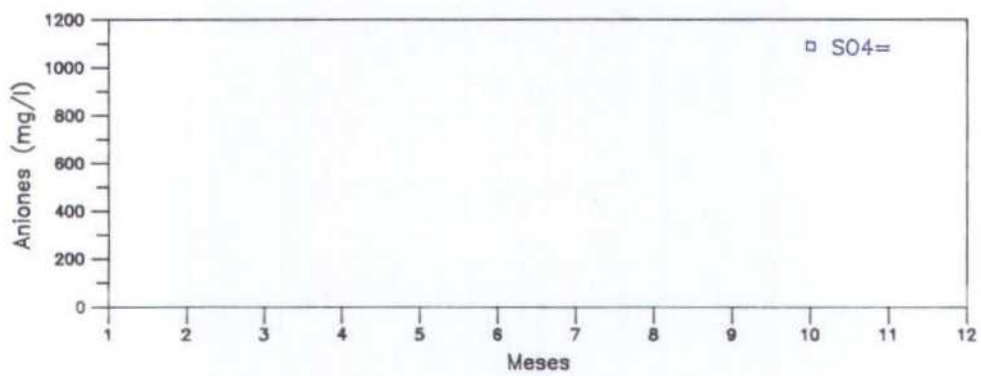


Fig. 5.74. Evolución temporal de la concentración de nitritos, nitratos, amonio y sulfatos. (Parcela 2, Lisímetro L12)

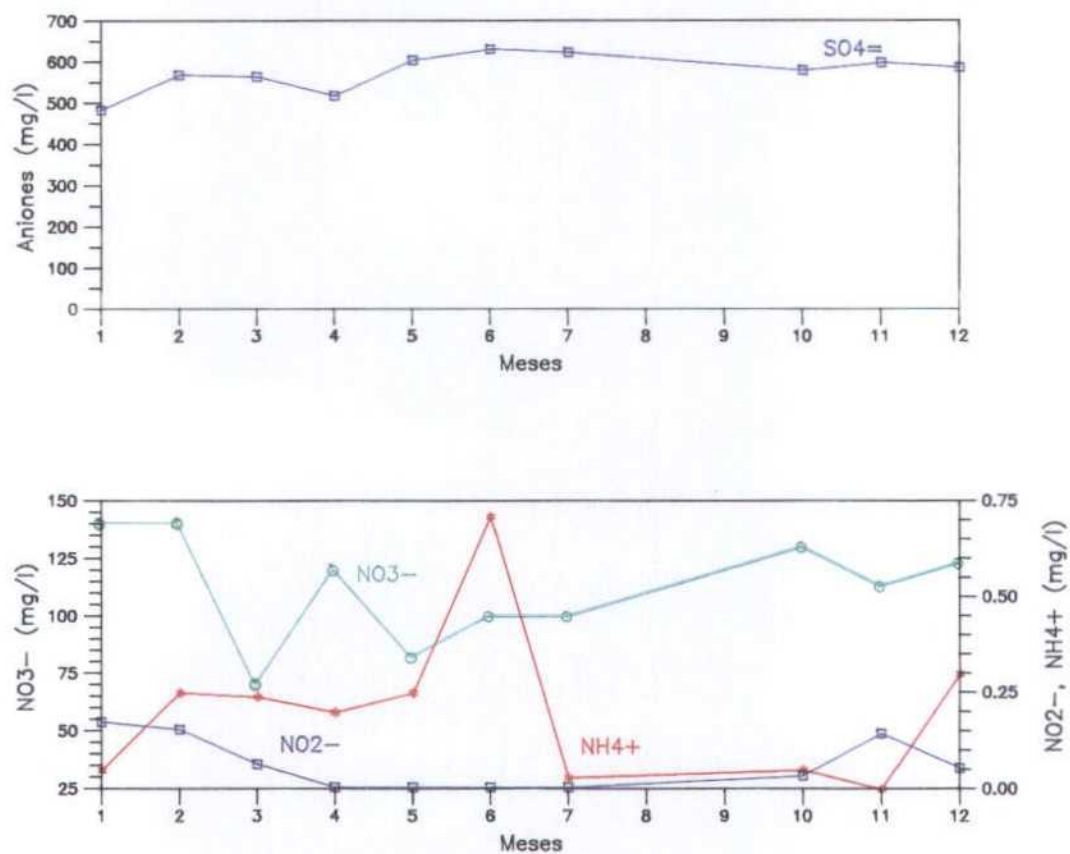


Fig. 5.75. Evolución temporal de la concentración de nitritos, nitratos, amonio y sulfatos. (Parcela 2, Lisímetro L13)

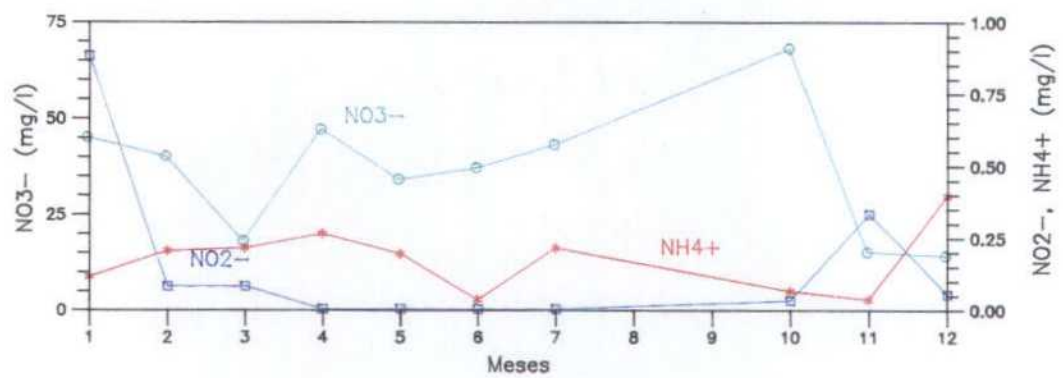
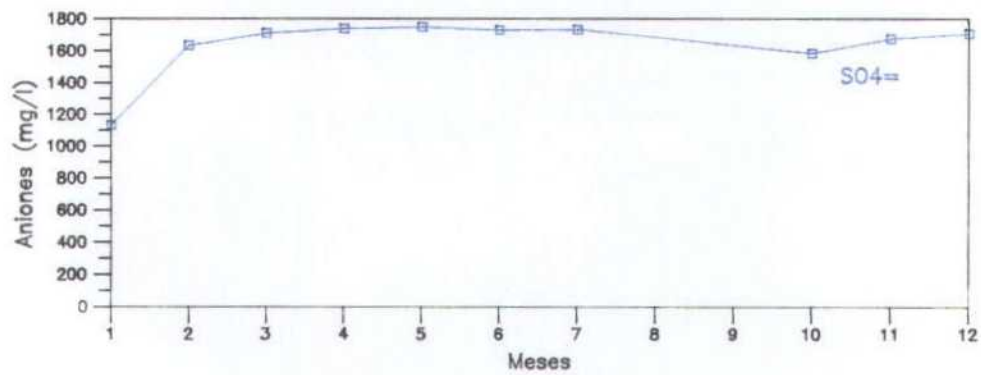


Fig. 5.76. Evolución temporal de la concentración de nitritos, nitratos, amonio y sulfatos. (Parcela 2, Lisímetro L14)

