

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA
FACULTAD DE CIENCIAS. SECCION DE QUIMICAS



"MEDIDA "IN-SITU" DE LA SALINIDAD DEL SUELO: APLICACION AL
MOVIMIENTO DE IONES INORGANICOS EN PROCESOS DE ASCENSO
CAPILAR Y LAVADO CON NIVEL FREATICO CONSTANTE"

Trabajo presentado por
Ramón Aragüés Lafarga

en satisfacción de los requisitos necesarios
para optar al grado de Doctor

Dirigida por: Dr. D. Francisco Alberto Giménez
Investigador Científico
C.S.I.C. E.E. Aula Dei, Zaragoza

Firma del doctorando: _____

Firma del Director: _____



A mi familia

AGRADECIMIENTOS



Mi agradecimiento más sincero a todas las personas que, en una u otra forma, hicieron posible la realización de este trabajo. Entre ellas debo destacar:

- Al Profesor Dr. D. Rafael Usón Lacal por su acogida, estímulo y eficaces consejos.
- Al Dr. D. Francisco Alberto Giménez, por la dirección del trabajo.
- A los Profesores J.W. Biggar y D.W. Henderson, de la Universidad de California, Davis, por la cooperación y asesoramiento científico prestados.
- Al Dr. D. Miguel Blasco Escudero, Director del I.N.I.A.-CRIDA 03, por su amistosa insistencia en ver realizado este trabajo debido al interés agronómico de la salinidad en la región.
- A Doña María Jesús Ibor García por su impecable labor de mecanografía.
- A D. Jesús Faci González por la excelente confección de gráficos.

De igual forma quiero expresar mi agradecimiento a las siguientes instituciones:

- Al I.N.I.A. por la concesión de una beca de ampliación de estudios en Estados Unidos, durante la que se realizó la parte experimental de este trabajo.
- Al "Department of Land, Air and Water Resources" de la Universidad de California en Davis por haberme facilitado los necesarios recursos materiales.

I N D I C E

	<u>Pag.</u>
1. <u>INTRODUCCION</u>	1
2. <u>ESTADO ACTUAL DEL PROBLEMA</u>	8
2.1. La sonda de succión.	8
2.2. El sensor de salinidad.	12
2.3. Teoría del movimiento de solutos en suelo.	15
2.4. Dinámica de salinización por capa freática de nivel constante.	21
2.5. Dinámica del lavado de sales.	25
3. <u>MATERIAL Y METODOS (PROCESOS DE ASCENSO CAPILAR Y LAVADO)</u>	30
3.1. Suelo.	31
3.2. Métodos.	35
3.2.1. Análisis granulométrico y mineralógico.	35
3.2.2. Métodos químicos: extractos a saturación y 1:10; conductividad eléctrica y pH; determinación de aniones y cationes; cationes de cambio; densidad óptica.	35
3.2.3. Instrumentación para el control y seguimiento de los experimentos: Tensiómetro; sonda de succión; sensor de salinidad; psicrómetro de suelo; psicrómetro de ambiente; aparato de rayos gamma.	36
3.3. Dispositivo y procedimiento experimental.	44
3.3.1. Dispositivo experimental.	44
3.3.2. Llenado de la columna de suelo.	50

	<u>Pag.</u>
3.3.3. Descripción de los experimentos IA (ascenso sin evaporación), IB (ascenso con evaporación) y II (lavado de la columna salinizada).	52
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSION</u>	57
4.1. Medida " <u>in-situ</u> " de la salinidad del suelo: La sonda de succión y el sensor de salinidad.	58
4.1.1. La sonda de succión.	58
4.1.1.1. Materiales.	58
4.1.1.2. Propiedades de la sonda porosa.	60
4.1.1.3. Dinámica del muestreo: Velocidad de entrada de agua en la sonda; influencia de la extracción sobre el equilibrio de la columna; comparación de la CE obtenida con el sensor, sonda de succión y extracto de suelo; influencia del nivel de vacío aplicado.	61
4.1.2. El sensor de salinidad.	71
4.1.2.1. Materiales: Descripción del sensor y del puente de salinidad; medios porosos; preparación de los sistemas homoiónicos.	71
4.1.2.2. Calibración. Procedimientos y resultados: Influencia del aire ocluído en la cerámica; estabilidad; histéresis.	77
4.1.2.3. Precisión. Procedimiento y resultados.	92
4.1.2.4. Corriente externa. Procedimientos y resultados.	98
4.1.2.5. Tiempo de respuesta. Procedimientos y resultados.	105

	<u>Pag.</u>
4.1.2.6. Sensibilidad al potencial matricial. Procedimientos y resultados.	124
4.1.2.7. Sensibilidad a la adsorción negativa. Procedimiento y resultados.	135
4.1.2.8. Sensibilidad a la temperatura. Procedimiento y resultados.	141
4.2. Estudios en columna: Procesos de ascenso capilar y lavado.	145
4.2.1. Dinámica de la salinización por capa freática de nivel constante (experimento I).	145
4.2.1.1. Experimento IA: Ascenso sin evaporación. Relaciones suelo-agua; composición de la solución inicial del suelo; variación de la CE en la columna de suelo; variación iónica en la columna de suelo; balance de masas iónico.	145
4.2.1.2. Experimento IB: Ascenso con evaporación. Relaciones suelo-agua; variación de la CE en la columna de suelo; variación iónica en la columna de suelo; balance de masas iónico.	181
4.2.2. Dinámica del lavado de sales en presencia de una capa freática de nivel constante (experimento II). Relaciones suelo-agua; densidad óptica de la solución del suelo; variación de la CE en la columna de suelo y en el efluente; variación iónica en la columna de suelo y en el efluente.	225
5. <u>RESUMEN Y CONCLUSIONES</u>	257
5.1. Sonda de succión.	258

	<u>Pag.</u>
5.2. Sensor de salinidad.	259
5.3. Dinámica de la salinización por capa - freática de nivel constante.	262
5.4. Dinámica del lavado de sales en presen <u>cia</u> de una capa freática de nivel cons <u>tan</u> tante.	267
6. <u>BIBLIOGRAFIA</u>	272

1. I N T R O D U C C I O N

1. INTRODUCCION

El total de la superficie terrestre es de unos quince mil millones de hectáreas, de las que aproximadamente un tercio se encuentran en áreas de clima árido o semi-árido.

Por diversas razones, gran parte de las antiguas civilizaciones surgieron en estas áreas, en las que se precisó del riego como práctica agronómica fundamental. Una parte importante de estas civilizaciones llegaron así a fundamentarse en sociedades agrarias con una próspera agricultura de regadío. Entre ellas pueden destacarse las de Mesopotamia, Egipto, China, Perú o Méjico.

Las causas del ocaso e incluso desaparición de muchas de estas civilizaciones antiguas son, evidentemente, complejas. Desde el punto de vista agronómico, estudios históricos recientes concluyen que, entre las mismas, debe destacarse la falta de capacidad de estas sociedades para enfrentarse a los problemas de encharcamiento y salinización de los suelos asociados a la agricultura de regadío. Así, la progresiva salinización de las fértiles tierras regadas del valle de los ríos Tigris y Eufrates, que ha conducido a parte de las actuales zonas desérticas de Mesopotamia, es un ejemplo dramático de la decadencia de una civilización que alcanzó uno de los mayores desarrollos culturales y técnicos en la historia de la humanidad.

En conclusión, la salinización de las aguas y de los suelos ha sido, y continúa siendo, uno de los principales factores limitantes de la productividad de las tierras de regadío, y puede - -

afirmarse que es un problema potencial de primera magnitud con el que deberán enfrentarse las reservas de suelo agrícola - localizadas fundamentalmente en zonas áridas o semi-áridas - en su futura puesta en regadío, imprescindible para satisfacer las crecientes demandas de alimentos de una población mundial en continuo aumento.

Al nivel actual de nuestros conocimientos, los problemas asociados a la salinidad no están resueltos satisfactoriamente en su totalidad. La constatación de este hecho, y la experiencia del pasado, han frenado el desarrollo potencial de la puesta en riego - de nuevas zonas; así, sólo el 3 % de las áreas áridas y semi-áridas (unos 150 millones de hectáreas) son regadas en la actualidad, aunque la tierra potencialmente regable excede de los 800 millones. Por otro lado, la preocupación por la permanencia de los regadíos establecidos actualmente no es menor: los planteamientos más pesimistas en U.S.A. cuestionan si la agricultura del Oeste, sin duda la más avanzada a nivel mundial, será rentable en el futuro debido a la creciente salinización de los suelos y aguas.

La gravedad del problema planteado se refleja en el siguiente cuadro (Kovda y Szabolcs, 1979), en el que se presentan las hectáreas de suelos de secano y regadío afectados por sales:

	Suelos salinos y/o alcalinos x 10 ⁶ has.
Europa	50.8
Asia	319.3
Africa	80.5
América del Norte	15.8
América Central y del Sur	131.1
Australasia	357.3
Total	954.8

En España, estos autores señalan la existencia de 840.000 - Has. de suelos afectados por sales. Finalmente, se han cartografiado 310.000 has. en la Cuenca del Ebro, de las que 219.000 se encuentran en Aragón.

Otra forma de cuantificar la importancia relativa del tema es analizar el número de publicaciones generadas por la comunidad científica. Así, del total de 125.374 referencias recopiladas por el Sistema Internacional de Información sobre Ciencias y Tecnologías Agrarias (Agris-FAO) en los años 1975 y 1976, 12.087 (el 9.6 % del total) se refieren a "Ciencia del Suelo", y de ellas 317 son sobre salinidad (el 2.6 %). Estos mismos porcentajes se presentan en la revisión solicitada a la "Lockeed Information Retrieval Service, Bibliography of Agriculture" para los años 1970-75 (782 referencias de salinidad sobre 29.915 de "Ciencia del Suelo"). De las referencias sobre "salinidad en general", el 12 % se refieren a la recuperación de suelos afectados por sales y un porcentaje algo menor a aspectos relacionados con la salinización de los suelos.

Uno de los mecanismos principales de salinización del suelo es el ascenso y evaporación del agua subterránea: la evaporación del agua acumula sus sales disueltas en la superficie del suelo, y este proceso conduce con el tiempo a la salinización del mismo.

Todo desarrollo de una agricultura de regadío permanente debe por lo tanto considerar conjuntamente el riego, el drenaje y el lavado. Al introducir el riego en un área, el incremento en



los aportes de agua puede conducir a una falta de drenaje adecuado, con lo que el riego por encima de la evapotranspiración provoca la recarga de las aguas subterráneas que en ciertos casos origina importantes ascensos del nivel freático hasta acercarse a pocos metros de la superficie del suelo. En estas condiciones, el flujo capilar ascendente puede salinizar el suelo en muy cortos períodos de tiempo. Este hecho ha quedado dramáticamente patente en un buen número de zonas bajas de los polígonos de riego, y algunos de los desarrollados en Aragón son un elocuente ejemplo de lo expuesto.

La importancia de este tema condujo al planteamiento del trabajo expuesto en esta memoria, en el que se estudia la dinámica del movimiento de sales a partir de una capa freática, en condiciones de no evaporación (experimento IA) y de evaporación (experimento IB) en la superficie del suelo.

En el experimento IB, la evaporación se realizó haciendo fluir una corriente de aire en la parte superior de la columna de suelo. De esta manera se evitó la complejidad del movimiento de agua en fases diferentes, por efecto del establecimiento de gradientes de temperatura en la superficie, y se equiparó a las condiciones climáticas imperantes en la región - el cierzo -, que tiene un gran peso específico en los valores finales de evapotranspiración.

Una vez concluido el experimento IA, en el que se produjo el ascenso de la solución desde la capa freática en ausencia de evaporación en la superficie del suelo, se planteó el lavado de esta

columna en condiciones de saturación (experimento II), semejante al de recuperación más utilizado en el campo, y equiparable al riego por inundación tradicional en la región.

El principal objetivo de los experimentos planteados sobre salinización y lavado en presencia de una capa freática, es por lo tanto el estudio del movimiento de sales en régimen transitorio, tratando de identificar la participación relativa de cada uno de los complejos procesos inherentes al desplazamiento de agua y sales en medios porosos reactivos a subsaturación y a saturación.

Por experiencias anteriores sobre el lavado de sales en columnas de suelo (tesina de licenciatura), era evidente que la metodología utilizada para la medida de la salinidad en procesos de régimen permanente (seccionado de la columna y/o análisis de efluentes) era inviable o poco práctica para procesos de régimen transitorio.

De las distintas técnicas aplicables a los mismos, se eligieron las que pudieran dar información más valiosa sin que alteraran sustancialmente la dinámica del movimiento. Así, se eligió el sensor de salinidad, que mide la conductividad eléctrica de la solución "in-situ" sin alterar en absoluto el proceso, y la sonda de succión que, aunque altera algo el proceso, permite obtener probablemente la información más completa sobre la composición de la solución del suelo. La complementariedad de ambos instrumentos, su sencillez (útiles para medidas en campo) y el hecho de que evi

dencien fenómenos que no se pueden poner de manifiesto por otros procedimientos, justificaban asimismo la racionalidad de la elección.

Sin embargo, tanto los antecedentes bibliográficos como los ensayos previos realizados revelaron que ambas técnicas, y en especial el sensor de salinidad, estaban poco estudiadas, sobre todo con respecto a su comportamiento en medios porosos a subsaturación y en régimen instantáneo. Por ello, antes de iniciar los estudios en columna, se analizaron en profundidad ambos instrumentos.

En conclusión; los trabajos que se presentan en esta memoria comprenden el estudio del movimiento de sales en procesos de ascenso capilar y lavado, a través de su seguimiento con la sonda de succión y el sensor de salinidad. La evaluación previa y el comportamiento posterior de estos instrumentos han permitido establecer sus ventajas y limitaciones y hacen previsible su mejor rendimiento en el estudio y perfeccionamiento de técnicas recientes de recuperación de suelos salinos y alcalinos (métodos de inundaciones intermitentes, diluciones sucesivas con aguas salinas, enmiendas químicas de subproductos industriales, etc.) que abren nuevas perspectivas para el control y mejora del problema de la salinidad en la agricultura.

2. ESTADO ACTUAL DEL PROBLEMA

2. ESTADO ACTUAL DEL PROBLEMA

2.1. La sonda de succión

Una dificultad sustancial que se presenta en el estudio de las relaciones agua-iones-suelo, está en la obtención de muestras representativas de su solución. La extracción de la solución del suelo a contenidos de agua apreciablemente diferentes a los encontrados "in-situ" (métodos habitualmente seguidos como el extracto saturado, extracto 1:5 ó 1:10 (suelo:agua), etc.) presenta a menudo dificultades apreciables de interpretación. Por ello, la medida "in-situ" de la salinidad del suelo o, alternativamente, la extracción "in-situ" de su solución por medio de sondas porosas, ha supuesto una contribución significativa al estudio de estas relaciones.

Este método de extracción, propuesto ya por Briggs y McCall en 1904, es operativo para potenciales matriciales del agua en el suelo mayores de aproximadamente -1 bar. Aunque el rango de "agua disponible" para las plantas se extiende más allá de -15 bares, no debe olvidarse que la parte más importante del movimiento de agua en el suelo se realiza a potenciales mayores de -1 bar. Además, desde el punto de vista agronómico, el rendimiento óptimo de la mayoría de los cultivos exige niveles de potencial superiores a -1 bar. Por ello, este método de extracción es aplicable a muchas situaciones reales en el campo de las relaciones agua-suelo-planta.

De los diversos materiales utilizados para la fabricación de

sondas de succión: cerámica, vidrio sinterizado, metales porosos, PVC poroso, fibra ahuecada de celulosa-acetato, etc. (Krugel et al., 1952; Jackson et al., 1976; Levin y Jackson, 1977; Long, 1978), el más utilizado es la cerámica porosa (Brooks et al., 1958; Wagner, 1962; Reeve y Doering, 1965). Sobre este material se han diseñado variantes para aplicaciones específicas, como la sonda miniaturizada de Harris y Hansen (1975) o la de otros (Pari^zek y Lane, 1970; Wood, 1973) que muestrean la solución del suelo a profundidades relativamente elevadas (más de diez metros).

No obstante, esta técnica presenta algunas limitaciones importantes. Así, Kapp (1937), Hansen y Harris (1975) y Alberts et al. (1977) han demostrado la necesidad de tomar en consideración fenómenos tales como la sorción iónica (para el ion fosfato; Parker, 1925) y la difusión y tamización iónica en las paredes porosas de la sonda. Asimismo, las propiedades de intercambio de la cerámica porosa pueden influenciar la composición de la muestra extraída (Grover y Lamborn, 1970). Por otro lado, según la succión aplicada y el tamaño de la muestra extraída, el volumen de suelo muestreado puede diferir considerablemente. Así, England (1974) plantea la existencia de serias dudas respecto de la representatividad de las muestras extraídas con sondas de succión, dado que la solución que drena de los poros grandes - a succiones relativamente bajas - puede tener una composición diferente a la que se encuentra en los microporos, que no es extraída por la sonda. Este hecho fue puesto anteriormente en evidencia para el ion cloruro por Miller et al. (1965).

El área de influencia de la sonda se extiende a un cilindro o esfera (dependiendo de su configuración) cuyo centro coincide con ella, y extrae solución de poros de diferente tamaño, en función de la distancia a la misma, del nivel de succión aplicado, de la conductividad hidráulica del medio y del contenido de agua del mismo.

Van der Ploeg y Beese (1977) y Ardakani y McLaren (1972) coinciden con estas conclusiones en sus estudios sobre el movimiento de los iones amonio y nitrato en el suelo.

De acuerdo con Hansen y Harris (1975), con el fin de reducir la variabilidad de las muestras extraídas, las sondas deben agruparse por su velocidad característica de infiltración. Además, deben utilizarse tiempos de muestreo cortos, longitud de sondas uniforme, vacío inicial idéntico y, si es posible, la imposición de un vacío constante en lugar de un vacío decreciente con el tiempo. Por otro lado, las sondas deben limpiarse con ácido diluído antes de su uso, ya que ceden algunos solutos a la solución (Wolff, 1967).

En resumen, la situación presente con respecto a la fiabilidad de las sondas cerámicas de succión es que su nivel de confianza es aceptable o bueno siempre que se fijen las condiciones de extracción (Hansen y Harris, 1975). El instrumento, el medio poroso y el procedimiento experimental, junto con los objetivos del estudio, deben considerarse conjuntamente para dilucidar las ventajas y limitaciones de la técnica propuesta.

De acuerdo con estos antecedentes, en el apartado 4.1.1 se analizan las ventajas y limitaciones de la sonda cerámica de succión y su fiabilidad en relación con las condiciones experimentales y los objetivos del trabajo. Factores tales como el tiempo de respuesta o la sensibilidad a fenómenos de superficie se presentan en el apartado 4.1.2, junto con los resultados obtenidos en estos dos aspectos con el sensor de salinidad.

2.2. El sensor de salinidad

Una técnica alternativa a la extracción de la solución del suelo por medio de la sonda de succión es la medida "in-situ" de la salinidad introduciendo en el suelo instrumentos diseñados a tal fin. Generalmente, esta medida es de tipo resistimétrico, aunque recientemente se ha introducido una nueva técnica inductométrica, todavía en fase de verificación (De Jong et al., 1979; Rhoades y Corwin, 1981). De los instrumentos resistimétricos, el sensor de salinidad es en la actualidad el de mayor difusión.

Kemper (1959) fue uno de los primeros investigadores que utilizó estos dispositivos para la medida "in-situ" de la conductividad eléctrica de la solución del suelo. Su sensor trabaja en el rango de concentraciones desde 0.01 N a 0.5 N y hasta -6 atmósferas de potencial matricial del suelo. Aunque el aparato respondía en general de forma adecuada, se presentaron problemas debido al dispositivo paralelo de los electrodos que inducía una corriente relativamente elevada fuera del sensor, y por las dimensiones de la sonda que condicionaban un tiempo de respuesta demasiado elevado.

Richards (1966) desarrolló un sensor en el que el campo externo al mismo fue anulado gracias a una disposición diferente de los electrodos, y con un sellado y protección adecuados del instrumento. Su diseño incluyó un termistor para medir la temperatura y corregir la lectura de la CE a la temperatura de referencia (25°C). El pequeño elemento cerámico (aproximadamente 1 mm. de espesor) - dio unos tiempos de respuesta de 1 hora en solución (tiempo de respuesta se define como el tiempo necesario para que se produzca un 63 % del cambio total de la resistencia (o de la conductancia) en respuesta a un cambio en la concentración externa). Por la naturaleza del elemento cerámico, éste podía operar en el rango de potenciales matriciales de 0 a -10 atmósferas.

El sensor desarrollado por Enfield y Evans (1969) se construyó de vidrio poroso, con electrodos de platino y un termistor. La reproducibilidad del sensor fue ± 10 % en un intervalo de conductividades de 0 a 20 mmhos/cm a 25°C, operaba en el rango de "agua útil" y el tiempo de respuesta en soluciones acuosas era menor de dos horas.

Reicosky, Millington y Peters (1970) diseñaron un sensor en el que el elemento resistimétrico consistía en dos electrodos de platino separados por una placa de cloruro de polivinilo poroso, y todo ello encerrado en un tubo cerámico. El instrumento incluía asimismo un termistor. El sensor sólo era operativo en el rango de potenciales de agua de 0 a -0.65 bares. El tiempo de respuesta en solución era aproximadamente de una hora y la calibración de los sensores permanecía estable durante varias semanas.

De todos estos sensores, el de Richards es - con ligeros cambios - el actualmente utilizado.

Oster e Ingvalson (1967) modificaron el sensor de salinidad de Richards cubriendo el electrodo situado exteriormente con una delgada capa de cerámica que impedía su movimiento, mejorando la estabilidad del mismo. En su trabajo concluyeron que la precisión del sensor de salinidad en la medida de la conductividad eléctrica en un suelo areno-limoso era de ± 0.5 mmhos/cm a lo largo de los ciclos de riego y de secado. El comportamiento era tan bueno bajo condiciones de bajo (-7 bares) como de elevado potencial matricial (saturación).

Sin embargo, Ingvalson et al. (1970), trabajando con el mismo tipo de unidades, mostraron que la conductancia del sensor era afectada significativamente cuando el potencial matricial del agua en el suelo era menor de -2 bares, aunque podía realizarse una corrección si el cambio en la calibración con el potencial era conocido. Para los mismos sensores, Oster y Willardson (1971) concluyeron que el 85 % de las unidades utilizadas en sus experimentos eran estables y se comportaban satisfactoriamente por un período de al menos un año y medio, con una precisión estimada de ± 0.6 mmhos/cm.

Finalmente, Wood (1978) discute la estabilidad de la calibración y el tiempo de respuesta de los sensores, concluyendo que todos los sensores utilizados en un período de 3 años fueron estables, mientras que sólo lo fueron un 41 % de los utilizados durante 5 años. Por otro lado, los termistores mostraron una falta

apreciable de estabilidad con el tiempo. Respecto al tiempo de respuesta, concluye que es lo suficientemente rápido para apreciar cambios de salinidad que ocurran con intervalos mayores de 5 días.

De estos estudios podemos deducir que a pesar de las importantes contribuciones hechas por estos investigadores, todavía permanecen sin resolver algunas cuestiones. La utilización de sensores para medir la salinidad del suelo "in-situ" está siendo cada día más popular en investigaciones de laboratorio y de campo (Oster et al., 1969; Rhoades, 1972; Oster y McNeal, 1971; Todd y Kemper, 1972). Además es aparente que el uso de sensores adecuados por parte de los agricultores para evaluar la salinidad de sus suelos de una forma rutinaria podría ser en el futuro una práctica importante para el control de la salinidad.

Tanto por lo anteriormente expuesto como por la utilización poco usual del sensor en los estudios en columna sobre el movimiento de sales inorgánicas, fue necesaria una evaluación más profunda de sus ventajas y limitaciones que se describen en el apartado 4.1.2.

2.3. Teoría del movimiento de solutos en el suelo

De forma general, el movimiento de solutos en suelo viene gobernado por los procesos de transporte de difusión y de convección y por las interacciones del soluto con la fase sólida del suelo. Sólo en ocasiones es necesario considerar otros aspectos, como el movimiento de agua en fase vapor, la existencia de gradientes de

temperatura, fenómenos electro-cinéticos, etc. para explicar este movimiento.

De acuerdo con las condiciones experimentales de este trabajo, y por razones de simplificación, se mencionarán únicamente los dos procesos de transporte más importantes

Movimiento de solutos por difusión.

El término difusión se refiere al movimiento de las partículas individuales de tamaño molecular como resultado de su energía térmica. Esta energía induce un movimiento al azar de las mismas, cuya resultante es un movimiento neto desde los puntos de elevada actividad a los de menor actividad.

La velocidad media macroscópica de este movimiento es proporcional al gradiente de concentración dC/dx y al área de la sección que atraviesan. Así, la primera ley de Fick se expresa como:

$$\frac{dQ}{dt} = -DA \frac{dC}{dx} \quad (1)$$

donde Q es la cantidad de material que difunde (en unidades de masa o volumen), t es tiempo, A es el área de la sección de difusión, C es la concentración del material (masa o volumen por unidad de volumen de solución), x es la coordenada espacial paralela al flujo y D es una constante de proporcionalidad conocida como coeficiente de difusión.

Debido a que el suelo es un medio poroso complejo, cargado eléctricamente, el coeficiente efectivo de difusión D_p de un ion en este medio es menor que el equivalente D_o en solución. La relación entre D_p y D_o viene dada por:

$$D_p = \theta (L/L_e)^2 \alpha \gamma D_o \quad (2)$$

donde θ es el contenido volumétrico del agua en el suelo, $(L/L_e)^2$ es un factor de tortuosidad debido a la naturaleza porosa del suelo, α es un parámetro que tiene en cuenta la reducción en la viscosidad del agua debido a la presencia de partículas cargadas en la matriz del suelo y γ otro parámetro que considera el efecto retardante de la exclusión aniónica en la vecindad de las partículas del suelo con carga negativa.

Teniendo en cuenta estos factores, la primera ley de Fick modificada puede escribirse:

$$J_d = dQ/Adt = -D_o \theta (L/L_e)^2 \alpha \gamma dC/dX = -D_p (\theta) dC/dX \quad (3)$$

donde J_d es la densidad de flujo del soluto.

Movimiento de solutos por convección.

Cuando una solución se desplaza a través del suelo, el transporte convectivo del soluto (también denominado transporte viscoso o transporte de masa) es función de la velocidad de desplazamiento de la solución.

Debido a la naturaleza porosa del suelo, la velocidad media

y la distribución de velocidades del agua en los poros está asociada a la distribución de tamaños y forma de los mismos. El flujo en los poros grandes es mayor que en los pequeños, y es mucho mayor en el centro que cerca de sus paredes. De esta manera, la matriz porosa del suelo induce la dispersión del soluto.

El transporte macroscópico de convección de un soluto se describe generalmente por una ecuación que considera dos formas de transporte: (a) la componente debida a la velocidad media del fluido y (b) la componente debida a la dispersión mecánica por efecto en las variaciones locales de la velocidad del fluido. Esta última componente puede describirse en primera aproximación por una ecuación similar a la (1), sustituyendo el coeficiente de difusión por el coeficiente de dispersión mecánica (D_h). Este coeficiente es proporcional a la velocidad intersticial del fluido \bar{v} (cm sec^{-1}).

Si se acepta que ambos componentes de velocidad son aditivos, la cantidad total de soluto transportado por unidad de área y de tiempo (J_h) en la dirección de flujo (x) es:

$$J_h = -D_h (\bar{v}) \frac{dC}{dx} + \bar{v} \theta C \quad (4)$$

El primer término representa el flujo de soluto debido a la dispersión y el segundo término el debido a la velocidad media del flujo.

Movimiento de solutos debido al efecto combinado de la difusión y de la convección.

El efecto combinado difusión-convección se describe con las ecuaciones (3) y (4):

$$J_s = - \left[D_h (\bar{v}) + D_p (\theta) \right] \frac{dC}{dx} + \bar{v} \theta C = -D (\bar{v}, \theta) \frac{dC}{dx} + qC \quad (5)$$

donde J_s es la densidad de flujo del soluto, D es el coeficiente de dispersión hidrodinámica ($\text{cm}^2 \text{sec}^{-1}$) y q es $\bar{v} \cdot \theta$ (denominada "velocidad eficaz", $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$). Sin embargo, las condiciones de flujo estacionario, tal como se describen en la ecuación (5) son poco frecuentes en la realidad.

Para condiciones más generales de régimen instantáneo puede obtenerse otra expresión matemática más compleja que combina la ecuación (5) con la ecuación de continuidad o de conservación de masa.

A partir de esa expresión (Kirkham y Powers, 1972), puede obtenerse la ecuación del movimiento de un soluto para el caso particular de estado estacionario y flujo unidimensional:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D' \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \bar{v} \frac{\partial C}{\partial x} \quad (6)$$

donde $D' = (D_h + D_p)/\theta$ es el coeficiente de dispersión. Este coeficiente puede obtenerse ajustando las curvas de avance obtenidas en experimentos de "desplazamiento miscible" (Biggar y Nielsen, -

1967), a una solución analítica de la ecuación (6).

La ecuación (6), desarrollada por Lapidus y Amundson en 1952, es aplicable al movimiento de un soluto no reactivo en un sistema sin fuentes ni sumideros. Para valores elevados de velocidad y en medios porosos saturados, D' es linealmente proporcional a \bar{v} . Cuando \bar{v} es cero, generalmente se considera que el coeficiente de dispersión hidrodinámica o mecánica es cero.

La ecuación (6) ha sido aplicada profusamente en el estudio de las relaciones agua-suelo, obteniéndose resultados excelentes en el caso de medios porosos homométricos a saturación. En condiciones de subsaturación, la ecuación no es tan satisfactoria, debido a la formación de "poros estagnantes" (zonas de régimen de flujo mucho menor que la velocidad media) que actúan como fuentes y sumideros del sistema.

Un factor adicional que complica el problema en suelos es la posibilidad de existencia de reacciones entre el soluto y la fase sólida. Entre ellas, pueden mencionarse la precipitación o disolución de sales, la adsorción positiva o negativa, fenómenos de adsorción específica, intercambio iónico y procesos asociados a fenómenos de ósmosis inversa y electrocinéticos. Todo ello puede alterar significativamente el comportamiento de los solutos, y en particular la velocidad de los mismos en relación con la del solvente. A pesar de ello, la ecuación (6) o similares se han utilizado con relativo éxito para predecir el movimiento de solutos en el suelo.

2.4. Dinámica de salinización por capa freática de nivel constante

El movimiento ascendente de agua y sales desde una capa freática se ha estudiado con cierta frecuencia. La mayoría de estos estudios se han basado en el análisis destructivo de columnas de suelo en estado estacionario, generalmente una vez completado el ascenso capilar.

El procedimiento utilizado suele consistir en seccionar la columna de suelo y determinar el contenido de salinidad (y en ocasiones agua) sobre porciones de suelo de cada sección. La salinidad se evalúa a través de la medida de la conductividad eléctrica o del análisis iónico de extractos de suelo. El Cuadro 2-1 resume algunos de estos trabajos, indicando los autores, tipo de extracto realizado y determinaciones analíticas para la estimación de la salinidad.

Las conclusiones generales a las que se llegó en estos y otros estudios similares son que la profundidad de la capa freática, la tasa de evaporación y las características del suelo son los factores principales que controlan la acumulación de sales en el perfil. Además, esta acumulación se produce preferentemente en los primeros centímetros superficiales de suelo.

Algunos autores han definido para diferentes suelos la profundidad crítica de la capa freática a la que la acumulación de sales en el perfil es despreciable (Talsma, 1963; Sharma, 1973; Kandil et al., 1977). Así, para Peck (1978) esta profundidad crí-

Cuadro 2-1. Estudios sobre dinámica de salinización por capa freática en los que se ha seguido la metodología del seccionado de columnas de suelo y determinación de la salinidad.

Autores ,	Extracto realizado	Determinación de la salinidad
Leo, 1963	Saturado	CE
Bahattin y Krashevski, 1964	"	CE
Kandil et al., 1977	"	CE
	1:5 (suelo:agua)	Aniones y cationes
Sharma y Prihar, 1972	1:2	CE
Bandyopadhyaya, 1973	"	Aniones, cationes, pH
Dahiya, 1980	"	Cl ⁻
Bresler y Hanks, 1969	1:5	CE
Scotter y Raats, 1970	"	Cl ⁻
Bresler y Laufer, 1974	"	Cl ⁻
Hassan y Ghaibeh, 1977	"	CE, Cl ⁻
Callebaut et al., 1979	"	CE
Doering et al., 1964	1:8	CE, Cl ⁻
Qayyum y Kemper, 1961	no se indica	Cl ⁻ (meq/100 g.)
Szabolcs y Lesztak, 1966	"	meq de varias sales
Grammaticati y Polikarpova, 1965	"	Cl, Na (%)

tica es aquella a la que la velocidad del movimiento ascendente - en estado estacionario es como máximo 0.1 cm/día. En general, para la mayoría de los suelos, la profundidad crítica es del orden de 1 a 2 metros.

Respecto a la acumulación superficial de sales, Grammaticati y Polikarpova (1965) indican que las sales se acumulan en los dos primeros centímetros de suelo, mientras para Leo (1963) y Hassan y Ghaibeh (1977) lo hacen en los cinco centímetros primeros. Para otros la acumulación es secuencial, encontrando diferencias entre el día y la noche en el primer centímetro de suelo (Nakayama et al., 1973). Es evidente que este tipo de conclusiones dependen de las condiciones experimentales y tipo de suelo utilizado.

A pesar de que es conocido que las sales se mueven generalmente con el agua, que el movimiento ascendente de agua viene condicionado por la evaporación (Gardner y Fireman, 1958; Gardner, - 1958; Parlange y Aylor, 1972) y que la misma es el factor fundamental de la acumulación de sales, de tal forma que en su ausencia sólo los primeros 15 cm. próximos a la capa freática se salinizan (Szabolcs y Lesztak, 1966), en un buen número de trabajos - revisados las tasas de evaporación impuestas en los experimentos no se midieron, o al menos no se consideraron en la interpretación de los resultados. Así, Qayyum y Kemper (1961) han evidenciado el efecto retardador de la evaporación a partir del momento de formación de una costra salina superficial.

A pesar de la importante contribución realizada por éstos y

otros investigadores al estudio del movimiento ascendente de sales desde una capa freática, la metodología utilizada no ha permitido estudiar de forma adecuada la dinámica de este movimiento en las fases anteriores al establecimiento del estado de equilibrio.

Sólo recientemente se han realizado algunos estudios del movimiento ascendente de sales en régimen instantáneo, a través de la utilización de técnicas de medición no destructivas (utilización de isótopos radiactivos, medida de la CE "in-situ" por medio de sensores de salinidad o por la técnica de cuatro electrodos, extracción "in-situ" de la solución del suelo por medio de sondas de succión...) (Khan, 1968; Todd y Kemper, 1972; Diestel, 1974, 1976).

Un enfoque diferente en el estudio del movimiento de sales en el suelo es su simulación a través de modelos matemáticos, algunos de ellos con especial referencia al movimiento ascendente desde una capa freática. Entre los trabajos relevantes en el desarrollo y/o aplicación de estos modelos pueden citarse: Bresler y Hanks (1969), Hanks et al. (1969), Dutt et al. (1972), Bresler y Laufer (1974), Cassel et al. (1975), Hwang et al. (1975), Wierenga et al. (1975), Cameron y Klute (1977) y Kovda y Szabolcs (1979).

La mayoría de estos modelos se basan en parámetros obtenidos experimentalmente y su validez actual está probablemente limitada por la insuficiente información experimental obtenida en condiciones controladas. A pesar de ello, la técnica de simula-

ción ha supuesto un avance conceptual de importancia en el estudio del movimiento de sales en el suelo.

En los estudios en columna de este trabajo (capítulo 4.2) se ha perseguido la aplicación de técnicas no destructivas de medida de la salinidad en un suelo natural y la explicación de algunos de los complejos procesos observados durante el ascenso de agua y sales desde una capa freática estacionaria. No se ha pretendido obtener parámetros que puedan introducirse en una modelación matemática del proceso, que debería emprenderse a través de una simplificación del método experimental y especialmente del medio poroso utilizado. No obstante, la información que se presenta puede ser útil para la verificación de algunos modelos actuales o futuros.

2.5. Dinámica del lavado de sales

El procedimiento de la recuperación de suelos salinos a través del lavado con agua de las sales acumuladas en su perfil es conocido de antiguo, y tanto por ello como por su interés agrónomo la bibliografía al respecto es muy extensa.

El planteamiento de los experimentos que se presentan en esta memoria se entronca con los que Nielsen y Biggar publicaron entre los años 1961 y 1963 en el Departamento de Water Science de la Universidad de California en Davis, en los que aplicaron la teoría del desplazamiento miscible al movimiento de solutos en el suelo. Un resumen de los aspectos más relevantes de estos

trabajos se presenta en Biggar y Nielsen (1967). Ambos demostraron experimentalmente la importancia de los fenómenos de convección y de difusión, y en especial de este último en condiciones de subsaturación o de baja velocidad del fluido. Asimismo, comprobaron que una parte sustancial de la solución es retenida por el suelo y no se desplaza con la solución infiltrante, principalmente cuando el desplazamiento se realiza en condiciones de saturación, y dedujeron la relación entre esta retención de agua, la velocidad de flujo y el contenido de agua en el suelo. Posteriormente, a esta solución difícilmente desplazable se le ha denominado "agua estagnante" por estar ubicada en poros estagnantes o parcialmente ciegos. La suposición de la presencia en el sistema de agua "móvil" y "no móvil" (estagnante) no está aceptada rotundamente por la comunidad científica, especialmente en el caso de suelos sin formación de agregados estructurales (Smiles y Philip, 1978). Finalmente, estudiaron la interacción solutos-medios porosos a través de la forma y posición de las curvas de avance o elución.

Como en el caso del ascenso capilar, la simulación del proceso de lavado a través de modelos matemáticos es muy amplia y ha supuesto un avance importante en la comprensión conceptual de los mecanismos que intervienen en el mismo. Así, Van der Molen (1956) fue uno de los primeros en aplicar el modelo de Glueckauf ("teoría de los platos") para la predicción del movimiento del ion cloruro en suelo. Este tipo de aproximación ha sido utilizado posteriormente por otros (Terkeltoub y Babcock, 1971; Dutt et

al., 1972), con resultados muy satisfactorios. En contraste con este tipo de modelos, otros se han basado en el intercambio cinético, en el que se asume un equilibrio dinámico entre los iones adsorbidos y en solución (Boast, 1973). Otros trabajos de interés en la simulación del transporte de sales en suelo son Ferrari y Cuperus (1973), Wierenga (1977) y Rao et al. (1980).

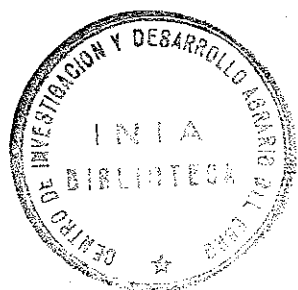
Estos y otros trabajos han sentado las bases que han conducido a definir las condiciones para un lavado eficiente de las sales del suelo. Así, los siguientes aspectos han quedado evidenciados por diferentes investigadores (Miller et al., 1965; Keller y Alfaro, 1966; Warrick et al., 1971; Kirda et al., 1973a, 1973b; Biggar y Tanji, 1975; Dahiya et al., 1980; Ghuman y Prihar, 1980):

1. La distribución de sales en el perfil del suelo durante el proceso de lavado depende del contenido inicial del agua en el suelo (θ_i) y del contenido de agua durante el proceso (θ_t).

2. Durante el período de infiltración, el efecto de θ_i es pequeño y el de θ_t es grande, de tal forma que el lavado es más eficiente y profundo conforme la velocidad de aplicación del agua disminuye. Así, Warrick et al., 1971, definen la ecuación:

$$\begin{aligned} &\text{velocidad de avance frente de sales} = \\ &= (\text{velocidad infiltración final del agua en el suelo}) / \theta_t \end{aligned}$$

3. Durante el período de redistribución del agua en el suelo, el efecto de θ_i es importante, siendo el lavado más eficiente cuanto menor es este valor.



4. En un suelo inicialmente seco, el frente de avance de agua y solutos coinciden, mientras que en un suelo inicialmente húmedo el frente de solutos va retrasado respecto al de agua.

5. El desplazamiento pistón no existe en un medio poroso natural, como es el suelo, y los procesos de transporte y mezcla de la solución residente e infiltrada en el suelo deben considerarse al definir la cantidad de agua necesaria para el lavado y el tiempo de recuperación.

6. De forma general, el desplazamiento con agua pura de un volumen de poros de la solución del suelo reduce su concentración a la mitad, y el desplazamiento de 1.5 a 2.0 volúmenes de poros lo hace al 20 % (método de inundación continua). Este volumen corresponde aproximadamente a una unidad de agua (altura equivalente) por unidad de suelo (Reeve et al., 1955; Jury et al., 1979).

7. Las interacciones en la interfase sólido-solución son generalmente importantes para explicar el comportamiento de los cationes en el suelo (Rible y Davis, 1955; Calvin, 1967; etc.). Sin embargo, no existe un criterio definitivo sobre la importancia de las interacciones fase sólida-aniones de la solución del suelo (Dyer, 1965; Bresler y Laufer, 1974; Biggar y Tanji, 1975), aunque se acepta que en ciertas condiciones (quizá difíciles de encontrar en suelos agrícolas naturales) estas interacciones son importantes (Bower y Goertzen, 1955; Kemper, 1960; Thomas y Sw-

boda, 1970).

En el capítulo 4.2 se presentan los resultados del lavado, - en condiciones de saturación, de una columna de suelo previamente salinizada por ascenso de una solución salina desde una capa freática estacionaria. Se eligió este tipo de lavado por ser el utilizado más comunmente en la recuperación de suelos salinos.

3. MATERIAL Y METODOS
=====

3. MATERIAL Y METODOS

3.1. Suelo

El Yolo es un suelo aluvial profundo de textura franca. La toma de muestras se realizó en el campo de experiencias del Departamento de Ciencia del Agua de la Universidad de California, Davis.

Se eligió este suelo por reunir unas condiciones físicas óptimas para el experimento planteado, y por ser uno de los suelos más estudiados, ocupando una elevada extensión de terreno agrícola de excelente productividad.

La clasificación de este suelo se da como Typic Xerorthents. Granulométricamente, está compuesto por un 30.7 % de arena (2-0.02 mm. de diámetro de partículas), un 46.6 % de limo (0.02 a 0.002 mm.) y un 22.7 % de arcilla (partículas menores de 0.002 mm. de diámetro).

El análisis de difracción de rayos X de la fracción menor de 2 micras dio las siguientes arcillas como predominantes en la muestra: Montmorillonita, Vermiculita, Mica y Caolinita. La Figura 3-1 muestra las curvas de difracción obtenidas para los cuatro tratamientos clásicos.

La Figura 3-2 muestra la curva de retención de humedad para el rango de potencial matricial de 0 (saturación) a -0.6 bares.

El Cuadro 3-1 recoge los resultados obtenidos en el análisis del extracto saturado y de los cationes de cambio del suelo.

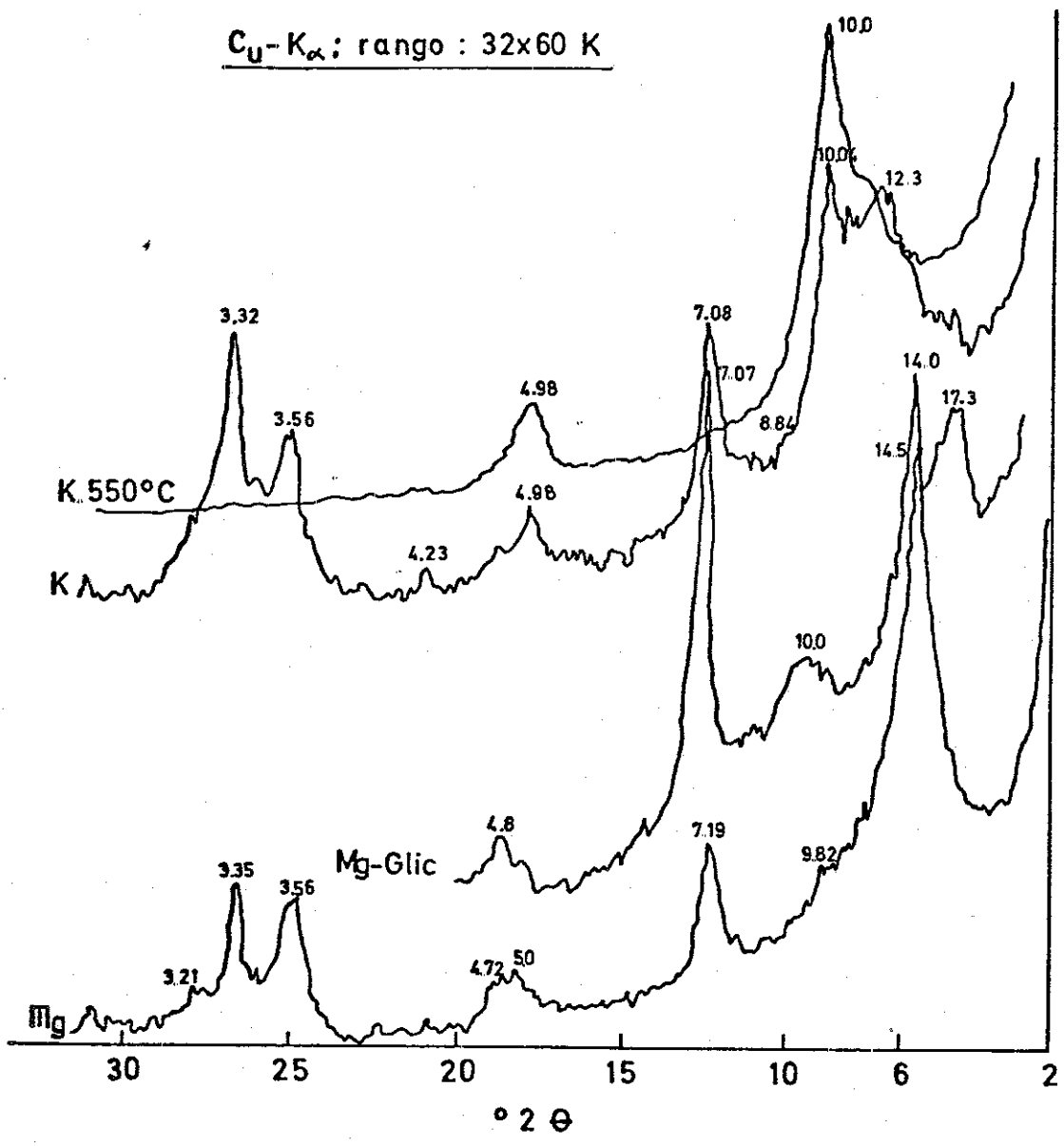


Figura 3-1. Curvas de difracción de rayos X de la fracción menor de 2 micras (suelo franco Yolo).