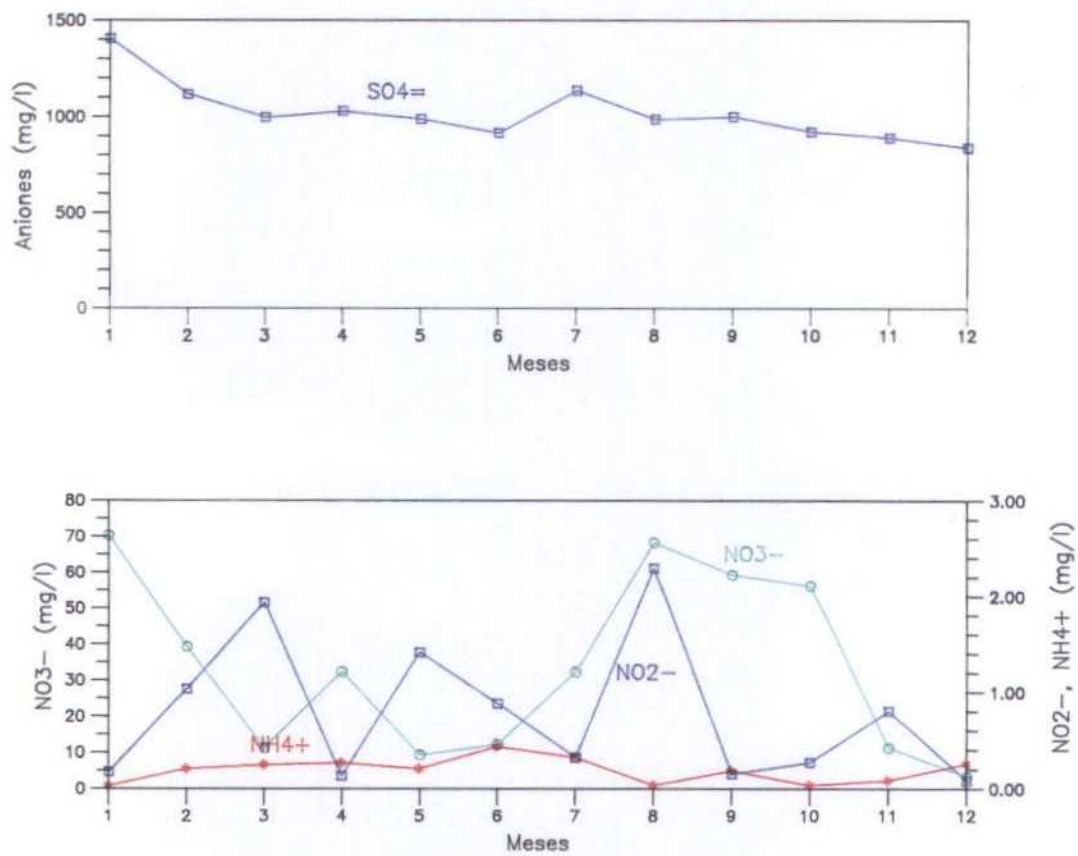


Fig. 5.77. Evolución temporal de la concentración de nitritos, nitratos, amonio y sulfatos. (Parcela 2, Piezómetro P2')

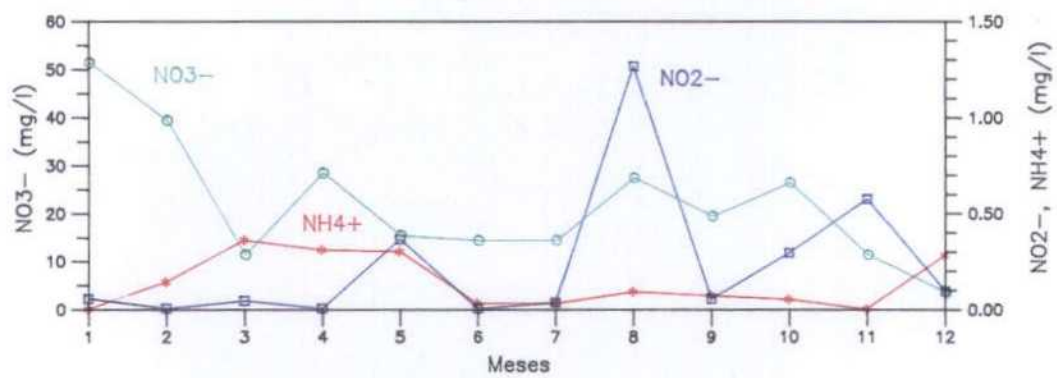
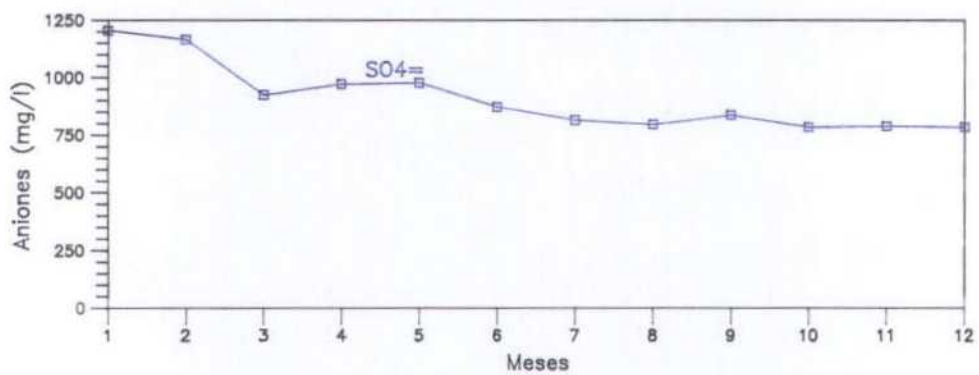


Fig. 5.78. Evolución temporal de la concentración de nitritos, nitratos, amonio y sulfatos. (Parcela 2, Piezómetro P2)

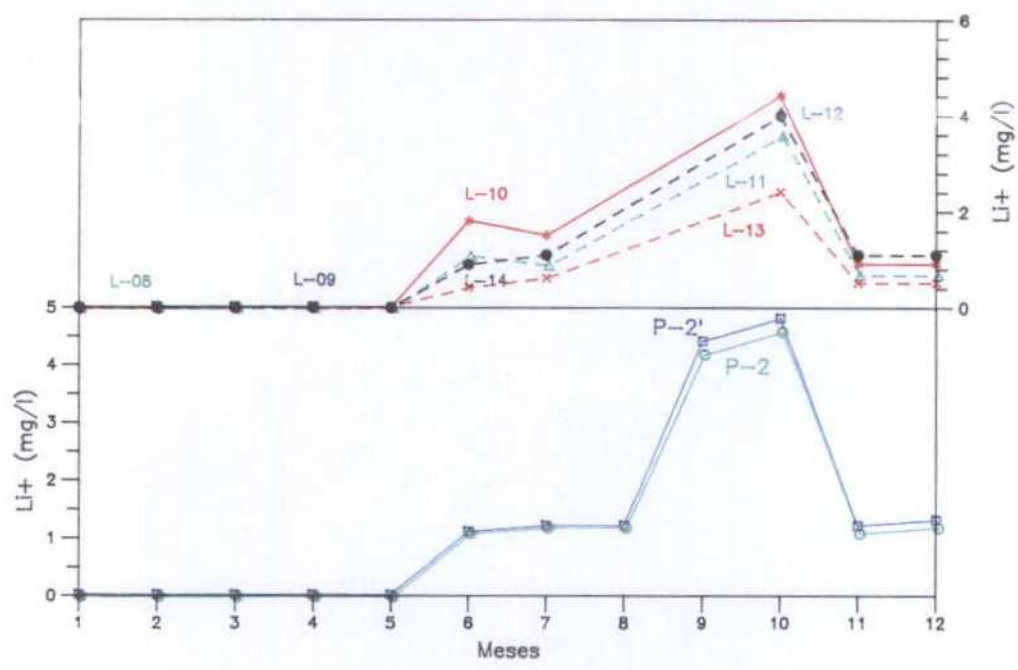


Fig. 5.79. Evolución temporal de la concentración de Litio. (Parcela 2)