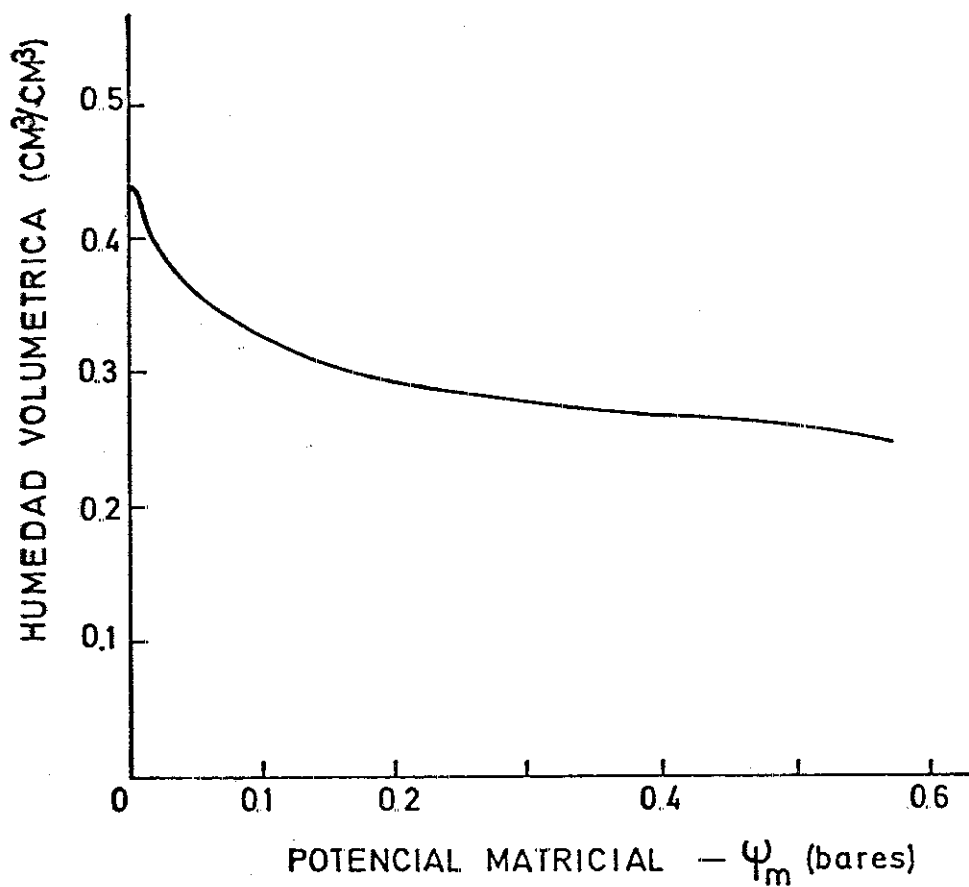


Figura 3-2. Curva de retención de humedad del suelo franco Yolo.

Cuadro 3-1. Análisis del extracto saturado y de los cationes de cambio del suelo franco Yolo

Variable	Extracto saturado meq/l	Cationes de cambio meq/100 g
Na	1.7	0.3
Ca	7.0	9.2
Mg	13.6	8.4
K	5.2	5.9
HCO ₃	1.0	-
Cl	22.4	-
SO ₄	2.6	-
NO ₃	0.1	-
pH	7.6	-
CE ¹	2.9	-
SAR ²	0.5	-

¹ CE = conductividad eléctrica expresada en mmhos/cm a 25° C

² SAR = relación de adsorción de sodio = $\text{Na} / \sqrt{(\text{Ca} + \text{Mg})/2}$ expresado en $(\text{meq/l})^{1/2}$

3.2. Métodos

3.2.1. Análisis granulométrico y mineralógico

El análisis granulométrico se realizó siguiendo el método hidrométrico propuesto por Bouyoucos (Day, 1965).

El análisis cualitativo de difracción por rayos X se realizó según el método propuesto por Jackson (1969), utilizando la radiación $K\alpha$ de un anodo de cobre.

3.2.2. Métodos químicos

Los extractos saturado y 1:10 (suelo:agua) se efectuaron en la forma descrita por Richards (1954).

La Conductividad Eléctrica y el pH se midieron en la forma usual con un conductímetro y un pH-metro Beckman.

Determinación de aniones y cationes: Los cloruros se determinaron por medio de un clorurómetro digital Buchler que opera basado en el punto final amperométrico. Los sulfatos se determinaron por turbidimetría con un espectrofotómetro Perkin-Elmer a 420 nm. de longitud de onda. Sodio, calcio, potasio y magnesio se determinaron por fotometría de llama y absorción atómica (Perkin-Elmer). Las muestras se diluyeron convenientemente para minimizar los problemas de interferencia.

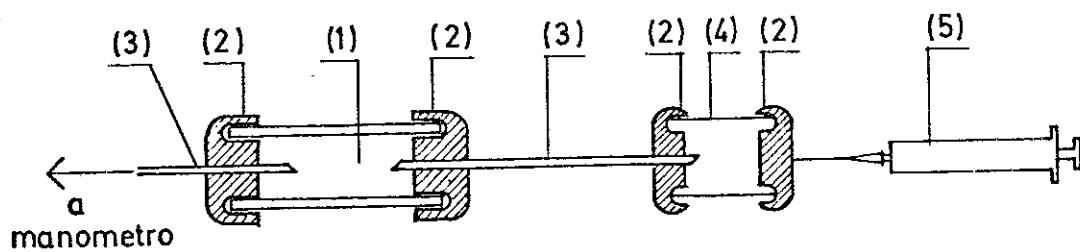
Los cationes de cambio se extrajeron por el método de percolación con una solución saturante de acetato amónico (Chapman, 1965).

Densidad óptica: En el experimento II (lavado de una columna de suelo salinizada) se determinó la densidad óptica relativa de las muestras extraídas con las sondas de succión y la del agua de drenaje, respecto a la del agua destilada, a una longitud de onda de 530 nm. en un colorímetro Perkin-Elmer.

3.2.3. Instrumentación para el control y seguimiento de los experimentos

Tensiómetro: Los microtensiómetros utilizados se construyeron de tubos de cerámica porosa de 10 mm. de diámetro exterior y 5 mm. de diámetro interior. Los tubos, de 30 mm. de longitud, se sellaron en sus extremos con tapones especiales de goma. De uno de los extremos sale un tubito de nylon (1 mm. de diámetro interior), por el que se puede inyectar agua para eliminar el aire presente en la cavidad del tensiómetro (Figura 3-3). Del otro extremo sale otro tubito de nylon hacia el manómetro de agua o de mercurio. El manómetro de agua se utilizó preferentemente por su mayor sensibilidad. El manómetro de mercurio se utilizó cuando el potencial matricial del agua en el suelo hacía poco práctica o inviable la utilización del manómetro de agua (potenciales inferiores a -100 cm. de agua).

El manómetro consta de un soporte apropiado que lleva una regla de 100 cm. de longitud (graduada en mm.) colocada verticalmente. Paralelo a la regla se fija el tubito de nylon que sale del tubo poroso, cuyo extremo se introduce en un recipiente con mercurio. La altura de la columna de mercurio sobre el nivel de referencia es una medida del potencial matricial del agua en el suelo. En el manómetro de agua, el tubo de nylon se coloca con su extremo apun-



- (1) CAPSULA POROSA
- (2) TAPONES DE GOMA
- (3) TUBO DE NYLON
- (4) TUBO DE VIDRIO
- (5) JERINGA PARA INYECTAR AGUA

Figura 3-3. Esquema del tensiómetro utilizado para la medida del potencial matricial.

tando hacia arriba. El nivel relativo del agua en el tubo respecto de la cápsula porosa, indica el potencial (Figura 3-4).

El llenado de los tensiómetros se realiza con una solución libre de aire de NaCl 0.1 N (similar a la de la capa freática de los experimentos I y II).

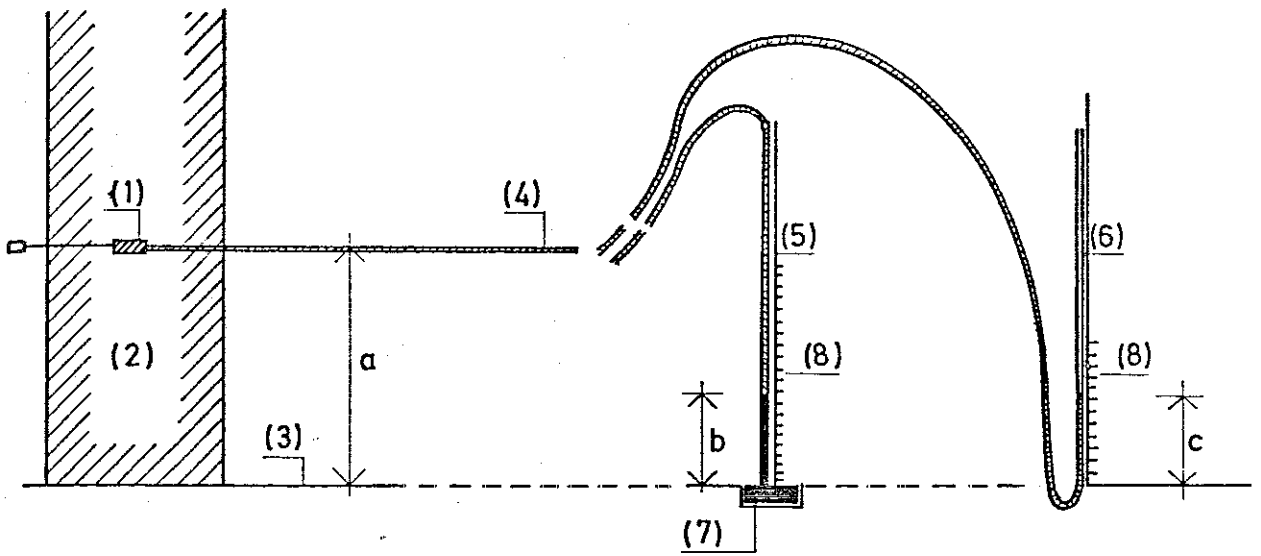
Al actuar las sondas de succión (nivel de vacío aplicado de -0.6 bares), los tensiómetros con manómetro de agua próximos a las mismas, se salían de escala en pocos segundos, y ésta perturbación se apreciaba con diferente intensidad en todos los tensiómetros a lo largo de la columna. Por ello, la lectura del tensiómetro se efectúa en todos los casos antes de proceder a la extracción de solución.

Una vez rellenos los tensiómetros con la solución 0.1 N de NaCl el establecimiento del nuevo equilibrio en la columna se produce transcurridas 35-40 horas, aunque a las 24 horas las diferencias de lectura con las anteriores a la extracción son ya pequeñas.

Sonda de succión: En el capítulo 4.1.1 se hace una descripción detallada de la sonda de succión.

El procedimiento de extracción seguido consiste en la evacuación de 4-5 ml. de solución que se descarta. Subsiguientemente se extraen unos 10 ml. de solución aplicando un vacío constante de -0.6 bares, excepto cuando el frente húmedo ascendente acababa de rebasar la sonda, en cuyo caso la extracción se realiza al máximo nivel de vacío aplicable (0.9 bares).

De forma general, la extracción con la sonda se realiza única



- (1) TENSÍMETRO
- (2) COLUMNA DE SUELO
- (3) NIVEL DE REFERENCIA
- (4) TUBO DE NYLON
- (5) MANÓMETRO DE MERCURIO

$$\psi_m(\text{cm}) = -a - 12.5 b$$

a = altura del tensiómetro sobre el nivel de referencia (cm)

b = altura del mercurio en el tubo de nylon (cm)

- (6) MANÓMETRO DE AGUA

$$\psi_m(\text{cm}) = -a + c$$

c = altura de agua en el tubo de nylon (cm)

- (7) MERCURIO
- (8) REGLA GRADUADA EN MM

Figura 3-4. Esquema del tensiómetro con manómetro de agua o de mercurio.

mente cuando los sensores de salinidad muestran algún tipo de varia ción relativa en sus lecturas, indicativa de cambios en la situa- ción de la columna.

Sensor de salinidad: En el capítulo 4.1.2 se hace una descrip- ción detallada del sensor, que fundamentalmente consta de un termis- tor, que mide la temperatura para corregir las lecturas de CE a 25° C (temperatura standard), y una célula de conductividad encastrada en una cerámica porosa. La medición de la Conductividad Eléctrica - se realiza de forma directa por medio de un puente de salinidad - apropiado. El termistor tiene además una salida para medir la tempe- ratura del suelo a través de una curva de calibración específica.

Psicrómetro de suelo: El psicrómetro de termopar (modelo PT- 51, Wescor Inc.), junto con un microvoltímetro (modelo HR33T, Wes- cor Inc.), es capaz de medir el potencial total del agua en el sue- lo, así como la temperatura. El psicrómetro dispone de un termopar de cromel-constantan montado en la cavidad interior de un receptácu- lo poroso de cerámica.

El instrumento opera basado en el método del punto de rocío - (la depresión en la temperatura del punto de rocío es una función - directa del potencial), por lo que más rigurosamente debería denomi- narse higrómetro de termopar, pues la psicrometría conlleva siempre la comparación de temperaturas entre un bulbo húmedo y seco.

En la práctica, el método adolece de limitaciones, siendo su - sensibilidad a pequeños cambios en la temperatura del medio uno de sus puntos críticos (Wiebe et al., 1977).



Aunque en los planes de este trabajo se preveía la instalación de psicrómetros a lo largo de toda la columna (experimentos I y II), la idea se desechó finalmente debido a la falta de consistencia de las medidas obtenidas en la calibración de los mismos. Únicamente se instaló un psicrómetro en las proximidades de la superficie de la columna de suelo cuya calibración y respuesta previa pareció razonable, y debido al interés de las lecturas relativas del potencial de agua próximo a la superficie del suelo en el experimento IB (ascenso de agua desde la capa freática estacionaria con evaporación en la superficie del suelo).

Psicrómetro de ambiente: Como se indicará más adelante, el sistema de control y medida de la evaporación en el experimento IB consiste esencialmente en un caudalímetro que mide el flujo de aire en $\text{cm}^3/\text{sg.}$ y en un psicrómetro de ambiente (Ysi, modelo 91, Yellow Springs Inst., USA) con su sonda de punto de rocío que mide la presión de vapor. A partir de este dato, se calcula la humedad absoluta del aire antes y después de entrar en contacto con la superficie del suelo. De la diferencia de estas dos medidas se obtienen los gramos de agua evaporados por litro de aire desplazado, y multiplicando por el flujo de aire (l/hr.) se calcula la tasa de evaporación en g/hr. La tasa de evaporación puede darse también en mm/hr.

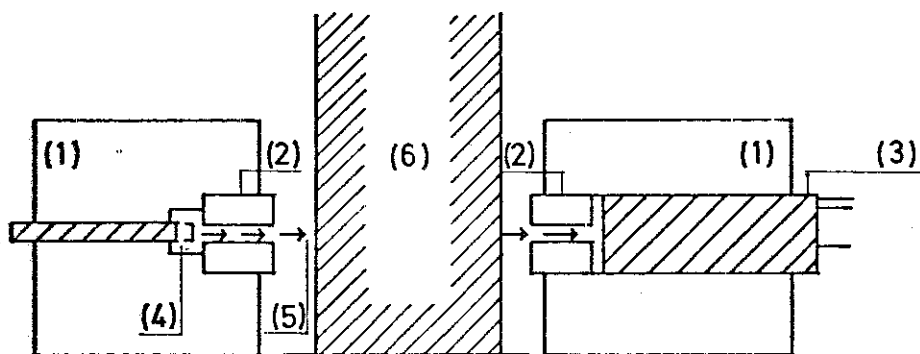
El método utilizado para el control y la medida de la evaporación, relativamente sencillo, presentó el problema de una humedad excesiva del aire derivado de la tubería de presión del laboratorio.

A pesar de la colocación de un desecador en la línea, se presentaron dificultades que en ciertos casos ocasionaron la interrupción del flujo de aire por un tiempo limitado. Por ello, los valores de evaporación calculados son promedio de los tiempos en que el sistema funcionó correctamente (excluidas en el cómputo las interrupciones).

Aparato de rayos gamma: El aparato de atenuación de rayos gamma se ha utilizado tanto para controlar la uniformidad de empacotamiento del suelo en la columna (a través de la medida de la densidad aparente del suelo), como para medir el contenido de humedad volumétrico del suelo en el curso de los experimentos IB y II. Ambas variables pueden medirse a lo largo de toda la columna desplazando ésta verticalmente por medio de un sistema hidráulico apropiado.

El método se basa en la atenuación de la radiación emitida por ^{137}Cs , producida al atravesar la muestra (Figura 3-5). A un lado de la columna de suelo se coloca la fuente emisora de rayos gamma, los cuales, una vez atravesada la muestra, son recogidos por un contador de centelleo situado en el lado opuesto. Un sistema electrónico resuelve la atenuación producida por la muestra en pulsos por segundo.

A partir de este dato, una vez realizadas las medidas estandarizadas requeridas, sustituyendo los valores de los coeficientes de absorción del suelo ($\mu = 0.076 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$) y del agua ($\mu = 0.082 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$) (Luthin, comunicación personal), el espesor de la muestra analizada



- (1) ENVUELTA DE PLOMO
- (2) RENDIJAS COLIMADAS DE PLOMO
- (3) DETECTOR DE NaI
- (4) FUENTE DE RAYOS GAMMA
- (5) TRAYECTORIA DE COLIMACION
- (6) COLUMNA DE SUELO

Figura 3-5. Esquema del aparato de rayos gamma utilizado para la medida de la densidad aparente y humedad volumétrica del suelo (experimentos IB y II).

($x = 13.25$ cm.) y la humedad volumétrica del suelo seco al aire ($\theta_v = 0.02$ cm³/cm³), la densidad aparente y humedad volumétrica de la muestra (asumiendo que la densidad aparente permanece constante) se obtienen de las siguientes ecuaciones simplificadas:

$$(1) \text{ densidad aparente } \rho_b \text{ (g/cm}^3\text{)} = -0.134 - 0.993 \ln \frac{I}{4972.6},$$

donde I son los pulsos por segundo de la radiación atenuada por la muestra

$$(2) \text{ humedad volumétrica } \theta_v \text{ (cm}^3\text{/cm}^3\text{)} = 0.02 + 0.9204 \ln \frac{I_1}{I_2},$$

donde I_1 e I_2 son los pulsos por segundo de la radiación atenuada del suelo seco al aire y del suelo húmedo, respectivamente.

De forma general, el tiempo de conteo de la radiación atenuada fue de 20 segundos. El detalle de los principios y procedimiento de medida de ρ_b y θ_v con el aparato de rayos gamma se puede obtener de Reginato y van Babel (1964).

3.3. Dispositivo y procedimiento experimental

3.3.1. Dispositivo experimental

La Figura 3-6 muestra el dispositivo utilizado en el experimento IA. Básicamente consiste en una columna rectangular de plexiglas transparente de 15.4 x 13.25 x 100 cm. a la que se le han practicado orificios a alturas apropiadas para la inserción de los instrumentos de medida. Una de las paredes puede quitarse para la limpieza de la misma, así como para manipular en el suelo.

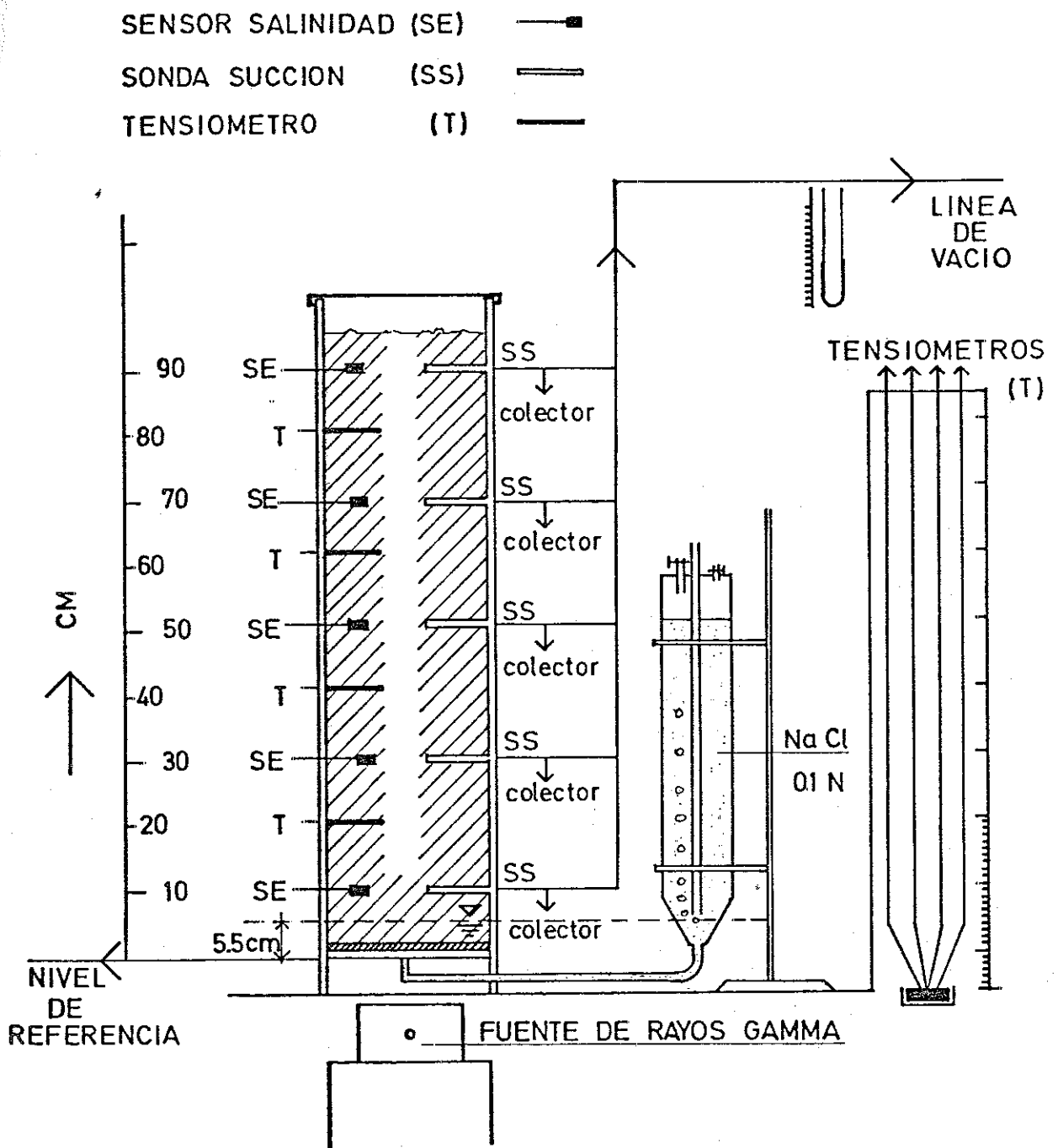


Figura 3-6. Esquema del dispositivo del experimento IA (ascenso de agua desde la capa freática estacionaria en ausencia de evaporación en la superficie del suelo).

La parte inferior de la columna dispone de una malla de nylon que impide el arrastre del suelo con el agua. El tubo de desagüe de la columna se conecta a un cilindro graduado de 500 ml. de capacidad que permite mantener un nivel freático estacionario constante a la altura deseada en la columna por medio del tubo de vidrio insertado en el cilindro graduado.

La Figura muestra la situación de los instrumentos instalados en la columna con respecto al nivel de referencia. Los sensores de salinidad (SE) se conectan al puente de salinidad y miden la conductividad eléctrica (en mmhos/cm a 25° C) de la solución del suelo. A las sondas de succión (SS) se acopla el sistema de vacío del laboratorio provisto de un manómetro de mercurio. Finalmente, los tensiómetros (T) se conectan a un manómetro de mercurio o de agua, y miden el potencial matricial del agua en el suelo.

Todo el dispositivo descrito, situado en una cámara de temperatura constante ($20^{\circ} \pm 0.5^{\circ}$ C), reposa sobre una plataforma móvil susceptible de desplazarse verticalmente por medio de un sistema hidráulico de elevada resolución. De esta manera, la columna puede enfrentarse a diferentes alturas con el aparato de rayos gamma para la medida de la densidad aparente y humedad volumétrica de la muestra analizada.

En el experimento IA (ascenso de agua desde la capa freática estacionaria en ausencia de evaporación en la superficie del suelo) la columna de suelo se cubrió con plástico para evitar en la medida de lo posible la evaporación. En el plástico se practicaron unos pequeños orificios para permitir el paso del aire desplazado

de la columna por el agua ascendente.

El dispositivo utilizado en el experimento IB (ascenso de agua desde una capa freática estacionaria con evaporación en la superficie del suelo), se esquematiza en la Figura 3-7. Las únicas diferencias con respecto al de la Figura 3-6 estriban en los siguientes puntos: (i) se colocaron dos sensores de salinidad en vez de uno a cada altura indicada, (ii) se colocó un psicrómetro de suelo 2 cm. por debajo de la superficie del suelo, para la medida del potencial total del agua en el suelo en ese punto, y (iii) la medida y control de la evaporación del agua en la superficie del suelo se realizó haciendo fluir aire a través de una campana de plástico soldada a la parte superior de la columna; esta campana lleva en su orificio de entrada una fina malla de plástico con el fin de homogeneizar el flujo de aire sobre la superficie del suelo. Tanto en el orificio de entrada como de salida de la campana puede introducirse un psicrómetro de ambiente para la medida de la humedad absoluta del aire. La disposición en serie de un regulador de presión, un desecador y un caudalímetro conectados al sistema de aire a presión del laboratorio completan el dispositivo experimental de control y medida de la evaporación de la columna de suelo.

La Figura 3-8 muestra el dispositivo del experimento II (lavado de la columna salinizada en el experimento IA). Básicamente, el esquema es el mismo de la Figura 3-6, al que se le ha añadido un dispositivo de altura hidráulica constante en la superficie del suelo solidario con la plataforma móvil. El tubo de desagüe de la columna se acopla a un colector de fracciones automático que recoge

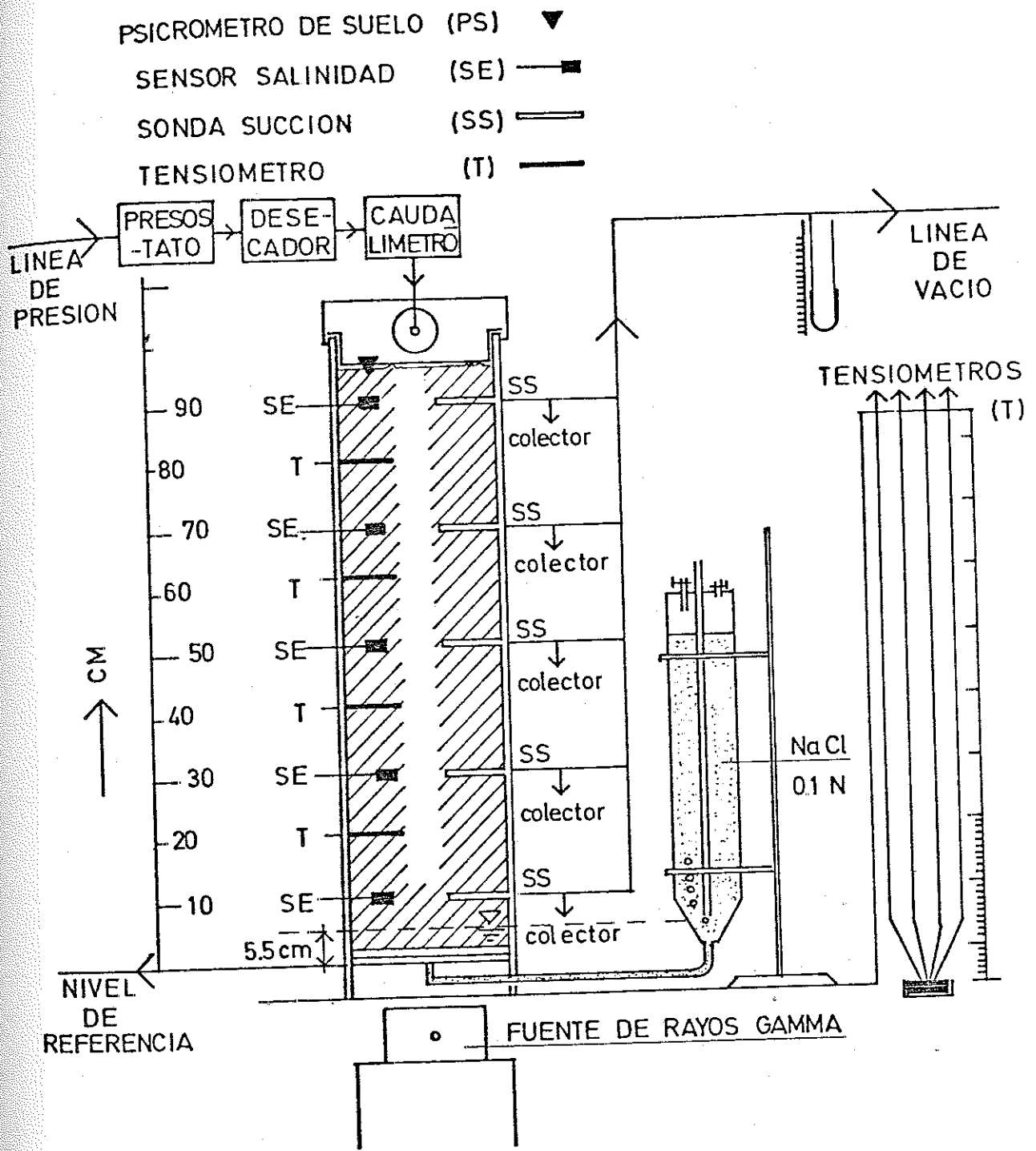


Figura 3-7. Esquema del dispositivo del experimento IB (ascenso de agua desde la capa freática estacionaria con evaporación en la superficie del suelo).

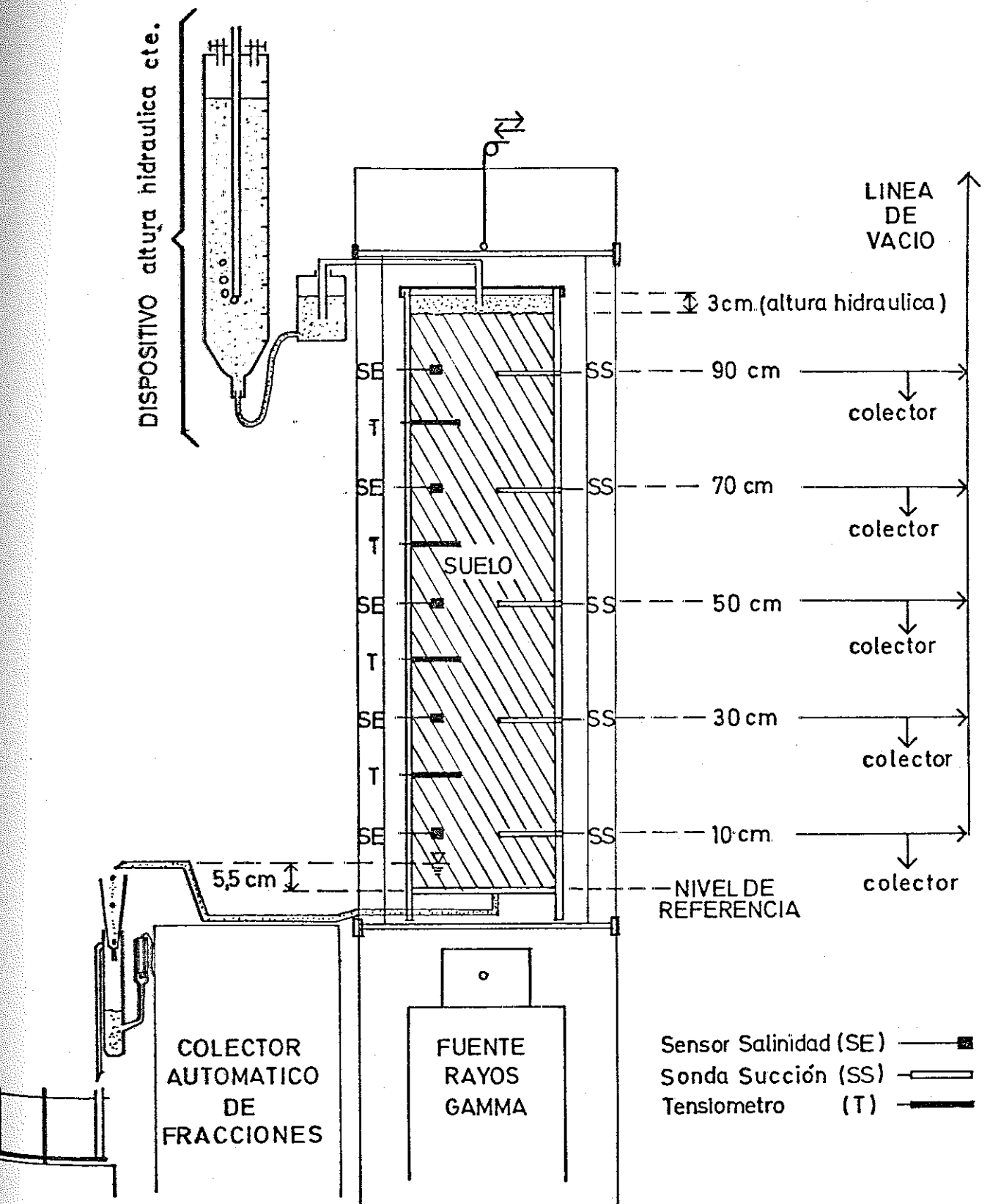


Figura 3-8. Esquema del dispositivo del experimento II (lavado de la columna de suelo salinizada en el experimento IA).

la solución percolada de la columna en fracciones de 20 ml.

En la Figura 3-9 se presentan unas fotografías de la columna y accesorios utilizados en estos experimentos.

3.3.2. Llenado de la columna de suelo

El suelo, una vez secado, molido y tamizado (tamiz de 2 mm de diámetro), se vertió en la columna rectangular. El procedimiento utilizado consiste en ir colocando el suelo en un embudo relativamente grande al que se le conecta un tubo de goma. El tubo se dirige contra el fondo de la columna o contra el suelo ya depositado en la misma, de tal manera que evita, en la medida de lo posible, la separación de partículas por tamaño que se produciría en una caída libre del suelo. El tubo se va levantando conforme se llena la columna con un movimiento continuo de rotación hasta llegar al nivel al que han de colocarse los primeros instrumentos. Una vez colocados y asegurado el contacto íntimo entre el instrumento y el suelo, se continúa el llenado de la columna en la forma descrita. Al interrumpir el llenado (para la colocación de los instrumentos a las alturas respectivas) y volver a iniciarse, aparece ocasionalmente en el suelo una capa más fina que hay que homogeneizar con el resto del suelo.

La homogeneidad del empaquetado del suelo en la columna se controló periódicamente con el aparato de rayos gamma. En caso de una desviación excesiva de los valores de atenuación de la radiación gamma, el suelo se volvía a sacar, se descartaba, y se iniciaba de nuevo el llenado desde el punto en que se había quedado ante

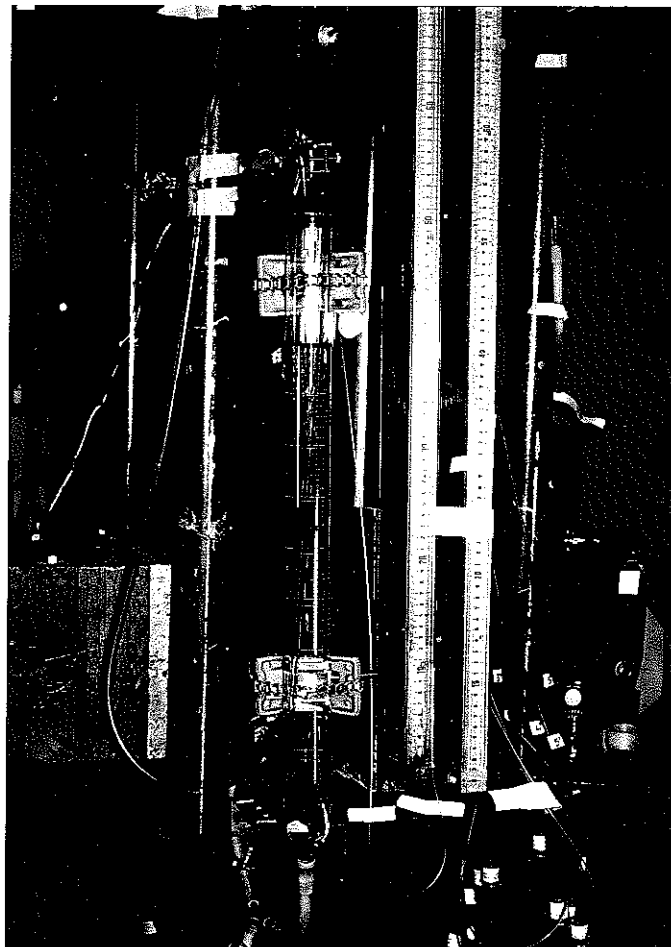
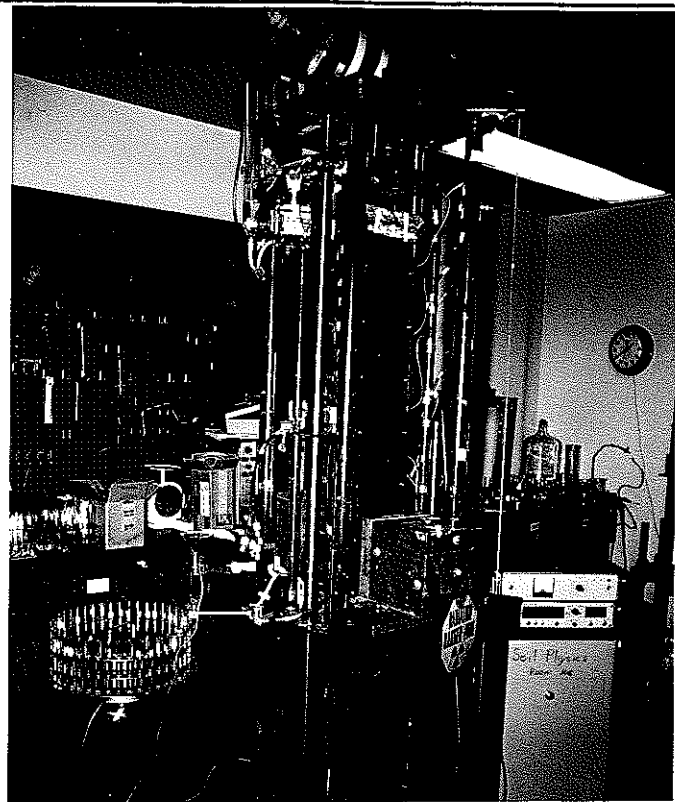
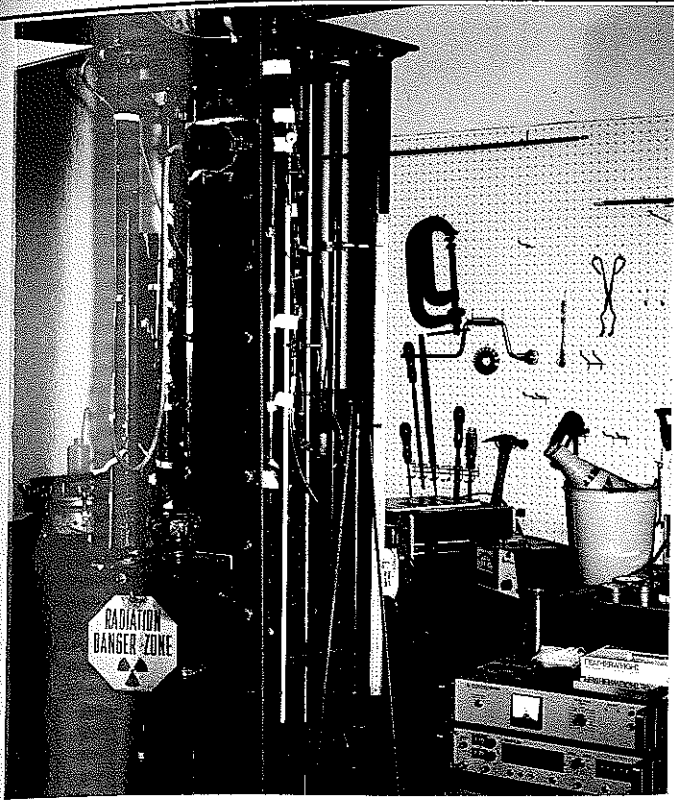


Figura 3-9. Fotografías de la columna y accesorios utilizados en los experimentos.

riormente. Una vez obtenida cierta práctica, el procedimiento de llenado se muestra excelente, arrojando unos valores de densidad aparente (ρ_b) semejantes a lo largo de toda la columna. Las diferencias entre los valores de ρ_b obtenidas por radiación gamma y las deducidas del peso de suelo y volumen ocupado fueron en todos los casos mínimas. Las pequeñas desviaciones de lectura de radiación gamma observables a ciertas alturas en la columna son en general debidas a la atenuación propia de los instrumentos instalados y no deben atribuirse a una falta de homogeneidad del perfil del suelo.

3.3.3. Descripción de los experimentos IA, IB y II

Una vez llena la columna de suelo y situada en la plataforma móvil, se le suministra una solución 0.1 N de NaCl por el tubo de drenaje inferior, manteniendo una altura hidráulica constante por medio del cilindro graduado Mariotte mencionado anteriormente (experimentos IA y IB). La capa freática estacionaria se establece por este procedimiento a 5.5 cm. sobre el nivel inferior de la columna de suelo.

Conforme la solución asciende desde la capa freática estacionaria por capilaridad, se mide regularmente la altura del frente húmedo ascendente (tanto visualmente como por medio del aparato de rayos gamma) y el volumen de agua infiltrado en la columna. Una vez pasado el frente ascendente, cada tensiómetro se pone en operación llenándolo de solución 0.1 N de NaCl preparada con agua libre

de aire, y conectándolos al manómetro correspondiente. Periódicamente se realizan lecturas de los sensores de salinidad, tensiómetros y atenuación de rayos gamma, y se extrae solución del suelo a diferentes niveles por medio de las sondas de succión.

El experimento IA (ascenso de agua desde la capa freática estacionaria en ausencia de evaporación) tuvo una duración total de 34 días. Cuando el frente húmedo ascendente alcanzó la superficie del suelo, se anotó el tiempo transcurrido (día 16) y se continuó hasta asegurarse que se había alcanzado el estado de equilibrio en la columna. Así, después del día 23, las lecturas de los tensiómetros permanecieron prácticamente constantes y la solución infiltrada (medida en el cilindro graduado) coincidía prácticamente con el volumen de solución extraído a través de las sondas de succión.

Para este primer experimento, el aparato de rayos gamma no estuvo disponible, por lo que la posición del frente ascendente sólo se apreció visualmente. Hay que resaltar la uniformidad de ascenso del frente húmedo, indicativo de un empaquetamiento homogéneo del suelo en la columna.

El experimento IB (ascenso de agua desde la capa freática estacionaria con evaporación en la superficie del suelo) tuvo una duración de 250 días. Los períodos de evaporación y no evaporación de este experimento se detallan en el apartado de resultados y discusión. Por otro lado, en el día 132 se realizó una extracción de 140 ml. de solución por la sonda más próxima a la superficie del suelo.

Además de las mediciones rutinarias comunes a los tres experimentos, se realizaron con el psicrómetro de termopar medidas del po

tencial total del agua en el suelo a 2 cm. por debajo de la superficie del mismo. Además, se midieron las diferencias en humedad del aire antes y después de entrar en contacto con la superficie del suelo con el fin de estimar la tasa de evaporación.

Al final del experimento IB, la columna de suelo se seccionó. La Figura 3-10 esquematiza este seccionado. A partir de submuestras de cada sección se determinó la humedad gravimétrica del suelo. Asimismo, se realizó un extracto de la solución del suelo al contenido de agua propio de cada sección, así como un extracto 1:10 (suelo: agua) sobre el que se analizaron cationes (Na, Ca y Mg), aniones (Cl y SO₄), CE y pH. Finalmente, sobre otra submuestra de cada sección se determinaron los cationes de cambio (Na, Ca y Mg).

El experimento II (lavado de la columna salinizada) se inició conectando a la columna del experimento IA el dispositivo experimental de la Figura 3-8. El agua utilizada en el lavado fue una solución 0.01 N de CaSO₄, empleada con el fin de minimizar los posibles problemas de dispersión que podrían haberse presentado en el caso de un lavado con agua desionizada. La altura hidráulica constante impuesta en la superficie del suelo fue de 3 cm., y la capa freática se mantuvo al mismo nivel del experimento IA.

En este experimento, las mediciones realizadas fueron el volumen de agua infiltrada y percolada por el tubo de desagüe, la conductividad eléctrica "in-situ" y la humedad volumétrica del suelo, θ_v (aparato de rayos gamma). Asimismo, se realizaron extracciones regulares de la solución del suelo con las sondas de succión. Ade-

más de los análisis rutinarios, se determinó la turbidez relativa de las muestras de agua extraídas, así como del agua de desagüe, con el fin de apreciar una posible dispersión de partículas coloidales durante el lavado.

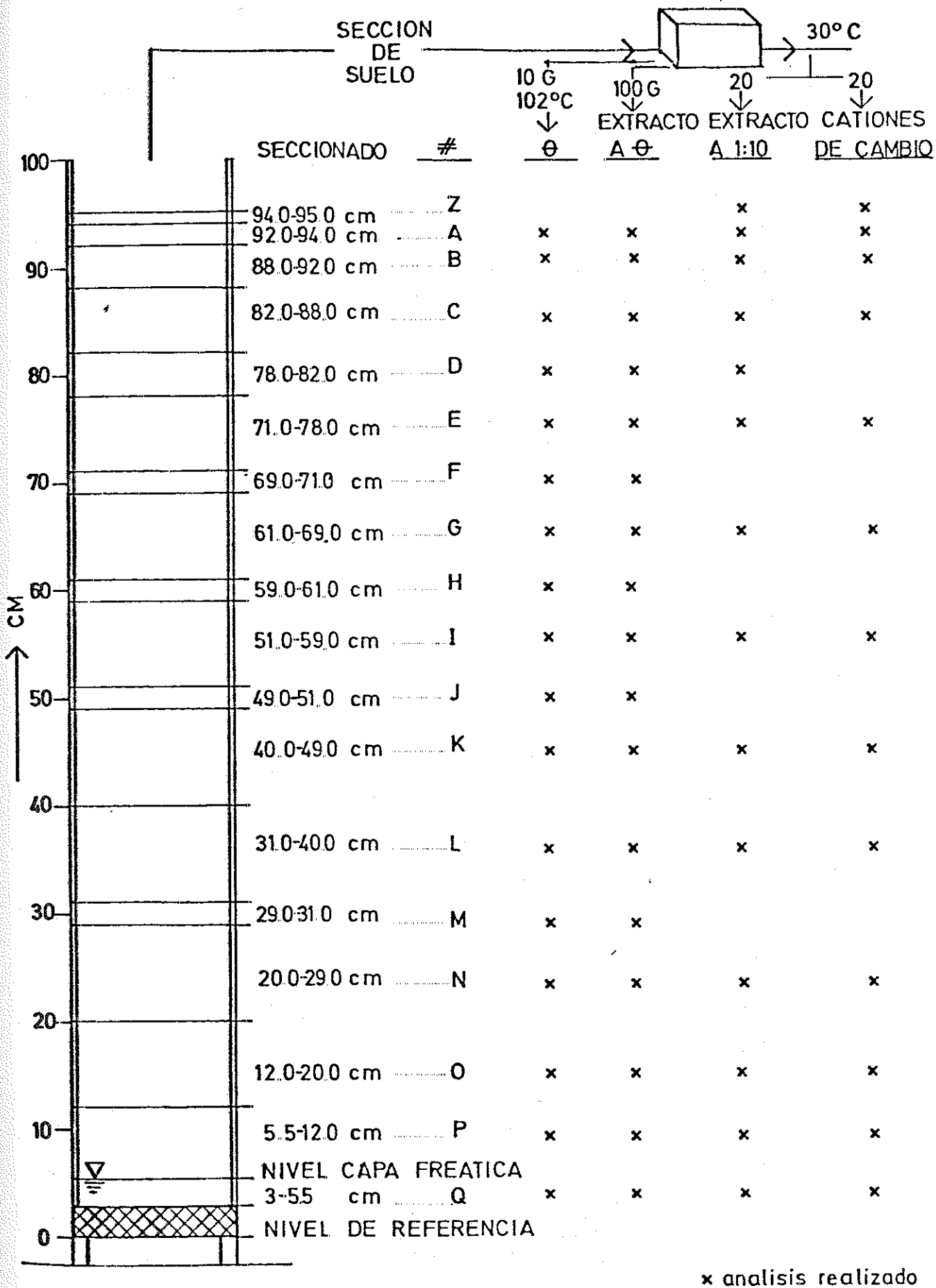


Figura 3-10. Seccionado de la columna de suelo. Experimento IB.

4. RESULTADOS Y DISCUSION

4. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1. Medida "in-situ" de la salinidad del suelo: la sonda de succión y el sensor de salinidad

4.1.1. La sonda de succión

4.1.1.1. Materiales

Básicamente, la sonda de succión consiste en un tubo poroso de cerámica conectado a un sistema de vacío y a un colector, el cual recoge una muestra de la solución del suelo cuando el vacío impuesto en la sonda excede el correspondiente potencial matricial del agua del suelo adyacente a ella.

La Figura 4-1 muestra el esquema del dispositivo utilizado. La sonda consiste en un cilindro poroso de cerámica (modelo P-10-C, Coors Porcelain Co., Golden, Colorado) cuyos extremos se tapan con dos cierres de goma. Sobre uno de ellos se practica un orificio por el que penetra un tubo de polietileno de pequeño diámetro y paredes rígidas. Este tubo se conecta al colector del que sale otro tubo empalmado a la línea de vacío.

Desde el punto de vista mecánico, la fiabilidad del dispositivo de succión utilizado es excelente; de cuarenta sondas de succión construídas, únicamente en un caso se observó una pérdida de agua en los cierres de goma de la misma. Por otro lado, el precio actual del material utilizado en su construcción es de unas 300 -



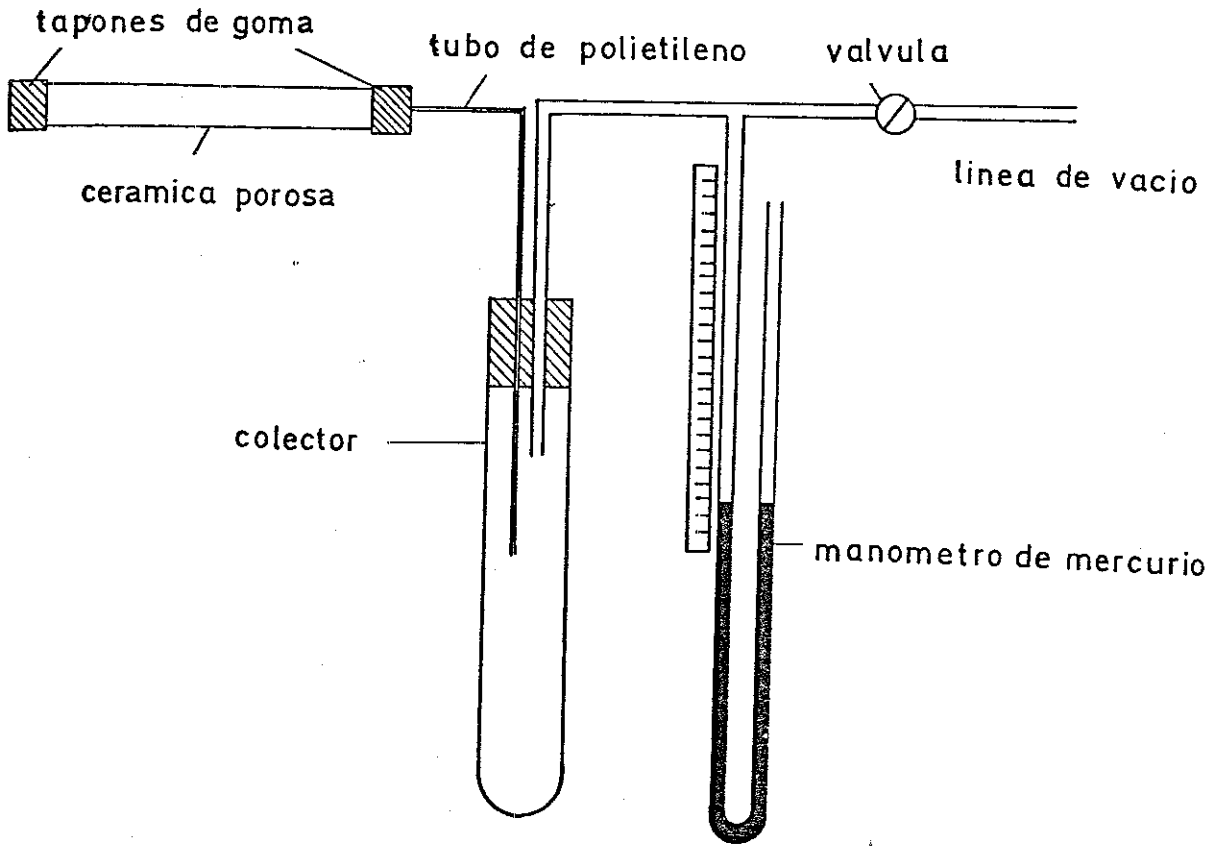


Figura 4-1. Esquema del dispositivo utilizado en la extracción de la solución del suelo.

ptas./unidad (tres veces menor que el de las sondas comerciales), y el tiempo requerido en su construcción es de unos pocos minutos.

Una vez obtenida la solución de suelo, se procede a su análisis químico. La conductividad eléctrica (CE) de la solución, medida rutinaria a lo largo de todo el trabajo, se midió con una célula de conductividad estandar (Industrial Instruments, Jersey, N.J.) conectada al puente de salinidad descrito en la sección 4.1.2. Un puente Wheatstone convencional de corriente alterna (Industrial Instruments, Jersey, N.J.) se utilizó también de forma ocasional a efectos de comprobación. La célula de conductividad se calibró periódicamente con una solución estandar de KCl 0.01 N, comprobándose que la constante de la célula fue relativamente estable (media $\pm \sigma_s = 0.502 \pm 0.058$) durante los dos años de operación de la misma.

4.1.1.2. Propiedades de la sonda porosa

El Cuadro 4-1 recoge las características y propiedades de la sonda utilizada. La cantidad de solución retenida por la sonda es mayor de la que podría anticiparse. Así, el volumen de la cavidad central es de 1.6 ml., y el agua retenida por los poros de las paredes es 1.4 ml. Ello hace que el agua retenida pueda llegar a ser hasta 3 ml. En general, el efecto de la retención de agua por las paredes requiere atención debido a la posible contaminación de las muestras obtenidas en extracciones posteriores. Por ello, el procedimiento rutinario seguido consiste en la extracción de unos 5 ml.

de solución, que se descartan, y en la extracción subsiguiente de un volumen suficiente de muestra (unos 10 ml.) para realizar sobre ella los análisis pertinentes.

Cuadro 4-1. Propiedades del cilindro poroso Coors modelo P-10-C

Longitud (mm.)	100
Diámetro (mm.)	10
Valor entrada de aire (bares)	0.3-0.4
Rango de diámetro poros (micras)	7-10.5
Porosidad media aparente (%)	45.7
Absorción (% en volumen)	26.1
Temperatura máxima de trabajo	1370° C
Densidad real (g/cm ³)	1.75
Velocidad infiltración (ml. H ₂ O/sec/in ² a 20 psi)	1.7-2.4
Rango de permeabilidad (M'Darcy a 20 psi)	100-140

4.1.1.3. Dinámica del muestreo

Dentro de este capítulo deben considerarse dos aspectos importantes: el derivado de las modificaciones introducidas en el sistema al realizarse la extracción de líquido (velocidad de entrada de agua en la sonda e influencia de la extracción sobre el equilibrio de la columna) y los posibles efectos sobre la concentración de -

las soluciones extraídas por la sonda (comparación de la CE del sensor y de la sonda en condiciones de equilibrio y no equilibrio e influencia del nivel de vacío aplicado).

Velocidad de entrada de agua en la sonda

La velocidad de entrada de solución en la sonda viene determinada no sólo por las características de la misma y el nivel de vacío aplicado, sino también por las propiedades del medio y su contenido en humedad.

Dado que en el estudio del movimiento ascendente de sales desde una capa freática la mayor parte de la columna de suelo se encuentra a subsaturación, interesaba saber la capacidad de extracción de la sonda en estas condiciones. Para ello, se midió la velocidad de extracción de la sonda a un determinado nivel de vacío, para diferentes valores de potencial matricial del suelo Yolo, impuestos por medio del dispositivo experimental descrito en el capítulo 4.1.2.6. El suelo Yolo se saturó con una solución de NaCl de 10 mmhos/cm. de CE (idéntica a la utilizada en el estudio del movimiento de sales desde una capa freática), y se equilibró a potenciales matriciales de 0.0 (saturación), -0.10, -0.20, -0.40 y -0.60 bares. La succión aplicada a la sonda fue de 0.10, 0.40 y 0.60 bares. Los resultados obtenidos se resumen en el cuadro 4.2. De él puede deducirse que, al nivel de vacío aplicado de 0.6 bares, el tiempo necesario para extraer solución suficiente (unos 10 ml.) a un nivel de potencial matricial del agua en el suelo de -0.4 bares es demasiado

alto (unas tres horas). Por ello, en los experimentos del movimiento ascendente de sales, la extracción de solución del suelo realizada en aquellos casos en que la sonda se encuentra próxima al frente húmedo ascendente (esto es, valores de Ψ_m relativamente bajos) se realizó al máximo nivel de vacío aplicable (unos 0.9 bares) con el fin de disminuir en la medida de lo posible el tiempo de extracción. A pesar de ello, en algún caso éste fue de horas, por lo que los resultados obtenidos en esas condiciones son discutibles (valores de CE excesivamente elevados debido a la evaporación de la solución en el colector).

Por otro lado, a lo largo de los experimentos realizados en este trabajo no se observaron problemas de obstrucción de las sondas, excepto en el estudio de la sensibilidad del sensor de salinidad a la adsorción negativa (sección 4.1.2.7); por el contrario, debido al tamaño relativamente grande de los poros de la cerámica (valores medios de 7 a 10 micras), ésta deja pasar una parte del material en suspensión. En cualquier caso, esta cantidad es pequeña, como queda demostrado por la determinación de densidad óptica de las muestras extraídas con la sonda. Así, tomando como 100 % de transmitancia el valor del agua destilada, las muestras extraídas con la sonda dan siempre valores superiores al 85 % cuando los valores de transmitancia de los efluentes descienden hasta el 60 %.

Por fin, de los datos reunidos en el Cuadro 4-2 se concluye la importante influencia de las propiedades conductoras del suelo sobre la velocidad de extracción de la sonda. Así, para una misma diferencia de potencial entre la sonda y el suelo, la velocidad de

Cuadro 4-2. Velocidad de extracción de la sonda (ml/hr) en función del vacío aplicado y del potencial matricial del suelo franco Yolo (Ψ_m , bares).

Vacío aplicado en la sonda (bares)	(Ψ_m, bares)				
	0	-0.10	-0.20	-0.40	-0.60
0.1	160(+26)	0	-	-	-
0.4	650(+62)	82(+24)	7(+3)	0	-
0.6	1040(+160)	320(+38)	43(+11)	3(+2)	0

(Cada cifra representa la media de cinco lecturas. Los valores entre paréntesis indican la desviación estandar de la media).

extracción será mayor conforme más gruesa sea la textura del suelo, lo cual deberá tenerse en cuenta a la hora de elegir la geometría de la sonda y el nivel de vacío aplicado. Por ello, para suelos de textura arenosa deben utilizarse sondas de mayor superficie porosa, y utilizar un nivel de vacío bajo o moderado que evite la total desaturación del suelo próximo a la sonda.

Influencia de la extracción sobre el equilibrio de la columna (experimentos I y II)

Es evidente que el sistema suelo-agua viene influido por la extracción de la solución del suelo realizada con la sonda (nivel

de vacío aplicado, tiempo y volumen de extracción). Así, en el estudio del movimiento ascendente de agua desde la capa freática, - la extracción de la solución del suelo con la sonda de succión - produce un efecto inmediato sobre las lecturas de los tensiómetros: aquellos colocados en la vecindad de la sonda en operación se salían de la escala de lectura (-100 cm. de agua) en pocos segundos, y esta perturbación se propagaba a lo largo de la columna de forma más o menos rápida. El establecimiento del nuevo equilibrio se producía transcurridas unas 35-40 horas después de la perturbación, aunque a las 24 horas las diferencias de lectura con las anteriores a la extracción eran ya pequeñas. En el Cuadro 4-3 A se muestran estas diferencias para tres situaciones. En las dos primeras (# 1 y 2) se presentan los resultados obtenidos para dos perfiles de potencial matricial del suelo ligeramente diferentes cuando se extrae solución simultáneamente de las sondas 4 y 5. En el tercer caso (# 3), se presentan los valores de Ψ_m antes y después de haber extraído solución con la sonda número 5. Evidentemente, las diferencias son menores en este último caso, ya que la fuente perturbadora está más alejada de los tensiómetros. En la parte B del Cuadro 4-3 se presenta el diagrama de la columna que hace más comprensibles estos resultados.

En resumen, puede concluirse que la perturbación que ocasiona la extracción con las sondas de succión tiene, instantáneamente, una relativa importancia, aunque - en nuestras condiciones experimentales - debido a las altas relaciones volumen de solución en el suelo/volumen de solución extraída, a la buena conductivi-

Cuadro 4-3. A - Lecturas de los tensiómetros antes y 24 horas después de la extracción de solución del suelo con las sondas de succión.

B - Diagrama de la columna con la numeración de las sondas de succión, tensiómetros y sensores de salinidad.

A-

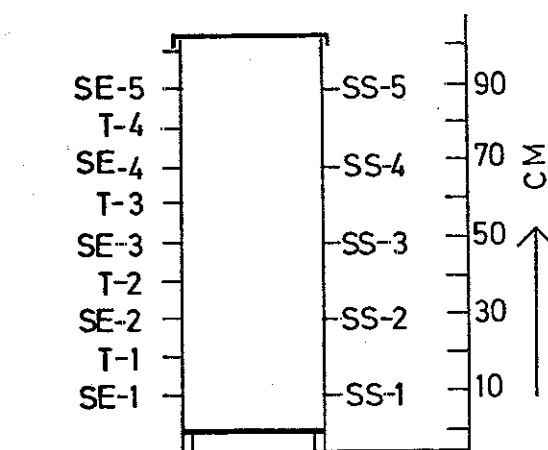
#	extracción con sonda número		Lectura tensiómetros (-cm. H ₂ O)		
			T1	T2	T3
1	4 y 5	antes	16.6	37.4	58.6
		después	19.8	41.8	63.4
		diferencia	3.2	4.4	4.8
2	4 y 5	antes	12.8	33.5	53.7
		después	18.2	38.9	59.5
		diferencia	5.4	5.4	5.8
3	5	antes	24.6	46.9	68.9
		después	25.9	48.0	71.0
		diferencia	1.3	1.1	2.1

B-

SS = sonda succión

T = tensiómetro

SE = sensor salinidad



dad hidráulica del medio poroso y al diseño de la sonda, estas perturbaciones son finalmente de poca importancia cuantitativa, restableciéndose con facilidad las situaciones anteriores a la extracción.

Comparación de la conductividad eléctrica (CE) obtenida con el sensor de salinidad, solución extraída con la sonda y extracto del suelo en condiciones de equilibrio

Dado que el tiempo de respuesta de los sensores de salinidad (Capítulo 4.1.2.5) se obtendrá en ciertos casos por comparación con los valores de la sonda, se efectuó una comprobación previa para determinar que, en condiciones de medios saturados y en equilibrio, ambos instrumentos dan los mismos resultados. Así, la Figura 4-2.A muestra que, en condiciones estáticas y de equilibrio del medio poroso con soluciones salinas de 7.3 mmhos/cm (arena) ó 11.6 mmhos/cm (Yolo) el sensor y la sonda coinciden, y que el nivel de vacío aplicado no afecta a la CE de la solución extraída; sólo cuando este nivel de vacío es muy bajo (valores inferiores a 0.3 bares), el tiempo de extracción puede ser dependiendo de las características del medio poroso tan elevado que se produzca la evaporación de la solución extraída en el colector (caso del suelo Yolo para vacíos inferiores a unos 0.3 bares).

Por otro lado, la Figura 4-2.B muestra que el sensor y la sonda dan también la misma CE en una situación dinámica en la que una columna de suelo Yolo se saturó y equilibró con las mismas soluciones salinas anteriores.

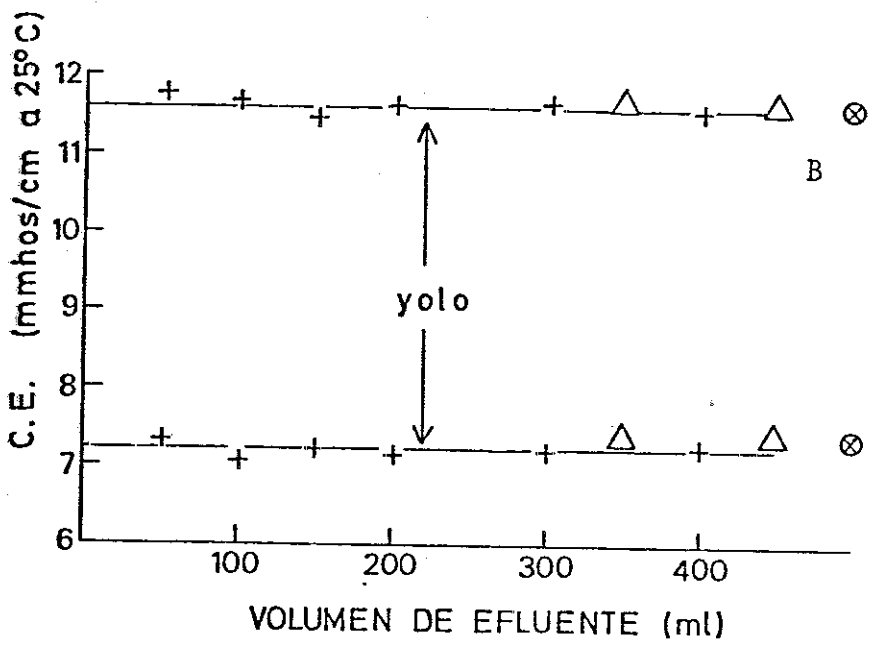
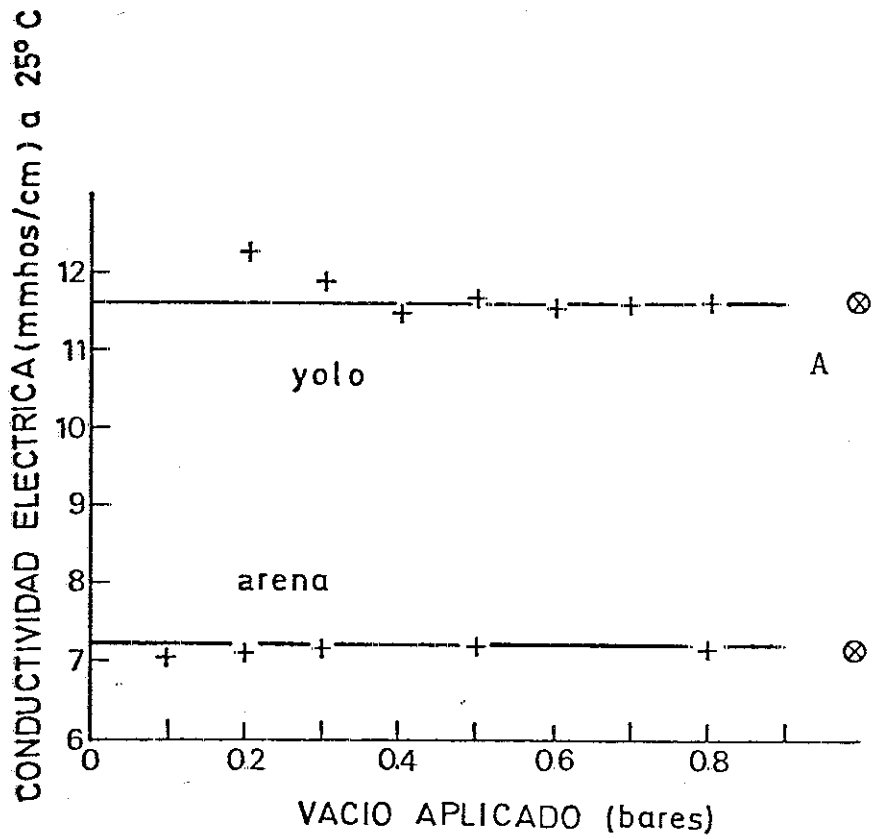


Figura 4-2. A - Influencia del nivel de vacío aplicado sobre la solución extraída con la sonda de succión (+). - La línea sólida representa la CE impuesta.

B - Comparación de la CE obtenida en la solución extraída con la sonda de succión (+), en el extracto de suelo (⊗) y con el sensor de salinidad (Δ). La línea sólida representa la CE impuesta.

Por consiguiente, puede concluirse que, tanto en situaciones estáticas como dinámicas, el sensor y la sonda producen los mismos resultados siempre que el medio poroso esté saturado y en equilibrio (perfil homogéneo) y el nivel de vacío aplicado sea lo suficientemente elevado para evitar la evaporación de la solución extraída.

Comparación de la CE obtenida con el sensor de salinidad y la solución extraída con la sonda en condiciones de no equilibrio. Influencia del nivel de vacío aplicado

Como indica el Cuadro 4-4, el planteamiento es completamente diferente en el caso de situaciones de régimen variable o de perfil no homogéneo. Los datos que se presentan se han tomado de los sensores de salinidad y de las sondas de succión colocados a la misma altura sobre el nivel de referencia, al paso del frente húmedo ascendente en el experimento cuyo diagrama se ha representado en el Cuadro 4-3. En todos los casos se observa que los valores de CE de la solución extraída a mayor succión, son mayores que los de la extraída a menor. Además, los valores de CE del sensor son siempre menores que los de la sonda. Las razones de este comportamiento del sensor se dan en el apartado 4.1.2.

La razón de las diferencias de CE según el nivel de vacío aplicado estriba en la situación de régimen variable de la columna. Como se verá más adelante, el frente ascendente tiene una CE mayor que el de la solución que le sigue. Dado que la sonda sólo es capaz de extraer solución del suelo un tiempo después de haber pasado el frente húmedo, cuando el vacío aplicado es bajo ésta ex

trae la solución próxima a ella, mientras que si el vacío aplicado aumenta, es capaz de extraer solución más próxima al frente (esto es, solución más concentrada), lo cual hace aumentar la CE de la solución extraída.

Por otro lado, al aumentar el nivel de vacío, la sonda extrae solución de poros más pequeños, cuya concentración puede diferir de la de los poros mayores que están saturados de la solución infiltrante de menor concentración que la primitiva del suelo.

Por ello, los valores de CE al nivel de vacío de 0.35 bares reflejan la CE de la solución presente en los poros grandes y situados a la altura en que se encuentra la sonda, mientras que los

Cuadro 4-4. Influencia del nivel de vacío aplicado a la sonda (en bares) sobre la CE de la solución extraída (regimen variable)

CE sensor mmhos/cm.	CE sonda succión (mmhos/cm)	
	0.35 bares	0.85 bares
9.8	10.1	10.5
12.4	14.4	16.1
13.7	15.2	16.8
14.0	15.2	17.1
14.8	18.2	19.5
16.1	22.3	22.8
19.5	27.3	28.7
20.2	30.3	33.0
21.0	28.7	33.1
21.8	34.1	37.7

valores de CE a 0.85 bares de vacío se aproximan más a la CE de la solución del suelo en el frente húmedo, y pertenecen más a la región de poros relativamente más pequeños. Estas diferencias deberán ser tenidas en consideración en la interpretación de los resultados.

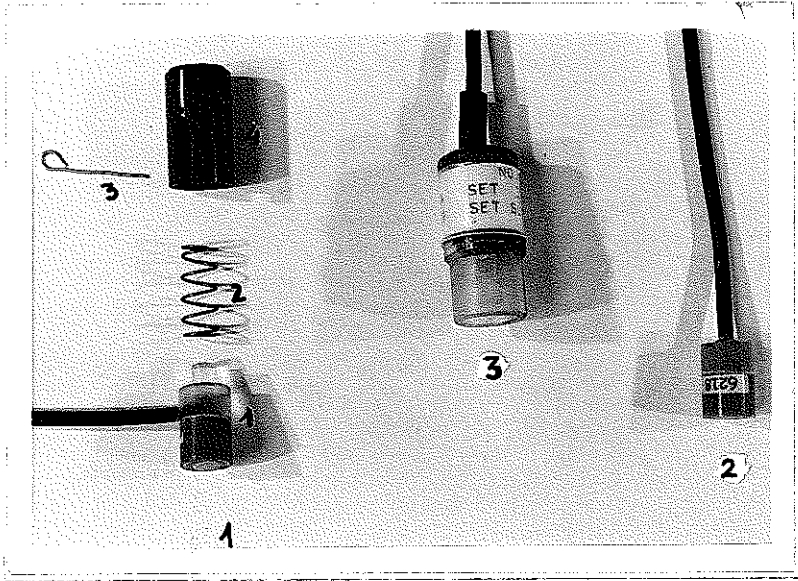
4.1.2. El sensor de salinidad

4.1.2.1. Materiales

Descripción del sensor y del puente de salinidad

El sensor de salinidad, comercializado por la casa Soil Moisture Equipment Corporation (Santa Bárbara, California), es el descrito por Richards (1966) con pequeñas modificaciones. La Figura 4-3 muestra los dos tipos comerciales de sensores y la sección de uno de ellos (Catálogo n° 5000-A). El de n° de catálogo 5100-A tiene el mismo diseño que el 5000-A, excepto que no lleva el dispositivo de muelle, y el cable sale coaxialmente del final del sensor. Ambos tipos fueron diseñados para su utilización con un puente de salinidad (Soil Moisture, n° de catálogo 5500), de forma que dan una medida directa de la conductividad eléctrica de la solución del suelo en mmhos/centímetro corregida automáticamente a la temperatura estandar de 25° C.

El elemento conductor está colocado en el extremo del sensor e inmediatamente detrás del mismo se encuentra un termistor. El mismo está hecho de una cerámica porosa de una textura extre-



1: Sensor N°de catalogo 5000 A

2 : Sensor N°de catalogo 5100 A

1- ensamblaje interno

2- muelle

3: Enchufe

3- perno

4- capsula

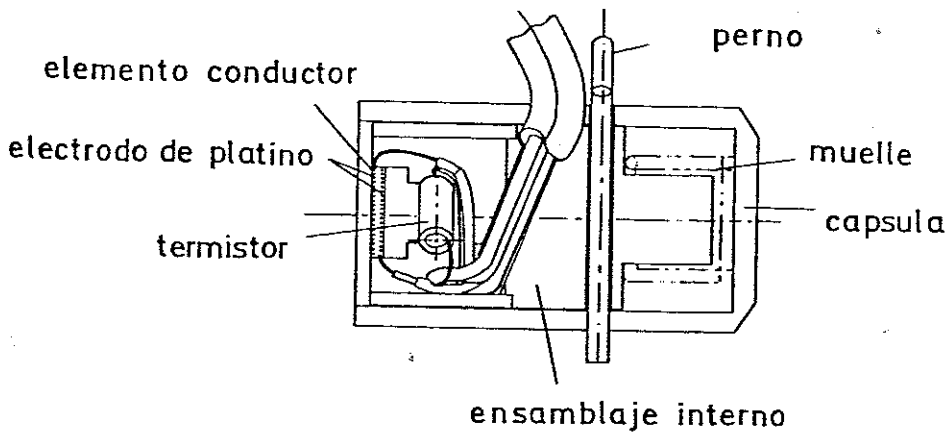


Figura 4-3. Ejemplo del sensor de salinidad fabricado por Soil Moisture Equipment Co.

madamente fina con una sección de 0.32 cm^2 . Dos finas mallas de platino actúan como electrodos y se encuentran encastradas en la cerámica y separadas 1 mm. entre ellas.

El termistor incorporado en el sensor tiene una resistencia de $2.000 \text{ ohms} \pm 10 \%$ a 25° C , que varía aproximadamente un 3.9% por grado centígrado.

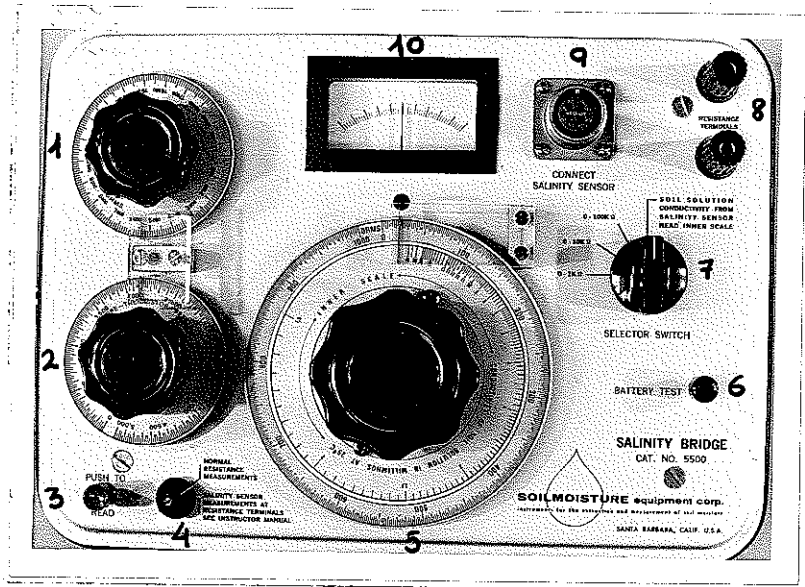
El puente de salinidad es un puente de resistencias de 1000 herzios y corriente alterna, que permite la lectura directa de la conductividad eléctrica de la solución del suelo en mmhos/centímetro a 25° C . Asimismo tiene una escala independiente para lecturas de resistencia.

En la Figura 4-4 se muestra el aparato y un diagrama del circuito del puente. Una vez introducidos los valores de la ordenada en el origen, de la pendiente y de la constante del termistor, obtenidos en la calibración de cada sensor, se acciona el botón de puesta en marcha y se mueve el dial de lectura hasta que la aguja del galvanómetro se estaciona en su punto nulo. La escala interior del dial de lectura da la conductividad eléctrica medida en mmhos/centímetro a 25° C .

Medios porosos

A lo largo de este estudio se evaluó la respuesta de los sensores de salinidad en cinco medios porosos:

1. Montmorillonita: Se separó la fracción menor de 0.2 micras de una Bentonita de Wyoming (American Colloid Company, Chica



- | | |
|-----------------------------------|--|
| 1. Disco de ordenada en el origen | 6. Interruptor de comprobación de batería |
| 2. Disco de pendiente y termistor | 7. Interruptor selec. rango de resistencia |
| 3. Interruptor de encendido | 8. Terminales de lectura de resistencia |
| 4. Interr. lectura de resistencia | 9. Conexión del sensor de salinidad |
| 5. Disco de lectura | 10. Galvanometro |

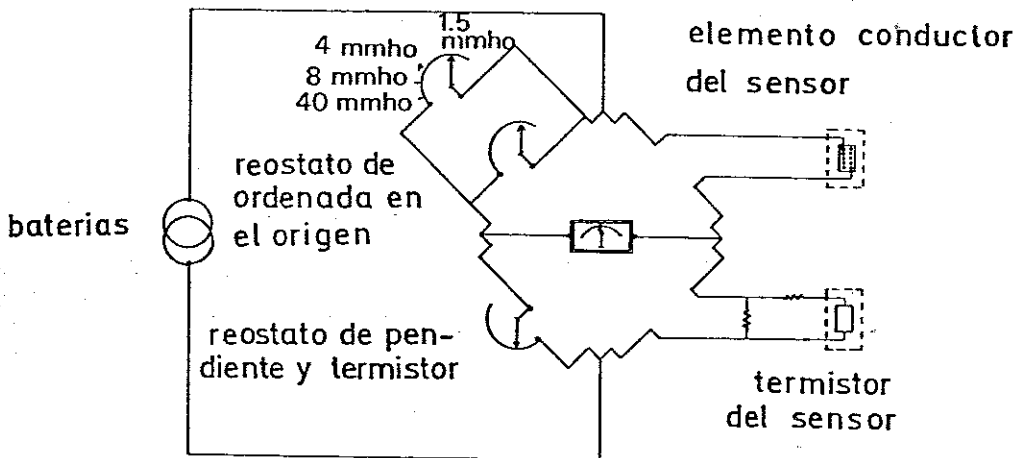


Figura 4-4. Puente de salinidad y diagrama del circuito del puente fabricado por Soil Moisture Equipment Co.

go, Illinois). En esta fracción se realizó el análisis de difracción de rayos X con el fin de determinar impurezas. La ausencia de otros silicatos en la muestra se confirmó por medio de este análisis. La capacidad de intercambio catiónico de esta montmorillonita es 1.1 meq/g.

2. Caolinita: Se utilizó una Caolinita de Virginia, en la que se demostró la ausencia de otros silicatos en la muestra por medio de la difracción de rayos X. La capacidad de intercambio catiónico es 0.05 meq/g.

3. Resina: Se utilizó la resina de intercambio catiónico Bio-Rex 70, saturada en sodio, con una capacidad de intercambio de 10.2 meq/g.

4. Se utilizó arena de cuarzo y de tamaño de partículas uniforme. La Figura 4-5 muestra su curva característica.

5. Suelo franco Yolo: Se obtuvieron muestras de suelo superficial del campo experimental de la Universidad de California en Davis. En el capítulo 2.1 se detallan las propiedades de este suelo, y en la Figura 4-5 se presenta la curva característica del mismo.

Preparación de los sistemas homoiónicos

Se prepararon suspensiones de los medios porosos de diferentes concentraciones salinas y saturadas en sodio añadiendo soluciones de NaCl de concentración conocida y agitando. Una vez sedimentada la muestra, el líquido sobrenadante se decantó y se des-

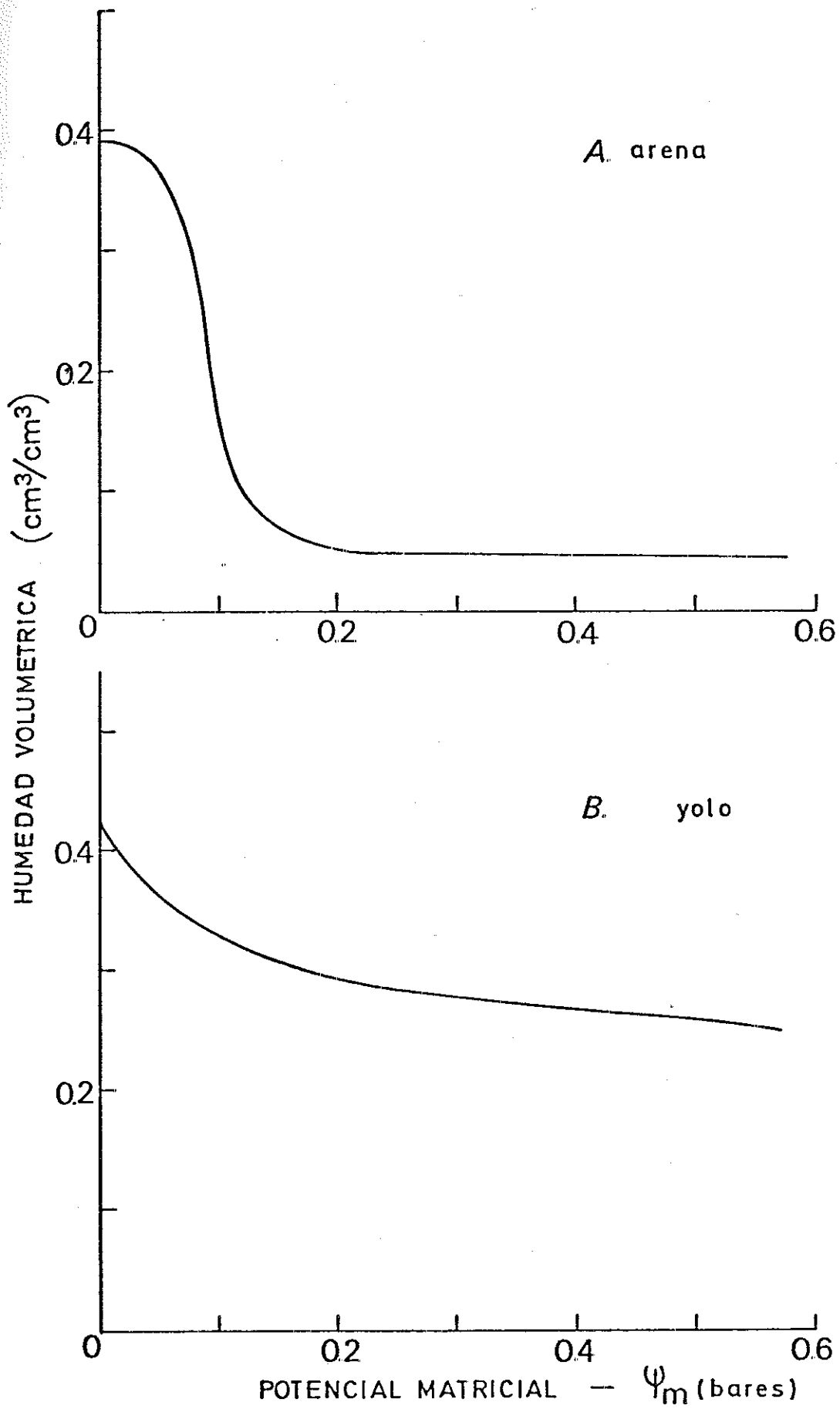


Figura 4-5. Curvas características de retención de agua para la arena (A) y el suelo franco Yolo (B).

cartó. El procedimiento se repitió dos veces más, y las muestras se mantuvieron saturadas hasta su utilización en los diferentes experimentos.

Diseño y construcción de las columnas

Las columnas, de 15 cm. de diámetro y 14 cm. de altura, se construyeron con plástico acrílico de 0.2 cm. de espesor de paredes. Se perforaron dos agujeros de 2 cm. de diámetro y 8 agujeros del mismo diámetro a 4 cm. y 9 cm., respectivamente, de la parte superior de la columna para la instalación de instrumentos. La parte superior se selló con plato de acrilato de 1 cm. de espesor unido a la columna con 4 tornillos, de tal forma que el conjunto del sistema era capaz de soportar presiones moderadas, necesarias para alcanzar flujos constantes en el experimento de "tiempo de respuesta". De esta manera se minimizó asimismo la evaporación. En la Figura 4-16 se presenta un esquema de la columna (pág. 108).

4.1.2.2. Calibración de los sensores

A. Procedimiento

Calibración en solución

Los sensores se calibraron en soluciones con cantidades equivalentes de cloruro de calcio y de sodio. Una vez preparada la solución de mayor concentración, las siguientes se obtuvieron a partir de ésta por medio de diluciones sucesivas, en el rango de 2 a

25 mmhos/cm. Estos valores se midieron con precisión con una célula de conductividad.

Los sensores se sumergieron en la solución de concentración más elevada por un período de diez días, con el fin de minimizar el aire ocluido en los poros del elemento conductor poroso. Una vez obtenido el equilibrio, se realizaron lecturas de la resistencia del elemento conductor, de la resistencia del termistor, y de la conductividad eléctrica del sensor en cámara de temperatura constante. Completadas las lecturas en la solución de mayor concentración, los sensores se colocaron en la siguiente solución de mayor concentración y se procedió como antes.

El valor de la conductancia del sensor a 25° C para cada una de las soluciones calibradoras se representó frente a la conductividad eléctrica de las soluciones a 25° C. La curva de calibración es una línea recta en el rango de 0.5 a 30 mmhos/cm. La ordenada en el origen y la pendiente de esta línea son características de cada sensor y se utilizan para obtener los valores de "ordenada" y "termistor-pendiente" que han de introducirse en el puente de salinidad para cada sensor en particular.

Calibración en suelo

Básicamente, el procedimiento es el mismo descrito anteriormente para la calibración de los sensores en solución, utilizándose 4 columnas de suelo Yolo equilibrado con soluciones de concentraciones en el rango de 2 a 14 mmhos/cm. Una vez establecido el

equilibrio en el sistema, se realizaron las lecturas en el sensor de salinidad y se obtuvieron las curvas de calibración como se describió anteriormente.

Influencia del aire ocluido en el elemento conductor sobre la calibración

Para estudiar la influencia del aire ocluido en el elemento conductor poroso sobre la calibración se utilizó un conjunto de seis sensores. Se impusieron tres condiciones iniciales diferentes: 1) sensores colocados diez días en solución; 2) sensores saturados a vacío y 3) sensores secos al aire. La calibración se realizó como se ha descrito anteriormente, omitiendo el pretratamiento de diez días en solución para los casos 2) y 3).

Estabilidad de la calibración

Después de calibrados, los sensores se colocaron en una solución de 1 mmho/cm. durante tres días con el fin de evitar el depósito de sales en la superficie del elemento conductor. Catorce meses más tarde, después de haber sido utilizados en los experimentos de ascenso capilar y lavado, los sensores se recalibraron y los resultados se compararon estadísticamente con los datos de calibración anteriores.

Histéresis de la calibración

Los sensores se analizaron para observar la posibilidad de su histéresis realizando dos calibraciones, una desde la solución

más diluída a la más concentrada y la otra desde la más concentrada a la más diluída. Los resultados se analizaron estadísticamente.

B. Resultados y discusión

Influencia del aire ocluído en el elemento conductor sobre la calibración

En el Cuadro 4-5 se presenta el análisis de regresión efectuado en dos de los sensores estudiados, y la Figura 4-6 muestra sus curvas de calibración. De los 6 sensores examinados 4 mostraron el comportamiento denominado "A" (normal) y el resto el denominado "B" (anormal).

De estos datos limitados, se deduce que el aire ocluído en los poros de la cerámica del elemento conductor resulta en valores de resistencia mayores que los normales. El comportamiento "A" se consideró como la respuesta normal a la presencia del aire en la cerámica: para el sensor seco al aire (tratamiento 3), la primera lectura (la de mayor conductividad eléctrica) resulta en un valor de la conductancia menor que el normal, pero conforme progresa la calibración el aire ocluído en la cerámica va disolviéndose, y las lecturas finales son casi idénticas a las obtenidas en los otros dos tratamientos.

El comportamiento anormal del sensor representado en la Figura 4-6 (B) puede explicarse por la presencia de poros estagnantes en la cerámica: cuando el sensor está seco (esto es, los poros de



Cuadro 4-5. Análisis de regresión para dos de los sensores utilizados en el estudio de la influencia del aire ocluido en el elemento conductor sobre la calibración.

Sensor	Tratamiento	Curva de calibración * $C_{se} = A+B \text{ CE}_s$	Coefficiente de correlación r
A	(1) 10 días en solución	$C_{se} = 0.241+0.1281 \text{ CE}_s$	1.0000
	(2) saturación a vacío	$C_{se} = 0.246+0.1276 \text{ CE}_s$	0.9989
	(3) seco al aire	$C_{se} = 0.440+0.9650 \text{ CE}_s$	0.9869
B	(1) 10 días en solución	$C_{se} = 0.240+0.0701 \text{ CE}_s$	0.9977
	(2) saturación a vacío	$C_{se} = 0.481+0.033 \text{ CE}_s$	0.9465
	(3) seco al aire	$C_{se} = 0.102+0.066 \text{ CE}_s$	0.9850

* C_{se} = conductancia del sensor en mmhos a 25° C; CE_s = conductividad eléctrica de la solución en mmhos/cm. a 25° C.

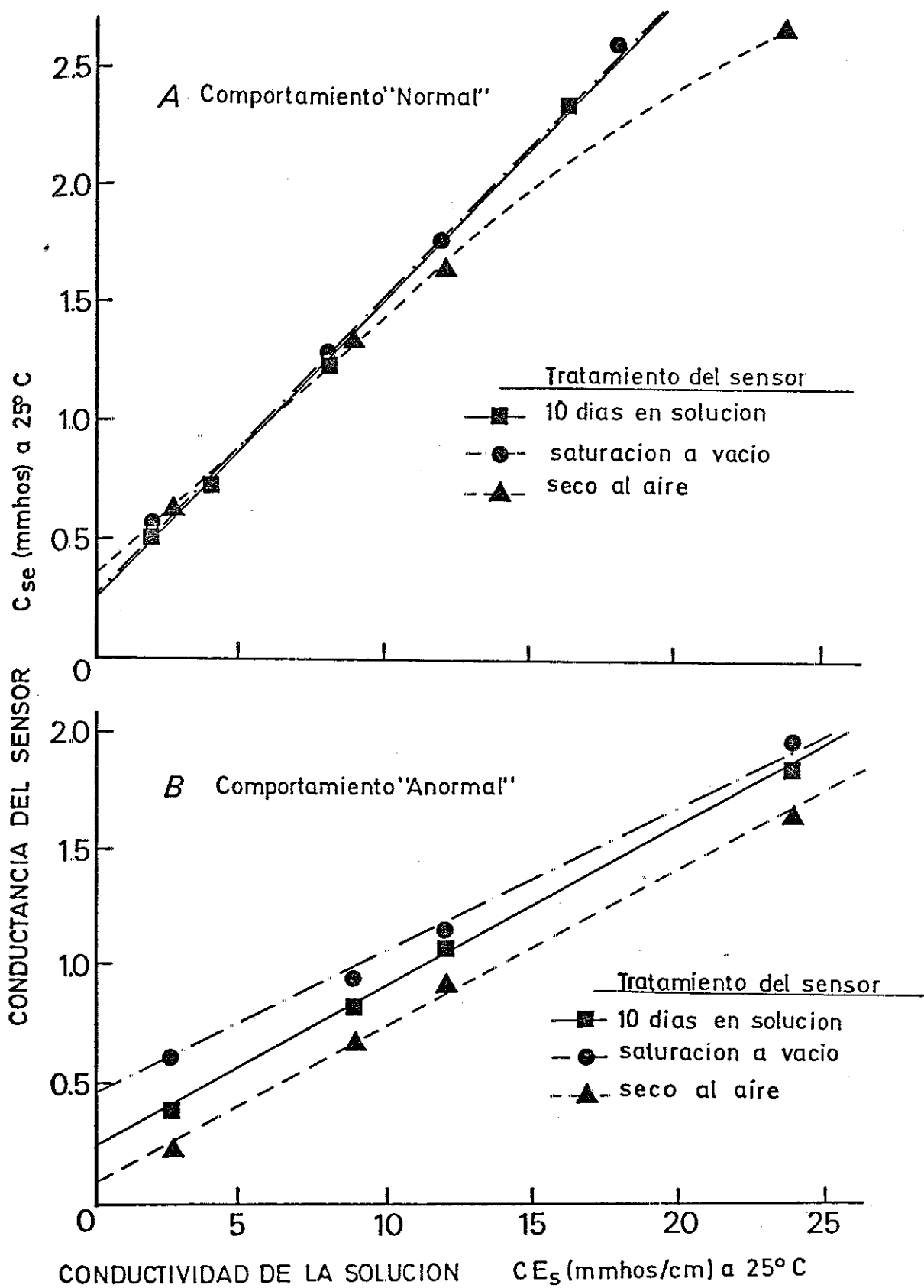


Figura 4-6. Influencia del aire ocluido en el elemento conductor sobre la calibración.

la cerámica están llenos de aire), el descenso en los valores de conductancia relativos a la curva de calibración estandar (tratamiento (1) de "10 días en solución") es persistente a lo largo de todo el tiempo de calibración, lo cual significa que la disolución del aire ocluido ha sido mínima. El descenso relativamente pequeño en el valor de la pendiente junto con el mantenimiento de un coeficiente de correlación elevado ($r = 0.985$) confirma esta hipótesis. Por otro lado, cuando el mismo sensor es saturado a vacío, muestra un importante descenso en el valor de la pendiente y un incremento sustancial en el valor de la ordenada en el origen o conductancia inherente. Esto sugiere que algunos poros evacuados de aire debido al vacío aplicado y que se llenaron con la solución de conductividad eléctrica más elevada, son estagnantes. La solución de estos poros no cambia mucho durante el proceso de calibración y por consiguiente imparte una conductancia relativamente elevada a esta unidad a pesar de que el resto de los poros estén en equilibrio con las soluciones calibradoras de concentraciones sucesivamente menores.