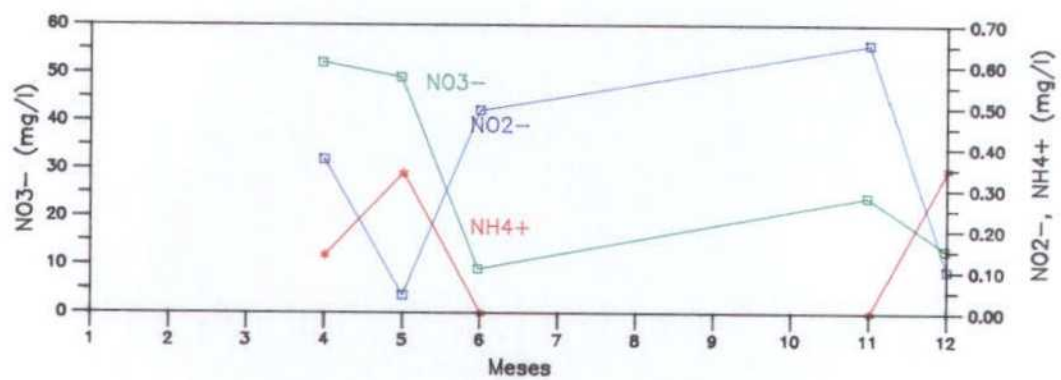
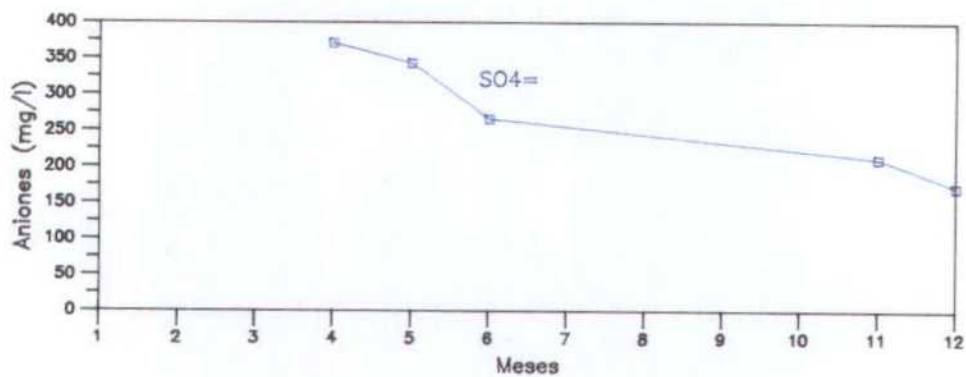


Fig. 5.80. Evolución temporal de la concentración de nitritos, nitratos, amonio y sulfatos. (Parcela 3, Lisímetro L15)



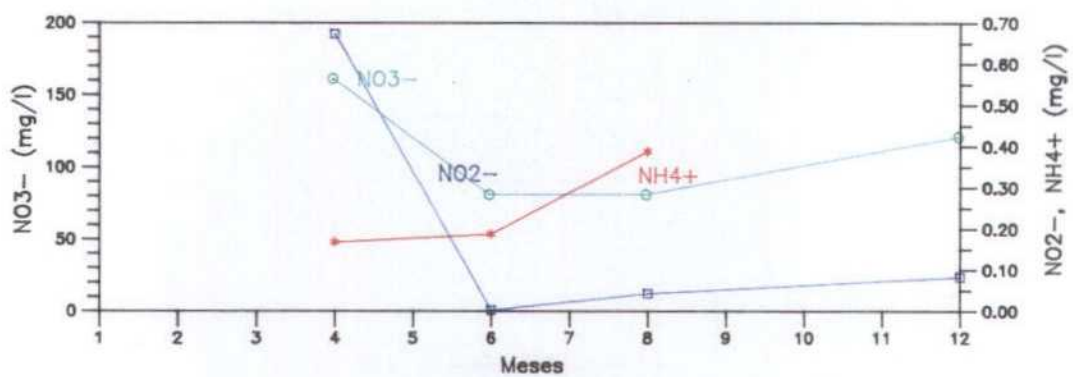
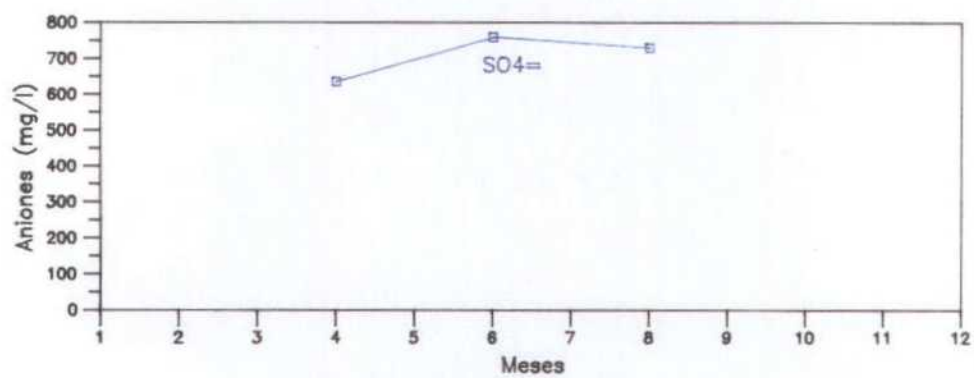


Fig. 5.81. Evolución temporal de la concentración de nitritos, nitratos, amonio y sulfatos. (Parcela 3, Lisímetro L16)

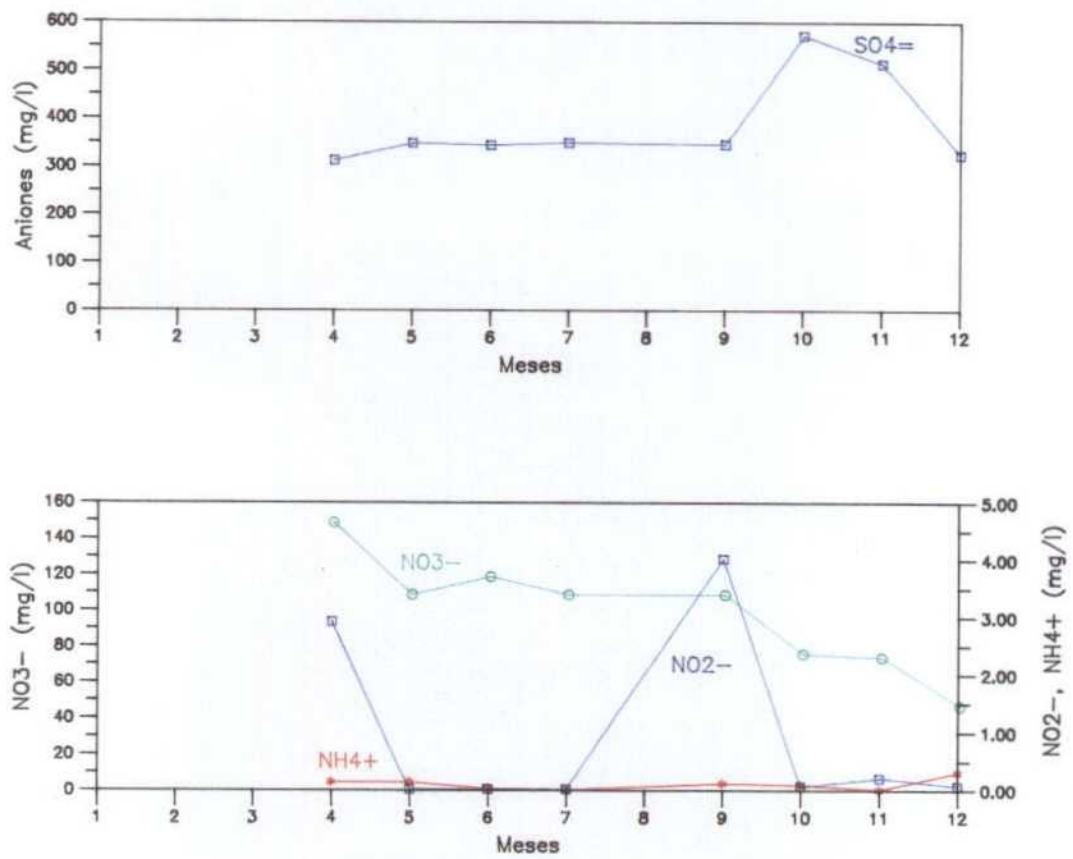


Fig. 5.82. Evolución temporal de la concentración de nitritos, nitratos, amonio y sulfatos. (Parcela 3, Lisímetro L18)