Este resultado es de interés práctico para muchas situaciones de campo porque permite la identificación "a priori" de aquellos sensores que al secarse cambiarían en sus características de calibración por un período apreciable de tiempo. El hecho de que este cambio subestima los valores de conductividad eléctrica es una consideración importante, especialmente cuando los sensores son utilizados para controlar la salinidad del suelo en relación con el crecimiento de las plantas. Se recomienda, por lo tanto, -

la realización de un test parecido al descrito antes de la instalación de las unidades con el fin de eliminar las que se comporten como la de la Figura 3-6 (B).

Asimismo, la práctica de saturar los sensores a vacío antes de calibrarlos, parece ser inapropiada para usos prácticos, porque la situación más lógica es que los poros estagnantes estén llenos de aire, aunque debe reconocerse que en la atmósfera del suelo - de mayor contenido en CO_2 - este aire puede disolverse más rápidamente que en condiciones atmosféricas.

Estabilidad de la calibración

Se examinaron un conjunto de 22 sensores con el fin de evaluar la estabilidad de la calibración. El primer año, los sensores se calibraron (calibración "II") y los resultados se compararon con los dados por la casa fabricante (calibración "I"). Catorce meses más tarde los sensores fueron recalibrados (calibración "III"). El Cuadro 4-6 muestra los valores medios de la pendiente y la ordenada en el origen para estas calibraciones.

Antes de entrar en la discusión, debemos establecer el criterio de estabilidad. Oster y Willardson (1971) consideran que los sensores tienen unas características estables de calibración si las curvas de calibración a tiempos diferentes se encuentran dentro del $\pm 15\%$ de la calibración media. Sin embargo, este criterio tiene algunas dificultades de interpretación: (1) tomando la calibración media de la curva como referencia, el posible cambio de la curva de calibración con el tiempo es subestimado; y (2) la

Cuadro 4-6. Media de las curvas de calibración y coeficientes de correlación de los 22 sensores examinados en la estabilidad de la calibración.

	Curva de calibración Cse = A+B CEs*	Coefficiente de correlación r
cal. I	Cse = 0.212+0.1008 CEs	0.9994
cal. II	Cse = 0.211+0.1023 CEs	0.9972
cal. III	Cse = 0.259+0.0846 CEs	0.9965

* Cse = conductancia del sensor en mmhos a 25°C; CEs = conductividad eléctrica de la solución en mmhos/cm a 25°C.

aplicación generalizada de un cambio de $\pm 15\%$ a todos los sensores - puede dar conclusiones erróneas, puesto que este valor depende de los valores absolutos de la pendiente y ordenada en el origen de cada unidad. Por ello, aquí consideraremos que un sensor tiene una calibración estable si la pendiente y la ordenada de las curvas de calibración a tiempos diferentes se encuentran dentro de \pm dos veces su mayor desviación estandar.

Con este criterio, el 23 % de los sensores examinados se consideraron estables. De los sensores inestables, el 93 % mostraron un cambio típico en la curva de calibración, con un descenso medio de un - 18 % en la pendiente y un aumento medio de un 30 % en la ordenada en

el origen. La Figura 4-7 muestra la distribución de frecuencias de los valores de la pendiente y ordenada en el origen de los sensores inestables, con las correspondientes medias y desviaciones estandar. La Figura 4-8 muestra los datos de calibración para un sensor que se consideró estable (A) y para otro (B) que mostró la desviación típica mencionada anteriormente. En general, para los sensores inestables, la diferencia en las ordenadas en el origen entre la calibración I y la III fueron próximas a ± 2 veces la desviación estandar, mientras que la diferencia en las pendientes fue mayor. Esto se refleja de alguna manera en los valores medios de la ordenada en el origen y de la pendiente de la Figura 4-7.

La razón del incremento aparente de la ordenada en el origen se pensó que podía ser debida, al menos en parte, a la adsorción de iones en la superficie de la cerámica porosa de la arcilla. La precipitación de las sales en la superficie de los electrodos y probablemente en las superficies de la cerámica misma, podría ser la responsable principal del descenso de los valores de la pendiente. Así, después de tener 9 sensores inmersos en una solución de KCl 1N durante 35 días bajo agitación continua, su recalibración mostró una tendencia hacia la curva de calibración original (I) en 4 de ellos. Para 3 sensores, la pendiente de la calibración III permaneció constante o incluso descendió. (Este experimento se hizo tres meses más tarde que el correspondiente a la calibración III), y dos sensores mostraron un incremento relativo en los valores de sus pendientes. Aunque estos resultados no son concluyentes, parece que la precipitación de las sales es una de las razones para este cambio en la calibración,

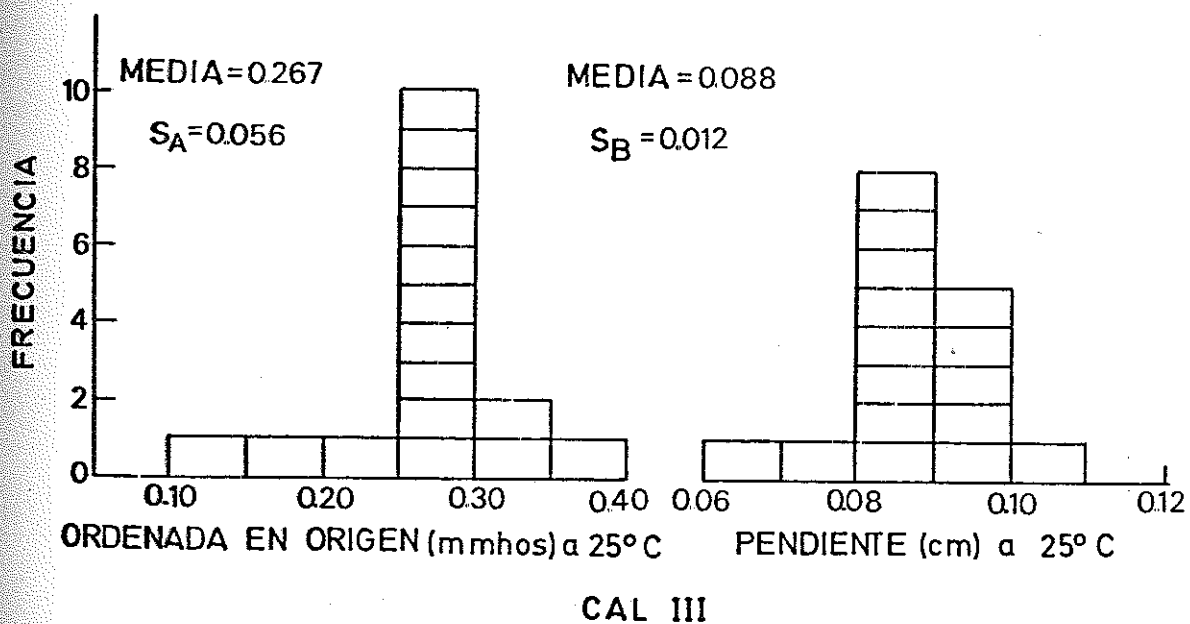
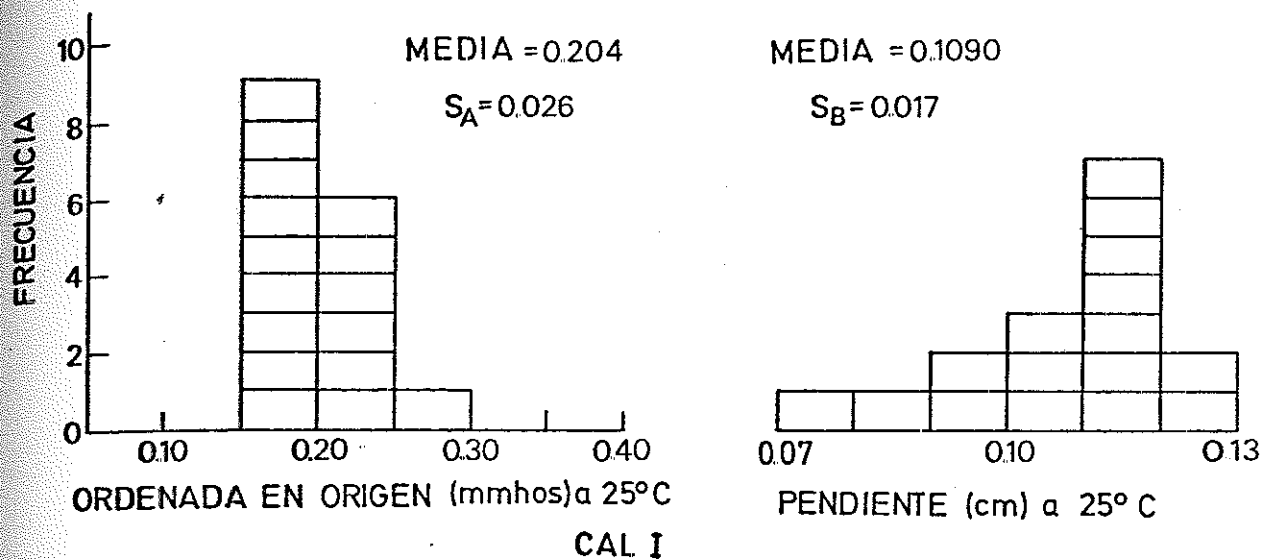


Figura 4-7. Distribución de frecuencias de los valores de la pendiente y de la ordenada en el origen para los sensores inestables (evaluados por un período de 14 meses).

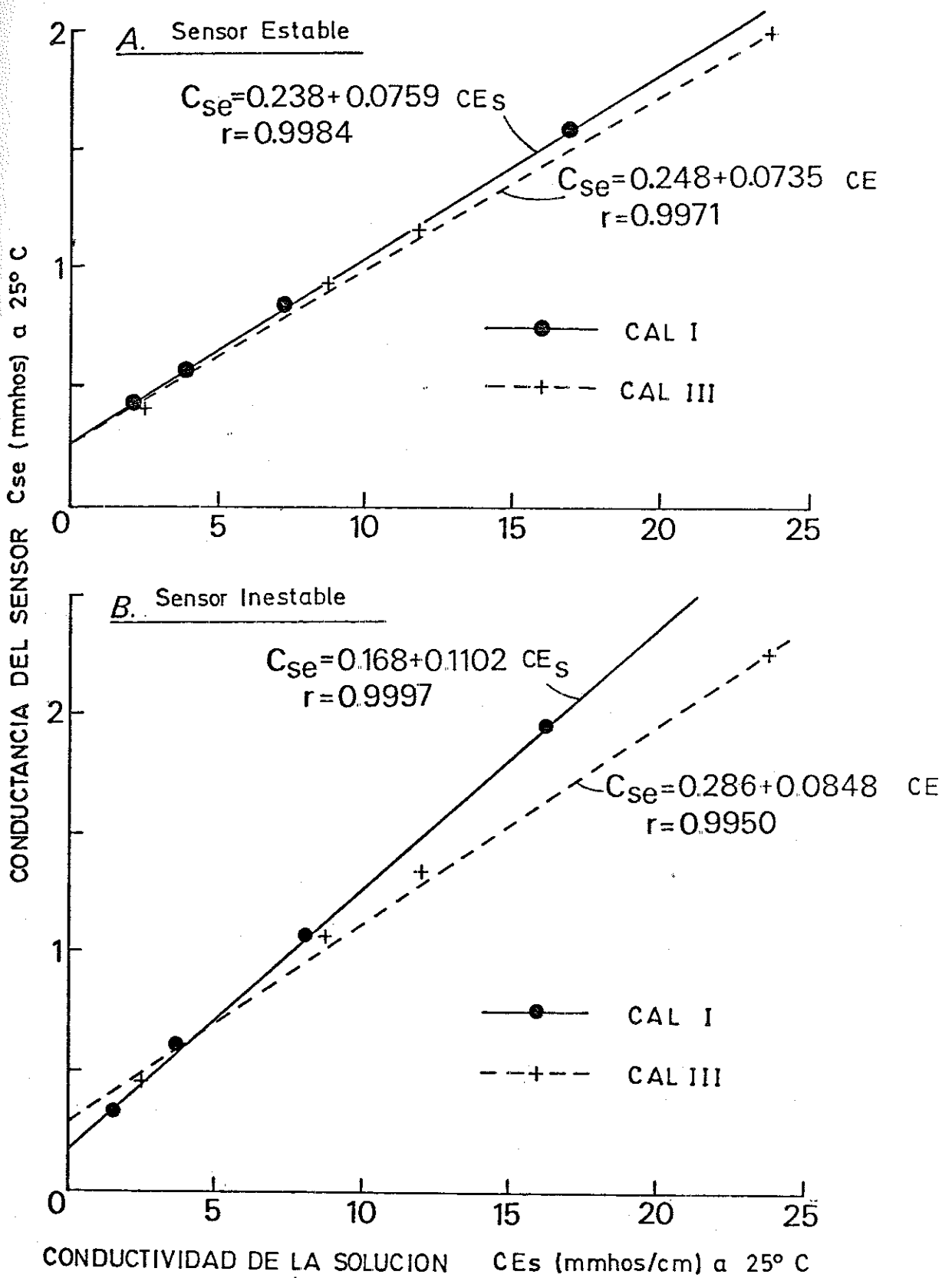


Figura 4-8. Curvas de calibración de un sensor estable (A), y un sensor inestable típico (B) (evaluados por un período de 14 meses).

aunque algún otro factor debería probablemente tenerse en cuenta. Si este es el caso, deberíamos esperar que la falta de estabilidad de los sensores instalados en el campo y sujetos a ciclos de humedecimiento y secado se acentuara, debido a la presencia de sales con mayor tendencia a precipitar (carbonatos del grupo alcalino-térrico, yeso, etc.). En este sentido, el problema sería de menor importancia en sistemas de riego de alta frecuencia donde el contenido de agua del suelo permanece relativamente constante.

Debido al cambio típico de las curvas de calibración que se asemeja a una rotación en el sentido de las agujas del reloj con el centro en la región de conductividad eléctrica de 4 mmhos/cm., los errores producidos por los cambios en la calibración fueron relativamente pequeños para esta región, y aumentaron conforme se alejaban de ella. La Figura 4-9 muestra la distribución de frecuencias de los errores de conductividad eléctrica debidos a este cambio, así como la media de estos errores a varios niveles de salinidad.

Aunque los errores producidos a bajos niveles de conductividad eléctrica no son importantes para la mayoría de las situaciones prácticas, debemos considerar que, de acuerdo con el USDA Agriculture Handbook n° 60 (Richards, 1954) un suelo se considera salino cuando la conductividad eléctrica del extracto saturado es mayor de 4 mmhos/cm. a 25° C. En términos de la concentración real de la solución del suelo, que es con la que el sensor está en equilibrio, esto equivale aproximadamente a 8 mmhos/cm. para el nivel superior del rango de humedad de campo y aproximadamente a 16

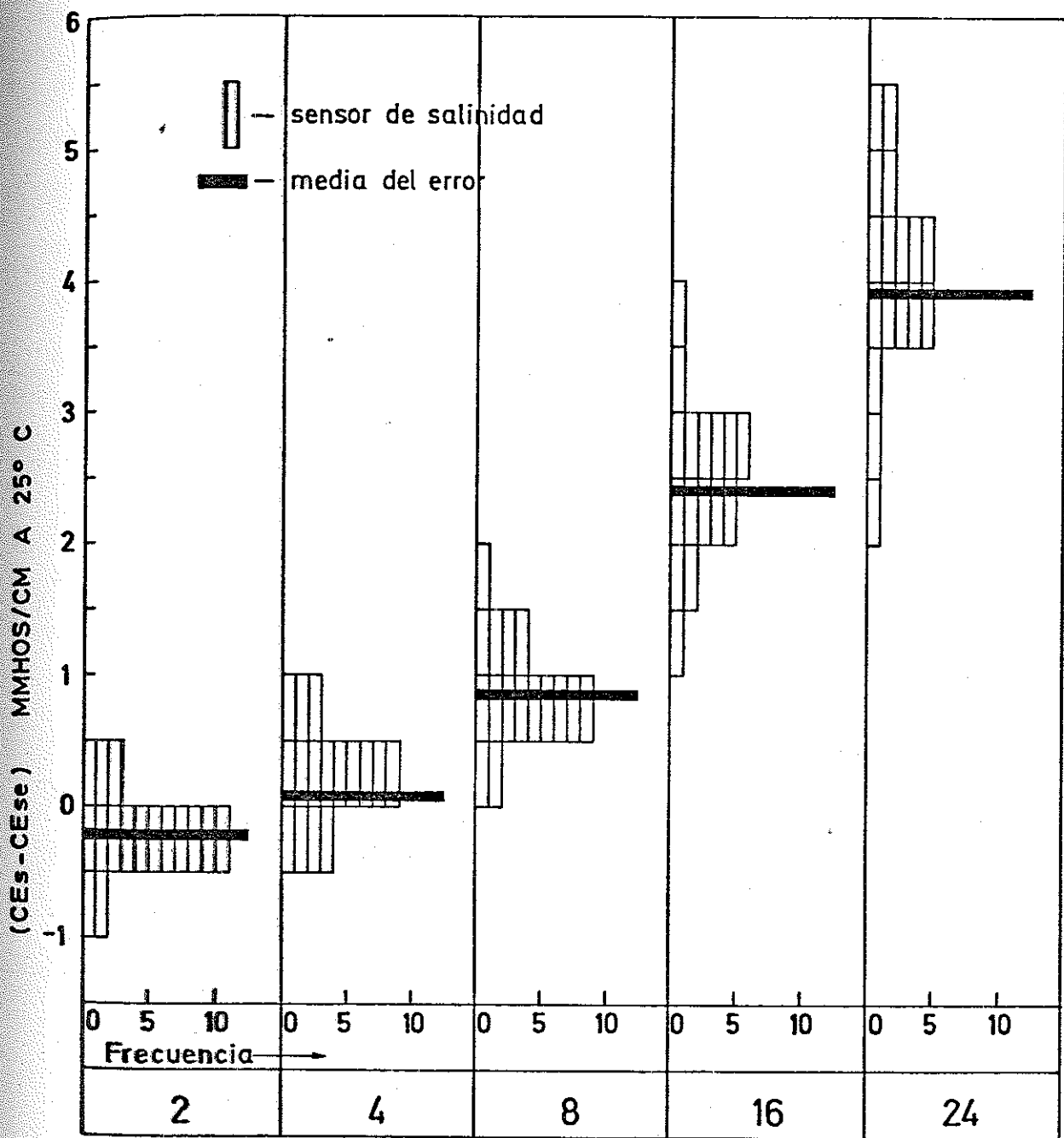


Figura 4-9. Distribución de frecuencias de los errores de conductividad eléctrica de los sensores a varios niveles de CE_s, debidos al cambio de la calibración en un período de 14 meses.

mmhos/cm. para el "punto de marchitez permanente". Por consiguiente, es evidente que el cambio en la calibración puede ser de importancia práctica para la mayoría de las condiciones salinas.

Oster y Willardson (1971) evaluaron la estabilidad de 26 sensores comerciales durante un año y medio de operación y concluyeron que durante ese tiempo el 85 % de los sensores eran estables. Ellos no mencionan en su trabajo la situación de los sensores durante este período de tiempo. Wood (1978), utilizando el mismo criterio de estabilidad propuesto por Oster y Willardson (1971), concluye que el 100 % de los sensores instalados permanentemente en el campo durante 3 años es estable, bajando esta cifra al 57 % de los instalados durante 4 años y al 41 % de los instalados durante 5 años. Usando su criterio de estabilidad, encontramos que sólo el 36 % de nuestros sensores eran estables durante 1.2 años de operación. Kemper (1959) no encontró cambios consistentes en la resistencia de las unidades después de tres meses de operación, excepto en el caso de un conjunto de unidades que se dejaron secar al aire en contacto con un suelo. Aunque sus sensores eran diferentes en cuanto a diseño y construcción respecto a los nuestros, debemos especificar que durante nuestro trabajo experimental todas las unidades se secaron durante un período u otro. La relación entre la situación seca de los sensores y el cambio en la calibración no resultó evidente, aunque un análisis riguroso de este hecho no se realizó. Sin embargo, debemos reconocer que el secado de los sensores aumentaría la precipitación de las sales en el elemento conductor, un hecho que estaría de acuerdo con nuestros resultados. Por

consiguiente, puede concluirse que la calibración de los sensores cambia con el tiempo, y que este cambio en la calibración se acentúa cuando los sensores se secan.

Histéresis de la calibración

Se analizaron seis sensores para apreciar la posibilidad de histéresis. El Cuadro 4-7 muestra el análisis de regresión de los datos obtenidos para los sensores individuales.

Dos de los sensores (n° 4606 y n° 6197) mostraron un incremento significativo de sus ordenadas en el origen para el caso b. De nuevo, la razón podría ser la presencia de poros estagnantes en la cerámica porosa. Como era de esperar, el aumento en el valor de la ordenada en el origen es menor que el obtenido para aquellos sensores saturados a vacío (Cuadro 4-5), porque aquí se utilizó el método estandar de calibración (10 días en solución), y por lo tanto la mayoría de los poros estagnantes están llenos de aire en vez de estarlo de solución. La conclusión es que los sensores normales no muestran una histéresis apreciable, mientras que aquellos sensores con poros no conductores o poco conductores muestran una histéresis apreciable en sus curvas de calibración.

4.1.2.3. Precisión de los sensores

La precisión de la medida de la conductividad eléctrica obtenida con un sensor calibrado puede estimarse a partir del análisis de regresión lineal de los datos de calibración. El Cuadro 4-8 - -

Número del sensor

*Cse = A+B CEs	4606		4652		4998		6171		6193		6197	
	a ⁺	b ⁺⁺	a ⁺	b ⁺⁺	a ⁺	b ⁺⁺	a ⁺	b ⁺⁺	a ⁺	b ⁺⁺	a ⁺	b ⁺⁺
A	.260	.272	.241	.242	.306	.298	.448	.440	.431	.429	.458	.477
B	.0633	.0630	.0703	.0705	.0764	.0773	.1206	.1215	.1100	.1107	.1219	.1216
r [*]	.997	.995	.999	.998	.998	.997	.999	.998	.999	.998	1.000	.999

*a = calibración en el sentido de concentraciones crecientes de las soluciones calibradoras.

+b = calibración en el sentido de concentraciones decrecientes de las soluciones calibradoras.

*Cse = conductancia del sensor (mmhos a 25°C); CEs = CE de la solución calibradora (mmhos/cm. a 25°C)

*r = coeficiente de correlación

muestra la desviación estandar media y el coeficiente de correlación del análisis efectuado. La desviación estandar de la regresión S_{y-x} , dividida por la pendiente de la línea de calibración, es una estimación de la desviación estandar de la conductividad eléctrica medida por el sensor. Asumiendo que una variación de dos veces la desviación estandar puede esperarse que ocurra, la precisión de la conductividad eléctrica medida por las unidades se muestra en la última columna.

De estos datos parece evidenciarse que la precisión de los sensores disminuye con el tiempo. A pesar de ello, el nivel estimado de precisión parece ser satisfactorio todavía para la mayoría de las necesidades prácticas. Sin embargo, debe señalarse que estas estimaciones de precisión se han realizado en base a las curvas de calibración finales. Debe reconocerse que desde un punto de vista práctico la calibración de los sensores cada 6 meses no es una práctica corriente. Por ello, los valores obtenidos toman en consideración el cambio en la calibración con el tiempo, y no representan la precisión actual de los sensores instalados. Si se realiza un análisis de regresión sobre todos los datos de las calibraciones I y III de cada sensor, las precisiones estimadas correspondientes son en promedio ± 0.71 mmhos/cm para los sensores estables y ± 1.92 para los inestables. Como ilustración, la Figura 4-10 muestra el análisis de regresión de dos sensores, uno considerado estable y otro inestable.

La calibración de los sensores en suelo se realizó únicamente al principio de este trabajo, al mismo tiempo que se realizó

Cuadro 4-8. Valores medios del análisis de regresión realizado sobre 22 sensores. La precisión estimada de la medida se presenta en la última columna.

Calibración	*Cse = A + B CEs ^x	r ⁺	Sy-x ⁺⁺ (mmhos)	Sx-y ⁺⁺ (mmhos/cm)	Precisión* (mmhos/cm)
I	Cse = 0.212 + 0.1008 CEs	0.9994	0.016	0.16	+ 0.32
II	Cse = 0.211 + 0.1023 CEs	0.9972	0.032	0.31	+ 0.62
III	Cse = 0.259 + 0.0846 CEs	0.9965	0.042	0.49	+ 0.98
suelo - II	Cse = 0.267 + 0.1004 CEs	0.9749	0.072	0.72	+ 1.44

*Cse = conductancia del sensor (mmhos) a 25°C

^xCEs = CE de la solución (mmhos/cm) a 25°C

+r = coeficiente de correlación

++Sy-x = Sx-y B = desviación estandar

*Precisión = $\pm 2 Sx-y$

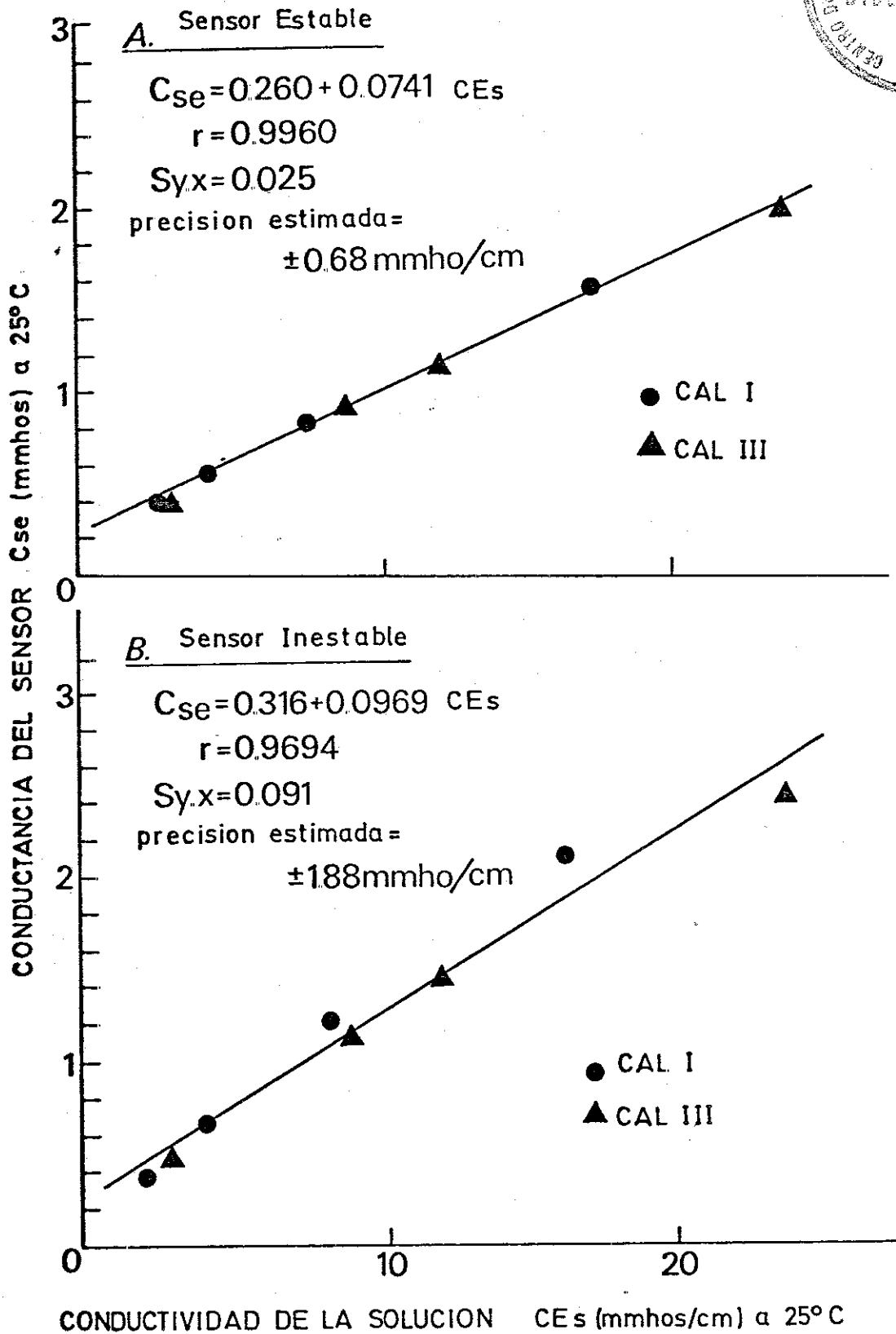


Figura 4-10. Curvas de calibración de un sensor estable (A) y otro inestable (B) al introducir en el análisis - de regresión todos los datos de las calibraciones I y III.

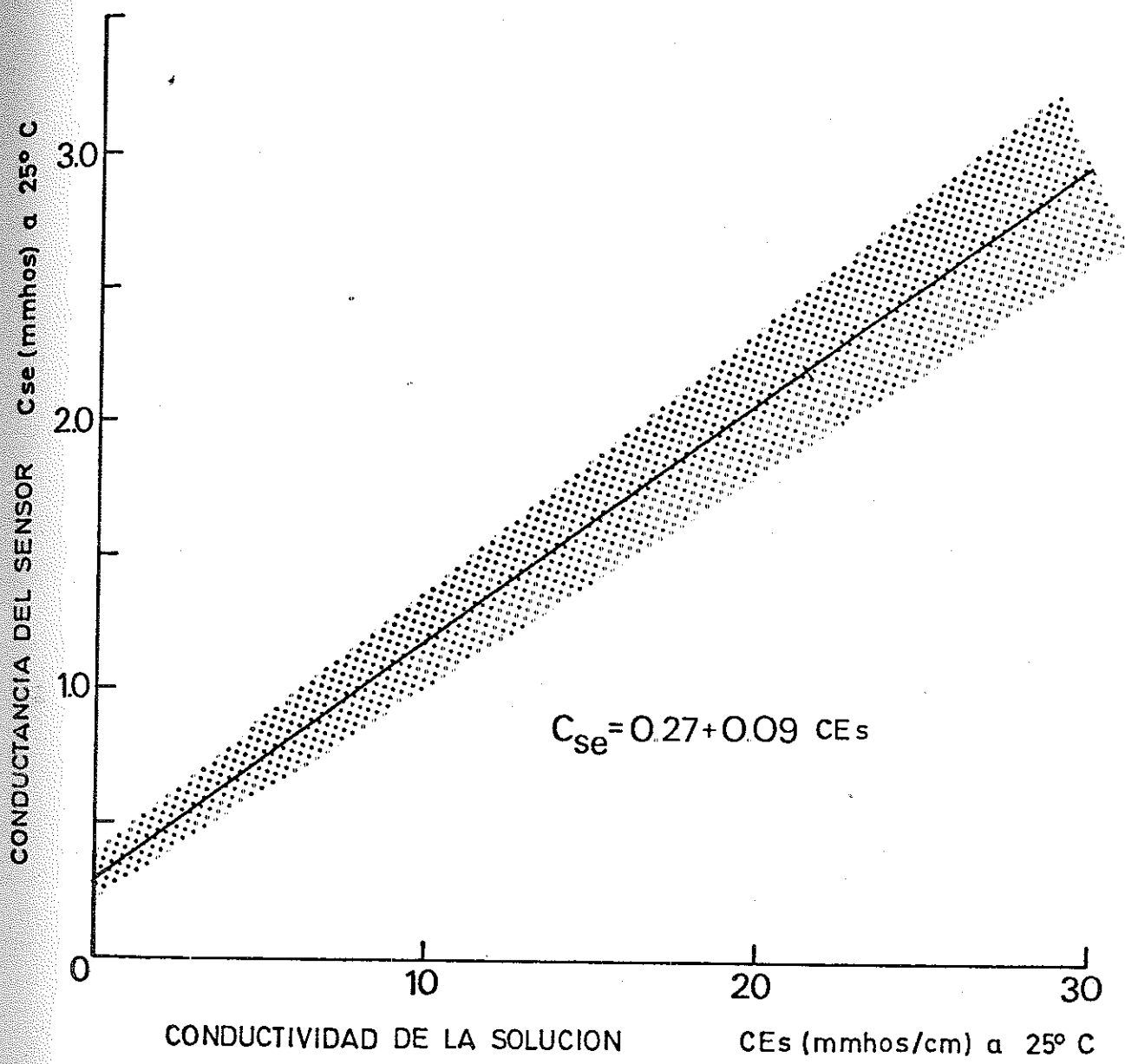


Figura 4-11. Imprecisión de la medida de CE_s utilizando una única curva de calibración para los sensores de características similares. El área sombreada representa la desviación estandar de la medida.

la calibración denominada II (Cuadro 4-8). Datos experimentales posteriores indican que la precisión estimada (± 1.44 mmhos/cm) es un tanto pesimista. Probablemente el suelo no alcanzó un equilibrio iónico completo, especialmente a los niveles de baja concentración, debido al contenido relativamente elevado de Magnesio del suelo seco.

En base a estos datos, se concluyó que la precisión estimada de la conductividad eléctrica medida por los sensores después de más de un año de operación es del orden de ± 0.7 a ± 0.9 mmhos/cm para los sensores estables y los inestables corregidos, y alrededor de ± 2 mmhos/cm, para los inestables no corregidos.

Por otro lado, se intentó discernir la posibilidad de usar una sola curva de calibración en lugar de calibraciones individuales para aquellos sensores que tuvieran características aproximadamente similares. El cambio en la calibración de las unidades con el tiempo no permitió realizar este análisis. Incluso asumiendo que el cambio en calibración cesara después de un año de operación la posibilidad mencionada no es aconsejable para los sensores actuales. Como ilustración, la Figura 4-11 muestra la falta de precisión de la medida cuando la calibración media III, $C_{se} = 0.27 + 0.09 CE_s$, se aplicó a aquellos sensores con ordenadas en el origen de valor 0.27 ± 0.1 mmho y pendiente de 0.09 ± 0.01 cm.

4.1.2.4. Corriente externa de los sensores

A. Procedimiento

El flujo de corriente externa a los sensores se analizó - -

transfiriendo las unidades desde una solución conductora, al aire no conductor, y midiendo el cambio en la resistencia y en la temperatura del sensor con el tiempo. Para estudiar la influencia de la evaporación de solución en la cerámica porosa sobre la temperatura del sensor y por consiguiente sobre su conductancia, un conjunto de sensores se cubrieron con papel de parafina un tiempo - después de haberse sacado de la solución conductora. La corriente externa se estudió para cuatro soluciones conductoras diferentes en el rango de 24 mmhos/cm. a 2.5 mmhos/cm., incluyendo una solución saturada en yeso.

B. Resultados y discusión

La Figura 4-12-A muestra el cambio típico en la resistencia media de 10 sensores con el tiempo, después de que las unidades fueran sacadas desde la solución al aire, y la Figura 4-12-B muestra los cambios individuales de la resistencia en dos unidades y cuatro soluciones de concentración inicial diferente. Si tomamos como valor de la corriente externa al sensor el cambio máximo (en %) de la resistencia antes de que ésta comience a descender, se obtiene un valor de 7.4 ± 1.5 % (Figura 4-12-A), no apreciándose diferencias significativas entre soluciones de concentraciones diferentes (Figura 4-12-B). Sin embargo, aunque esta estimación da valores próximos a los obtenidos por Ingvalson et al. (1970) (descenso en la conductancia del 5 %), el hecho de que desde el tiempo 5 min. hasta el tiempo 30 min. exista un descenso relativo en

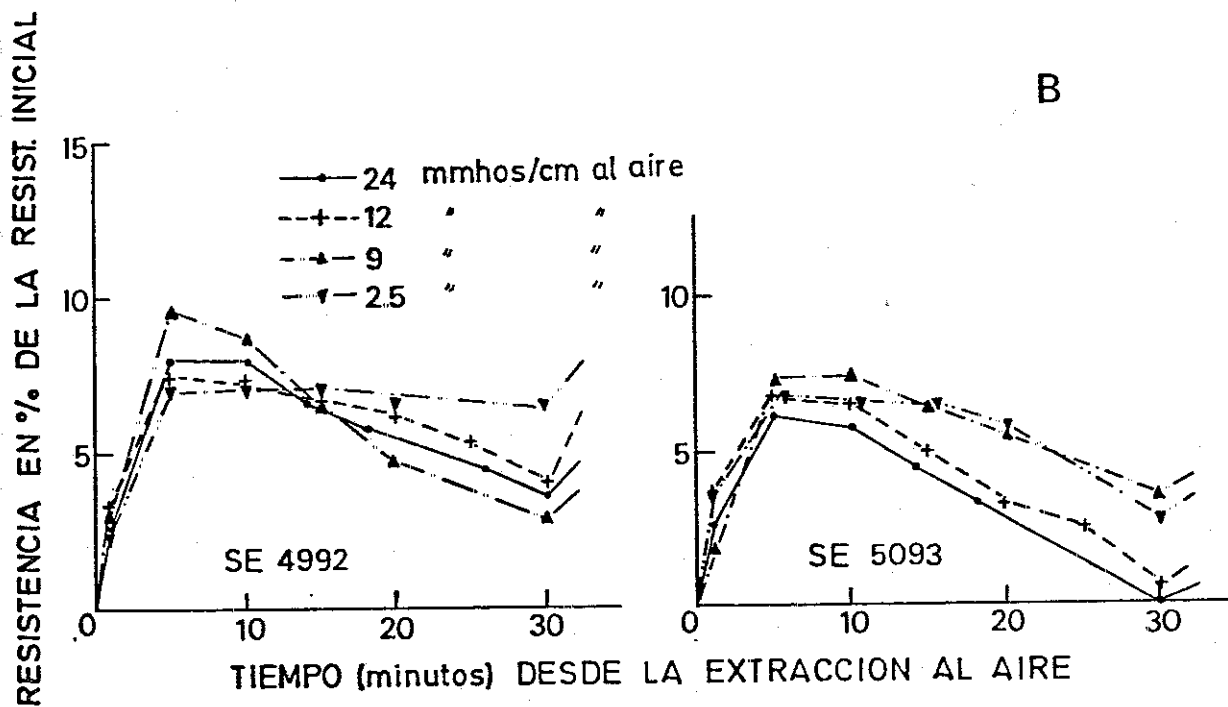
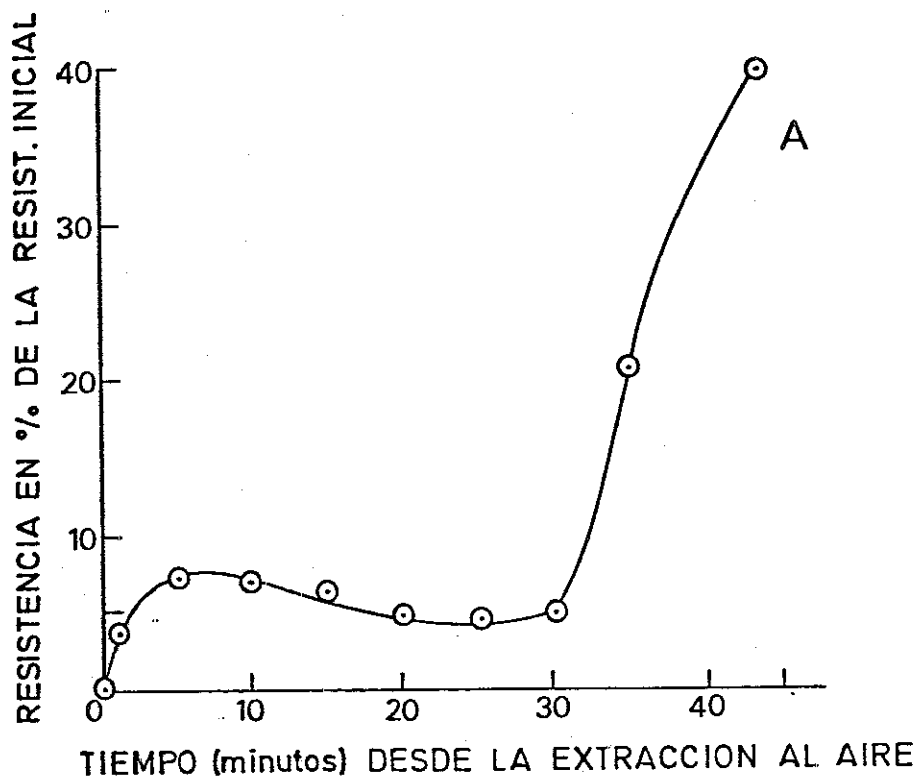


Figura 4-12. Variación en la resistencia del sensor al moverlo de la solución conductora al aire no conductor. - A: media de los valores para 10 sensores y 4 concentraciones de la solución conductora. B: valores individuales de dos sensores para 4 soluciones conductoras.

el valor de la resistencia, condujo a la conclusión de que estaba produciéndose evaporación de solución en la superficie del sensor. Por consiguiente, los valores obtenidos son representativos tanto de la corriente externa como de la evaporación. Los efectos principales que tendría el proceso de evaporación sobre los sensores son: (1) un descenso de la temperatura del sensor, que tendería a incrementar la resistencia del mismo, (2) un descenso en el contenido de agua de la cerámica del sensor que causaría un incremento en la resistencia del mismo, y (3) un aumento de la concentración de la solución remanente en el sensor, que tendería a disminuir su resistencia.

El efecto de la temperatura se evaluó midiendo la resistencia del termistor y convirtiéndola a °C (Figura 4-13). El descenso brusco de la temperatura del sensor desde 20 a 18.5° C en un período de 4 min. (a pesar de que el gradiente de temperatura entre la solución y el aire era despreciable) es indicativo del proceso de evaporación. Tomando en consideración este descenso en la temperatura, el flujo de corriente externa al sensor para el ejemplo que se muestra se reduciría a la mitad del estimado anteriormente. Asimismo, la Figura 4-13 muestra que cuando el sensor se cubre con parafina (t = 8 min.), la temperatura aumenta, presumiblemente debido a la falta de evaporación, y desciende de nuevo al descubrirse a los 26 min.

El efecto del aumento en la concentración de la solución presente en la cerámica del sensor debido a la evaporación, se evaluó equilibrando dos unidades con una solución saturada en yeso (CaSO_4).

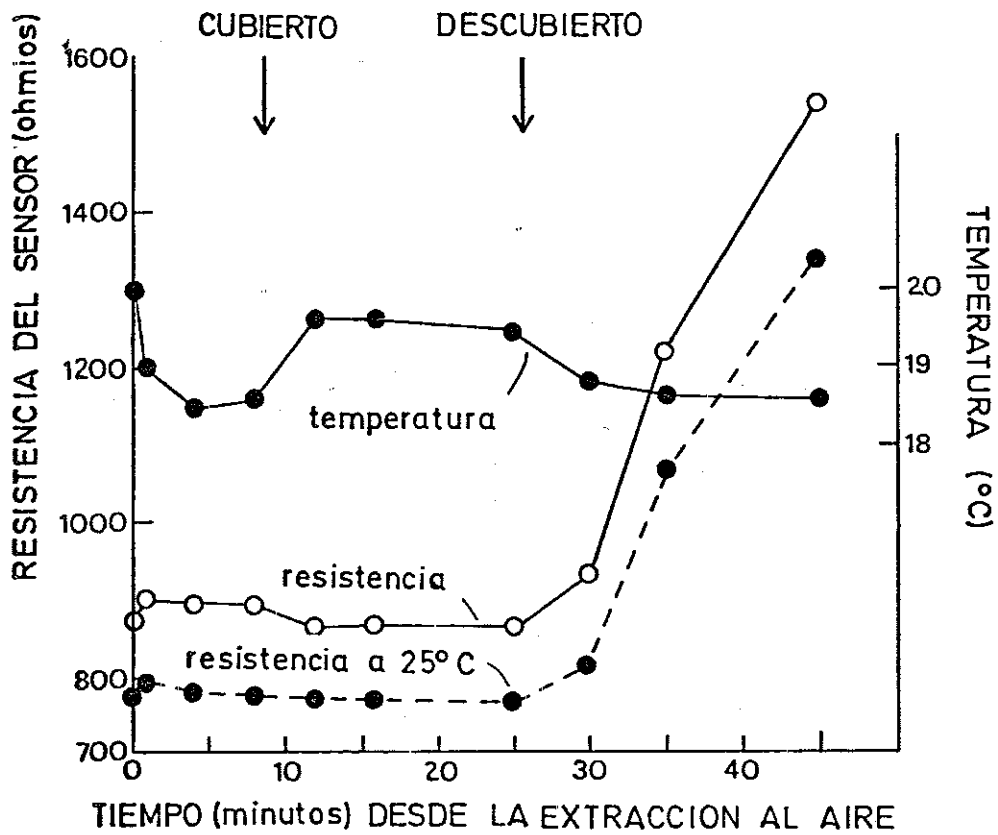


Figura 4-13. Cambio en la resistencia del sensor con el tiempo cuando los sensores se mueven desde una solución de 12 mmhos/cm al aire. A los 8 minutos las unidades se cubrieron con papel de parafina, descubriéndose de nuevo a los 26 minutos.

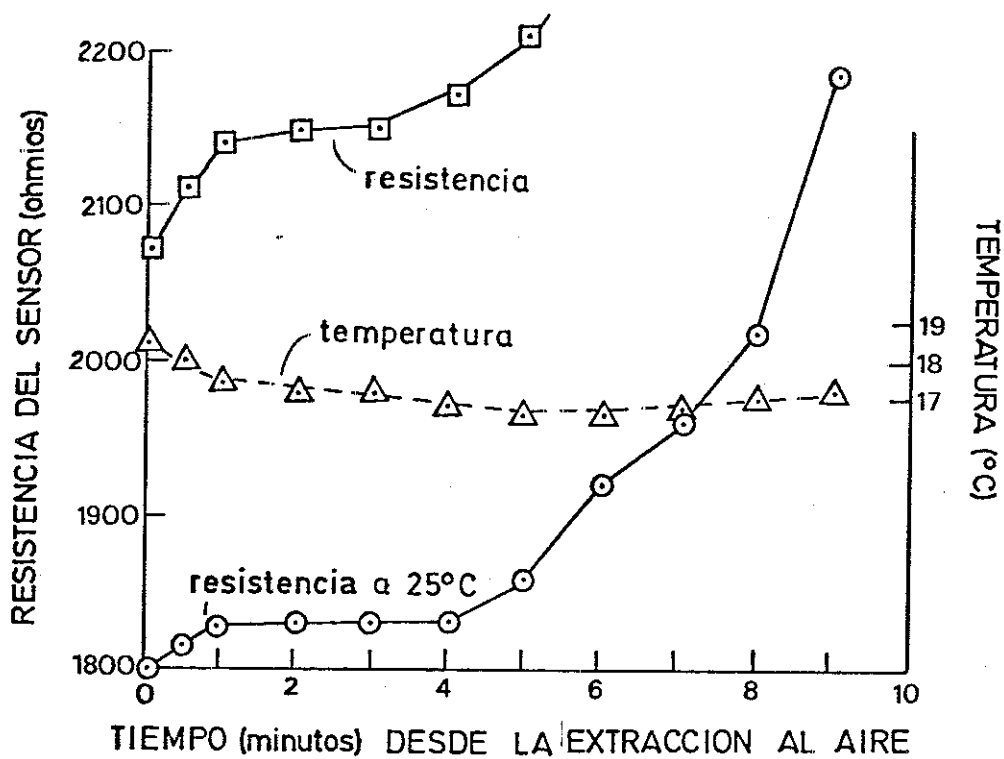


Figura 4-14. Cambio en la resistencia del sensor con el tiempo cuando los sensores se mueven desde una solución saturada en yeso, al aire.

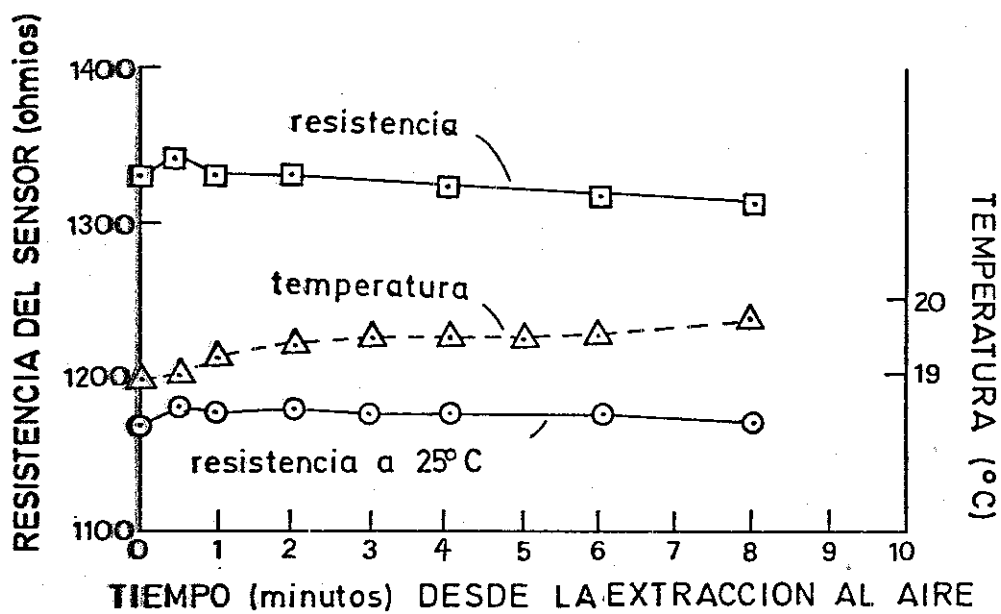


Figura 4-15. Cambio en la resistencia del sensor con el tiempo cuando los sensores se mueven desde una solución conductora al aire no conductor. A los cero minutos, las unidades se cubrieron con papel de parafina para evitar la evaporación.

2H₂O). Una solución saturada de yeso no puede concentrarse más dado que rebasaría su producto de solubilidad, precipitando. La Fig. 4-14 confirma que la resistencia no desciende como ocurría anteriormente, y el tiempo transcurrido hasta producirse el aumento brusco en la resistencia decrece desde los 30 minutos de los ejemplos anteriores a aproximadamente 4 minutos.

Finalmente, el descenso en el contenido de agua de la cerámica sería el principal responsable del incremento abrupto en el valor de la resistencia que tiene lugar a $t = 4$ minutos en la Figura 4-14 o el que tiene lugar a $t = 30$ minutos en la Figura 4-12.

Para evitar el proceso de evaporación que se solapaba con el valor del flujo de corriente externa, se cubrieron diez unidades con papel de parafina inmediatamente después de ser sacadas de la solución conductora. La Figura 4-15 muestra que la temperatura no desciende como en los casos anteriores, y que la resistencia, después de un incremento del 0.7 % (en base a valores a 25° C), permanece constante con el tiempo. De acuerdo con estos datos, se concluyó que la corriente externa de los sensores de salinidad analizados es despreciable (menos de un 1 %).

4.1.2.5. Tiempo de respuesta de los sensores

A. Procedimiento

Tiempo de respuesta en solución

Se realizaron tres experimentos con tres condiciones inicia-

les diferentes. En el primero se colocaron un conjunto de 12 sensores en una solución de conductividad eléctrica conocida durante 10 días para asegurar la situación de equilibrio. Los sensores se trasvasaron entonces a otra solución de CE conocida, realizándose lecturas periódicas de CE hasta alcanzarse un nuevo equilibrio.

El procedimiento se repitió para varias soluciones de concentraciones diferentes, tanto en la dirección de concentraciones crecientes como decrecientes.

Para los experimentos segundo y tercero los sensores se dejaron primero secar al aire o saturar a vacío, respectivamente, y entonces se colocaron en solución, anotándose el tiempo necesario para alcanzar el equilibrio.

Tiempo de respuesta en medios porosos

El tiempo de respuesta del sensor de salinidad en medios porosos se determinó por dos métodos diferentes:

- (1) después de equilibrar los sensores en una solución de NaCl de CE = 0.5 mmhos/cm. durante diez días, se colocaron seis unidades en sucesivas columnas de suelo Yolo, que habían sido previamente equilibradas con soluciones de NaCl de CE conocidas. Al mismo tiempo se colocaron en cada columna dos sensores secos al aire. Inmediatamente, se realizaron lecturas periódicas de los sensores hasta que alcanzaron el equilibrio. El tiempo de respuesta se analizó también para la arena y el suelo Yolo equilibrados previamente a niveles de

potencial matricial de -0.1 y -0.4 bares (ver dispositivo experimental en Figura 4-23).

(2) la Figura 4-16 muestra el dispositivo utilizado en el que soluciones de NaCl de concentraciones crecientes fueron forzadas consecutivamente a una velocidad de flujo constante a través de cuatro medios porosos diferentes: resina catiónica, arena-caolinita (2:1 en peso), arena y suelo franco Yolo. Una vez que los medios porosos alcanzaron un equilibrio dinámico con la solución de NaCl de menor concentración (CE = 2.0 mmhos/cm.), se añadió la siguiente solución de mayor concentración (CE = 5.4 mmhos/cm.) y así sucesivamente para el resto de las soluciones. En cada una de estas situaciones impuestas, se realizaron lecturas de CE de los sensores al mismo tiempo que se extraía solución a través de las sondas de succión. Una vez equilibrado el sistema con la solución más concentrada (CE = 23.8 mmhos/cm.), se forzó de nuevo a través de la columna la solución de NaCl de menor concentración. Los flujos constantes en el sistema se obtuvieron con una bomba jeringa conectada a un regulador electrónico de velocidad (modelo 4 x 796 de Dayton Electric Manufacturing, Chicago).

B. Resultados y discusión

El Cuadro 4-9 resume los resultados de los tiempos de respuesta obtenidos según el procedimiento (1). La última columna

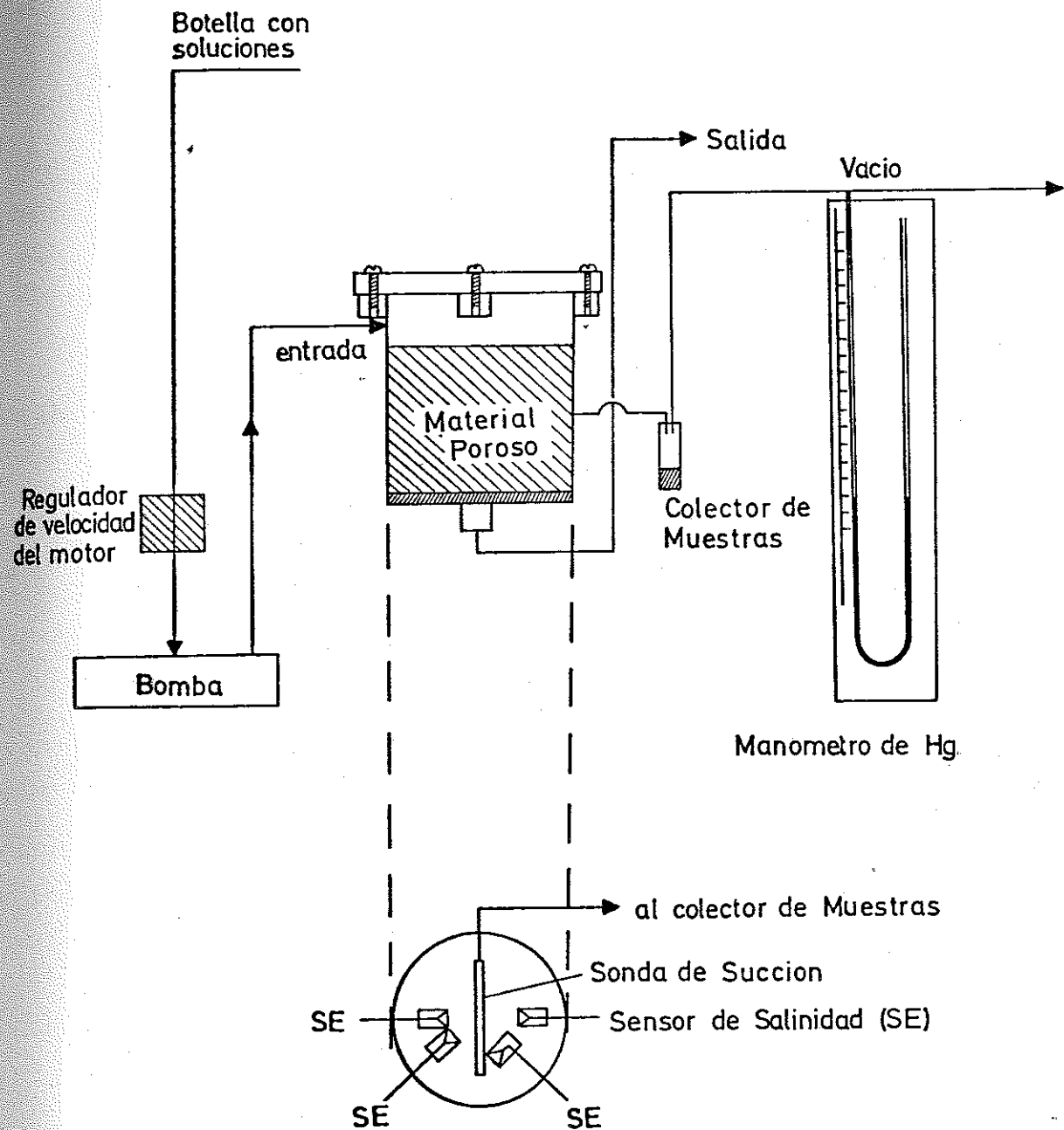


Figura 4-16. Dispositivo experimental utilizado en la medida del tiempo de respuesta de los sensores de salinidad y sondas de succión en medios porosos equilibrados consecutivamente con soluciones de varias concentraciones.

del Cuadro indica el número de sensores utilizados, con el número de repeticiones en paréntesis. En medios porosos equilibrados a potenciales matriciales de -0.4 bares, los sensores no alcanzaron en ningún caso el valor de la conductividad eléctrica impuesta al sistema; por ello, en la tercera columna del Cuadro se da entre paréntesis el rango de % del cambio alcanzado por estos sensores (en lugar del 63 % del cambio total). Como ejemplo, en el experimento n° 6 (arena a potencial matricial = -0.4 bares) los dos sensores analizados alcanzaron únicamente el 48 y el 51 % del cambio total esperado si los sensores hubieran respondido de forma normal, esto es, si hubieran alcanzado la conductividad eléctrica impuesta en el sistema.

El tiempo de respuesta en los experimentos 1, 2 y 3, se analizó para 4 soluciones diferentes de NaCl con concentraciones entre 2 y 24 mmhos/cm. En general no se encontraron diferencias significativas en el tiempo de respuesta entre estas soluciones para cada sensor individual. Como ilustración, la Figura 4-17 muestra el tiempo de respuesta de una unidad que es representativa de los resultados medios obtenidos en los experimentos realizados en solución.

El tiempo de respuesta se define como el tiempo requerido para que los sensores alcancen el 63 % (o el 100 % según se indique) de la respuesta total cuando se trasvasan desde un nivel de concentración a otro diferente. El porcentaje del cambio total al tiempo t se obtiene de :

Cuadro 4-9. Tiempo de respuesta de los sensores. Los números entre paréntesis en la última columna indican repeticiones.

+A - sensores 10 días en solución				
#	tiempo de respuesta en:	63% del cambio total media \pm desviación estándar (horas)	100% del cambio total media \pm desviación estándar (horas)	N° de sensores
1	solución	2.8 \pm 0.60	14.6 \pm 1.9	12 (1)
2	arena saturada	3.6 \pm 1.60	29 \pm 3.2	6 (1)
3	suelo Yolo saturado	3.5 \pm 1.90	24 \pm 8.8	6 (1)
4	arena a $\psi_m = -0.1$ bares	70.8 \pm 27	218 \pm 45	2 (2)
5	Yolo a $\psi_m = 0.1$ bares	7.0 \pm 2.4	62 \pm 14	2 (1)
6	arena a $\psi_m = -0.4$ bares	(sólo alcanza el 48-51% del cambio teórico total)	(sólo alcanza el 48-51% del cambio teórico total)	2 (1)
7	Yolo a $\psi_m = -0.4$ bares	(sólo alcanza el 55-88% del cambio teórico total)	(sólo alcanza el 55-88% del cambio teórico total)	2 (1)
+B - sensores secos al aire				
#	tiempo de respuesta en:	63% del cambio total media \pm desviación estándar (horas)	100% del cambio total media \pm desviación estándar (horas)	N° de sensores
8	solución	--	206 \pm 47	4 (1)
9	arena saturada	--	336 \pm 38	2 (1)
10	suelo Yolo saturado	--	352 \pm 86	2 (1)
11	arena a $\psi_m = -0.4$ bares	(sólo alcanza el 12-56% del cambio teórico total)	(sólo alcanza el 12-56% del cambio teórico total)	1 (2)
12	Yolo a $\psi_m = -0.4$ bares	(sólo alcanza el 28-68% del cambio teórico total)	(sólo alcanza el 28-68% del cambio teórico total)	1 (2)
+C - sensores saturados a vacío				
#	tiempo de respuesta en:	63% del cambio total media \pm desviación estándar (horas)	100% del cambio total media \pm desviación estándar (horas)	N° de sensores
13	solución	2.95 \pm 1.08	359 \pm 100	4 (1)

+ A, B, C: pretratamientos.

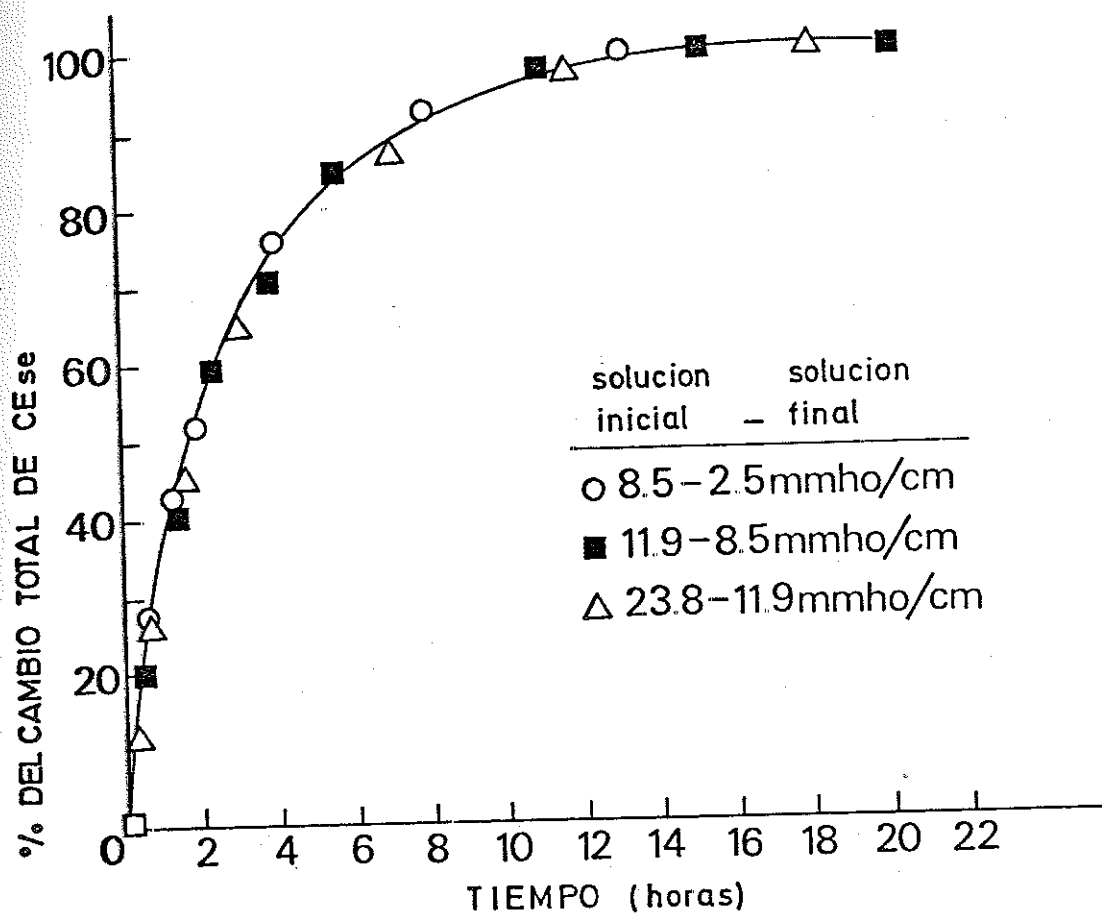


Figura 4-17. Tiempo de respuesta de sensores en solución.

$$\% \text{ cambio total al tiempo } t = 100 (CE_0 - CE_t) / (CE_0 - CE_f)$$

donde CE_0 = conductividad eléctrica del sensor (mmhos/cm) al tiempo
cero

CE_t = conductividad eléctrica del sensor (mmhos/cm) al tiempo
t

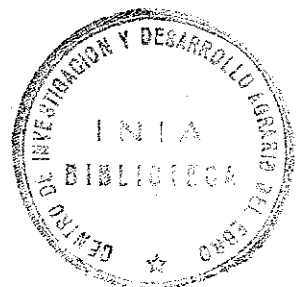
CE_f = conductividad eléctrica del sensor (mmhos/cm) al tiempo
de equilibrio final

El tiempo de respuesta de un sensor depende de la difusión de solutos entre la solución de la cerámica y la solución externa. Asimismo, depende de la geometría del cuerpo poroso, esto es, de su espesor, forma de los electrodos y uniformidad de separación, grietas en la arcilla y, en general, del procedimiento de fabricación (Wesseling y Oster, 1973). De aquí las elevadas desviaciones estandar de las medias encontradas en las medidas (Cuadro 4-9). Incluso para el mismo sensor, el tiempo de respuesta entre repeticiones en suelo a subsaturación fue sustancialmente diferente, un hecho que puede ser explicado por las diferencias en la eficacia del contacto entre el suelo y los sensores. Para sensores de diseño similar a los examinados, el tiempo de respuesta en solución varía entre una (Richards, 1966) y dos horas (Wesseling y Oster, 1973). Estos autores encontraron asimismo que el tiempo de respuesta del sensor en un suelo areno-limoso saturado es aproximadamente un 50% mayor que el obtenido en solución. En su análisis, Wesseling y Oster (1973) concluyen que el tiempo de respuesta en el suelo debe permanecer constante en un amplio rango de contenidos de agua, pero en su trabajo sólo alcanzaron potenciales matriciales mayores de -0.11 bares.

Sin embargo, el Cuadro 4-9 muestra que el tiempo de respuesta del sensor viene influenciado aparentemente por el contenido de agua del suelo. Aunque la arena utilizada en estos experimentos no es probablemente representativa de un suelo agrícola normal, el experimento n° 6 muestra que para un potencial matricial de -0.4 bares (que corresponde a un contenido de agua de $0.04 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, Figura 3-2) el tiempo de respuesta del sensor es prácticamente infinito, lo cual indica la falta del contacto líquido entre el suelo y el sensor. Así, en estas circunstancias, éstos no son capaces de leer la conductividad eléctrica actual de la solución del suelo. Para el suelo franco Yolo, el tiempo de respuesta del sensor fue extremadamente alto para un potencial matricial de -0.4 bares (experimento n° 7). Como ilustración, la Figura 4-18-A muestra el tiempo de respuesta de dos sensores para el suelo Yolo con un potencial matricial de -0.4 bares ($\theta = 0.28 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, Figura 3-2). El descenso de la CE de los sensores a $t = 30$ horas es indicativo de una posible desaturación parcial de la cerámica del sensor. Por lo tanto parece que tanto la sensibilidad al potencial matricial como la falta de contacto parcial entre el suelo y el sensor son los responsables del comportamiento anómalo del mismo. Como era de esperar, la pendiente de la curva del tiempo de respuesta del sensor y el % del cambio total de la CE en la arena a un potencial matricial de -0.4 bares (Figura 4-18-B) es menor que la del suelo Yolo al mismo potencial. Ello es consecuencia de la falta de contacto líquido entre el sensor y la arena (debido a su bajo contenido de agua). Asimismo, otra consecuencia de esta

falta de contacto es la menor desaturación de la cerámica del sensor en la arena que en el suelo Yolo.

Con el fin de evaluar la influencia del aire ocluido en la cerámica del sensor sobre el tiempo de respuesta, se llevó a cabo el pretratamiento B (Cuadro 4-9). En promedio, el tiempo de respuesta de un sensor seco (experimentos 8, 9 y 10) es aproximadamente 14 veces mayor que el de un sensor saturado (experimentos 1, 2 y 3). El cambio del 63 % no se indica, debido al comportamiento poco ortodoxo de las unidades (Figura 4-19): aparentemente, la disolución de las sales precipitadas en el elemento conductor (sales procedentes de soluciones más o menos salinas de experiencias anteriores. La casa fabricante recomienda el no lavado de los sensores con agua destilada) es la responsable del abrupto aumento de la CE durante los primeros minutos; más tarde, la solución de concentración relativamente elevada difunde hacia la más diluida del exterior y la CE disminuye. La forma de la curva depende de la cantidad de sales precipitadas en la cerámica del sensor, de la concentración de la solución externa y del tiempo necesario de saturación de la cerámica. Este último sería el responsable principal de la forma de la curva después de $t = 20$ horas. Por consiguiente, se postula que casi son necesarios 8 días para resaturar un sensor seco. El mismo tipo de curvas se encontró para los suelos saturados (experimentos 9 y 10), con la diferencia de que se necesitaron 15 días para que los sensores se resatura-



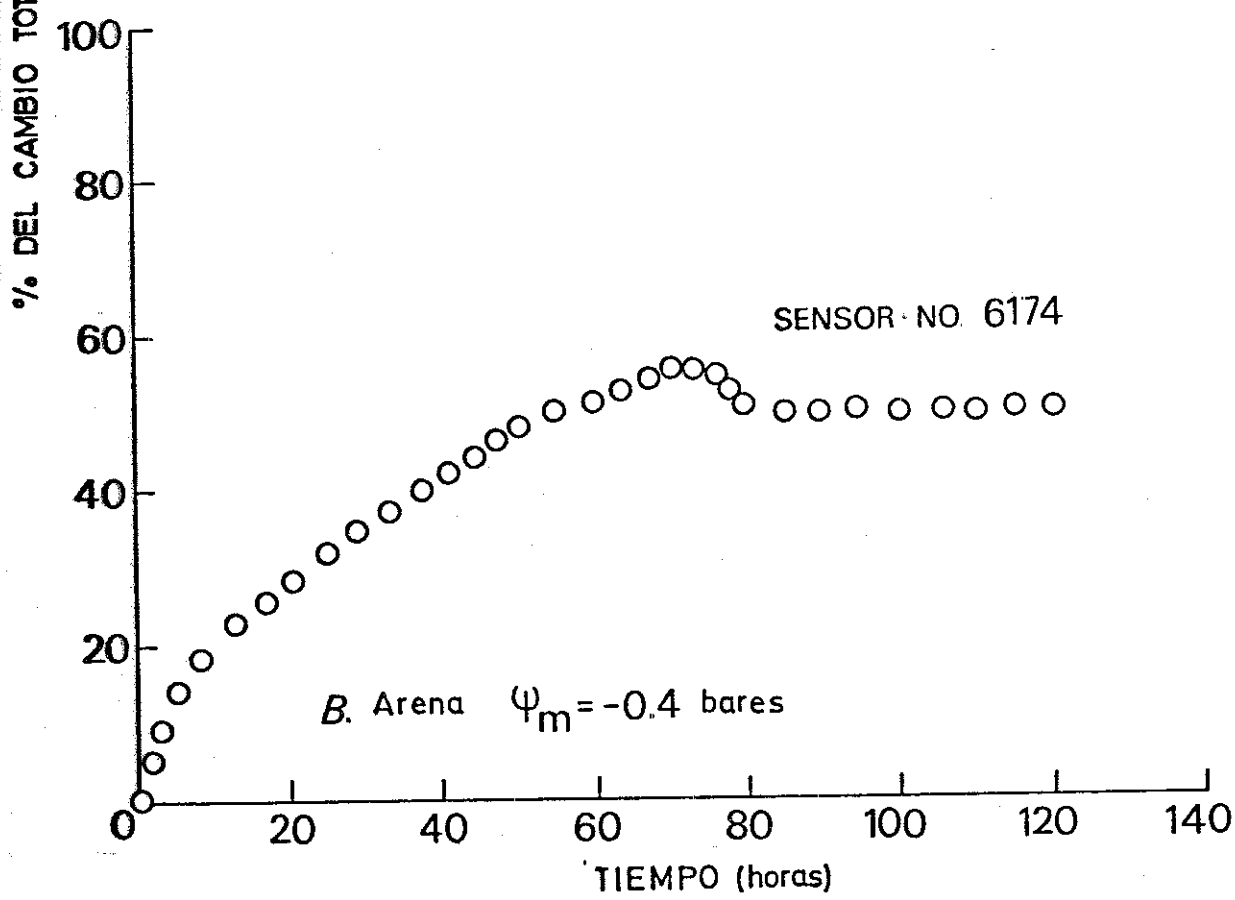
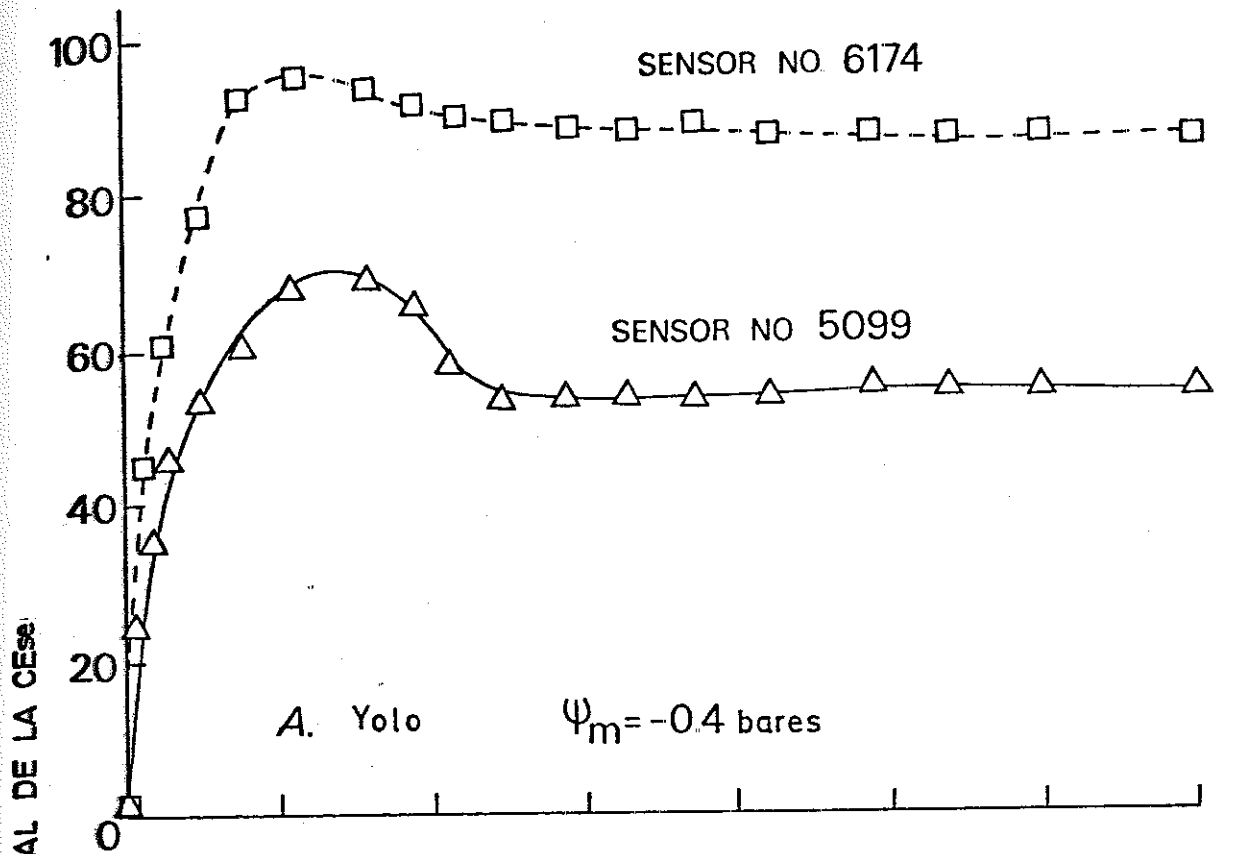


Figura 4-18. Tiempo de respuesta de los sensores en suelos parcialmente saturados. A: suelo Yolo a $\Psi_m = -0.4$ bares. B: arena a $\Psi_m = -0.4$ bares.

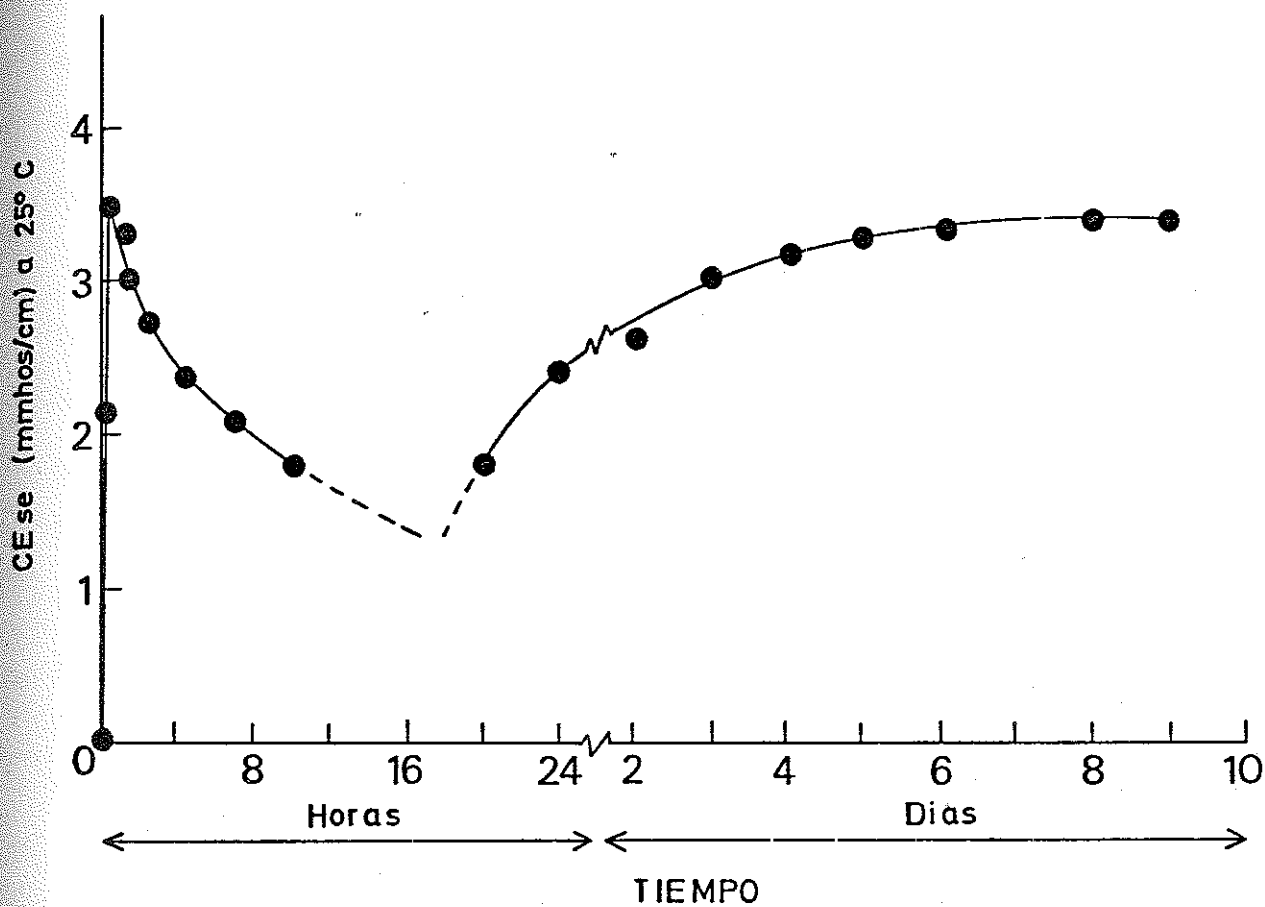


Figura 4-19. Tiempo de respuesta en solución de un sensor secado al aire.

ran y alcanzaran lecturas constantes. Como era de esperar, el tiempo necesario para resaturar los sensores secos colocados en suelos parcialmente saturados (Cuadro 4-9, experimentos 11 y 12) es extremadamente largo. La razón principal para la ausencia de una respuesta del 100 % es la falta de contacto líquido entre el suelo y el sensor. Por lo tanto, se recomienda colocar los sensores en solución antes de su instalación al menos durante diez días; además, si es posible, deben instalarse cuando el suelo tenga un contenido de agua relativamente elevado.

El pretratamiento C (Cuadro 4-9) se efectuó para confirmar la existencia de poros no conductores en la cerámica del sensor. De acuerdo con estos resultados limitados, los cuatro sensores estudiados mostraron un tiempo de respuesta muy alto para el cambio del 100 %, lo que sugiere que todas las unidades tienen poros no conductores en mayor o menor medida. No obstante, estos poros deben permanecer desaturados en condiciones normales de uso, por lo que no participarán en la conducción de corriente eléctrica entre los electrodos, esto es, el comportamiento de los sensores no viene influenciado de forma muy grande por ellos.

La Figura 4-20 muestra la forma de las curvas del tiempo de respuesta para tres de los sensores estudiados. De la misma se deduce que el sensor n° 5094 es inapropiado. Este análisis parece ser un procedimiento adecuado para identificar los sensores con poros poco o no conductores.

Con el fin de evaluar la respuesta del sensor en una situa-

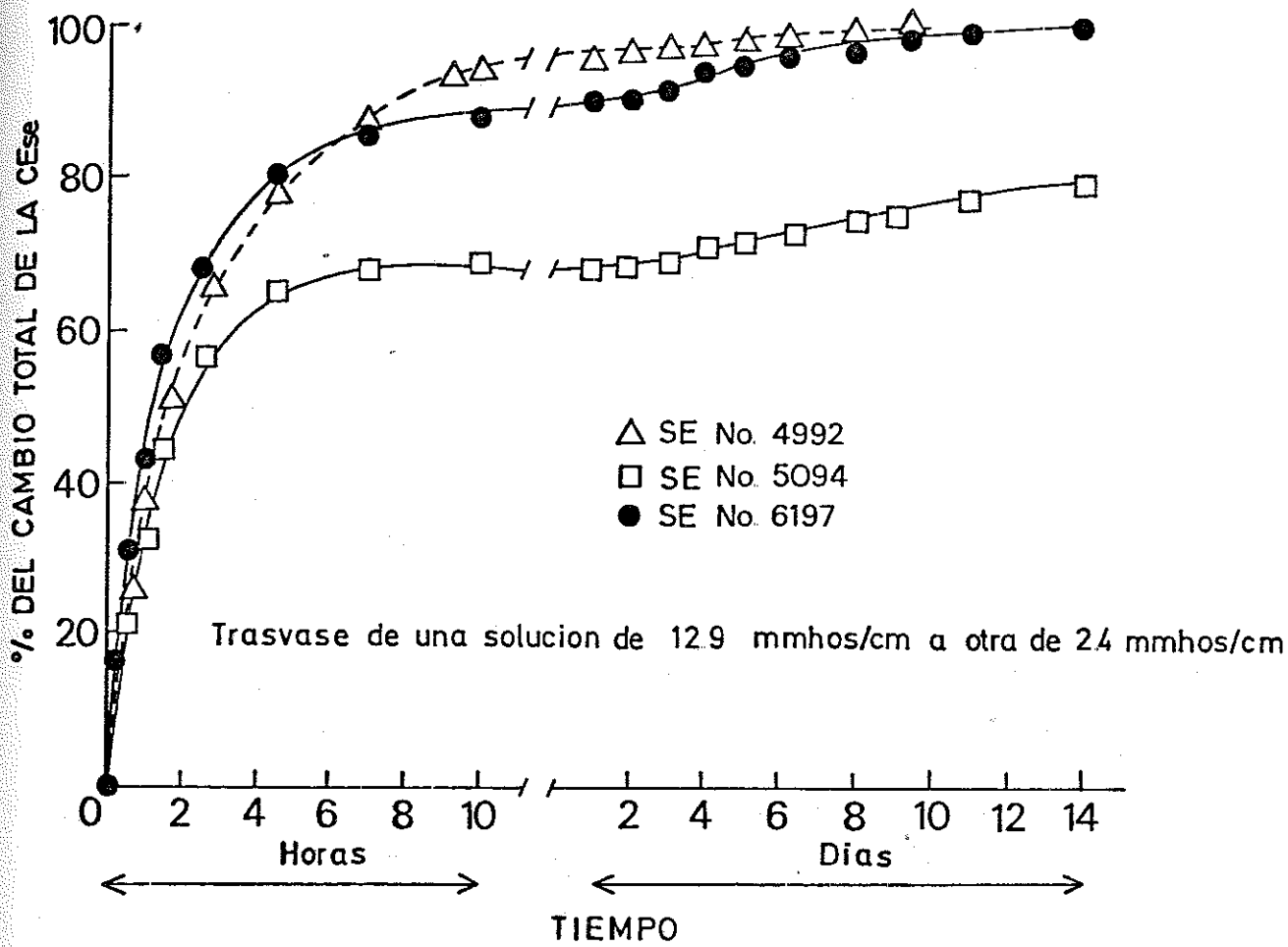


Figura 4-20. Tiempo de respuesta en solución de sensores saturados a vacío.

ción dinámica, similar a la que se llevará a cabo en los experimentos del movimiento de sales en procesos de columna (capítulo 4.2), se diseñó el experimento descrito en la página 107 (procedimiento 2) y esquematizado en la Figura 4-16. La Figura 4-21 muestra la secuencia general de los cambios de CE_{se} (Conductividad Eléctrica del sensor) y CE_{ss} (Conductividad Eléctrica de la solución extraída con la sonda de succión) debida al cambio en la CE de las soluciones impuestas en los cuatro medios porosos (resina catiónica, suelo Yolo, arena:caolinita (2:1 en peso) y arena). En la parte superior de la Figura se indican las CEs de las soluciones impuestas en el sistema. La línea de triángulos de la figura representa la media de las lecturas de cuatro sensores de salinidad. El Cuadro 4-10 muestra el tiempo de respuesta (para un cambio del 63 % del total en la CE_{se} y CE_{ss}) para los cuatro medios porosos estudiados durante los primeros 22 días del experimento. Las Figuras 4-21 y 4-22 muestran que los datos obtenidos con el sensor cuando los cambios en salinidad ocurren durante un período mayor de cuatro días son adecuados para los cuatro medios porosos examinados. Sin embargo, cuando los cambios ocurren en un período menor de cuatro días (días 8 a 11 en el experimento), los sensores en el suelo Yolo y particularmente en la columna de arena:caolinita no son capaces de alcanzar la concentración de equilibrio impuesta y dada por la solución extraída con la sonda de succión.

A partir de las Figuras 4-21 y 4-22, puede hacerse una clara distinción entre la resina y los otros medios porosos. La CE

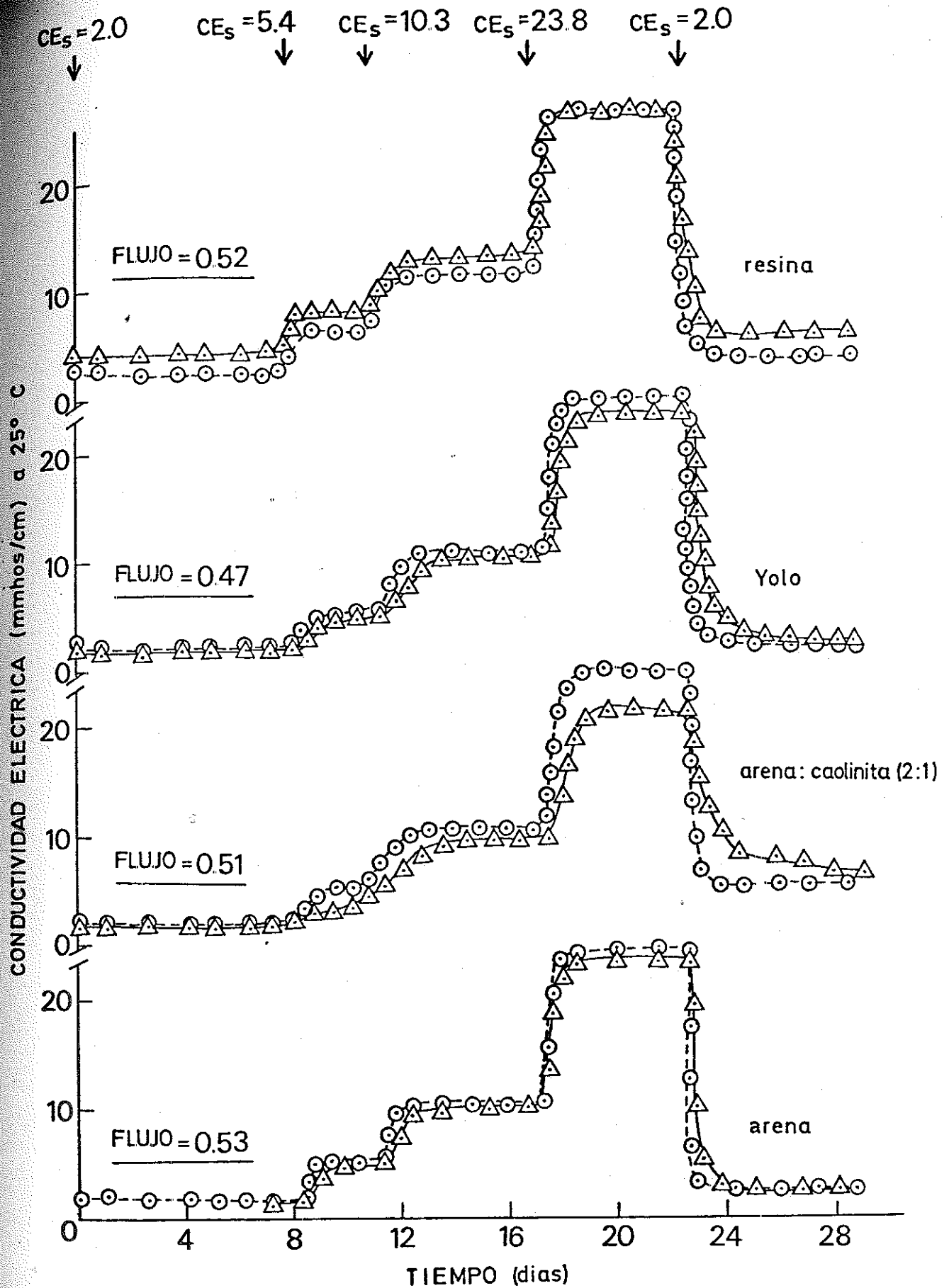


Figura 4-21. Respuesta de los sensores de salinidad (Δ) y de las sondas de succión (\odot) en cuatro medios porosos equi librados consecutivamente con soluciones de $CE_s = 2.0, 5.4, 10.3, 23.8$ y 2.0 mmhos/cm.

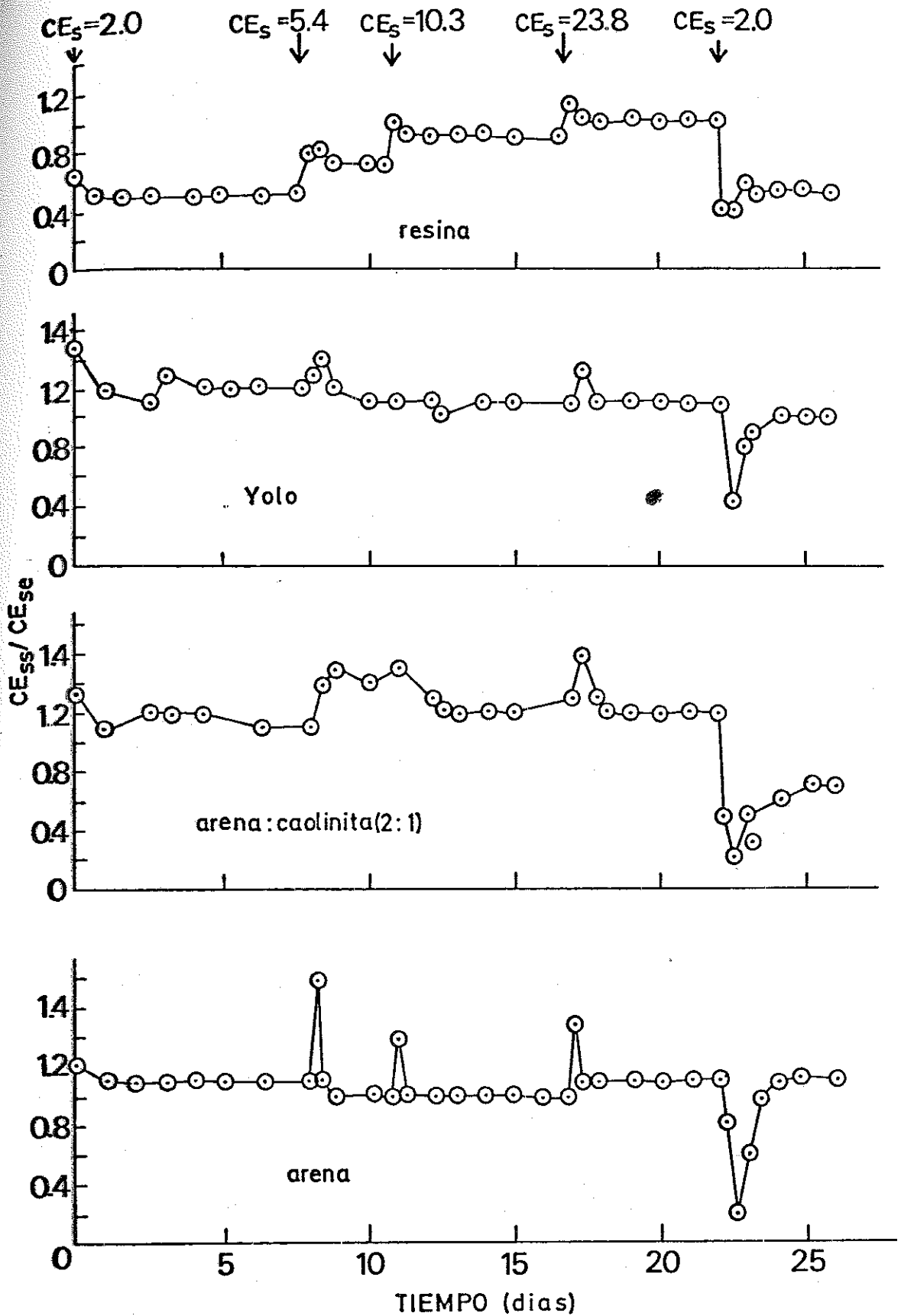


Figura 4-22. Respuesta de los sensores relativa a las sondas de succión (CE_{ss}/CE_{se}) en cuatro medios porosos equilibrados consecutivamente con soluciones de $CE = 2.0, 5.4, 10.3, 23.8$ y 2.0 mmhos/cm.