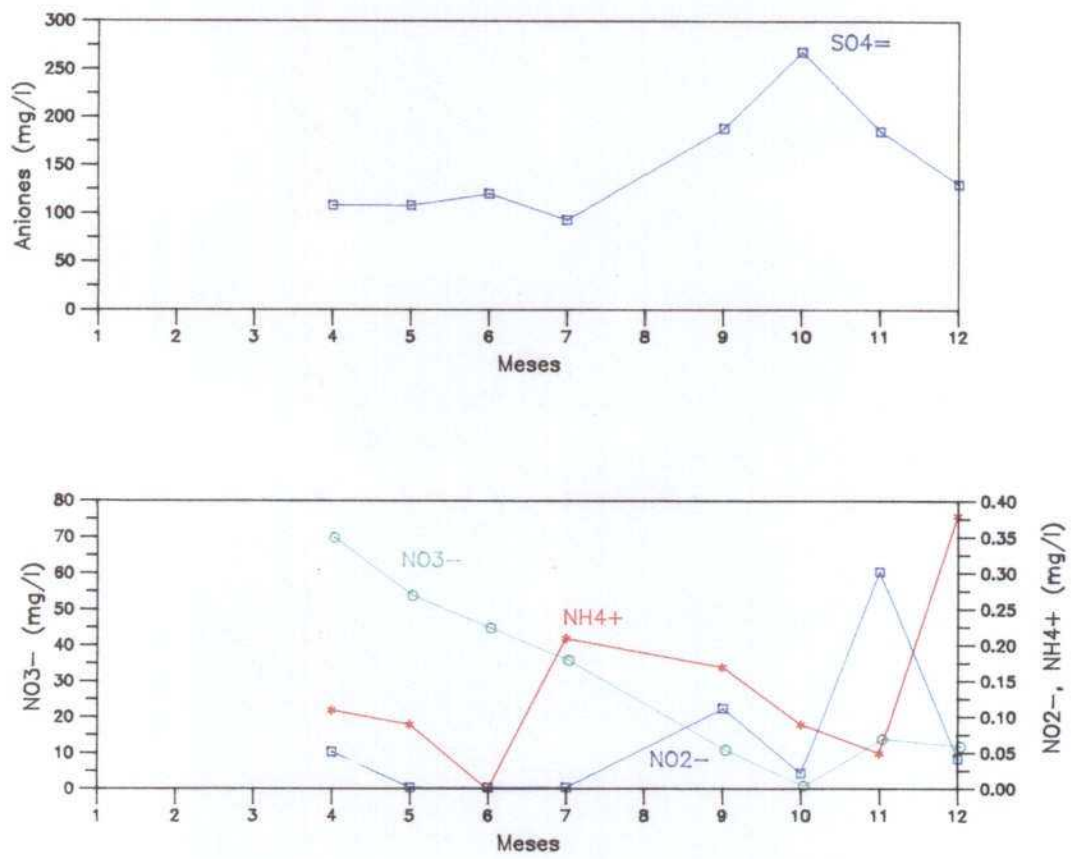


Fig. 5.83. Evolución temporal de la concentración por nitritos, nitratos, amonio y sulfatos. (Parcela 3, Lisímetro L19)

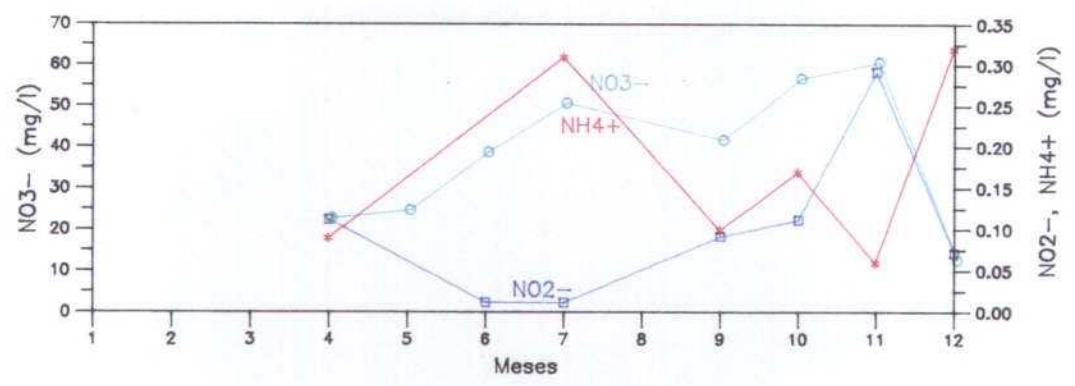
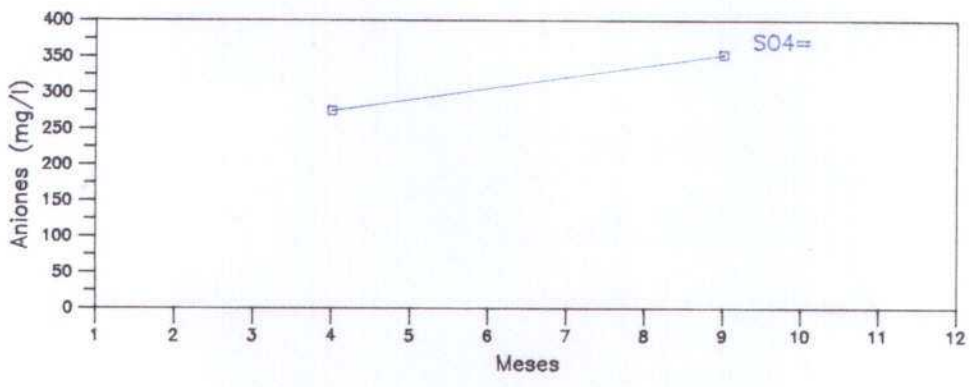


Fig. 5.84. Evolución temporal de la concentración de nitritos, nitratos, amonio y sulfatos. (Parcela 3, Lisímetro L20)