Cuadro 4-10. Media de los tiempos de respuesta de los sensores y de las sondas de succión en cuatro medios porosos.

Medio poroso	N° de muestras con		Tiempo de respuesta (horas) para un 63% del cambio total	
	SS	SE	Sonda succión (SS) media \pm desv. std.	Sensor salinidad (SE) media \pm desv. std.
Resina	31	4 x 31	1.0 \pm 0.4	2.8 \pm 0.9
Suelo franco Yolo	32	4 x 32	7.5 \pm 0.8	12.0 \pm 3.0
Arena:caolinita (2:1)	30	4 x 30	2.7 \pm 1.0	17.3 \pm 12.0
Arena	30	4 x 30	1.2 \pm 0.1	4.6 \pm 0.4

del sensor en la resina tiene siempre un valor mayor que la de la solución extraída con la sonda de succión, mientras que en las restantes columnas ocurre exactamente lo contrario durante los primeros 22 días del experimento. Esta respuesta puede ser el resultado de la elevada densidad de carga superficial de la resina (capacidad de intercambio catiónico de 10.2 meq/g.). La resina induce una elevada adsorción negativa o exclusión de sales en la interfase líquido-sólido, con una concentración resultante mayor de la solución del suelo con la que el sensor está en equilibrio. Como resultado de la compresión de la doble capa difusa, el efecto de la exclusión de sales disminuye conforme la concentración de la solución impuesta aumenta (Bower y Goertzen, 1955; Bolt y Bruggenwert, 1976), lo cual se refleja en las Figuras 4-21 y 4-22. Una discusión más profunda del efecto de la adsorción negativa sobre el comportamiento del sensor se da más adelante (capítulo 4.1.2.7, "sensibilidad del sensor a la adsorción negativa").

El efecto de la distribución del tamaño de poros de los medios porosos estudiados sobre el comportamiento de los sensores y sondas de succión se refleja en el Cuadro 4-10. Si asumimos que la solución en la cerámica del sensor y la extraída por la sonda son idénticas en el estado de equilibrio, las diferencias en el tiempo de respuesta entre los sensores y las sondas de succión (Cuadro 4-10, columna cuarta) son una indicación del tiempo de respuesta de los sensores en régimen instantáneo. Por consiguiente, los valores obtenidos deberían ser del mismo orden de magni-

tud que los del Cuadro 4-9-A (experimentos 2 y 3); esto es, cualquier valor alejado de aproximadamente 3.5 horas (tiempo de respuesta de los sensores en medio poroso saturado), es una indicación de que lo asumido anteriormente es incorrecto, e indica por consiguiente diferencias reales en la CE del sensor y de la solución extraída con la sonda de succión. Como podíamos esperar, esto queda reflejado claramente en la columna arena-caolinita debido al carácter bimodal del sistema (únicamente predominan partículas de tamaño grande -arena- o pequeño -caolinita-). Mientras que la solución extraída por la sonda de succión puede esperarse que refleje las características de la solución en los poros mayores - (Miller et al., 1965), el sensor refleja su contacto con un rango más amplio de los poros del suelo y por lo tanto reduce el efecto de una falta de equilibrio dinámico entre los poros del suelo. Las extremadamente elevadas desviaciones estandar de las lecturas de los sensores en esta columna pueden ser un reflejo de la falta de homogeneidad del medio poroso, así como diferencias reales en las concentraciones de la solución debido a la distribución de los sensores en la columna (Figura 4-16). Por otro lado, los sensores en la columna de arena dan valores muy próximos a 3.5 horas, debido a su estrecha distribución de tamaño de partículas y superficies relativamente inertes.

4.1.2.6. Sensibilidad del sensor al potencial matricial

A. Procedimiento

Los sensores de salinidad se analizaron para evaluar su sensi

bilidad al potencial matricial del suelo (Ψ_m) por dos procedimientos:

(1) para el rango de Ψ_m relativamente elevado (0 a -0.5 bares) - los sensores se colocaron en un embudo Buchner de 600 ml. (Pyrex No. 36060F, Corning Inc., New York) llenos del material homoiónico poroso preparado anteriormente (página 75). El disco poroso del embudo se saturó previamente con la misma solución utilizada en la preparación del medio homoiónico. El embudo se cubrió con papel de parafina para minimizar la evaporación (Figura 4-23). Inicialmente, los sensores alcanzaron el equilibrio en el suelo saturado. Un Ψ_m definido, correspondiente a la succión aplicada, se impuso entonces en el sistema y se tomaron lecturas del sensor diariamente hasta alcanzar el nuevo equilibrio. El procedimiento se continuó para potenciales decrecientes hasta que se alcanzó el valor de entrada de aire del disco poroso del embudo o hasta que los sensores dieron lecturas fuera de escala ($CE < 1.5$ mmhos/cm.). Debido a la distancia relativamente pequeña entre los sensores y el disco poroso del embudo, el potencial matricial en los sensores se asumió que era el mismo que el impuesto en el disco.

En el caso de los sensores instalados en la arena, después de que su CE disminuyera apreciablemente, se resaturó el medio (día 46) con la misma solución utilizada previamente y se midió el tiempo que el sensor parcialmente desaturado necesitaba para resaturarse y alcanzar de nuevo la CE inicial.

(2) Para el rango de Ψ_m bajo (-1 a -15 bares) los sensores se in-

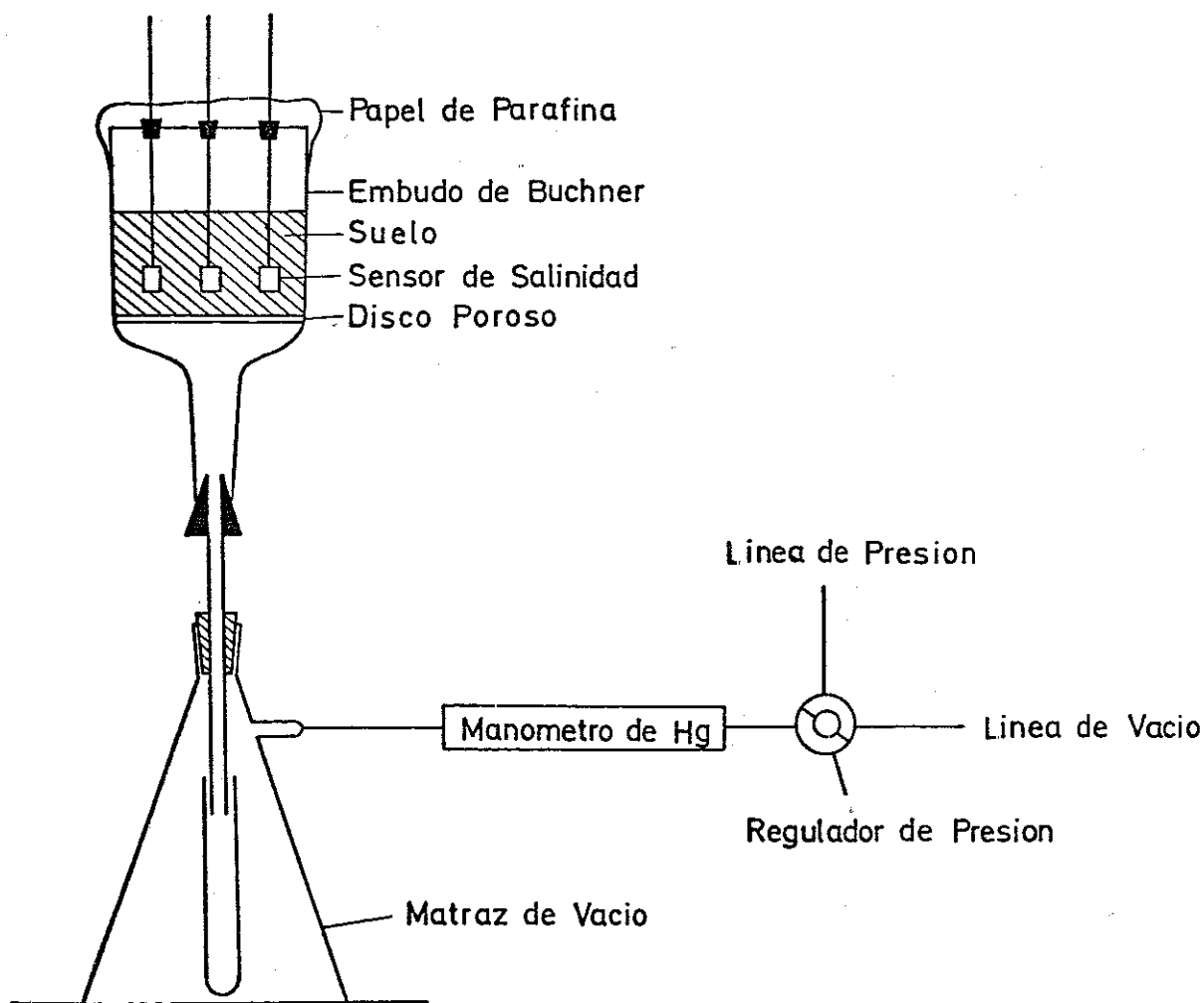


Figura 4-23. Esquema experimental utilizado para medir la sensibilidad del sensor al potencial matricial del suelo. Procedimiento (1): rango de Ψ_m elevado. Este dispositivo se utilizó también en el estudio del tiempo de respuesta del sensor en medios no saturados.

rodujeron en un plato de presión ("aparato de Richards") modificado, instalados en recipientes cilíndricos de plástico de diseño especial que se colocaron sobre el plato cerámico saturado de 15 bares. Asimismo, se colocaron psicrómetros de termopar. Los recipientes se llenaron con los suelos homoiónicos previamente preparados (Figura 4-24).

Después de alcanzarse el equilibrio hidráulico e iónico en el suelo saturado, se midió la resistencia del sensor y se aplicó un incremento de presión al sistema para forzar solución del suelo. Una vez cesado el drenaje del aparato y alcanzadas lecturas de resistencia constantes, se aplicó un nuevo incremento y el procedimiento se continuó para aplicación de presiones consecutivamente mayores.

Debido a la falta de reproducibilidad de los psicrómetros de termopar, los valores obtenidos no se han incluido en la discusión de los resultados.

B. Resultados y discusión

El Cuadro 4-11 resume los resultados obtenidos, expresados en términos de la relación CE_i/CE_s , donde CE_i es la conductividad eléctrica del sensor a diferentes potenciales matriciales y CE_s es la conductividad eléctrica del sensor a saturación. Es evidente que si la respuesta de los sensores es independiente de Ψ_m , esta relación debe tener un valor próximo a la unidad para cualquier potencial matricial del suelo. En el Cuadro 4-11 el símbolo "|" se utiliza para los datos obtenidos en el procedimiento (1) (Figura -

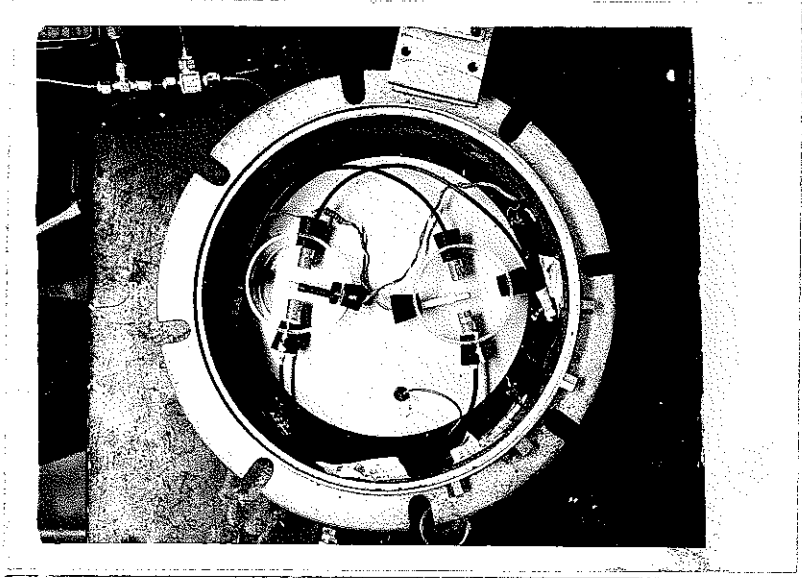


Figura 4-24. Aparato utilizado en la medida de la sensibilidad del sensor al potencial matricial. Procedimiento (2) (bajos Ψ_m).

Cuadro 4-11. CE_i/CE_s relativa de los sensores (CE_i = CE del sensor al ψ_m impuesto; CE_s = CE del sensor a saturación) en función del potencial matricial ψ_m . Cada símbolo | y □ representa un sensor y/o repetición.

ψ_m Bares	CONDUCTIVIDAD ELECTRICA RELATIVA CE_i/CE_s												Procedimiento			
	arena						yolo									
	>1.0	1.0	1.0-0.8-0.6-0.4 <0.4	>1.0	1.0	1.0-0.8-0.6-0.4 <0.4	>1.0	1.0	1.0-0.8-0.6-0.4 <0.4	>1.0	1.0	1.0-0.8-0.6-0.4 <0.4				
0.05																SENSOR. PROCEDIMIENTO (1) (FIG. 4.23) CON PAPEL DE PARAFINA
0.11																SENSOR. PROCEDIMIENTO (1) (FIG. 4.23) CON TEJIDO HUMEDO Y SOBRECUBIERTA DE ALUMINIO
0.22																
0.31																
0.41																
0.49																
0.7																1. Embudo con Disco poroso exp° de elevados ψ_m
1.4																2. Aparato de Presion exp° de bajos ψ_m
1.7																SENSOR. PROCEDIMIENTO (2) (FIG 4.24) PRETRATAMIENTO DE 10 DIAS EN SOLUCION
3.0																SENSOR. PROCEDIMIENTO (2) (FIG 4.24) PRETRATAMIENTO DE SATURACION A VACIO
3.5																
4.0																

4-23) con la cubierta de parafina. El símbolo "[]" se ha utilizado para indicar los datos obtenidos con el mismo procedimiento en el que además de la cubierta de parafina, el embudo se cubrió con un tejido húmedo y una sobrecubierta de aluminio para evitar al máximo la evaporación. Para potenciales matriciales relativamente bajos (-0.7 a -4 bares) se utilizó el aparato de presión modificado. Para este procedimiento se dan dos símbolos en el Cuadro 4-11, y se refieren a los sensores equilibrados durante diez días en solución antes de ser colocados en suelo saturado (símbolo "|") y a los sensores saturados a vacío (símbolo "[]").

Las diferencias en el comportamiento de los sensores en la arena y en el suelo Yolo a igualdad de Ψ_m (procedimiento (1), símbolo "|") sugieren que el potencial matricial del suelo no es la única variable a considerar en la interpretación de los resultados. Considerando la posibilidad de que pudiera producirse algo de evaporación en el embudo - al que la arena sería mucho más sensible en términos de Ψ_m que el suelo Yolo - los embudos llenos de arena se cubrieron con un tejido humedecido y una sobrecubierta de aluminio para prevenir la evaporación al máximo. Las Figuras 4-25 y 4-26 muestran la secuencia de los cambios de la conductividad eléctrica del sensor con potenciales matriciales del suelo de crecientes para la arena y para el Yolo, respectivamente. A $t = 45$ días (Figura 4-25) la arena se resaturó con la misma solución utilizada anteriormente. El punto 1 en la Figura 4-26 indica el punto en que se sobrepasó el valor de entrada de aire del disco poroso del embudo (día 48). Por consiguiente, el Ψ_m del suelo des

pués de este día era probablemente mucho más bajo que el teóricamente impuesto (-0.57 bares) debido al secado del suelo por evaporación. Por ello, los descensos en la CE_{se} después del día 28 no se han computado en el Cuadro 4-11.

Aunque las diferencias en el comportamiento del sensor para ambos suelos fueron menores cuando los embudos llenos de arena se cubrieron con tejido húmedo y sobrecubierta de aluminio, es aparente que mientras los sensores en el suelo Yolo permanecen saturados ($CE_i/CE_s = -1$) para potenciales matriciales del suelo del orden de -0.4 bares (Figura 4-26), los mismos sensores en la arena muestran un descenso significativo en las lecturas de conductividad eléctrica para los mismos niveles de potencial matricial del suelo (Figura 4-25). Las razones de estas diferencias no son claras, pero parece que la falta de contacto relativo entre la arena y el sensor (debido al bajo contenido de agua de la arena a estos potenciales matriciales), junto con la posibilidad de que la solución estuviera en mayor o menor medida evaporándose de la superficie del sensor pueden ser consideraciones importantes. El hecho de que el tiempo necesario para que los sensores alcancen los valores de CE a saturación cuando la arena se resaturó (Figura 4-25, día 46) sea más de 6 días, sugiere que la desaturación de la cerámica del sensor ocurrió efectivamente, porque estos elevados tiempos de respuesta son del orden de los encontrados para un sensor seco (206 ± 47 horas).

Los resultados obtenidos en el aparato de presión fueron aparentemente opuestos a los encontrados en el embudo de disco poro-

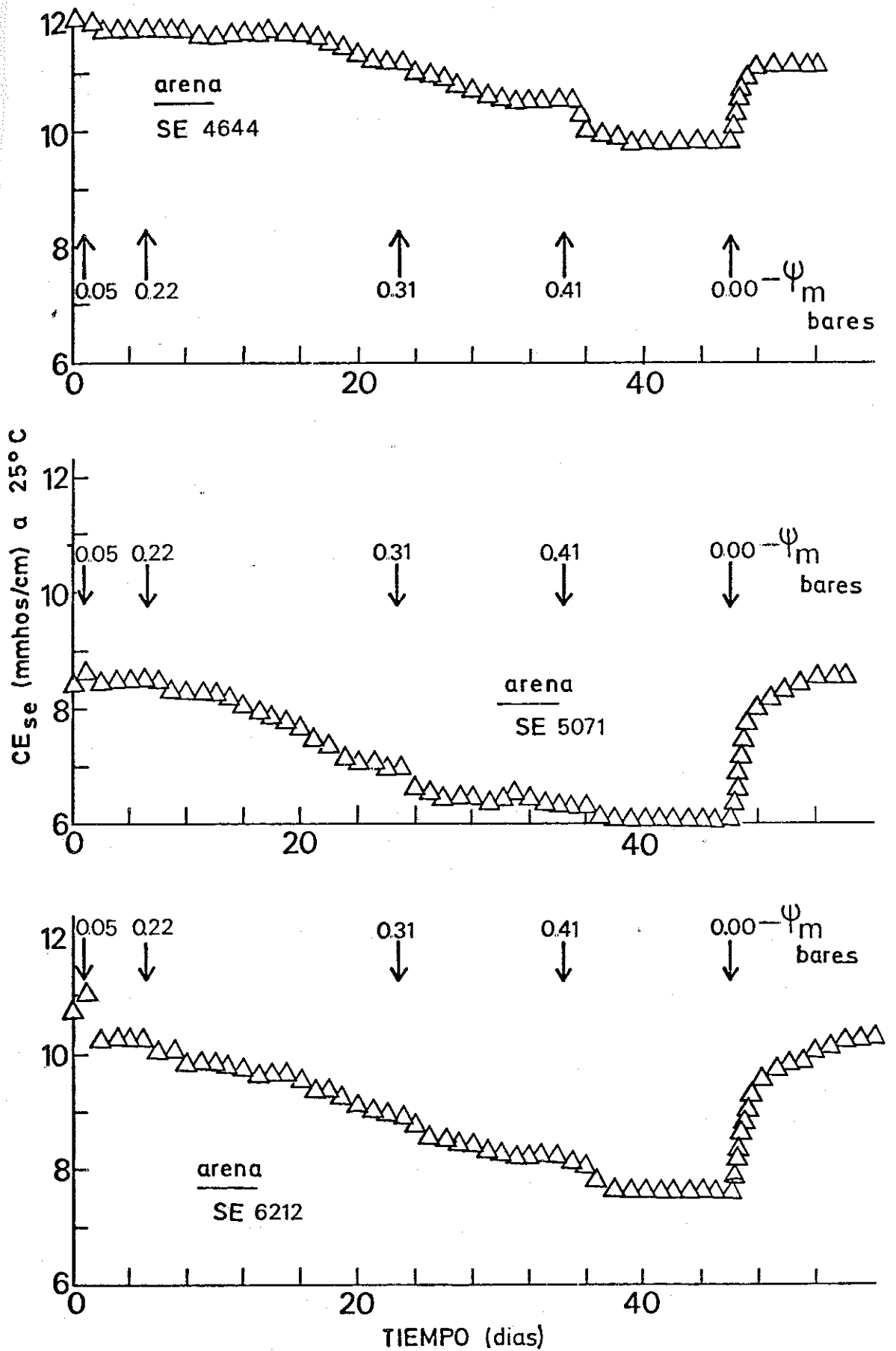


Figura 4-25. Secuencia de los cambios de la CE del sensor con Ψ_m decrecientes en la arena. Las flechas indican el potencial matricial impuesto. En el día 46, la arena se resaturó ($\Psi_m = 0.00$).

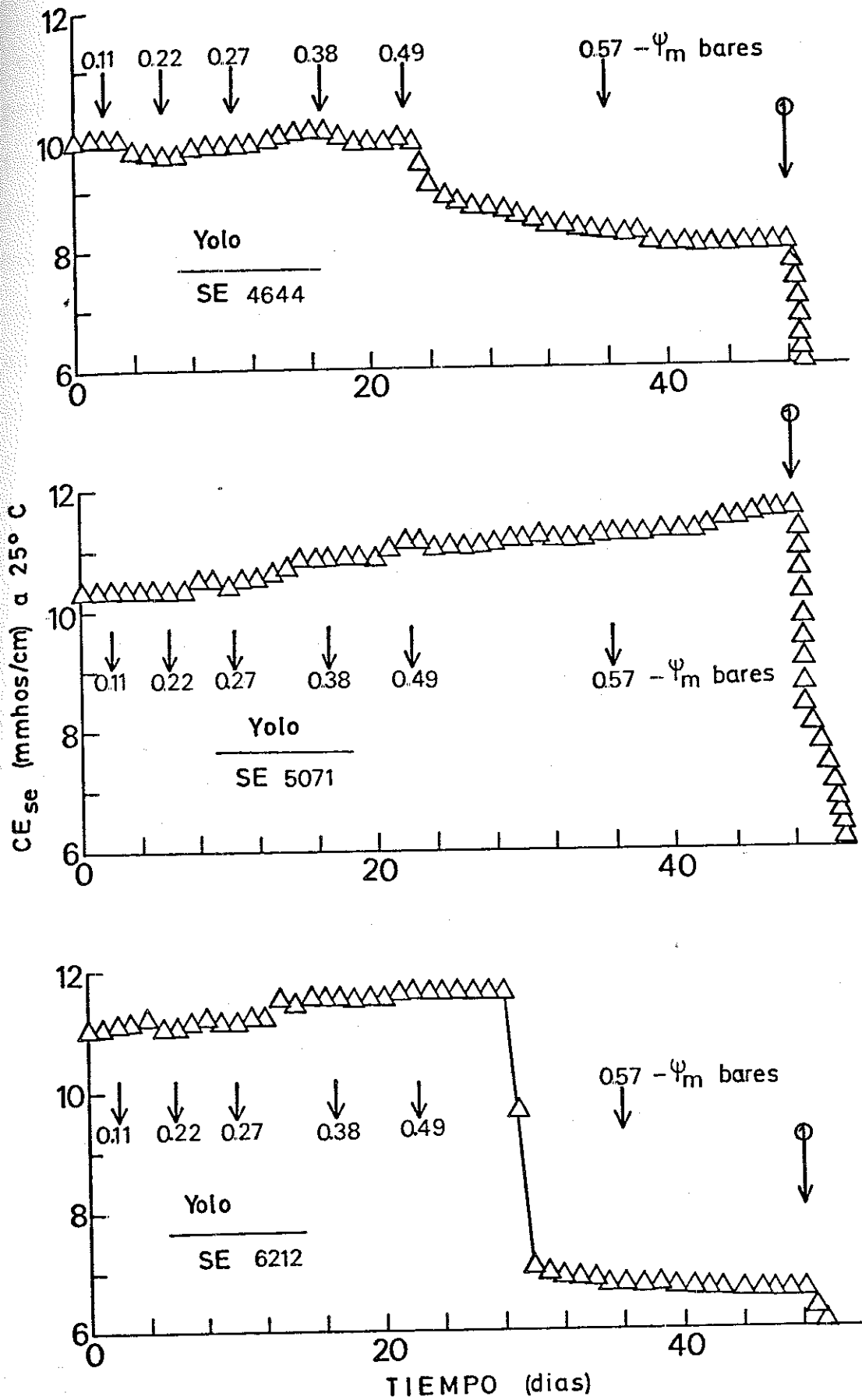


Figura 4-26. Secuencia de los cambios de la CE del sensor con Ψ_m decrecientes en el suelo franco Yolo. Las flechas indican el potencial matricial impuesto. En el día 48 (punto 1) se sobrepasó el valor de entrada de aire del disco poroso del embudo.

so: en la arena, la conductividad eléctrica del sensor aumentó con la presión aplicada, mientras que en el caso del Yolo ocurrió lo contrario. La explicación de este hecho puede ser que un aumento en la presión aplicada origina una disminución del volumen de las burbujas de aire potencialmente presentes en el elemento conductor del sensor (lo cual tiende a disminuir la resistencia del mismo) y, aunque el potencial matricial del suelo desciende a un valor igual al de la presión aplicada, la falta de contacto entre la arena y el sensor (debido a un contenido de agua de la arena relativamente bajo) hace que las unidades sean insensibles a este descenso y, por lo tanto, el efecto neto es el aumento de la CE. Por otro lado, los sensores en contacto con el suelo Yolo son sensibles a ambos fenómenos y el resultado neto es un descenso en la conductividad eléctrica del sensor conforme la presión aplicada aumenta. Esta hipótesis se confirma al observar el comportamiento de los sensores que fueron previamente saturados a vacío (Cuadro 4-11): los valores de CE_i/CE_s para las unidades en contacto con la arena permanecen casi constantes a valores iguales a 1, mientras que la CE_i en el Yolo disminuye más drásticamente que antes.

En conclusión, el comportamiento de los sensores de salinidad en suelos parcialmente saturados viene influenciado por:

1) contenidos de agua relativamente bajos ($\theta < 0.05 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) que resultan en la falta de contacto entre el suelo y las unidades, y por consiguiente las hace insensibles a cambios en la conductividad eléctrica de la solución del suelo.

2) potenciales matriciales del suelo relativamente bajos - - ($\Psi_m < -1$ bar) que resultan en una falta de fiabilidad para medir la conductividad eléctrica de la solución del suelo, debido a la desaturación parcial de la cerámica del sensor.

4.1.2.7. Sensibilidad del sensor a la adsorción negativa

Es bien sabido que el fenómeno de adsorción negativa depende básicamente (entre otros factores) de la capacidad de intercambio catiónico de un medio poroso. Por ello, la sensibilidad del sensor a este fenómeno se evaluó en sistemas con un amplio rango de capacidades de intercambio catiónico, a través de la preparación de medios porosos de diferentes relaciones montmorillonita (CIC = 1.1 meq/g) : caolinita (CIC = 0.05 meq/g) que, una vez homogeneizadas, se saturaron y equilibraron con soluciones de NaCl de concentraciones conocidas, con una relación constante arcilla:solución de 0.1:1 (gramo:ml) (Cuadro 4-12).

Los sensores de salinidad se colocaron en mezclas de montmorillonita:caolinita sucesivamente mayores y con un contenido en sales constante. Se tomaron las lecturas del sensor para cada sistema una vez alcanzado el equilibrio. Simultáneamente se determinaron las conductividades eléctricas de las soluciones extraídas con las sondas de succión. El mismo procedimiento se repitió en la dirección opuesta, esto es, desde relaciones de montmorillonita:caolinita bajas a elevadas.

Cuadro 4-12. Medios de diferentes relaciones montmorillonita:caolinita a tres niveles de CE de soluciones de NaCl, utilizadas para medir la sensibilidad del sensor a la adsorción negativa.

#	CE (mmhos/cm) sol. NaCl	% montmorillonita	% caolinita
1	2.3	0	100
2	2.3	5	95
3	2.3	10	90
4	2.3	30	70
5	2.3	70	30
6	2.3	100	0
7	6.5	0	100
8	6.5	5	95
9	6.5	10	90
10	6.5	30	70
11	6.5	70	30
12	6.5	100	0
13	12.9	0	100
14	12.9	5	95
15	12.9	10	90
16	12.9	30	70
17	12.9	70	30
18	12.9	100	0

La Figura 4-27 muestra los resultados obtenidos. La parte A se refiere a la CE medida en la solución extraída con la sonda de succión. La parte B se refiere a los valores de la CE de los sensores colocados en medios de capacidad de intercambio catiónico sucesivamente mayores y la parte C a la de los colocados en medios de capacidad de intercambio catiónico sucesivamente menores.

Sólo pueden darse resultados limitados debido a las dificultades siguientes presentadas en el curso de este experimento:

1) La relación arcilla:solución de 0.1:1 (g:ml) fue demasiado elevada en el caso de la bentonita al 100 % (capacidad de intercambio catiónico de 110 meq/100 g) y la suspensión resultante fue tan densa que las lecturas del sensor no fueron consistentes, probablemente debido a la falta de contacto entre el sensor y la solución externa. Asimismo, el tiempo necesario para extraer solución suficiente con la sonda de succión fue de más de 5 horas, produciéndose la evaporación de la solución recogida en el tubo. En consecuencia, los valores del sistema de bentonita al 100 % no se han presentado.

2) El tiempo necesario para que se equilibraran los sensores con los diferentes sistemas arcillosos fue extremadamente elevado, especialmente para las suspensiones de menor concentración salina y de menor CIC (tiempos de equilibrio de hasta 40 días). Debido a limitaciones de tiempo, no fue posible realizar repeticiones en este experimento.

3) En algunos casos se encontró una importante contaminación en la solución extraída con las sondas de succión. Con el fin de mi

nimizarla, las sondas se lavaron con 100 ml. de agua destilada y se dejaron secar al aire; entonces se extrajeron porciones sucesivas de 5 ml. por medio de la aplicación de vacío a la sonda sumergida en el sistema en estudio. Por este procedimiento, se encontró que, en general, los primeros 5 ml. de solución extraída eran menos concentrados que las porciones sucesivas, probablemente debido al agua destilada remanente en los poros de la sonda. Los valores que se dan en la figura corresponden a la tercera porción extraída del electrolito, que en general era próxima a la segunda porción extraída.

Teniendo presentes estas limitaciones, los resultados obtenidos (Figura 4-27) sugieren claramente la importancia del efecto de la adsorción negativa sobre el comportamiento del sensor. La adsorción negativa de aniones o exclusión de sales (Reitemeyer, 1946; Scofield, 1947; Babcock, 1963) resulta de un déficit en la concentración de aniones en la zona próxima a la superficie con carga negativa de las partículas del suelo que implica un incremento en la concentración de la solución del suelo en zonas más alejadas de la superficie. De acuerdo con la teoría de la doble capa (Babcock, 1963), confirmada experimentalmente (Bower y Goertzen, 1955; De Haan, 1965), la exclusión de sales aumenta con la capacidad de intercambio catiónico, con el incremento en la superficie específica del suelo y con el descenso en la concentración del electrolito. Consecuentemente, la concentración de la solución en la cerámica del sensor, que está en equilibrio con la solución del suelo, aumentará de la misma manera. Los datos que se muestran en la Figura 4-27 están de acuerdo con la descripción anterior.

Acerca de los resultados obtenidos, pueden señalarse los siguientes puntos de interés:

1) La pendiente de las curvas de los sensores es mayor que la correspondiente de las sondas de succión, excepto para la concentración electrolítica más alta. Esto sugiere que, bajo nuestras condiciones experimentales, la solución extraída por la sonda de succión pertenece a una región relativamente más próxima a la superficie de la arcilla (en otras palabras, es relativamente menos concentrada) en comparación con la solución con la que los sensores están en equilibrio. Como era de esperar, las pendientes son similares para el nivel de concentración mayor ($CE_s = 12.9$ mmhos/cm), ya que el efecto de exclusión de sales es de una importancia relativa mucho menor. La gran superficie de la sonda de succión comparada con la del sensor, así como el nivel de vacío aplicado para extraer la solución pueden también ser de significación en la explicación de estas diferencias.

2) Aunque pequeñas, las diferencias en el comportamiento de los sensores cuando se movieron en el sentido de incrementos de CIC y en el opuesto (casos B y C), pueden ser importantes. Parece como si la historia del sensor tuviera que considerarse, aunque deben realizarse más trabajos para dilucidar su significación.

3) Las relaciones CE_{se}/CE_s son menores que la unidad para los sistemas de más baja capacidad de intercambio catiónico. Aunque pueden contribuir a este comportamiento diversas razones, como la posibilidad de una adsorción específica del ion cloruro en

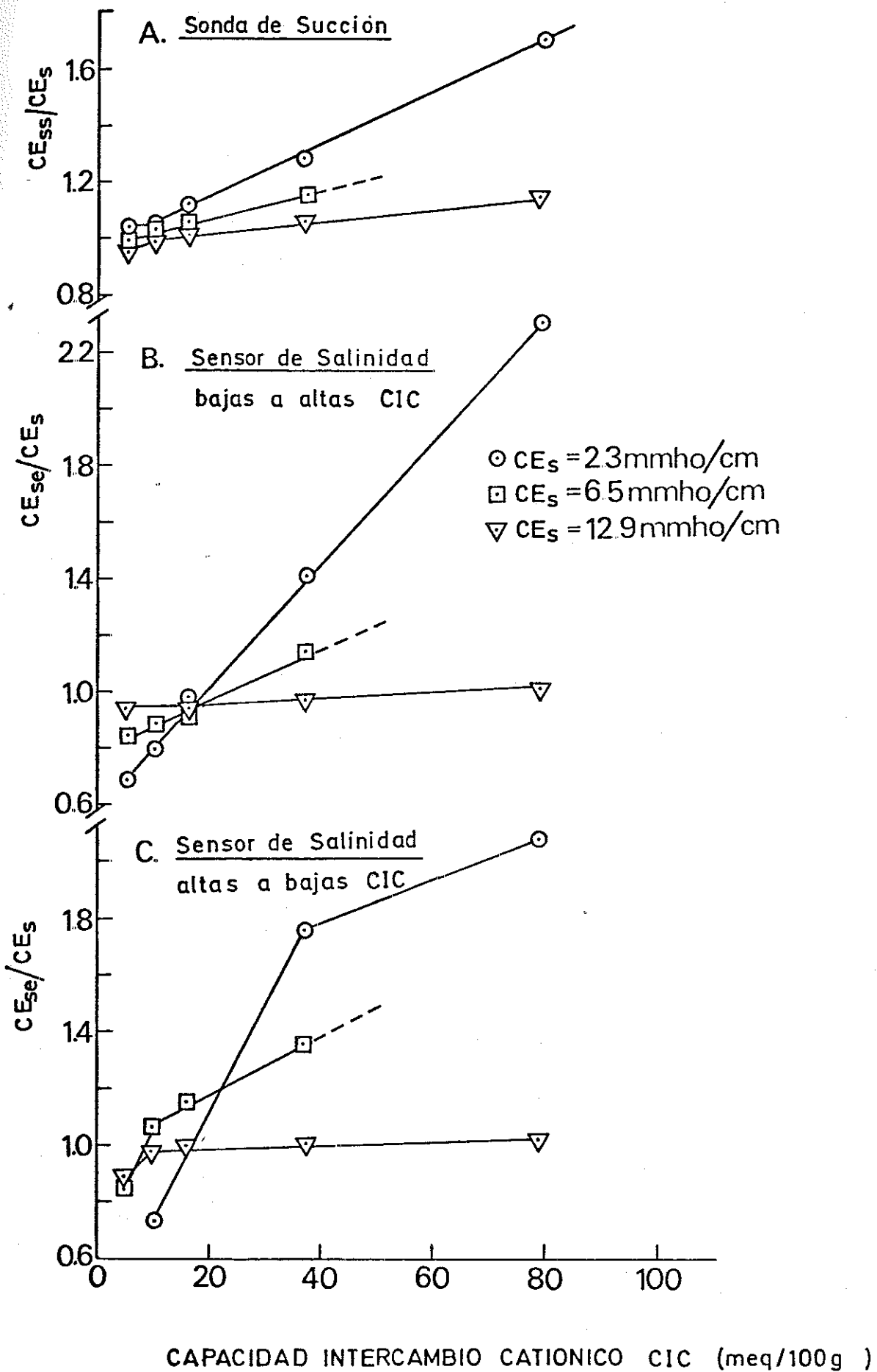


Figura 4-27. CE relativa de los sensores (CE_{se}/CE_s) y de las sondas de succión (CE_{ss}/CE_s) para diferentes relaciones montmorillonita:caolinita y tres niveles de CE_s de la solución del medio poroso.

la alumina expuesta de las superficies de caolinita (Bolland et al., 1976) o la presencia de trazas de agua en este mineral, una razón importante podría ser la existencia de una exclusión de sales por parte de la cerámica del sensor, que actuaría como una tamización de sales en la dirección opuesta a la exclusión de sales de los sistemas de arcilla mencionados anteriormente. En los sistemas de menor CIC la importancia relativa de la tamización de sales de la cerámica del sensor sería mayor y por consiguiente la concentración de la solución en la cerámica descendería en relación con la externa al sensor. Esto justificaría los valores menores de la unidad de CE_{se}/CE_s . Este fenómeno parece tener una significación menor en la sonda de succión, como podía esperarse debido al mayor tamaño relativo de los poros en la sonda comparada con los del sensor. La conclusión sería que la cerámica del sensor no es tan inerte como podía pensarse, y que muestra propiedades de superficie que pueden ser significativas en ciertas circunstancias. Esto tendría implicaciones importantes en términos de las interacciones en la interfase líquido-cerámica del sensor y plantea preguntas adicionales que deberían dilucidarse para un mejor entendimiento de las ventajas y limitaciones de los sensores de salinidad.

4.1.2.8. Sensibilidad del sensor a la temperatura

Tanto para completar el estudio del sensor como por su posterior aplicación en los experimentos en columnas de suelo, se evaluó la precisión del elemento termistor para medir la temperatura, que afecta indirectamente a los valores de CE expresados a 25° C.

Se colocaron un conjunto de 6 sensores en un baño de temperatura constante y se realizaron lecturas de la resistencia del termistor con el tiempo. La temperatura del baño se midió con un termómetro electrónico de alta sensibilidad (Omega Eng., Inc., Stamford, Conn.) y un termopar de cobre-constantan, tipo 3624T.

Una vez medida la resistencia del termistor, la temperatura correspondiente a ella se determinó de acuerdo con las especificaciones dadas por el constructor,

El Cuadro 4-12 muestra la media de los valores obtenidos para seis temperaturas diferentes del baño, y la Figura 4-28 muestra el tiempo de respuesta necesario para alcanzar la temperatura impuesta.

El tiempo de respuesta (63 % del cambio total) es de 0.9 minutos y el tiempo de respuesta total es de 4 minutos (Figura 4-28), con una precisión estimada de $\pm 0.3^{\circ}$ C (Cuadro 4-13). Con base a estos datos, se concluyó que el termistor es muy preciso para medir la temperatura en el rango de 10 a 35° C y su tiempo de respuesta es bajo. Por consiguiente, los sensores de salinidad pueden ser utilizados de forma satisfactoria para medir temperatura, una ventaja que se ha omitido frecuentemente en la bibliografía sobre el sensor.

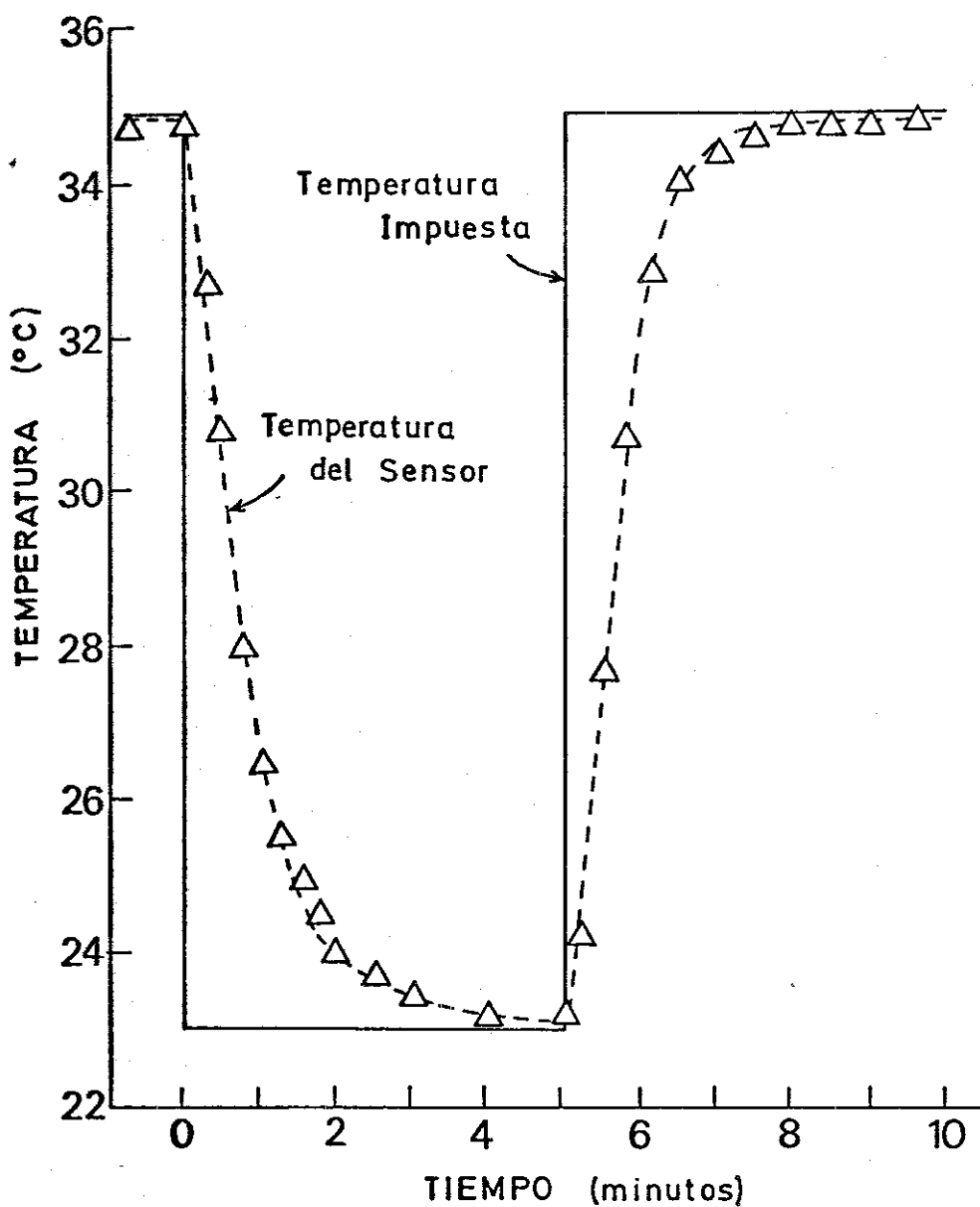


Figura 4-28. Tiempo de respuesta del termistor del sensor.

Cuadro 4-13. Precisión de la temperatura medida por el termistor del sensor. Valores medios de seis sensores.

Temperatura media del baño	10.3	18.4	22.7	26.5	29.6	34.9
Temperatura media de los sensores	10.8 ± 0.21	18.5 ± 0.12	22.7 ± 0.14	26.3 ± 0.28	29.3 ± 0.08	34.4 ± 0.08
Diferencia T (sensor - baño)	+ 0.5	+ 0.1	0.0	- 0.2	- 0.3	- 0.5

4.2. Estudios en columna: procesos de ascenso capilar y lavado

4.2.1. Dinámica de la salinización por capa freática de nivel constante

4.2.1.1. Experimento IA: Ascenso sin evaporación

Relaciones suelo-agua

El proceso de ascenso capilar consiste en el desplazamiento, más o menos parcial, del aire y solución residentes en los poros del suelo, por una solución infiltrante que se abastece de una capa freática estacionaria.

Este proceso se realizó en una columna de suelo, según el procedimiento descrito en el capítulo 3 (Figura 3-6). La Figura 4-29 muestra el perfil de densidad aparente del suelo en la columna (obtenido por atenuación de rayos gamma) que indica el grado de uniformidad de empaquetamiento del mismo.

En la Figura 4-30 se presenta la evolución ascendente del frente húmedo en función del tiempo transcurrido desde el inicio de la infiltración ($t = 0$) y en función del volumen acumulado (cm^3) de solución infiltrada. Se observa que la solución alcanzó la superficie del suelo en 15.7 días, y que la velocidad de ascenso disminuyó paulatinamente con el tiempo debido básicamente al descenso en el gradiente de potencial del agua en el suelo. Por otro lado, la linealidad de la relación altura del frente húmedo-volumen infiltrado es una indicación indirecta de la homogeneidad de la columna.

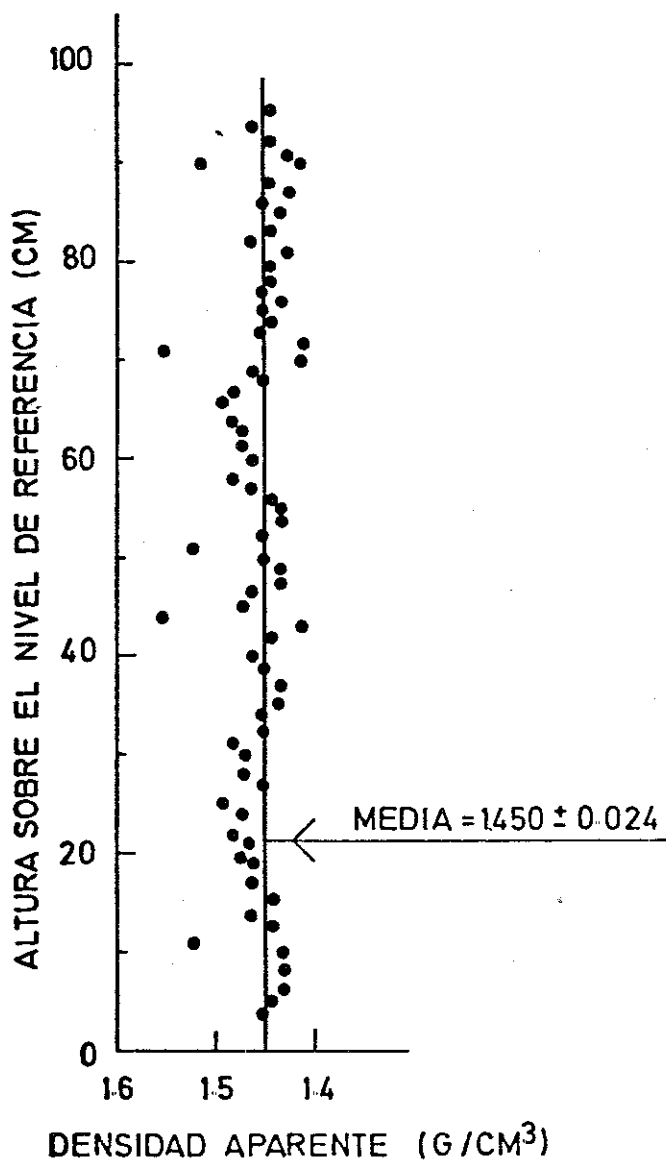


Figura 4-29. Perfil de densidad aparente medida con el aparato de rayos gamma antes del inicio del experimento - IA (ascenso sin evaporación).

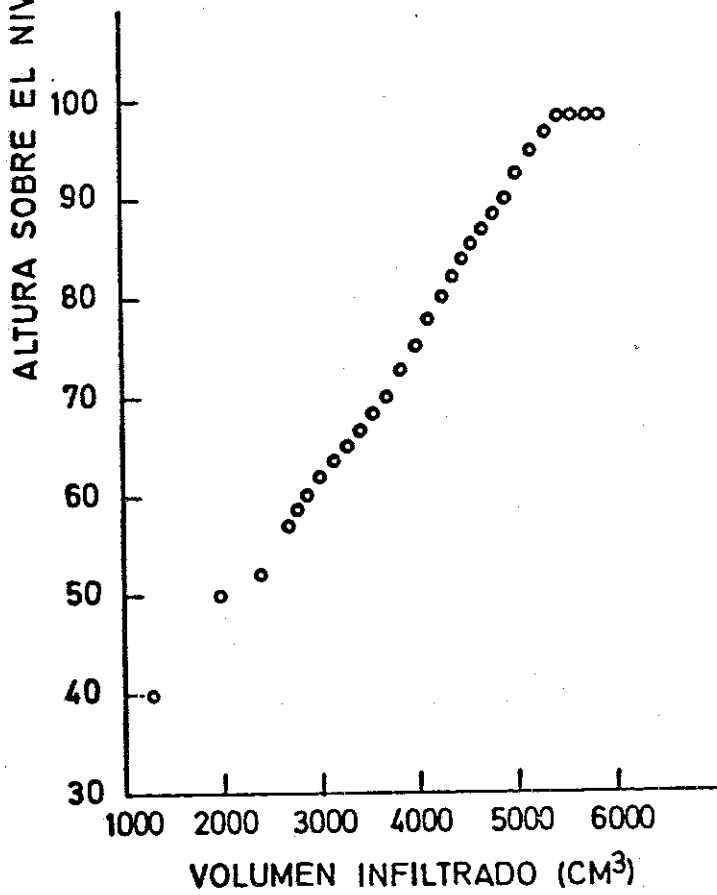
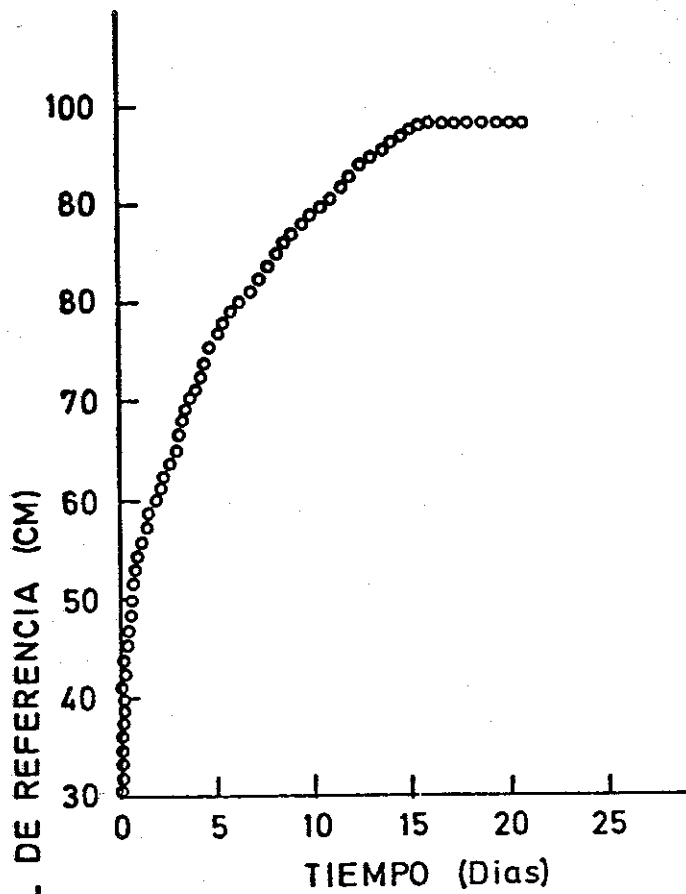


Figura 4-30. Evolución del frente húmedo ascendente en función del tiempo y del volumen acumulado de solución infiltrada en la columna (experimento IA, ascenso sin evaporación).

El volumen total de solución infiltrado en la columna fue de 6998 cm³. Dado que el volumen inicial de la solución del suelo en la columna era de 767 cm³ y que se extrajeron un total de 1120 cm³ por las sondas de succión, el volumen neto de solución en la columna al final de la experiencia es de 6645 cm³.

Por otro lado, el volumen de poros (VP) - porción del volumen total de la columna (VT) no ocupada por la matriz del suelo (VM) puede estimarse de la siguiente relación:

$$VP = VT - VM = \frac{\text{g. suelo en la columna}}{\rho_b} - \frac{\text{g. suelo en la columna}}{\rho_p} =$$

$$= \frac{27280}{1.45} - \frac{27280}{2.65} = 8520 \text{ cm}^3$$

donde ρ_b es la densidad media aparente del suelo en la columna (Fig. 4-29) y ρ_p es la densidad de partículas.

Por lo tanto, la fracción del volumen de poros ocupados por solución al final de la experiencia es del 78 % (100 x 6645 : 8520). Esto es, a pesar de la distancia relativamente corta de la capa freática a la superficie del suelo (≈ 90 cm.), todavía hay un 22 % del volumen total de poros ocupados por aire que pueden actuar como fuentes o sumideros de sales del sistema. Este hecho deberá tenerse en cuenta en la interpretación de los resultados obtenidos en este experimento y en el del posterior lavado de la columna (experimento II).

La variación del perfil de potencial matricial con el tiempo

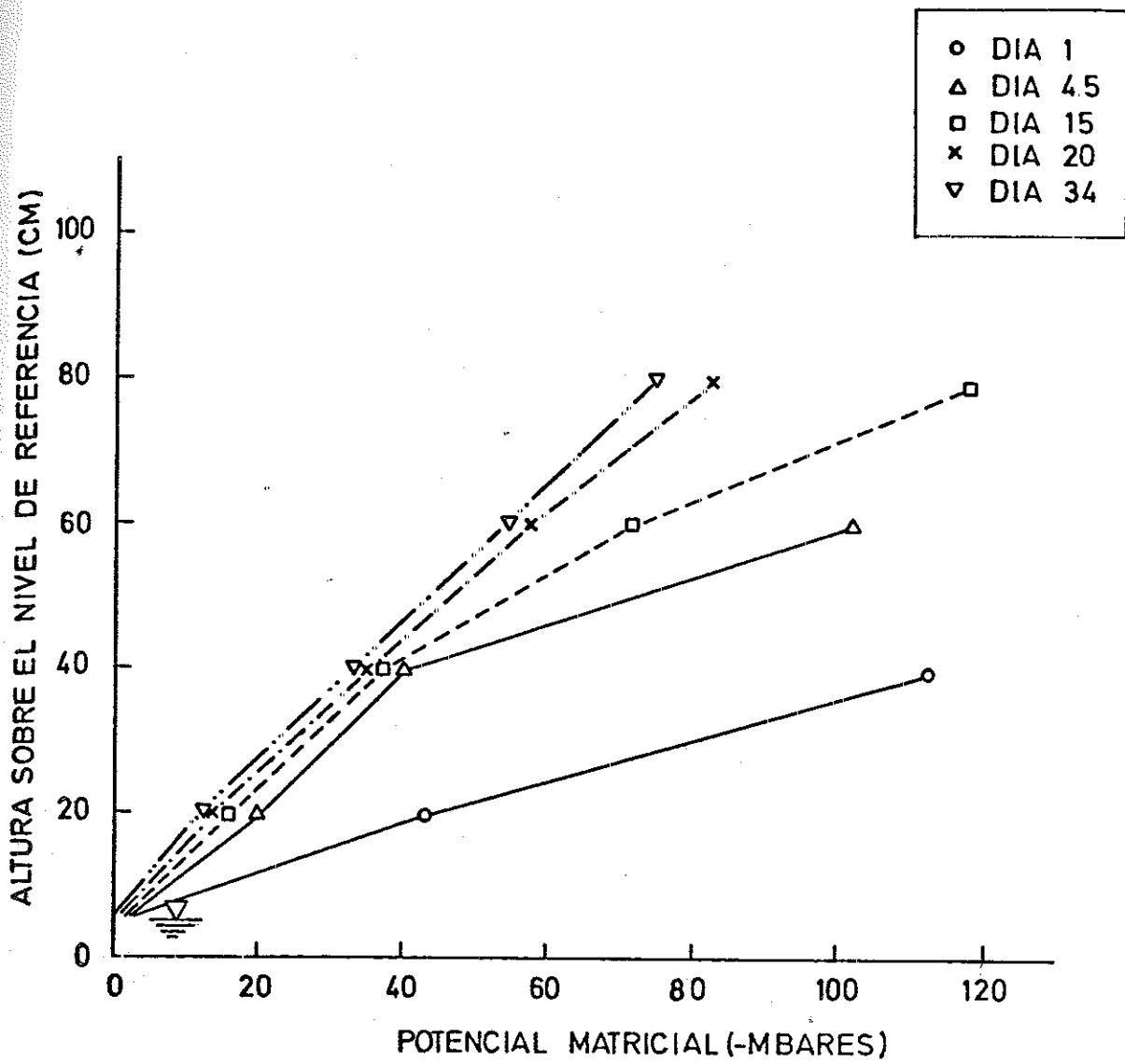


Figura 4-31. Evolución del perfil del potencial matricial (columna IA, ascenso sin evaporación).

(Figura 4-31) muestra que hasta el día 20 aproximadamente no se alcanzó una situación de cuasi-equilibrio en la columna. (Como ya se indicó en el capítulo 3 (Material y Métodos) las lecturas de los tensiómetros fueron siempre previas a la extracción con sondas de succión).

El perfil de Ψ_m en el día 34 muestra una situación de equilibrio hidráulico, indicado por su linearidad y por los valores de Ψ_m a cada altura. Así, teniendo en cuenta que la altura de la capa freática en la columna es de 5.5 cm., los valores de Ψ_m a cada altura coinciden con las mismas (descontados los 5.5 cm.), como era de esperar en una situación de equilibrio y en ausencia de evaporación en la superficie del suelo. Dado que esta situación de equilibrio se llevaba manteniendo desde aproximadamente el día 29, se dio por concluido el experimento IA en el día 34 y se inició el experimento II (capítulo 4.2.2).

Composición de la solución inicial residente del suelo

A partir del análisis químico del suelo (Cuadro 3-1) se estimó la composición real de la solución del suelo a su contenido de humedad inicial ($\theta_m = 2.81 \%$). Para ello se aplicó el modelo de Oster y Dell'Osso (1), que está basado en el cálculo numérico del equilibrio intercambio iónico-pares iónicos-sales solubles para diferentes humedades. Desafortunadamente, el modelo sólo fue capaz

(1) Oster y Dell'Osso (1976). Change in ionic composition of water and exchange complex as a result of change in water content. - Comunicación personal. Se agradece al Dr. J.D. Oster la realización de este análisis.

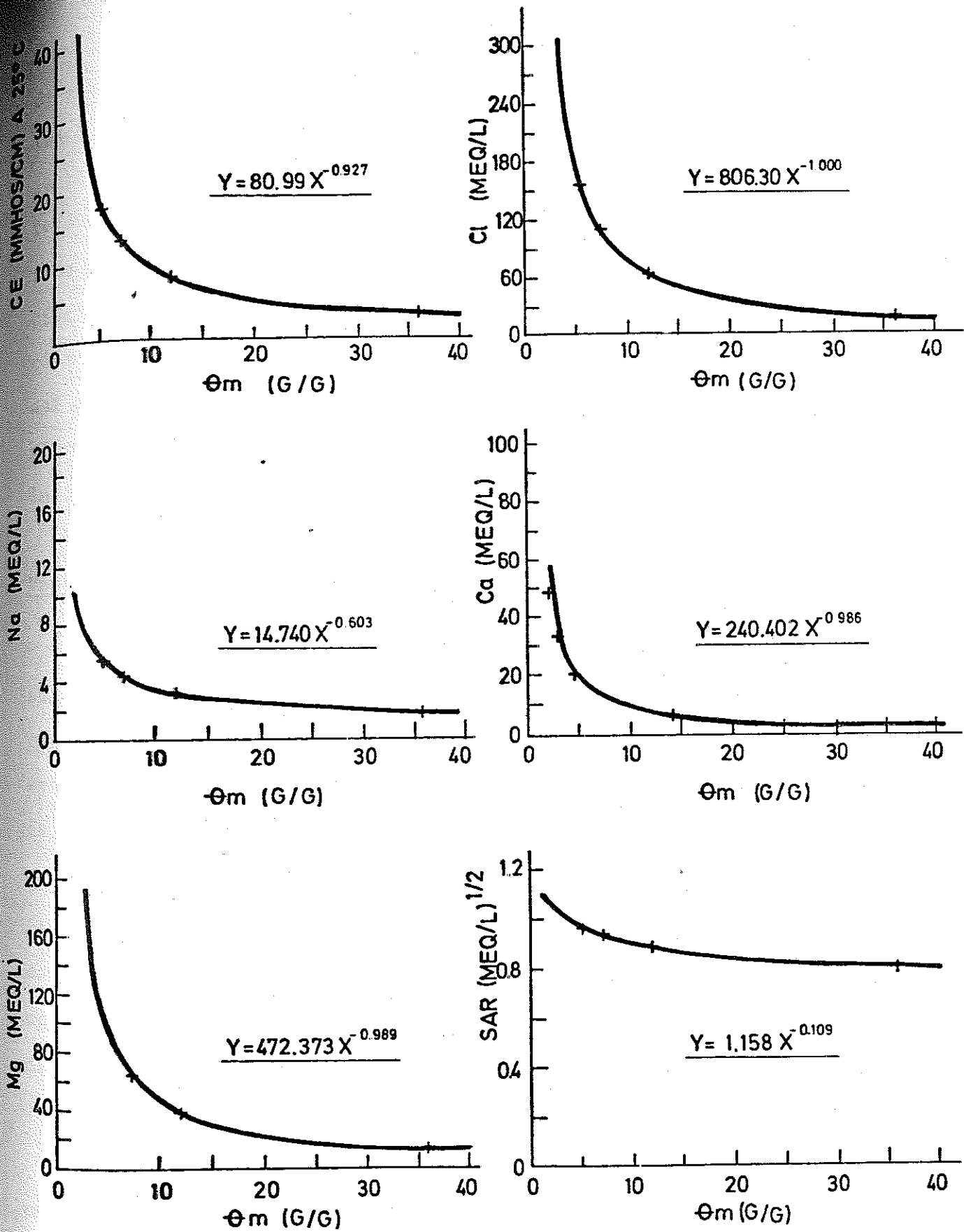


Figura 4-32. Relación CE- θ_m e iones θ_m según el modelo de Oster y Dell'Osso.

de realizar este cálculo hasta un $\theta_m = 5.1 \%$. La Figura 4-32 muestra la variación de la CE y de los iones Cl, Na, Ca y Mg de la solución del suelo conforme θ_m disminuye de acuerdo con el modelo anterior. Ajustando estos puntos se obtienen las curvas señaladas en cada gráfica, a partir de las cuales puede estimarse la composición de la solución del suelo a $\theta_m = 2.81 \%$. Aunque esta extrapolación no es rigurosa desde el punto de vista químico, las cifras así obtenidas pueden servir de referencia acerca de los valores máximos aproximados de la solución residente en el suelo antes de iniciarse el proceso de ascenso capilar.

Variación de la CE en la columna de suelo

De acuerdo con los resultados del apartado anterior, el proceso de infiltración y ascenso capilar de la solución de NaCl 0.1 N consiste en el desplazamiento (parcial) de una solución residente en el suelo de CE próxima a 31 mmhos/cm por una solución infiltrante de CE igual a 10.7 mmhos/cm (NaCl 0.1 N).

En la Figura 4-33 se presenta la evolución de la CE leída por el sensor de salinidad (CE_{se}) y la medida en las soluciones extraídas por la sonda de succión (CE_{ss}) durante el proceso de ascenso capilar. En la misma se observa claramente el ascenso de un frente de sales que, aparentemente, se va concentrando paulatinamente conforme se aleja de la capa freática estacionaria.

De la comparación de los valores de CE_{se} y CE_{ss} se deduce que en todos los casos $CE_{se} < CE_{ss}$, aumentando esta diferencia con la

distancia a la capa freática. Como se vio en el capítulo 4-1, estas diferencias pueden deberse a una desaturación parcial de la cerámica del sensor, debida a los Ψ_m imperantes en la columna de suelo, y al elevado tiempo de respuesta de estas unidades, especialmente en medios porosos a subsaturación. Así, conforme progresa el tiempo, estas diferencias tienden a disminuir, hasta hacerse mínimas en los instrumentos situados a 10 y 30 cm. Por el contrario, en los instrumentos a 50, 70 y 90 cm. de altura las diferencias persisten, indicando el hecho ya conocido de que el tiempo de respuesta de sensores desaturados es infinito, esto es, nunca alcanzan el valor de la CE impuesta en el sistema. El diferente comportamiento de los sensores a 10 y 30 cm. y los instalados a alturas superiores puede deberse a que, aunque todos ellos se instalaron con sus cerámicas saturadas, estos últimos estuvieron en contacto un tiempo apreciable (23 horas el situado a 50 cm. y tiempos mayores para los situados a 70 y 90 cm.) con el suelo seco al aire, lo cual pudo inducir la desaturación de las cerámicas de los mismos. Por el contrario, los instalados a 10 y 30 cm. sólo estuvieron unos minutos en contacto con el suelo seco, por lo que la desaturación (si existió) debió ser mucho menor. En conclusión, estos resultados confirman los obtenidos en el capítulo 4.1.2 y demuestran las limitaciones del sensor de salinidad en procesos como el descrito. No obstante, dado que el sensor y la sonda muestrean porciones diferentes de la solución del suelo (capítulo 4.1) no debe descartarse que las diferencias encontradas entre ambos instrumentos puedan ser en parte reales y no derivadas de una anomalía del sensor.

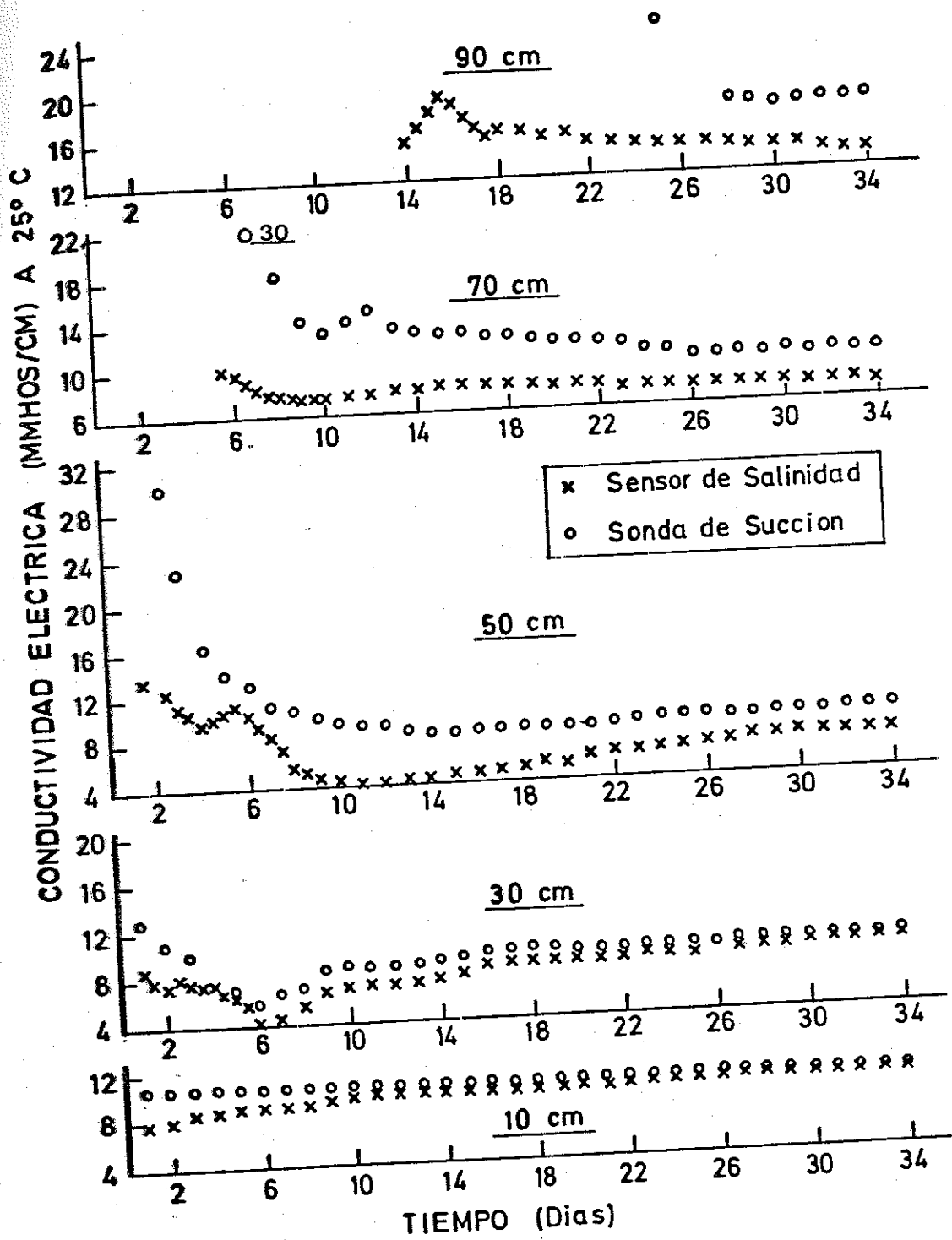


Figura 4-33. Evolución de CE_{se} (sensor de salinidad) y CE_{ss} (sonda de succión) durante el proceso de ascenso capilar sin evaporación (experimento IA, ascenso sin evaporación).

por otro lado, la obtención en las curvas de valores iniciales de CE próximos a 31 mmhos/cm indica que el movimiento de las sales en la columna ha sido tipo "cuasi-pistón" o próximo al desplazamiento inmisible, ya que los procesos de dispersión y difusión, característicos del desplazamiento miscible, habrían hecho disminuir la CE del frente de avance (Nielsen y Biggar, 1962). Este tipo de desplazamiento próximo al pistón ha sido observado también en otros trabajos (Smiles y Philip, 1978).

Un hecho que confirma la relativamente escasa mezcla y dispersión que se ha producido entre la solución residente y la infiltrada es la abrupta pendiente negativa inicial de las curvas CE-tiempo. Ello es debido a que el ascenso por capilaridad se produce inicialmente por los poros más pequeños del suelo, que son los ocupados por la solución residente en suelos relativamente secos como el que nos ocupa; en contraste, en el lavado de los suelos la solución infiltrante, que se desplaza preferentemente por los poros más grandes, adelanta con frecuencia al aire y a la solución residente de los poros más pequeños, originando poros no conductores y zonas estagnantes y produciendo la mezcla y dispersión de ambas soluciones (Scotter, 1978; Thomas y Phillips, 1979).

Debe indicarse que cuando se habla de desplazamiento tipo cuasi-pistón, se hace con referencia al desplazamiento relativo de los procesos de lavado antes señalados. Ya se resaltó en el capítulo 2 que el desplazamiento inmisible o pistón no existe en medios porosos naturales en procesos como el que nos ocupa. Así, en el suelo de Yolo en estudio existe de hecho una cierta dispersión, como se deduce

ce del Cuadro 4-14.

En el Cuadro 4-14 se presentan las tres primeras extracciones realizadas con la sonda a 70 cm. (días 7.1, 8.0 y 9.1, respectivamente). Se ha elegido la sonda a 70 cm. por su distancia apreciable a la capa freática y por el tiempo transcurrido relativamente largo, que harían presumir una elevada dispersión del movimiento de sales.

Es evidente que si el desplazamiento hubiera sido rigurosamente inmiscible, o tipo pistón, se habría pasado de una relación $CE_t/CE_f = 2.9$ inmediatamente antes del frente de contacto solución residente-solución infiltrada, a una relación $CE_t/CE_f = 1.0$ inmediatamente después de este frente de contacto (columna 3). Por el contrario, se observa que cuando el frente teórico de contacto (columnas 8 y 10) ha sobrepasado ya la altura de la sonda (día 8.0), la misma extrae todavía una solución de relación $CE_t/CE_f = 1.7$. Sin embargo, cuando el frente teórico de contacto se encuentra ya más alejado de la sonda (día 9.1), la relación CE_t/CE_f se acerca a la unidad, indicando que la mayor parte de la solución extraída pertenece ya a la infiltrada en el suelo.

El frente teórico de contacto se ha estimado por dos procedimientos en la forma descrita en el Cuadro 4-14, asumiendo un desplazamiento pistón y una ocupación por la solución del suelo del 78 % del volumen total de poros.

Por el primer procedimiento (columna 8), se ha calculado la altura del frente de contacto a partir del volumen de solución infiltrada en la columna (columna 5) y del volumen de poros ocupados por solución (columna 7). Por el segundo procedimiento (columna 10), se ha estimado la altura del frente de contacto sustrayendo

Cuadro 4-14. Extracción en tres días sucesivos de la solución del suelo con la sonda de succión a 70 cm. de altura.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
tiempo, t (días)	$\frac{CE_t}{(mmhos/cm)}$	$\frac{CE_t}{CE_f}$	altura frente húmedo (cm)	volumen SI (cm^3)	volumen SRD (cm^3)	VPOS $\frac{cm}{(cm^3/cm)}$	altura SI (cm)	altura SRD (cm)	altura SIE (cm)	VP desplazados
7.1	30	2.9	81.0	4751	640	69.4	68.5	9.2	71.8	1.11
8.0	18	1.7	83.8	4963	660	69.4	71.5	9.5	74.3	1.15
9.1	13	1.2	87.0	5163	720	69.4	74.4	10.4	76.6	1.21

1 : tiempo (t) en días desde el inicio del experimento IA

2 : Conductividad Eléctrica de la solución extraída con la sonda a 70 cm. de altura en el día t

3 : CE_f = CE final de equilibrio a 70 cm. de altura = 10.5 mmhos/cm.

4 : Altura (cm) del frente húmedo de avance estimado visualmente

5 : volumen de solución infiltrada en la columna

6 : volumen de solución inicial residente en el suelo y desplazada por la solución infiltrada. Se ha calculado a partir de la humedad inicial ($\theta_m = 2.81\%$) y de la masa mojada de suelo en el día t

7 : volumen de poros ocupados por solución (78% del volumen total de poros) en una sección de la columna de suelo de un centímetro de altura

8 : volumen de la SI expresado en altura equivalente de volumen de poros = columnas n° 5:7

9 : volumen de la SRD expresado en altura equivalente de volumen de poros = columnas n° 6:7

10 : altura estimada de la SI = columnas n° 4-9

8 y 10 : equivalen a la altura del frente de contacto entre la solución residente y la infiltrada en el suelo

11 : número de volúmenes de poros desplazados de los primeros 70 cm. de la columna = $(SI + SRD)/VPOS$ (70 cm.) = $(SI + SRD)/4858 \text{ cm}^3$.

la altura de la solución residente desplazada (columna 9) de la altura medida del frente de avance (columna 4). Evidentemente, ambos procedimientos deberían dar la misma altura del frente de contacto. Aunque esto no es así, las diferencias obtenidas por ambos procedimientos son pequeñas si se consideran las asunciones establecidas. Así, se ha asumido que sólo el 78% del volumen total de poros es ocupado por solución. Esta cifra se obtuvo en un apartado anterior para el total de la columna y no es necesariamente aplicable a una parte de la misma, ya que puede presumirse que una fracción importante de poros llenos de aire se encuentra preferentemente en la parte superior de la columna por ser la de potenciales matriciales inferiores.

Por otro lado, de la columna 11 se deduce que la eficiencia del desplazamiento ha sido elevada. Así, para un número de volúmenes de poros desplazados de 1.21 (día 9.1), la concentración de la solución ha disminuido un 57% (de 30 a 13 mmhos/cm), en contraste con reducciones menores obtenidas en procesos de lavado por inundación (Gardner y Brooks, 1957; Aragüés y Alberto, 1978). Tanto la pequeña velocidad de infiltración del agua en el suelo como el tiempo transcurrido deben conducir a una mayor interacción entre los poros del suelo (mayores posibilidades de equilibrio entre poros conductores y poros estagnantes, mayor tiempo de difusión, etc.) y por consiguiente a una mayor eficiencia del desplazamiento (Keller y Alfaro, 1966).

Finalmente, del Cuadro 4-14 se deduce que la solución residente en el suelo y desplazada por la solución infiltrada se mueve en y con el frente de avance de agua. Así, el frente de avance del agua viene dado en el Cuadro 4-14, columna 4, y su

comparación con el frente de avance de sales (columna 8 + columna 9) indica que ambos están muy próximos (distancia máxima entre ambos de 3.3 cm. en el día 7.1 y mínima de 2.2 cm. en el día 9.1). Esto significa que el frente de avance húmedo está formado fundamentalmente por el agua inicialmente presente en el suelo. Este hecho está de acuerdo con otros experimentos en los que también se utilizó un suelo inicialmente seco (Kirda et al., 1973a; Ghuman y Prihar, 1980) e indica que el efecto de segregación gravitacional (o dispersión hidrodinámica debida a diferentes densidades de la solución residente e infiltrada) importante en otras situaciones (Krupp y Elrick, 1969; Rose y Passioura, 1971) no tiene un efecto muy marcado en este caso, a pesar de que la solución residente (de mayor densidad) asciende sobre una solución infiltrada de menor densidad.

En conclusión, aunque el análisis efectuado supone una aproximación, ya que (i) no puede medirse el volumen de poros efectivamente ocupados por solución en los primeros 70 cm. de columna y (ii) el volumen de influencia de extracción de la sonda es apreciable (capítulo 4.1.1) y por lo tanto no sólo extrae solución de los poros situados a 70 cm., el mismo ilustra la existencia de dispersión en la columna de suelo, pero de una cuantía menor que la que se produce en procesos de lavado por inundación.

De la Figura 4-33 se deduce igualmente la complejidad de la dinámica del ascenso capilar sin evaporación y el tiempo relativamente largo necesario para alcanzar el equilibrio. Entre los procesos que intervienen en dicha dinámica deben señalarse, además de la dispersión hidrodinámica ya mencionada, las interacciones físico-químicas

entre la fase sólida y la solución del suelo, y la difusión transversal entre los poros conductores y los estagnantes.

Así, la paradoja aparente de la presencia de solución en la columna con valores de CE menores de 10.7 mmhos/cm (CE de la solución en la capa freática) puede explicarse en parte por el cambio dinámico en la composición iónica de la solución del suelo. Como se verá más adelante, las sales en solución próximas a la capa freática (10 cm. de altura) son sales de sodio, y la CE correspondiente es siempre mayor o igual a 10.7 mmhos/cm, mientras que al alejarnos de la capa freática (30 cm. y 50 cm. de altura) las sales son principalmente de Ca y Mg, las cuales tienen en general menores conductividades para concentraciones totales semejantes. Así, y como caso extremo, una solución de $MgSO_4$ de 50 meq/l tiene una CE = 3.3 mmhos/cm, mientras que la misma concentración de NaCl (50 meq/l) da una CE = 5.6 mmhos/cm (Richards, 1954). La razón principal de esta desviación es que los iones Ca y Mg tienen una tendencia importante a formar pares iónicos de menor carga neta o neutros, lo cual hace que no sean medidos por técnicas conductométricas y por lo tanto la CE sea menor (Tanji, 1969).

Finalmente, puede observarse (Figura 4-33) que la extracción con la sonda a 90 cm. sólo pudo realizarse en el día 25 - esto es, quince días después de que el frente de avance alcanzara esta altura - debido a los bajos potenciales matriciales imperantes. De aquí que los valores iniciales de CE a 90 cm. sean menores que los obtenidos inicialmente a otras alturas. Dado que el frente húmedo

de avance alcanza la superficie del suelo en el día 15.7 (Figura 4-30), el flujo de masas ascendente disminuye sustancialmente después de ese día, por lo que el mecanismo de difusión adquiere una mayor importancia relativa (Rieu y Cheverry, 1976; Hassan y Ghai-beh, 1977). Así, el sistema tiende a eliminar el gradiente de potencial osmótico y la solución del suelo a esta altura alcanza una CE de "equilibrio" final de 18 mmhos/cm.

Variación iónica en la columna de suelo

La Figura 4-34 muestra la concentración de los iones Cl, Na, Ca y Mg en las soluciones extraídas con las sondas de succión, durante el proceso de ascenso capilar de la solución infiltrante de NaCl 0.1 N.

El cloruro, considerado típicamente como un ion "inerte", muestra en general variaciones paralelas a las de CE. La eficiencia del desplazamiento ascendente se manifiesta por las elevadas concentraciones de este ion en o cerca del frente de avance (puntos iniciales de cada curva) y por el rápido descenso a valores de concentración próximos a los de la solución infiltrante (100 meq/l).

Aplicando al Cl^- el modelo de Oster y Dell'Osso (Figura 4-32), se obtiene para $\theta_m = 2.81 \%$ una concentración de 285 meq/l. Incidentalmente, debe señalarse que esta concentración se obtiene también de la relación

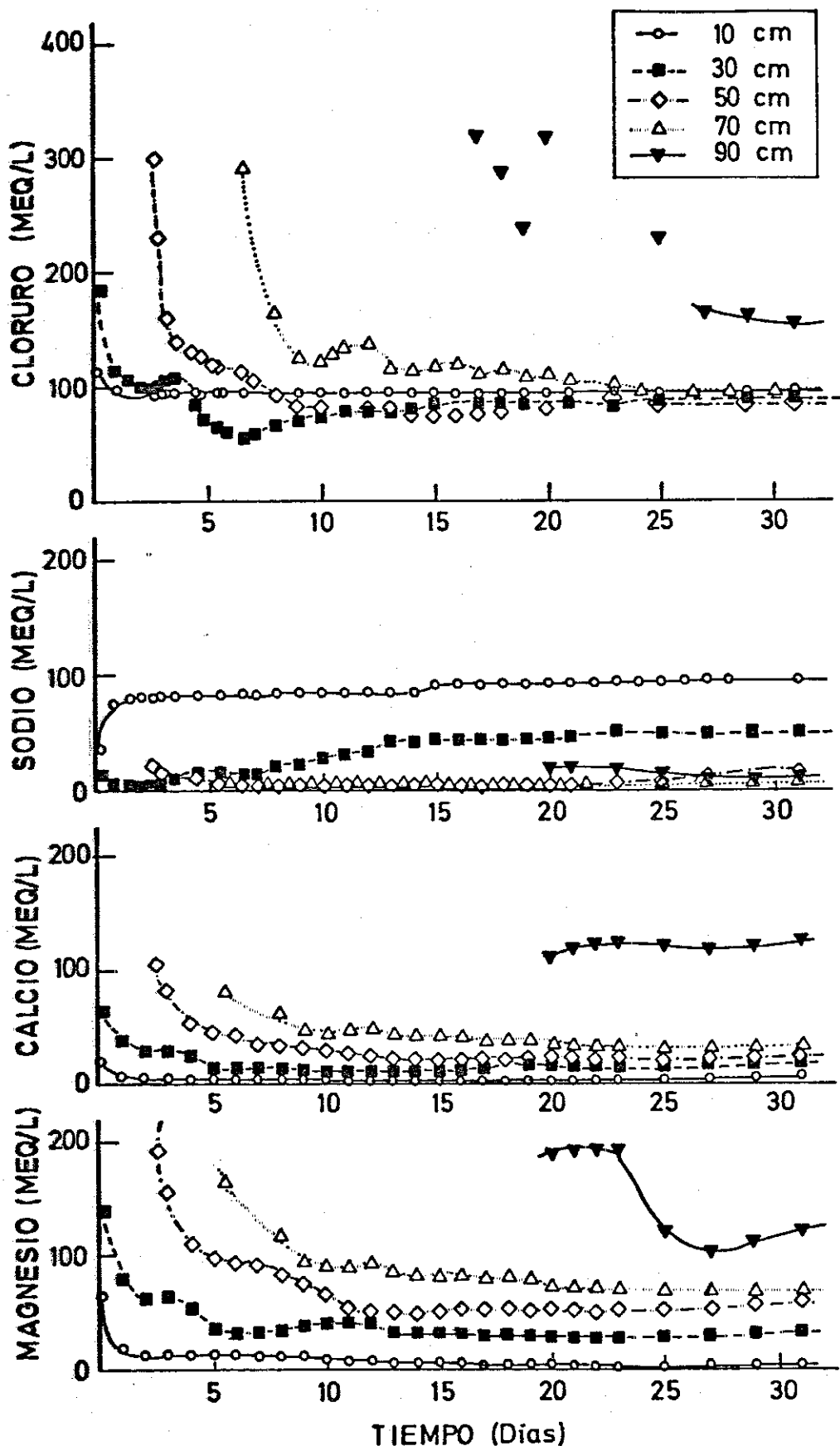


Figura 4-34. Concentración a diferentes alturas de los iones Cl , Na , Ca y Mg durante el proceso de ascenso capilar de la solución infiltrante de NaCl 0.1 N (columna IA, ascenso sin evaporación).

$$Cl (\theta_m) = \frac{\theta_s}{\theta_m} \times Cl (\theta_s)$$

donde θ_s = porcentaje de saturación

$Cl (\theta_s)$ = concentración del extracto saturado (meq/l)

$Cl (\theta_m)$ = concentración a $\theta_m = 2.81 \%$ (meq/l)

que representa el factor de concentración estequiométrico directo de un ion inerte. Evidentemente, esta asunción del modelo no es válida para todo el rango de humedades, puesto que dejará de cumplirse cuando se rebasen los productos de solubilidad de las sales del ion cloruro.

La existencia de valores de Cl superiores a 285 meq/l en algunos puntos iniciales de las curvas puede indicar la posible evaporación de la solución extraída en el colector (capítulo 4.1.1), aunque no debe descartarse la existencia de un efecto de exclusión aniónica (Bower y Goertzen, 1955; Todd y Kemper, 1972). Así, se ha demostrado que si la porción de la solución del suelo que excluye el ion cloruro se desplaza más lentamente que el resto de solución, la concentración de Cl en el frente de avance aumenta (Thomas y Swoboda, 1970).

La Figura 4-35 muestra el perfil de Cl en la columna en días diferentes. En ella se observa la progresión ascendente del frente de cloruros de elevada concentración. La posición relativa del frente húmedo respecto al momento de la extracción debe tenerse en cuenta al interpretar estos resultados. En la situación final de -

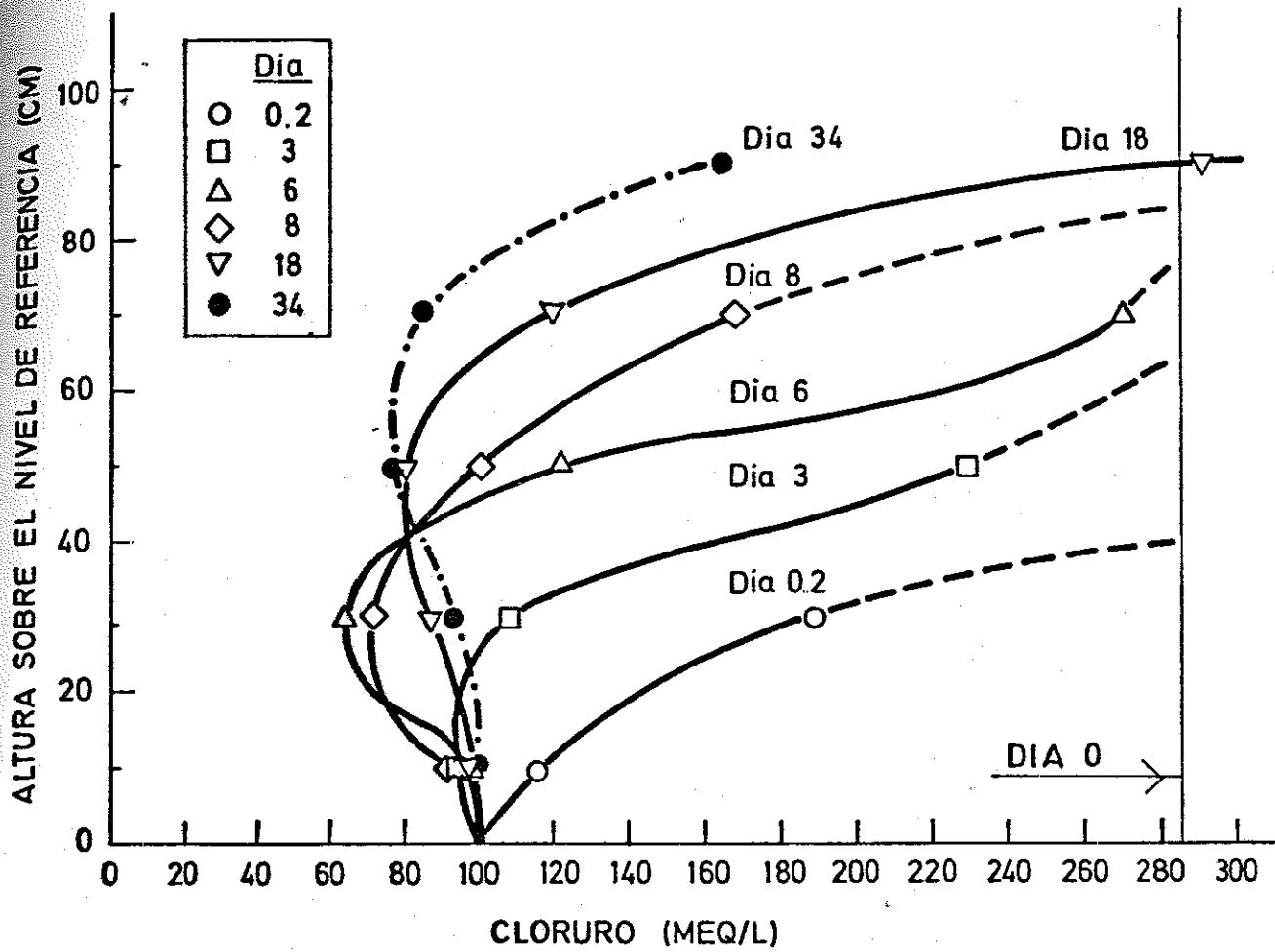


Figura 4-35. Evolución del perfil de concentración del ion cloruro (columna IA, ascenso sin evaporación).

aparente equilibrio (día 34) se observa un perfil relativamente homogéneo hasta los 70 cm. de altura y una acumulación importante de cloruros en la porción restante de suelo (70 a 96 cm. de altura).

El hecho de que, en ciertos momentos, la concentración de cloruro sea menor que la de la solución infiltrante puede deberse - como se señaló antes - a fenómenos de superficie en la interfase sólido-solución. Asimismo, la hipótesis de que los microporos actúen de alguna manera como sumideros de sales explicaría este hecho, dado que la sonda extrae solución preferentemente de los macroporos, llenos de solución menos concentrada. El descenso simultáneo de la CE mencionado anteriormente estaría asimismo de acuerdo con esta hipótesis.

Como era de esperar, el comportamiento del ion sodio es totalmente diferente al del ion cloruro, ya que reacciona con la matriz del suelo. Así, a pesar de que la solución de la capa freática tiene una concentración $Na = 100 \text{ meq/l}$, este valor sólo se obtiene en los diez primeros centímetros de la columna (Figura 4-36).

De acuerdo con el modelo de Oster y Dell'Osso, la solución inicial residente en el suelo tiene una concentración $Na = 7.9 \text{ meq/l}$ (Figura 4-32), y es desplazada por una solución infiltrante de $Na = 100 \text{ meq/l}$. Sin embargo, una parte sustancial de la misma se adsorbe en las posiciones de cambio del suelo y por consiguiente su concentración en la solución disminuye. Una vez alcanzado el equilibrio dinámico entre la fase sólida y la solución, la concentración de sodio vuelve a aumentar paulatinamente. Así, para el final de la expe

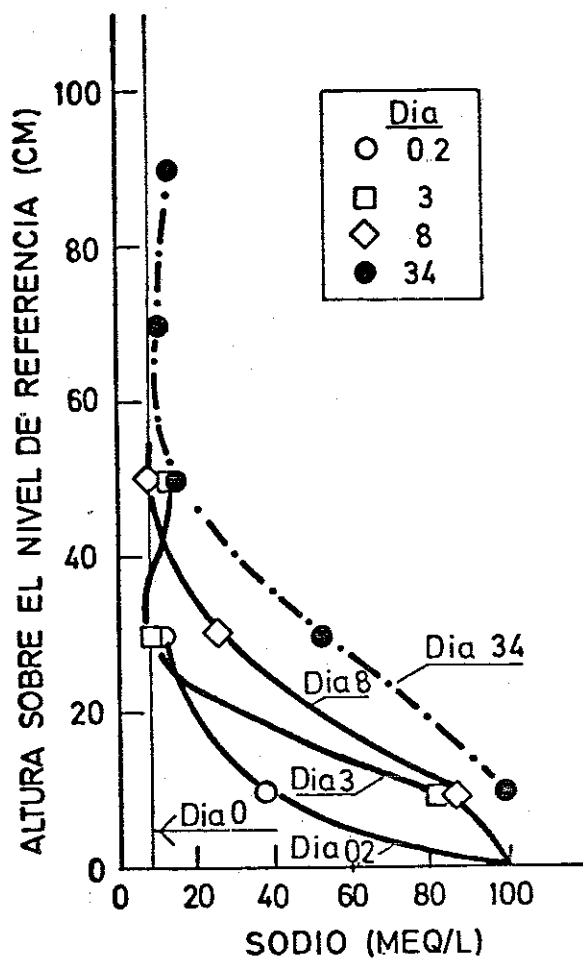


Figura 4-36. Evolución del perfil de concentración del ion sodio (columna IA, ascenso sin evaporación).

riencia se llega a una situación en la que ya no hay adsorción neta de Na en los 10 primeros centímetros de la columna ($\text{Na} = 100 \text{ meq/l}$), mientras que a los 30 cm. todavía la mitad del sodio se adsorbe ($\text{Na} = 50 \text{ meq/l}$), y por encima de 50 cm. la concentración en sodio es igual o menor de 14 meq/l .

Como se verá más adelante en el balance de masas, el pequeño ascenso del ion sodio en la columna es debido a que, aunque la solución infiltrada tiene una elevada concentración ($\text{Na} = 100 \text{ meq/l}$), los niveles de sodio en la columna son muy bajos (8 meq/l en solución y 0.3 meq/100 g. en la fase adsorbida) y la capacidad de intercambio catiónico es muy elevada (23.8 meq/100 g.), lo cual hace que la mayor parte del sodio se adsorba en las posiciones de cambio de los primeros centímetros de la columna de suelo.

Evidentemente, la adsorción del ion sodio en las posiciones de cambio debe ir acompañada de una desorción equivalente de otros iones, lo cual se refleja en el paulatino incremento en las concentraciones de los iones calcio y magnesio en solución conforme progresa el ascenso de la misma (Figuras 4-34 y 4-37).