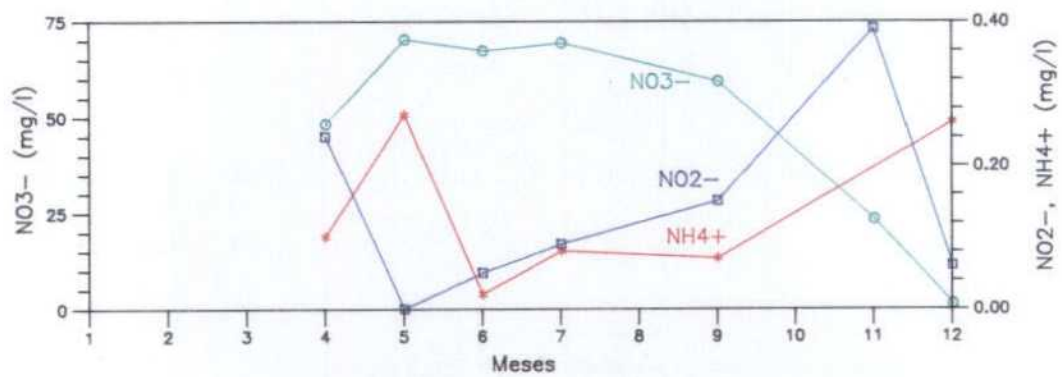
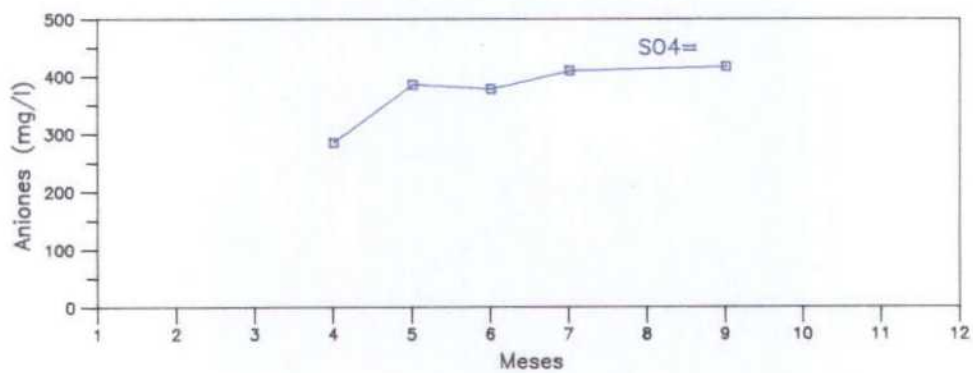


Fig. 5.85. Evolución temporal de la concentración de nitritos, nitratos, amonio y sulfatos. (Parcela 3, Lisímetro L21)

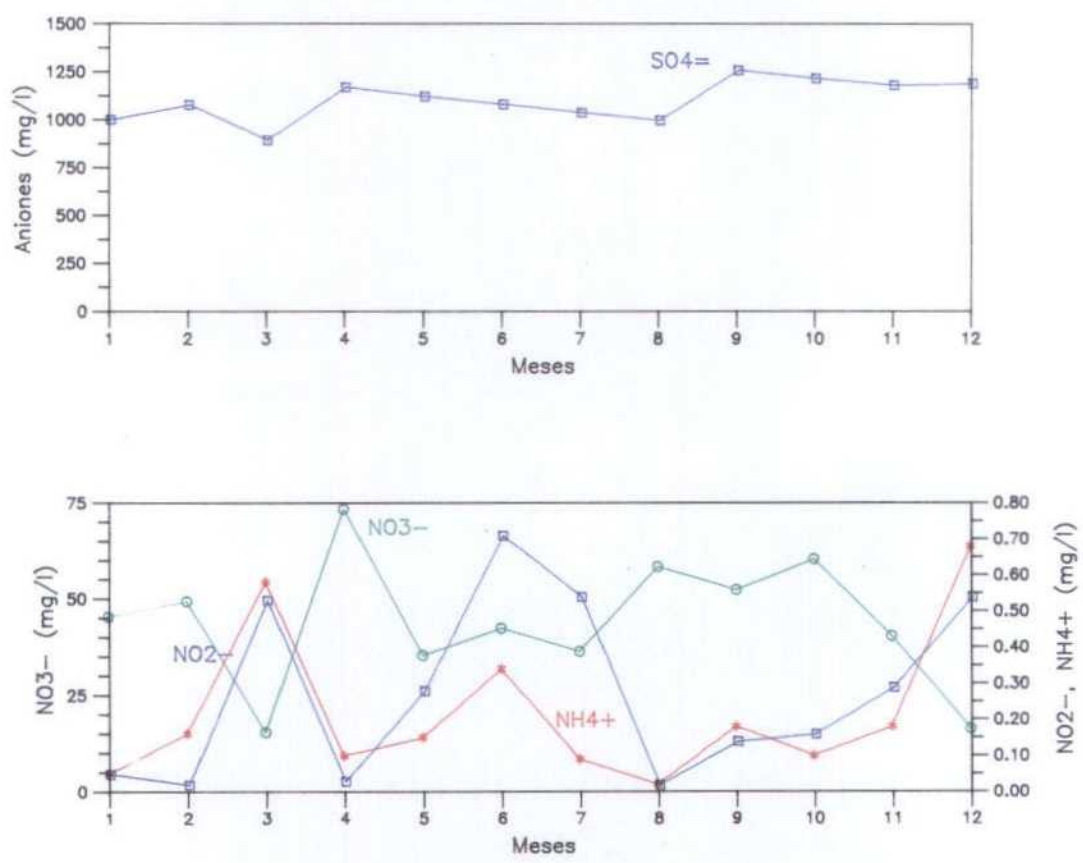


Fig.5.86. Evolución temporal de la concentración de nitritos, nitratos, amonio y sulfatos. (Parcela 3, Piezómetro P3')

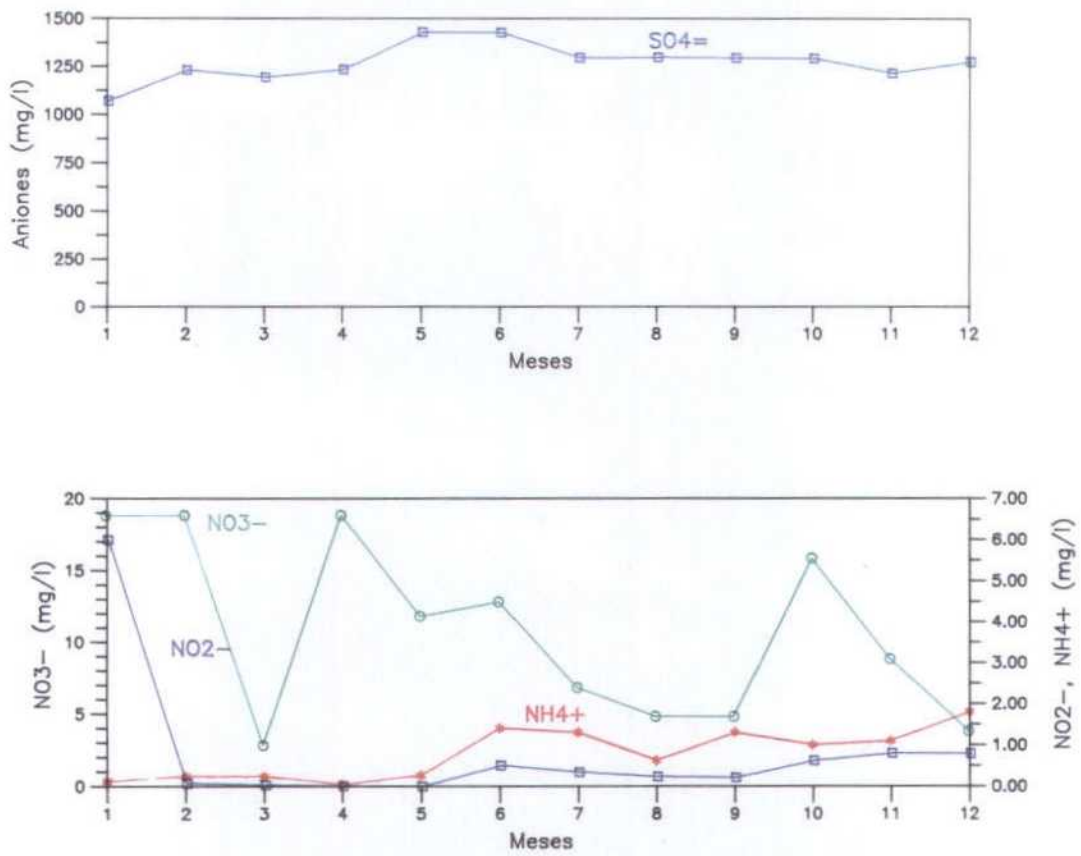


Fig. 5.87. Evolución temporal de la concentración de nitritos, nitratos, amonio y sulfatos. (Parcela 3, Piezómetro P3)

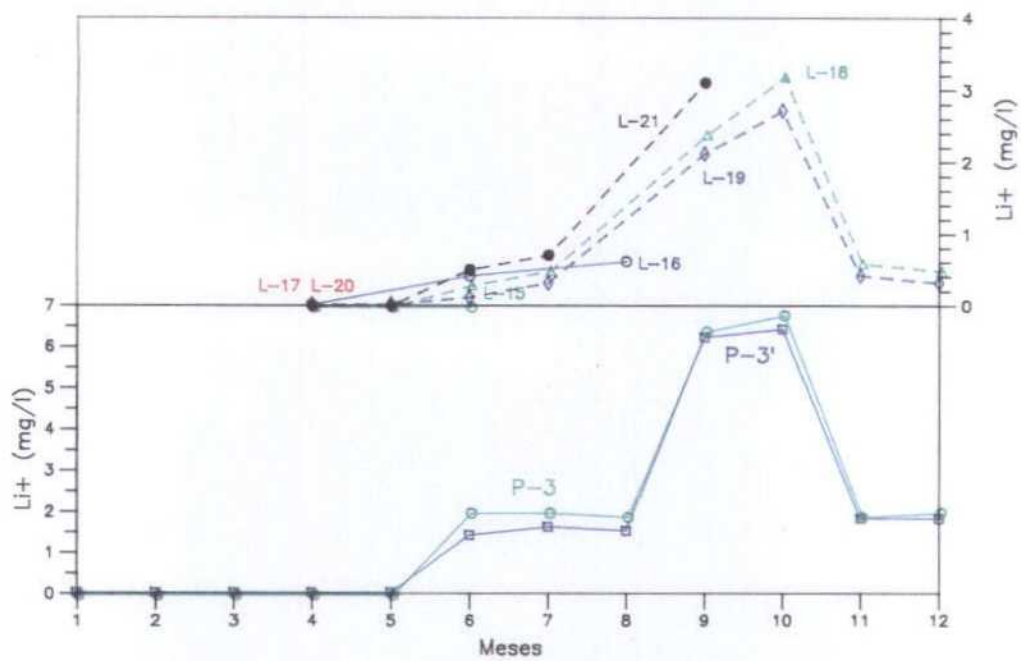


Fig. 5.88. Evolución temporal de la concentración de Litio. (Parcela 3)



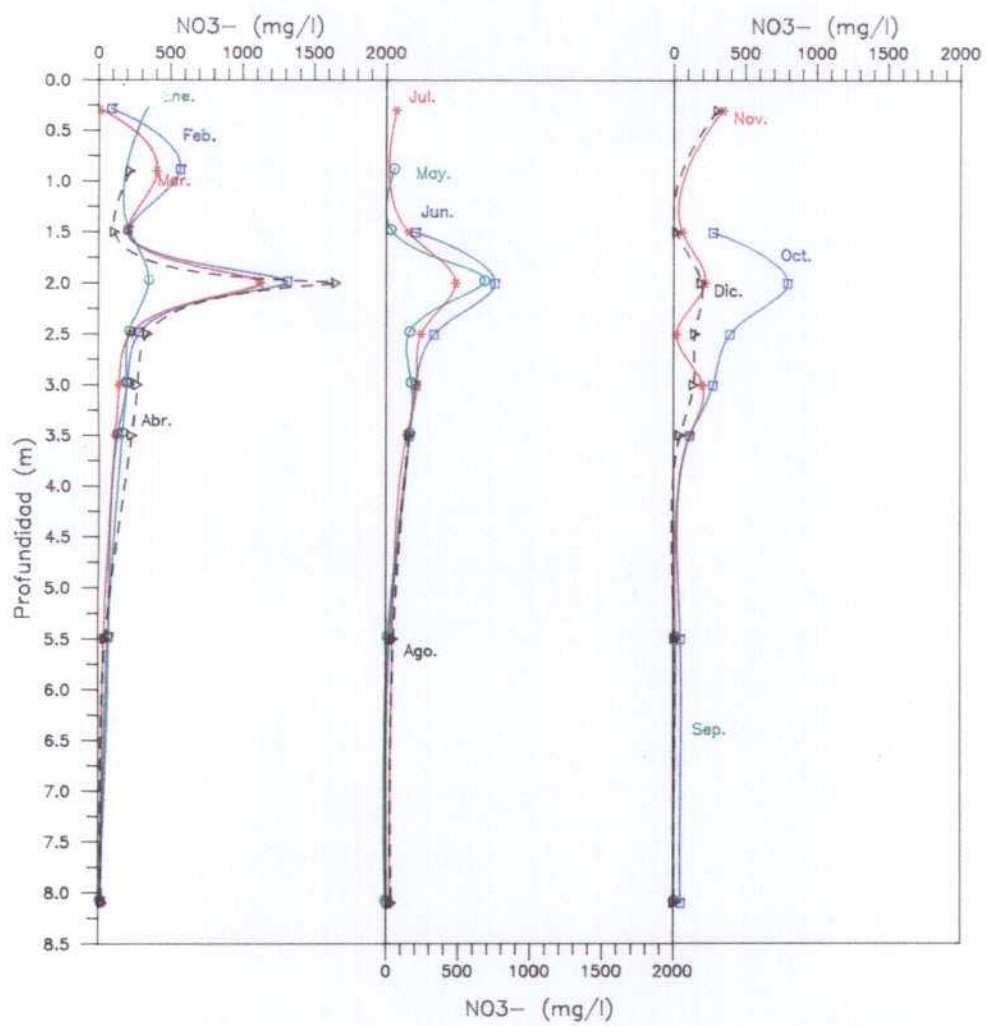


Fig. 5.89. Variación en profundidad de la concentración de nitratos. (Parcela 1)

En el piezómetro de mayor profundidad, los nitratos y sulfatos siguen una tendencia similar.

El amonio se mantiene sin variación apreciable, excepto en el lisímetro L13 en el mes de Junio.

En la figura 5.79. se refleja la evolución temporal de la concentración de litio, que parte de 0 mg/l en los primeros meses de muestreo, alcanza un valor máximo de 4,8 mg/l en el piezómetro P2' en el mes de octubre, y desde ahí disminuye. Esta tendencia de aumento de la concentración hasta llegar a octubre y disminución desde este mes, se manifiesta también en los lisímetros (en éstos el valor máximo se registra en L10, situado a 1.5 m de profundidad).

En cuanto a la parcela E-3 se aprecia una disminución de los nitratos en L15, L16, L18 y L19 hasta, el mes de junio y un aumento a través del tiempo en L20.

En la figura 5.88 se refleja la evolución temporal de la concentración de litio, que parte de 0 mg/l en los primeros meses de muestreo, alcanza un valor máximo de 6.8 mg/l en el piezómetro P3 en el mes de Octubre, y desde ahí disminuye. Esta tendencia de aumento de la concentración hasta llegar a Octubre y disminución desde este mes, se manifiesta también en los lisímetros (en éstos el valor máximo se registra en L18, situado a 2.0 m de profundidad).

En las figuras 5.89. a 5.91. se representa la variación de la concentración de nitratos en profundidad y a través del tiempo, para las tres parcelas experimentales.

En la primera parcela el valor máximo de nitratos, dentro de cada muestreo aparece a una profundidad de 2 m, en el lisímetro L04, y desde ahí experimenta una disminución acusada, de forma que al llegar al nivel saturado del acuífero subyacente las concentraciones alcanzan valores bajos. En la segunda existen dos valores máximos situados a diferente profundidad dependiendo de la época de muestreo. En enero y febrero se sitúa a 0.9 m, en el lisímetro L09, y en el período comprendido entre junio y noviembre, se registra en el L10, a 1.5 m desde la superficie del terreno. Antes de llegar al acuífero subyacente, el agua que percola ha disminuido sensiblemente su concentración en nitratos. Y en la tercera parcela la concentración máxima se registra a una profundidad de 2 m.

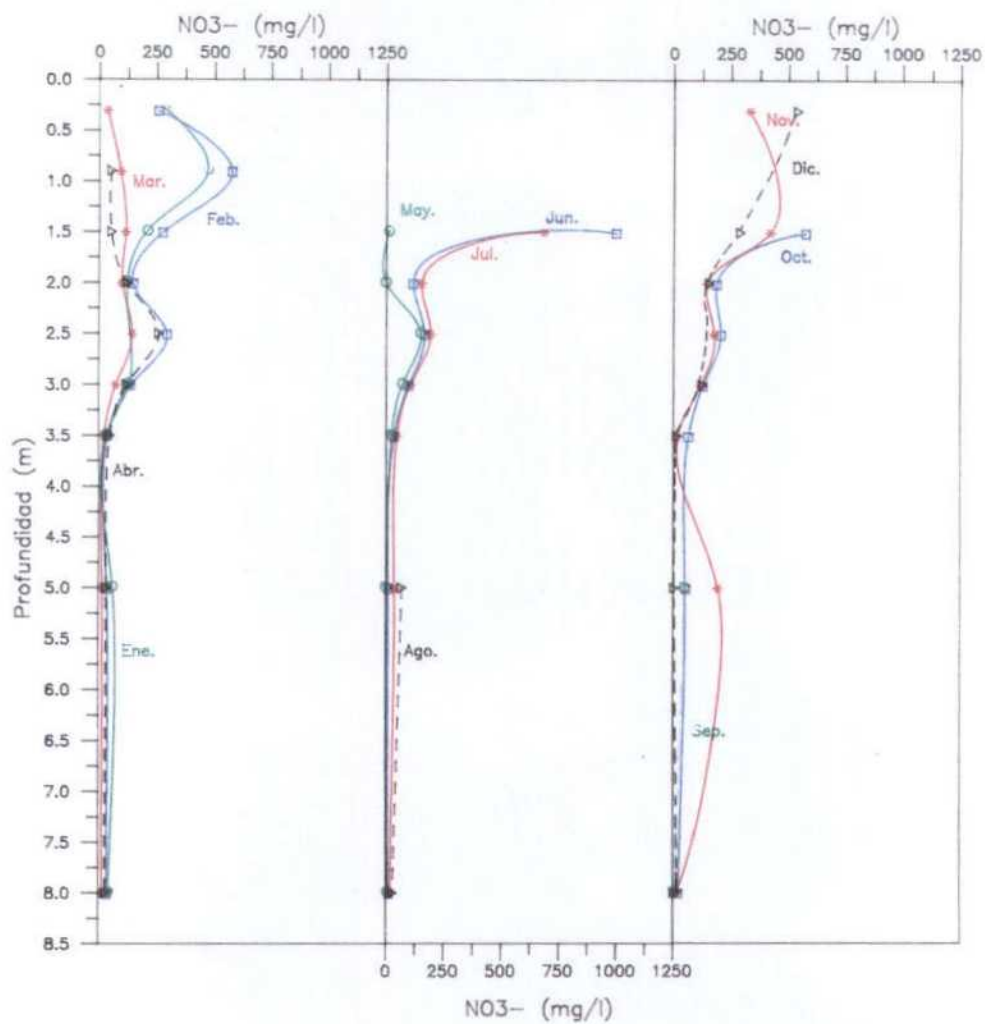


Fig. 5.90. Variación en profundidad de la concentración de nitratos. (Parcela 2)

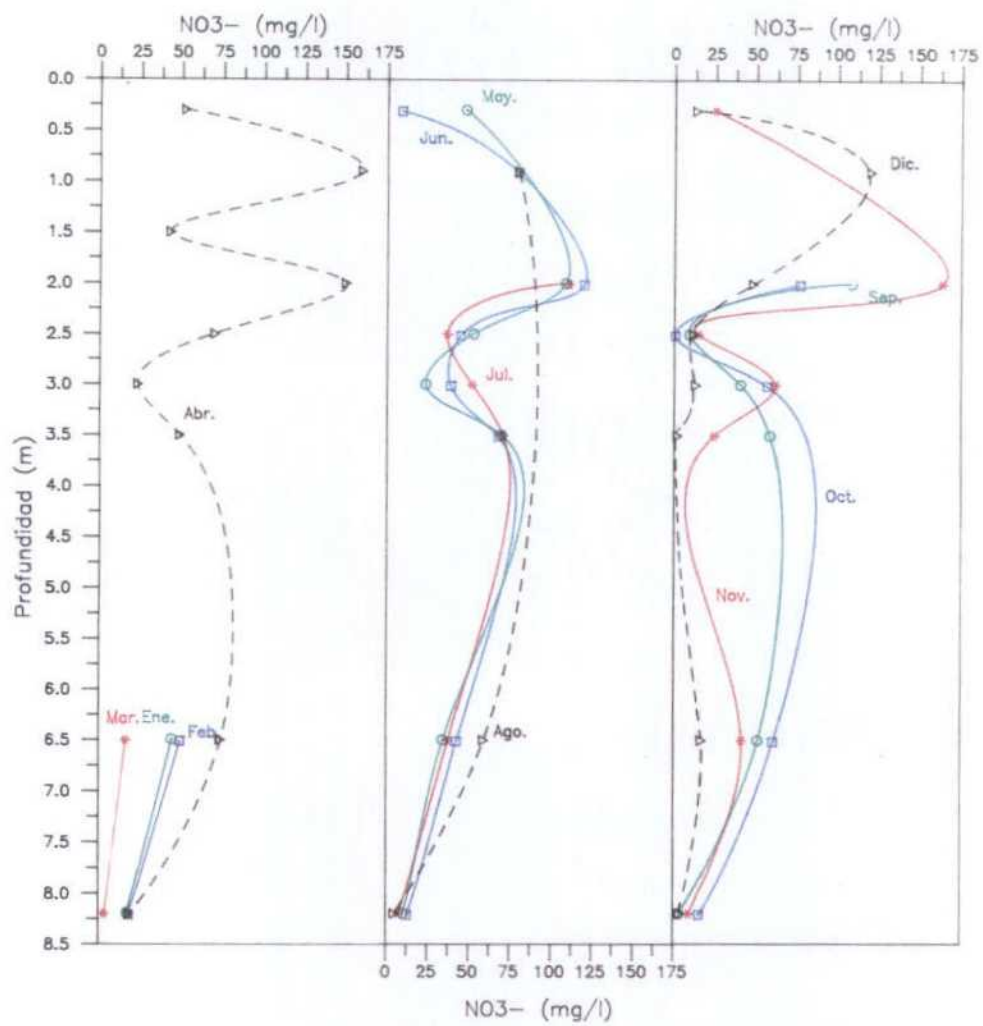


Fig. 5.91. Variación en profundidad de la concentración de nitratos (Parcela 3)

**6. MASA CONTAMINANTE DRENADA**

## 6 . MASA CONTAMINANTE DRENADA

### 6.1 . SELECCION DEL METODO DE CALCULO DEL DRENAJE

Teniendo en cuenta las consideraciones realizadas sobre cada uno de los métodos y sus limitaciones en su aplicación práctica en la finca "El Palomar" (Apartado 4.3.) se ha decidido seleccionar como más fiable el método del Balance Hídrico.

Por consiguiente, el valor del drenaje estimado en las parcelas E-1 y E-2 es de 33 mm para el período de estudio enero-julio de 1988, concentrándose este drenaje en el mes de enero.

### 6.2 . ESTIMACION DE LA MASA DE $\text{NO}_3^-$ DRENADA

Conocido el volumen de agua que drena hacia el acuífero es preciso atribuirle una concentración del ión nitrato, de forma que pueda estimarse para el período de estudio cuál es la masa de nitrato que llega al acuífero.

Previa observación de los perfiles en profundidad del ión nitrato (capítulo 5) se ha seleccionado la profundidad de 2.5 m para la determinación de la concentración, entendiéndose que el ión nitrato apenas sufrirá modificaciones en su concentración a profundidades mayores. Por otra parte, teniendo en cuenta cuándo se produce drenaje, se ha seleccionado dicha concentración en el muestreo del mes de febrero.

Por consiguiente, la masa de  $\text{NO}_3^-$  drenada es en E-1

$$M = D [\text{NO}_3^-]_{2.5} = 33 \text{ mm} \times 290 \text{ mg/l} = 9570 \text{ mg/m}^2$$

y en E-2,

$$M = 33 \text{ mm} \times 300 \text{ mg/l} = 9900 \text{ mg/m}^2$$

con lo que teniendo en cuenta las superficies de las parcelas resulta una masa M de 95.7 kg/ha para E-1 y 99.9 kg/ha para E-2.

Lógicamente, la disponibilidad de un mayor número de muestras a la profundidad de 2.5 m hubiera proporcionado una mayor representatividad a  $[\text{NO}_3^-]_{2.5}$  y a la masa estimada.

Por otra parte, la masa de nitrógeno aplicada con el fertilizante como abonado de fondo y de cobertera es de 99 kg/ha y la producción media de cebada se estima en 5500 kg/ha, si bien la producción real de las parcelas no fue estimada en esta 1ª Fase del Estudio.

En cualquier caso, las masas obtenidas no deben considerarse a efectos de cálculo de rendimiento del fertilizante pues ello implicaría el planteamiento de un balance de nitrógeno, y la estimación de importantes componentes del mismo (mineralización, etc). Estos valores, junto con el de producción, sirven para establecer comparaciones sobre la utilización del suelo efectuado en las tres parcelas experimentales.

En la parcela E-3 la estimación de la masa de  $\text{NO}_3^-$  que se lixivia hacia el acuífero no ha podido estimarse en esta 1ª Fase del Estudio, puesto que el drenaje de 33 mm estimados por el método del Balance Hídrico se produce en enero de 1988, y el primer muestreo químico del agua en la zona no saturada se ha efectuado en abril.

Como dato a retener para la siguiente fase del estudio, debe comentarse que la masa de nitrógeno aplicada a través del fertilizante fue de 98.85 kg/ha.

## **7. RESUMEN Y CONCLUSIONES**



## 7 . RESUMEN Y CONCLUSIONES

Como resumen de los anteriormente tratado, se han elaborado una serie de puntos que sintetizan los aspectos más importantes.

- Desde el punto de vista edafológico, los suelos de las parcelas de experimentación son aluviales, formados sobre materiales depositados recientemente. Los 40 primeros centímetros están desprovistos de sales, y el perfil se saliniza en profundidad alcanzando un máximo entre 80 y 120 cm.
- La succión que ejerce la matriz del terreno en la zona no saturada se ha controlado con tensiómetros. Para E-1 y E-2, las variaciones de succión en el tiempo a partir de 1.5 m son muy pequeñas. Los tensiómetros situados a 0.3 m sufren una clara influencia climatológica, reflejando los estadios húmedos y secos. En E-3 el estiaje de verano se acusa incluso a 2.5 m.
- Los niveles medidos en los piezómetros es probable que respondan a tensiones locales producidas por la abundancia de arcillas y no sean niveles piezométricos únicamente.
- En el cálculo del drenaje se ha empleado el balance hídrico y el balance de cloruros. El balance hídrico no ha utilizado datos meteorológicos locales, sino los correspondientes a las estaciones de Barajas y Retiro, por lo que sólo puede representar una aproximación. El volumen de agua drenado en el período de estudio se estima en 33 mm en el mes de enero. La aplicación del balance de cloruros ha mostrado que el sistema no se encuentra en estado estacionario, y el medio sigue aportando Cl<sup>-</sup>. Por esta razón los valores obtenidos con este segundo método son muy diferentes entre las 3 parcelas y a su vez del resultado del balance hídrico.
- Se ha comprobado la dependencia del funcionamiento de los lisímetros con la litología, ésto es, con los diferentes parámetros físicos que determinan su comportamiento hidráulico. Sería aconsejable optimizar en algún caso la frecuencia de muestreo de los lisímetros.

Así mismo, se ha observado que los modelos de vacío-presión son más eficaces para la recogida de muestras que los de vacío. Como incidencias, cabe señalar la rotura del L17 y la baja eficiencia del L12.

- La elevada heterogeneidad litológica del medio provoca cambios de permeabilidad de consideración, por lo que la hipótesis de flujo puramente vertical es sólo una aproximación. En especial, la parcela E-3 presenta composiciones química muy diferentes a lo largo del perfil, que pueden relacionarse con el efecto de la variación de permeabilidad en la vertical.
- Hidroquímicamente, las muestras recogidas en zona no saturada presentan salinidades diferentes para las 3 parcelas, siendo E-1 la parcela de mayor salinidad y E-3 la de menor. La composición hidroquímica en todo el perfil de E-2 es bastante uniforme y muy próxima a la de las aguas subterráneas de la zona. Por el mayor porcentaje de arcillas en E-1, ésta es la parcela que posee niveles de acumulación más acusados.
- Entre 0.3 y 0.9 m se percibe al existencia de una importante zona de actividad edáfica que sería conveniente estudiar detenidamente con la instalación de un mayor número de lisímetros. Precisamente es aquí donde deben producirse las transformaciones más importantes de las especies nitrogenadas.
- En la parcela E-1 es en la que mejor se aprecia la influencia de las oscilaciones del nivel freático-franja capilar, especialmente sobre los lisímetros más profundos (a 3 y 3.5 m).
- Aproximadamente a 2 m de profundidad y en todas las parcelas, se registra un máximo en la concentración de  $\text{NO}_3^-$ , que no se desplaza en profundidad con el tiempo. Es posible que el período de estudio, un año, sea insuficiente para percibir esta evolución. La existencia de procesos de reducción no puede confirmarse con los valores de Eh y  $\text{O}_2$  medidos en campo, debido al tiempo de almacenamiento del agua en el lisímetro.

- Respecto al cálculo de la masa de  $\text{NO}_3^-$  drenada al acuífero, se ha realizado a partir del valor del drenaje estimado mediante balance hídrico. Por lo tanto está sujeto a las mismas limitaciones que aquél. El resultado se evalúa en unos 100 kg/ha en E-1 y E-2.

A partir de las consideraciones anteriores sobre la complejidad del sistema se puede concluir que las parcelas experimentales elegidas no son en absoluto equivalentes. Por tanto no da lugar al desarrollo de la experiencia de optimización de abonado-riego previsto en el planteamiento inicial.