Inicialmente, se está produciendo el desplazamiento de una solución residente en el suelo de concentración en Ca y Mg de 87 y 170 meq/l respectivamente (Figura 4-32), por una solución infiltrante de concentración cero en Ca y Mg. Conforme asciende, la solución va equilibrándose con las posiciones de cambio de la matriz del suelo ($\text{Ca cambio} = 9.2 \text{ meq/100 g.}$ y $\text{Mg cambio} = 8.4 \text{ meq/100 g.}$) a la vez que se produce la dispersión de la solución residente e infiltrada.

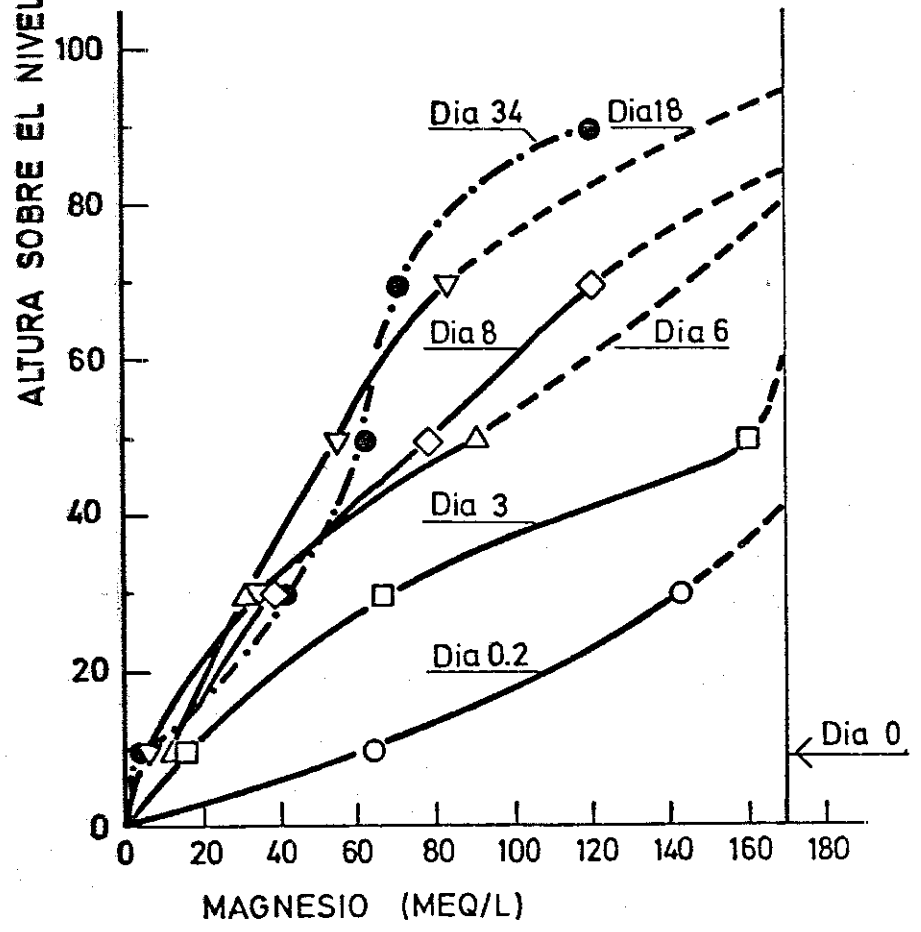
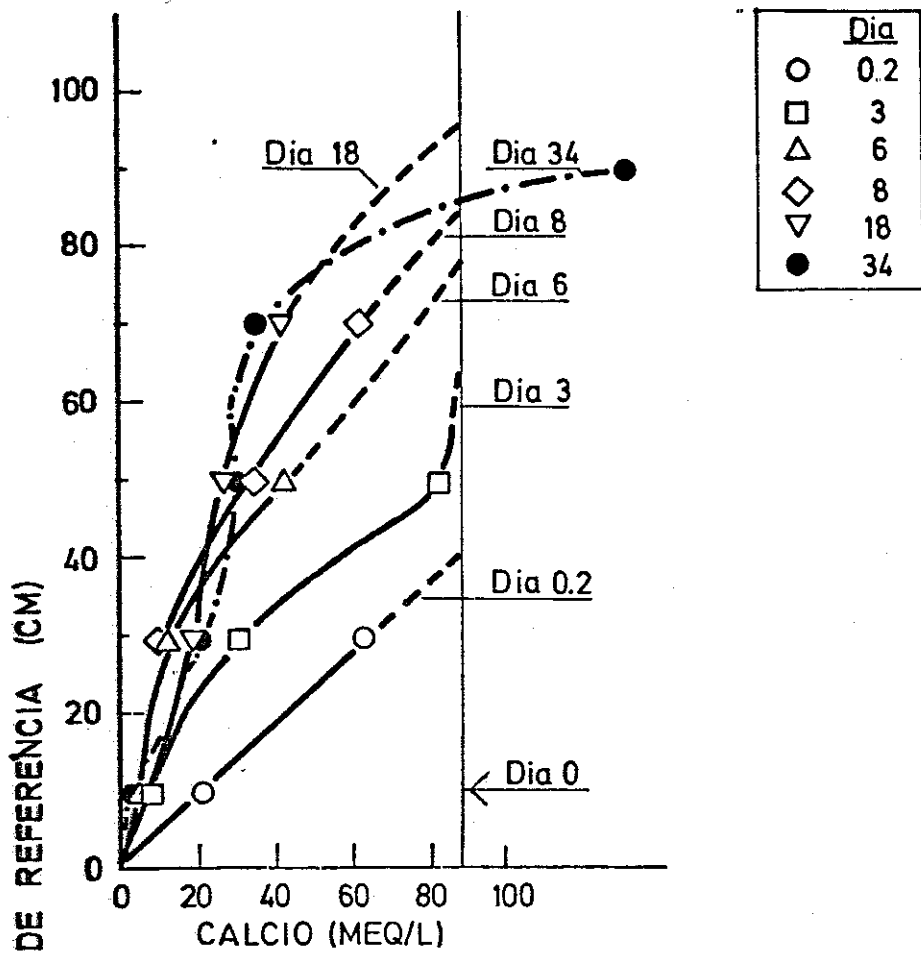


Figura 4-37. Evolución del perfil de concentración de los iones calcio y magnesio (columna IA, ascenso sin evaporación).

El resultado de estos procesos es que las concentraciones de Ca y (sobre todo) de Mg van incrementándose paulatinamente con la altura en la columna (exactamente al contrario que en el caso del ion sodio) (Figura 4-34). El mayor incremento en concentración del ion Mg que del Ca puede deberse a que la concentración del primero en la solución residente del suelo es mayor y a que el Mg se desorbe algo más fácilmente que el Ca de las posiciones de cambio (serie liotrópica).

Al igual que en las curvas de Cl, la concentración de Ca y Mg en o cerca del frente de avance es muy elevada, con valores incluso superiores a los de la solución inicial del suelo. Sin embargo, la caída en los valores de concentración detrás del frente húmedo es mucho menos abrupta para estos dos cationes que para el Cl.

Ello puede interpretarse en el sentido de que, aunque los procesos de intercambio en sí son rápidos, la difusión de los iones desorbidos desde las partículas del suelo hacia la solución es relativamente lenta (Bohn, 1979), lo cual induce a la mezcla de la solución residente e infiltrada. Por otro lado, ya se indicó que una parte sustancial de las partículas del suelo permanecen más o menos parcialmente rodeadas de aire, y pueden por lo tanto actuar como fuentes y sumideros para los iones de cambio, contribuyendo así a la dispersión de la solución del suelo. Todo ello origina, como se ha mencionado anteriormente, que los valores finales de Ca y Mg a lo largo de la columna sean diferentes (Figura 4-37), en contraste con la mayor homogeneidad del perfil del ion cloruro (Figura 4-35).

Finalmente, la Figura 4-38 muestra la evolución del perfil

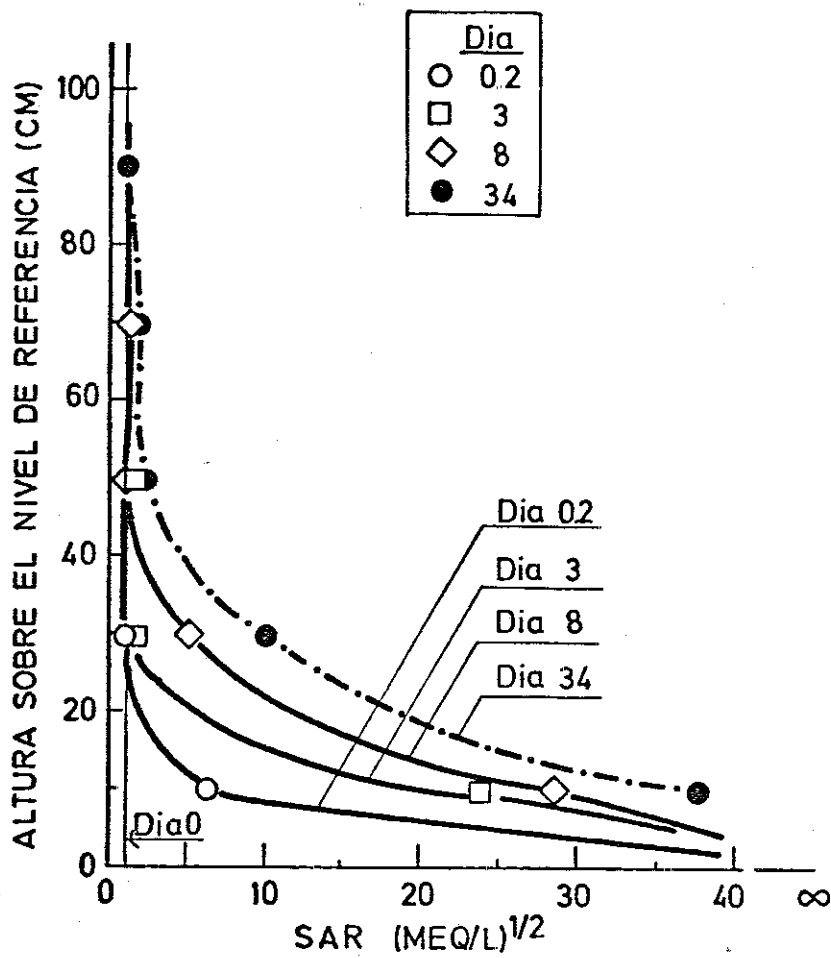


Figura 4-38. Evolución del perfil del SAR (columna IA, ascenso sin evaporación).

del SAR¹⁾ deducido de las concentraciones de Na, Ca y Mg en las soluciones extraídas con las sondas de succión. De la misma se deduce que, a pesar de que el SAR de la solución infiltrada es infinito (NaCl 0.1 N), el suelo sólo se ha sodificado a valores superiores a 15 (suelo sódico según la clasificación del U.S. Salinity Laboratory; Richards, 1954) en los primeros 25 cm. de la columna. Más aún, si se asume que las fases de cambio y de solución están en equilibrio, el porcentaje de sodio de cambio (ESP) deducido del SAR alcanza valores - por encima de los 50 cm. de altura - inferiores al ESP original del suelo (1.2 %); esto es lógicamente reflejo de las elevadas concentraciones de Ca y Mg asociadas al mínimo ascenso del sodio a alturas superiores a los 50 cm.

Balance de masas iónico

Al final del experimento IA (día 34), cuando la columna estaba presumiblemente en equilibrio, se llevó a cabo un balance de masas de los iones Cl, Na, Ca y Mg.

El interés y utilidad de dicho balance radica en los siguientes aspectos:

1. Se calcula el movimiento total y relativo de masas de los distintos iones, analizando de esta manera la acumulación o pérdida de los mismos por unidad de masa o de longitud de la columna de suelo.

1) SAR = relación de adsorción de sodio = $\frac{Na}{\sqrt{(Ca + Mg)/2}}$, iones en meq/l.

2. Se deducen las cantidades relativas de los cationes de cambio a lo largo de la columna y se da información sobre la eficiencia relativa del intercambio catiónico.
3. Se estima la concentración y masa de los iones en la sección superior de la columna de suelo (90-96 cm.), sobre la que no existe información experimental.
4. Permite evaluar la precisión del trabajo experimental e identificar las variables de mayor sensibilidad o peso relativo.

Por el contrario, el balance realizado puede presentar las siguientes limitaciones:

1. Se ha asumido el equilibrio químico de la columna, de lo que no hay certeza absoluta.
2. La humedad del suelo se ha deducido de las lecturas de los tensiómetros en el día 34 y de la curva característica de retención de humedad (Figura 3-2). En principio, la precisión de esta deducción es relativa, ya que la relación $\theta - \Psi_m$ no es única (histéresis).
3. Las concentraciones iónicas de la solución inicial del suelo se han deducido a partir del modelo de Oster y Dell'Osso que, como se recordará, sólo llegaba al cálculo para $\theta_m = 5.1 \%$, por lo que se extrapoló por medio de la ecuación apropiada para alcanzar los valores a $\theta_m = 2.81 \%$ (Figura 4-32).



4. El ion potasio no se ha medido. Para soslayar parcialmente esta limitación se ha asumido que este ion no participa en las reacciones de la interfase sólido-solución, por lo que se ha descontado su valor (5.9 meq/100 g.). Todos los cálculos de los procesos de intercambio se han realizado por consiguiente en base a una CIC = 17.9 meq/100 g.
5. La CIC se ha obtenido sumando los cationes de cambio, lo cual puede ser problemático en suelos que, como el Yolo, tienen calcita (disolución de Ca^{++}). Esta razón, junto con la posible disolución de Mg de los silicatos, puede hacer que los valores medidos de Ca y Mg de cambio sean más altos que los reales, y por lo tanto que la CIC esté sobreestimada.
6. El cálculo de la masa de cationes de cambio en la sección 0-10 cm. se ha realizado con varias suposiciones que se citan en las notas del Cuadro 4-16 (# 11). Dada la sensibilidad de estas suposiciones y la gran importancia relativa de la masa de los cationes de cambio, pequeños errores en las mismas pueden conducir a importantes diferencias en los balances de masa aparentes.
7. El Na de cambio se ha deducido a partir del SAR (esto es, se ha asumido que las fases de cambio y de solución están en equilibrio), y el Ca y Mg de cambio se han estimado por diferencia de CIC - Na cambio, con la posibilidad de producir errores acumulativos. Finalmente, se ha supuesto una eficiencia de intercambio catiónico del 100 %.

Los Cuadros 4-15, 4-16 y 4-17 presentan el balance de masas - de los iones Cl, Na y Ca + Mg, respectivamente. Las notas a pie de cuadro explican los cálculos realizados.

En primer lugar, se observa que el volumen neto de agua en la columna, calculado a través de un balance de agua (volumen neto = volumen inicial + volumen infiltrado - volumen extraído) se aproxima satisfactoriamente al volumen de agua estimado de la relación $\Psi_m - \theta_m$ (columna 5) (error del 2.8 %; Cuadro 4-15, nota 5). Ello indica que la precisión de las medidas experimentales ha sido buena, y que el cálculo de θ_v a partir de Ψ_m y de la curva característica de retención de humedad es aceptable en este caso.

Como era lógico de esperar, hay un aporte neto de cloruro - (meq) en todas las secciones analizadas (Cuadro 4-15, columna 6 - frente a 8). De la columna 9, en la que el Cl se expresa en meq - por sección de columna de un cm. de altura, se deduce que hay un descenso (relativo a la capa freática) en la masa/cm. de cloruro - hasta los 70 cm. de altura, un ligero aumento en la sección de 70 a 90 cm., y un aumento evidente en la parte superior de la columna. Esto es, incluso en ausencia de evaporación, la superficie del suelo se ha salinizado a valores muy elevados, debido a la solución residente del suelo que contiene 218 meq de Cl (columna 6) y que ha sido desplazada hacia la superficie del mismo. Así, la concentración estimada del ion cloruro en la sección 90-96 cm. es de 331 meq/l (columna 7), esto es, unas tres veces la concentración - del Cl en la capa freática y unas 1.2 veces la del Cl en la solu

ción inicial del suelo seco al aire. Esto último tiende a sugerir la posibilidad, ya mencionada anteriormente, de un efecto de exclusión aniónica.

En estas condiciones experimentales, parece que la concentración de la capa freática influye poco en el valor de la concentración de la solución del suelo superficial, siendo mucho más importante la concentración inicial de la solución del suelo. Evidentemente, para tiempos más largos el mecanismo de difusión debe tender a homogeneizar la concentración en la columna, y en ese caso la concentración de la capa freática deberá tenerse en consideración.

De forma análoga al Cl, el ion Na (Cuadro 4-16) ha tenido un aumento neto en toda la columna respecto a sus valores iniciales (columna 7 frente a 9). Sin embargo, al contrario que en el cloruro, la concentración del ion sodio disminuye claramente con la altura hasta los 90 cm. (columnas 8 y 14). Por otro lado, comparando las columnas 10 y 13 se observa un gran incremento del Na de cambio en los primeros 50 cm., y un descenso por encima de esta altura. Este comportamiento es lógico si se tiene en cuenta que la capacidad relativa de la fase solución respecto a la de cambio es tan sólo 0.04.

De acuerdo con el balance realizado, la masa de los iones Ca y Mg en la sección 0-10 cm. (Cuadro 4-17) es menor que la inicialmente presente en el suelo, pero por encima de esta sección hay de nuevo un incremento neto que aumenta con la altura de la columna (columnas 16 y 17). Evidentemente, dado que no ha habido un aporte

externo de Ca y Mg, este incremento neto debe realizarse a expensas de una disminución neta de Ca y Mg en otra parte de la columna y/o en la fase sólida. Así, comparando las columnas 10 y 14 y la columna 15 se observa un descenso de (Ca + Mg) cambio final de 448 meq en los primeros 50 cm. de la columna, los cuales han pasado a la fase 'solución y han ascendido con el flujo de agua. Consecuentemente, estas posiciones de cambio han sido ocupadas por Na, y de aquí el elevado Na cambio final del suelo en los primeros 50 cm. de columna (Cuadro 4-16, columna 13).

El balance de masas para la sección superficial de suelo (90-96 cm.) indica que la masa de calcio y magnesio en las fases sólida y de solución es de 343.4 meq. Si se supone que el Na cambio final en esta sección es prácticamente cero, el Ca y Mg en solución serán los meq totales menos los meq de cambio, esto es, $343.4 - 312 = 31.4 \text{ meq} = 31.4/0.32 = 98 \text{ meq/l}$. Por consiguiente, el balance indica, al contrario que en el caso del sodio, que el calcio y magnesio han ascendido en la columna en cantidades importantes, ocupando prácticamente todas las posiciones de cambio por encima de los 50 cm. e impartiendo unas concentraciones relativamente elevadas en la solución del suelo.

Aunque las limitaciones ya señaladas del balance impiden un análisis cuantitativo riguroso, las cifras obtenidas están dentro del orden de magnitud esperado y son indicativas de los complejos procesos de intercambio que han tenido lugar en la columna.

Por otro lado, los valores obtenidos de los cationes de cam-

bio están basados en una eficiencia de intercambio catiónico del 100 %. El valor negativo de la masa de sodio en la sección superficial sugiere que el intercambio se ha realizado con una eficiencia menor, puesto que conforme la CIC efectiva disminuye, la masa de Na en la sección 90-96 cm. aumenta, y la de Ca + Mg disminuye. Así, como ejemplo, si se supone que la CIC efectiva es del 78 % de la total (valor correspondiente al volumen de poros llenos de solución), las masas de Na y Ca + Mg que se obtienen en la sección superior de la columna (90-96 cm.) son de 86.7 y 181.7 meq., respectivamente. El hecho de que la eficiencia de la CIC puede ser menor del 100 % ha sido demostrado en diversos trabajos (Jury et al., 1978; Gallez et al., 1981), sobre todo cuando el flujo de agua es a subsaturación (Mokady y Bresler, 1968), como es el caso de este estudio, sobre todo en la parte superior de la columna.

En resumen, a través del balance de masas se ha calculado la masa (meq) del ion cloruro a lo largo de la columna y se ha deducido su concentración en la solución del suelo superficial. Las limitaciones señaladas al principio de este apartado y la posibilidad de una CIC efectiva menor del 100 %, impiden calcular de forma precisa las concentraciones de los cationes en la fase sólida y en solución, pero los resultados indican los complejos procesos de intercambio catiónico a lo largo de la columna, las translocaciones iónicas relativas en sus diferentes secciones y la capacidad relativa de las fases de cambio y de solución, responsable de que únicamente se sodifiquen ($ESP > 15$) los primeros 30 cm. de la columna próximos a la capa freática.

Cuadro 4-15. Balance de masas del ion cloruro. Ascenso sin evaporación (Experimento IA)

1 altura columna cm	2 suelo g	3 θ_v cm^3/cm^3	4 θ_m g/g	5 volumen solución cm^3	6 solución inicial meq	7 solución final meq/l	8 solución final meq	9 solución final meq/cm
90-96	1740	0.32	0.224	390	13.9	(331)**	(128.9)*	(21.5)
70-90	5818	0.33	0.230	1338	46.5	133	178.0	8.9
50-70	5899	0.35	0.241	1422	47.2	91	129.4	6.5
30-50	5859	0.37	0.256	1500	46.9	89	133.5	6.7
10-30	5920	0.39	0.267	1581	47.4	94	148.6	7.4
0-10	2044	0.42	0.292	597	16.4	100	59.7	8.5
TOTAL	27280			6828	218.3			

(Entre paréntesis, valores deducidos del balance de masas)

NOTAS

Columna #

- 1 Altura de la columna sobre el nivel de referencia.
- 2 Gramos de suelo en la sección considerada. Calculado del volumen de la columna y de la densidad aparente de cada sección de suelo obtenida por atenuación de rayos γ . ρ_b media = 1.45; ρ_b (0-10) = 1.440; ρ_b (10-30) = 1.460; ρ_b (30-50) = 1.445; ρ_b (50-70) = 1.455; ρ_b (70-90) = 1.435; ρ_b (90-96) = 1.430.
- 3 Humedad volumétrica (día 34). Deducida de la curva de retención de humedad y de la lectura de los tensiómetros.
- 4 Humedad gravimétrica (día 34), $\theta_m = \theta_v/\rho_b$; ρ_b = densidad media de cada sección de suelo obtenida por atenuación de rayos γ .
- 5 cm^3 de solución en la sección considerada (día 34) = $\theta_m \times \text{gm suelo}$ (ρ solución = 1 gm/cm^3).
 cm^3 iniciales en la columna = θ_m inicial \times gm suelo = 0.0281 \times 27280 = 767 cm^3
 cm^3 infiltrados en la columna (día 34) = 6998 cm^3 (b)
 cm^3 extraídos con las sondas de succión = 1120 cm^3 (c)
 cm^3 netos en la columna = a + b - c = 6645 cm^3 . cm^3 estimados en la columna = 6828 cm^3 . Δ (medido - estimado) = -183 cm^3 (2.8% de error).
- 6 Cl solución inicial = 285 meq/l; Cl solución inicial (meq) = 285 \times θ_m inicial \times gm suelo/1000 = 0.008 \times gm suelo sección.
- 7 Para cada sección, media de los valores extremos de la sección (día 34) (Figura 4-35)
- 8 Cl solución final (meq) = Cl solución final (meq/l) \times 1 solución en cada sección.
- 9 meq por sección de suelo de un cm de altura. Para la sección 0-10 cm se ha considerado que 3 cm están ocupados por el sistema de drenaje y no por suelo.

* Cl final (sección 90-96), meq = Cl incorp. + Cl sol. ini. - Cl sol. final (sección 0-90 cm) - Cl ext.; Cl incorporado en la columna = 6.998 l \times 100 meq/l = 699.8 meq; Cl extraído en sondas succión = 140 meq.

Cl final (sección 90-96), meq = 699.8 + 218.3 - 649.2 - 140 = 128.9 meq.

** Cl final (sección 90-96), meq/l = 128.9/0.390 = 331 meq/l.

Cuadro 4-16. Balance de masas del ion sodio. Ascenso sin evaporación (Experimento IA)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
altura columna cm	suelo g	θv cm ³ /cm ³	θm g/g	volumen solución cm ³	capacidad intercambio catiónico meq	solución inicial meq	solución final meq/l	solución final meq	cambio inicial meq	relación adsorción sodio cambio(SAR) (meq/l) ^{1/2}	porcentaje sodio cambio(ESP) %	cambio final meq	solución final meq/cm
90-96	1740	0.32	0.224	390	312	.4	-	A*	5.2	-	-	B*	
70-90	5818	0.33	0.230	1338	1041	1.3	11	14.7	17.5	1.2	.6	6.3	0.7
50-70	5899	0.35	0.241	1422	1056	1.3	10	14.2	17.7	1.4	.8	8.5	0.7
30-50	5859	0.37	0.256	1500	1049	1.3	31	46.5	17.6	5.1	5.9	61.9	2.3
10-30	5920	0.39	0.267	1581	1060	1.3	73	115.4	17.8	18.0	20.2	214	5.8
0-10	2044	0.42	0.292	597	366	.5	96	57.3	6.1	-	-	214	8.2
TOTAL	27280	-	-	6828	4884	6.1		248.1+A	81.9			504.7+B	

NOTAS

Columna #

- Altura de la columna sobre el nivel de referencia.
- Gramos de suelo en la sección considerada. Calculado del volumen de la columna y de la densidad aparente de cada sección de suelo obtenida por atenuación de rayos γ. ρ_b media = 1.45; ρ_b (0-10) = 1.440; ρ_b (10-30) = 1.460; ρ_b (30-50) = 1.445; ρ_b (50-70) = 1.455; ρ_b (70-90) = 1.435; ρ_b (90-96) = 1.430.
- Humedad volumétrica (día 34). Deducida de la curva de retención de humedad y de la lectura de los tensiómetros.
- Humedad gravimétrica (día 34), $\theta_m = \theta_v / \rho_b$; ρ_b = densidad media de cada sección de suelo obtenida por atenuación de rayos γ.
- cm³ de solución en la sección considerada (día 34) = $\theta_m \times \text{gm suelo} (\rho \text{ solución} = 1 \text{ gm/cm}^3)$.
- Capacidad de intercambio catiónico en la sección considerada (meq) = .179 meq/gm x gm suelo en sección.
- Na sol. inicial = 7.91 meq/l; Na sol. ini. (meq) = 7.91 x θ_m ini. x gm suelo/1000 = 22.23 x 10⁻⁵ x gm suelo en sección.
- Para cada sección, media de los valores extremos de la sección (día 34) (Figura 4.36).
- Na sol. final (meq) = Na sol. final (meq/l) x l. solución en cada sección.
- Na cambio inicial = .003 (meq/gm) x gm suelo en cada sección.
- Sección 0-10 cm: los primeros 5.5 cm están bajo la capa freática de NaCl 0.1 N, en los que Na = 100 meq/l, y Ca, Mg = 0 meq/l, por lo que ESP = 100%. De estos 5.5 cm, 3 cm están ocupados por el sistema de drenaje, y el resto (2.5 cm) es suelo. En estos 2.5 cm hay 2.5 x 292 gm/cm = 730 gm de suelo; Na cambio (3-5.5 cm) = 730 gm x 0.179 meq/gm = 131 meq. El resto del suelo (1314 gm) se asume con un SAR de 38 (SAR a 10 cm) equivalente a un ESP de 35.4; Na cambio (5.5-10 cm) = 35.4 x .179 x 1314/100 = 83 meq; Na cambio (0-10 cm) = 131 + 83 = 214 meq. Resto secciones: SAR = Na / [(Ca + Mg)/2]^{1/2}; Na, Ca, Mg = valores extremos de la sección en meq/l, día 34.
- ESP = porcentaje de sodio de cambio = $[100 (-0.0126 + 0.01475 \text{ SAR})] / [1 + (-0.0126 + 0.01475 \text{ SAR})]$
- Na cambio final = ESP x CIC (meq)/100
- meq por sección de suelo de un cm de altura. Para la sección 0-10 cm se ha considerado que 3 cm están ocupados por el sistema de drenaje y no por suelo.

Na final (sección 90-96), meq (A + B) = Na incorporado + Na sol. ini. + Na cambio ini. - Na sol. final (0-90 cm) - Na cambio final (0-90 cm) - Na extraído; (valores en meq); Na incorporado en la columna = 699.8 meq; Na extraído con sondas succión = 41 meq.
 A + B = 699.8 + 6.1 + 81.9 - 248.1 - 504.7 - 41 = -6 meq.

adro 4-17. Balance de masas del ion calcio y magnesio. Ascenso sin evaporación. (Experimento IA)

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
altura columna	suelo	0v	0m	volu- men solu- ción	capaci- dad in- tercam- bio ca- tiónico	Ca solu- ción ini- cial	Ca solu- ción final	Ca solu- ción final	Ca cambio ini- cial	Mg solu- ción ini- cial	Mg solu- ción final	Mg solu- ción final	Mg cambio ini- cial	Ca+Mg cambio final	Ca solu- ción final	Mg solu- ción final
cm	g	cm ³ /cm ³	g/g	cm ³	meq	meq	meq/l	meq	meq	meq	meq/l	meq	meq	meq	meq/cm	mcq/cm
96	1740	0.32	0.224	390	312	4.2	-	C	160	8.3	-	D	146	E		
90	5818	0.33	0.230	1338	1041	14.2	79	105.7	535	27.8	90	120.4	489	1034.7	5.3	6.0
70	5899	0.35	0.241	1422	1056	14.4	32	45.5	543	28.2	65	92.4	496	1047.5	2.3	4.6
50	5859	0.37	0.256	1500	1049	14.3	25	37.5	539	28.0	49	73.5	492	987.1	1.9	3.7
30	5920	0.39	0.267	1581	1060	14.4	12	19.0	545	28.3	21	33.2	497	846	1.0	1.7
10	2044	0.42	0.292	597	366	5.0	0	0	188	9.8	0	0	172	152	0	0
GLOBAL	27280	-	-	6828	4884	66.5		207.7+C	2510	130.4		319.5+D	2292	4067.3+E		

Altura de la columna sobre el nivel de referencia.

Gramos de suelo en la sección considerada. Calculado del volumen de la columna y de la densidad aparente de cada sección de suelo obtenida por atenuación de rayos γ . ρ_b media = 1.45; ρ_b (0-10) = 1.440; ρ_b (10-30) = 1.460; ρ_b (30-50) = 1.445; ρ_b (50-70) = 1.455; ρ_b (70-90) = 1.435; ρ_b (90-96) = 1.430.

Humedad volumétrica (día 34). Deducida de la curva de retención de humedad y de la lectura de los tensiómetros (día 34).

Humedad gravimétrica (día 34), $\theta_m = \theta_v/\rho_b$; ρ_b = densidad media de cada sección de suelo obtenida por atenuación de rayos γ .

cm³ de solución en la sección considerada (día 34) = $\theta_m \times \text{gm suelo} (\rho \text{ solución} = 1 \text{ gm/cm}^3)$.

Capacidad de intercambio catiónico en la sección considerada (meq) = $0.179 \text{ meq/gm} \times \text{gm suelo en sección}$.

Ca sol. inicial = 86.8 meq/l; Ca sol. ini. (meq) = $86.8 \times \theta_m \text{ ini.} \times \text{gm suelo}/1000 = 243.9 \times 10^{-5} \times \text{gm suelo en sección}$.

Para cada sección, media de los valores extremos de la sección (día 34) (Figura 4-37).

Ca sol. final (meq) = Ca sol. final (meq/l) \times l. solución en cada sección.

Ca cambio inicial = $0.092 \text{ (meq/gm)} \times \text{gm suelo en cada sección}$.

Mg sol. inicial = 170 meq/l; Mg sol. ini. (meq) = $170 \times \theta_m \text{ ini.} \times \text{gm suelo}/1000 = 477.7 \times 10^{-5} \times \text{gm suelo en sección}$.

Para cada sección, media de los valores extremos de la sección (día 34).

Mg sol. final (meq) = Mg sol. final (meq/l) \times l. solución en cada sección.

Mg cambio inicial = $0.084 \text{ (meq/gm)} \times \text{gm suelo en cada sección}$.

(Ca + Mg) cambio final = Capacidad Intercambio Catiónico (meq) - Na cambio final (meq) en cada sección.

17 meq por sección de suelo de un cm de altura. Para la sección 0-10 cm se ha considerado que 3 cm están ocupados por el sistema de drenaje y no por suelo.

+ Mg) final (sección 90-96 cm) (C+D+E), meq = (Ca + Mg) incorporado + (Ca + Mg) sol. ini. + (Ca + Mg) cambio ini. - (Ca + Mg) sol. final (0-90 cm) - (Ca + Mg) cambio final (0-90 cm) - (Ca + Mg) extraído (valores en meq). Ca y Mg incorporados en la columna = 0 meq; Ca y Mg extraídos con sondas succión = meq.

$$D+E = 66.5 + 130.4 + 2510 + 2292 - 207.7 - 319.5 - 4067.3 - 61 = 343.3 \text{ meq.}$$

CE GLOBAL (Na + Ca + Mg)

1) A+B = -6; (2) C+D+E = 343.4; (3) E+B = 312

2) (2) - (3) : A+C+D = -6 + 343.4 - 312 = 25.4 meq = $25.4/.39 = 65.1 \text{ meq/l}$ de Na+Ca+Mg en solución en la sección 90-96 cm.

4.2.1.2. Experimento IB: Ascenso con evaporación

Relaciones suelo-agua

Este experimento, descrito en el capítulo 3 (ver Figura 3-7), tuvo cuatro etapas claramente diferenciadas: la primera (días 0 a 10) consistió en el ascenso de la solución NaCl 0.1 N desde la capa freática estacionaria, sin evaporación en la superficie del suelo (esto es, etapa idéntica a la del experimento IA). Durante la segunda (días 11 a 100) se impuso una tasa de evaporación aproximadamente constante e igual a 1.0 mm/día. En la etapa tercera (días 101 a 230) se eliminó de nuevo la evaporación, y en el día 132 se realizó la extracción de 140 ml. de solución por la sonda más próxima a la superficie del suelo (sonda a 90 cm.). Finalmente, en la etapa cuarta se impuso de nuevo una evaporación constante (flujo de aire constante) en la superficie del suelo de 1.8 mm/día, hasta el final de la experiencia (días 231 a 250).

En el experimento IB la densidad media de la columna fue ligeramente superior a la del experimento IA (1.458 frente a 1.450 g/cm³). La Figura 4-39 muestra el perfil de densidad aparente de la columna IB obtenido por atenuación de rayos gamma antes del inicio del experimento.

En la Figura 4-40 se presenta, para los primeros 20 días del experimento, la evolución ascendente del frente húmedo en función del tiempo y del volumen infiltrado de solución. En el experimento IB, la solución alcanzó la superficie del suelo en 17.1 días (15.7

días en el IA). La Figura 4-41 muestra el volumen acumulado infiltrado en la columna (una vez descontado el volumen extraído por las sondas de succión) en función del tiempo transcurrido desde el inicio del experimento, y se observa que la tasa de infiltración (pendiente de la curva) es relativamente constante durante la etapa de evaporación inicial (días 10 a 100), con un valor próximo a 26 ml/día. Dado que la evaporación en esta etapa es de 1 mm/día (equivalente a 20.5 ml/día), la humedad de la columna debe aumentar en esta etapa (Figura 4.44). Incluso después de cesada la evaporación, persiste la infiltración de solución (aunque a una tasa mucho menor, Figura 4-41), por lo que el contenido de agua en la columna durante esta etapa debe aumentar significativamente.

El volumen total de solución infiltrada en la columna es 10760 cm³. Dado que el volumen inicial de la solución en la columna era 761 cm³, y que se extrajeron un total de 1370 cm³ por las sondas de succión y 2583 cm³ por evaporación, el volumen neto de solución en la columna al final de la experiencia es 7568 cm³. Puesto que el volumen de poros de la misma es 8356 cm³, la fracción del volumen de poros ocupados por solución al final de la experiencia es del 91 % (78 % en el experimento IA). De acuerdo con estos datos, el factor de concentración del agua en el suelo (FCAS) debido a la evaporación es:

$$FCAS = \frac{\text{Volumen total}}{\text{Volumen (total-evaporado)}} = \frac{10760+761-1370}{10760+761-1370-2583} = 1.34$$

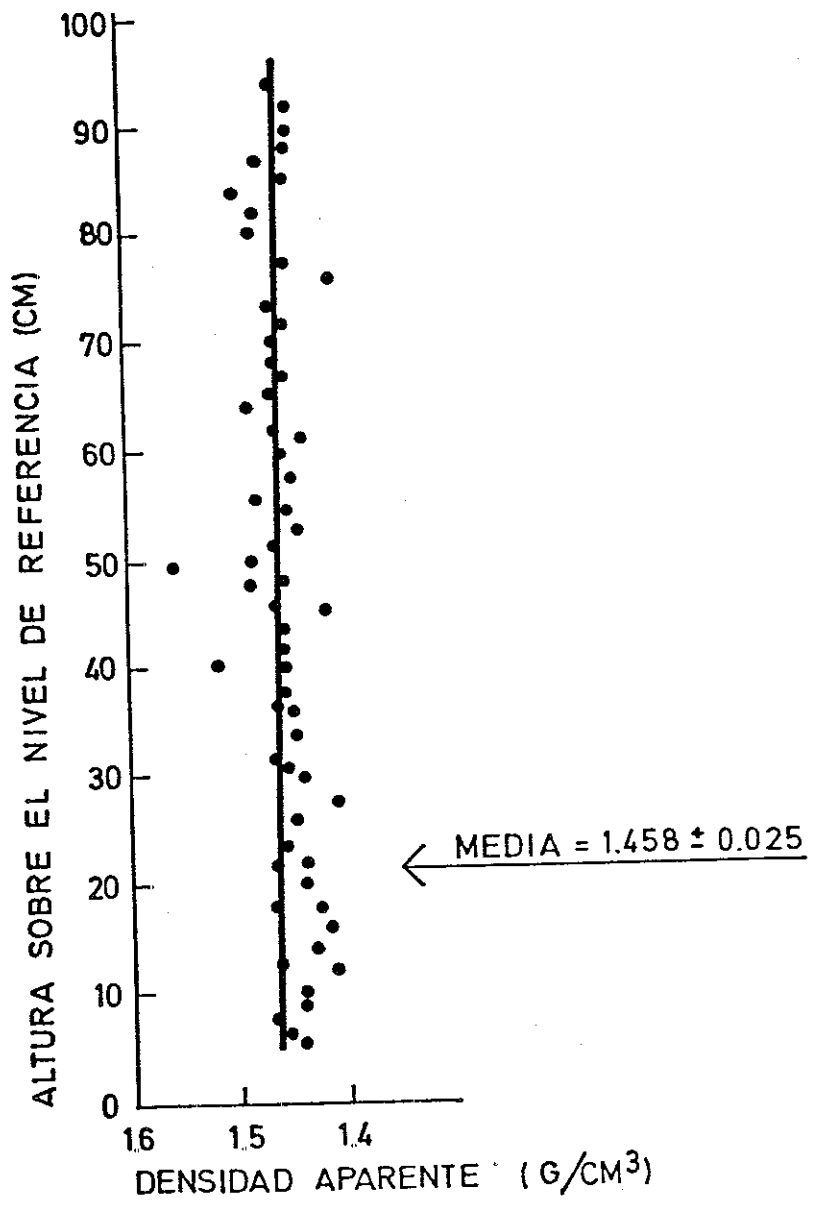


Figura 4-39. Perfil de densidad aparente medida con el aparato de rayos gamma antes del inicio del experimento - IB.

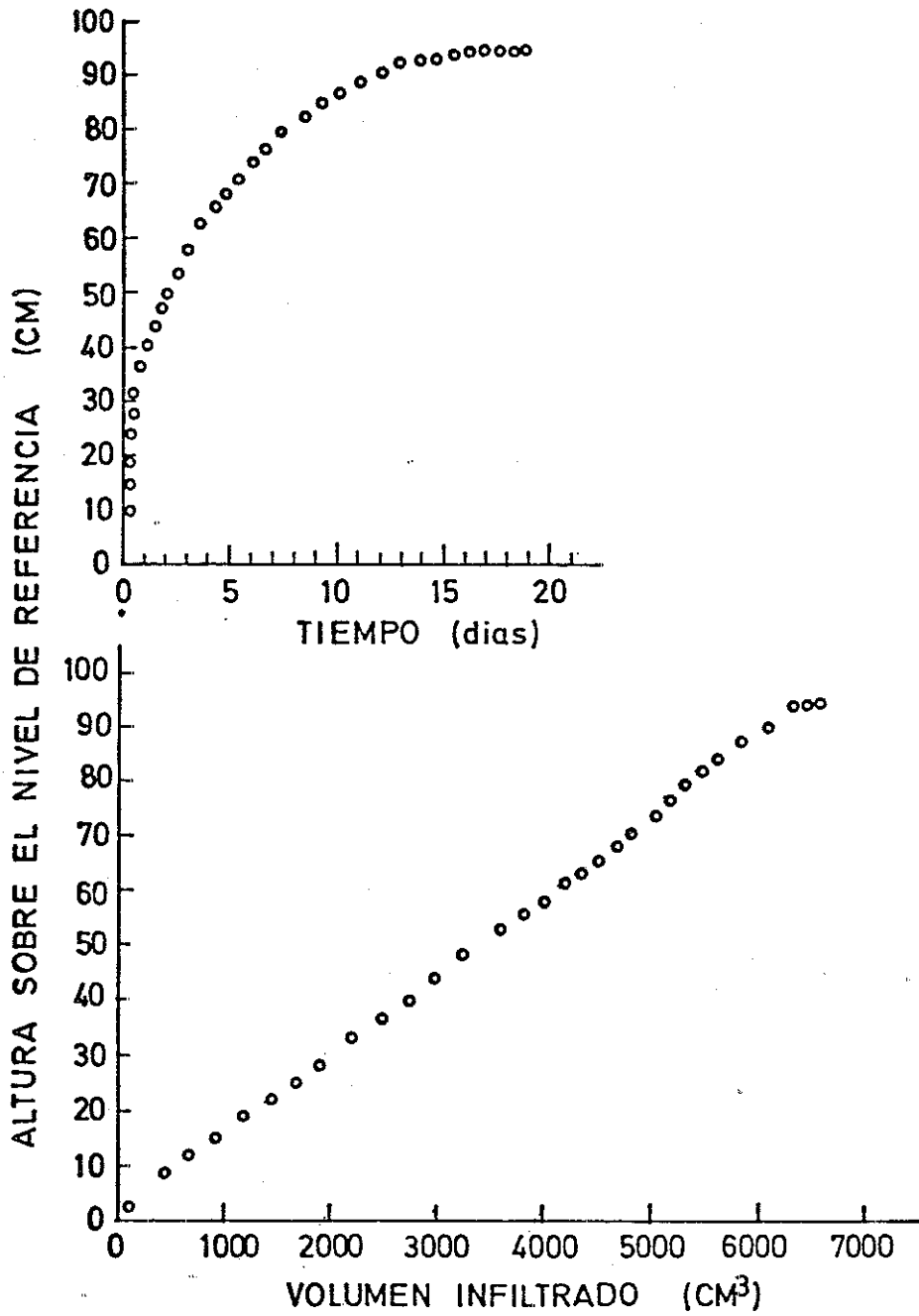


Figura 4-40. Evolución del frente húmedo ascendente en función del tiempo y del volumen acumulado de solución in filtrada en la columna IB.

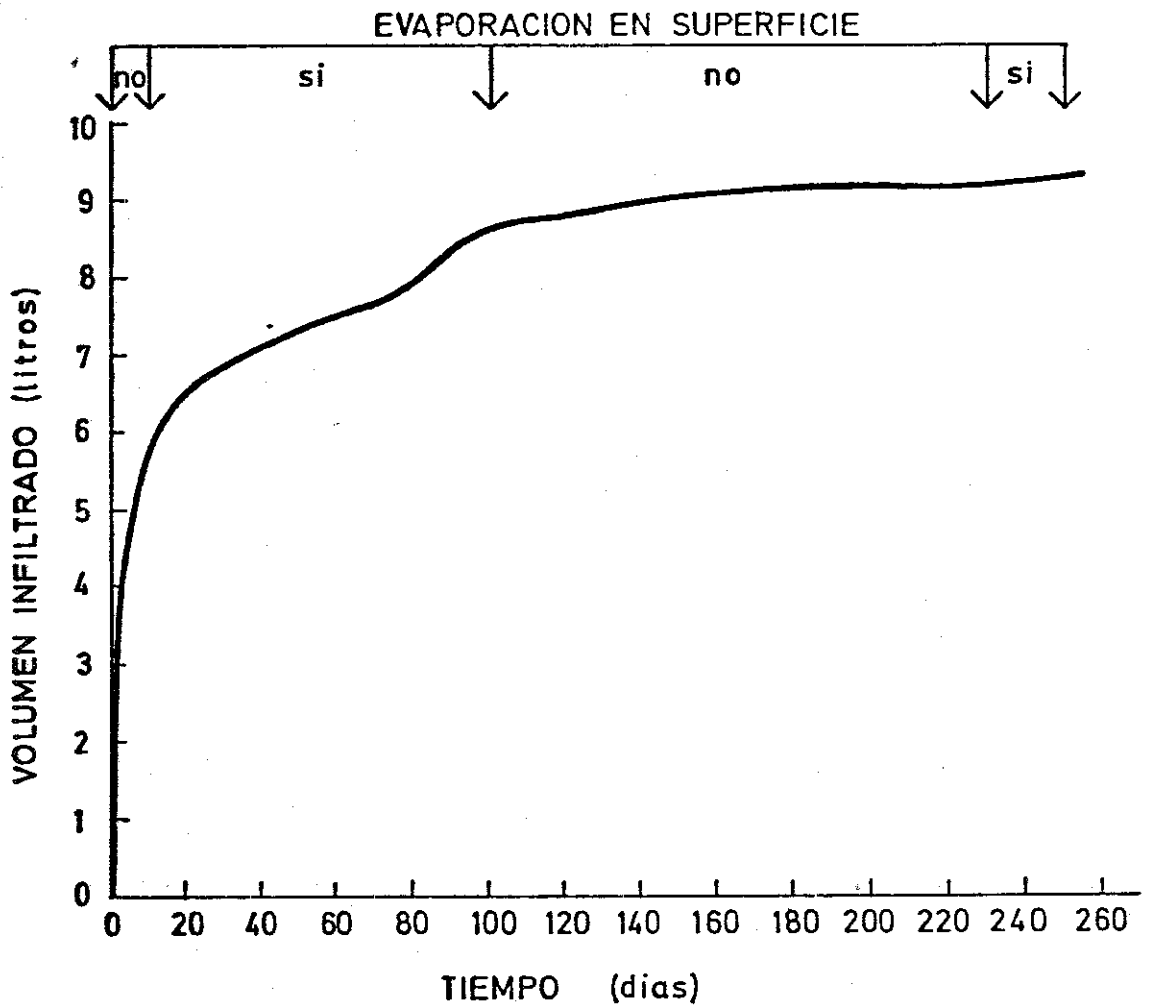


Figura 4-41. Volumen infiltrado en la columna IB (cm^3) en función del tiempo transcurrido (días) desde el inicio de la experiencia.

esto es, se ha producido una reducción por evaporación del volumen de agua en la columna de un 34 %, por lo que las sales presentes en la misma deben haberse concentrado en una proporción similar.

La Figura 4-42 (A) presenta el perfil del potencial matricial (Ψ_m) en los primeros días de ascenso capilar, e indica que la columna no ha alcanzado el equilibrio hidráulico en esas fechas. Posteriormente al día 10.2, el tensiómetro a 80 cm. de altura dejó de funcionar. Los tensiómetros inferiores mostraron pequeñas oscilaciones de lectura, siempre próximas al perfil teórico de equilibrio en ausencia de evaporación (línea de trazos discontinuos), lo cual es una indicación de que el efecto de la evaporación en superficie no es apreciable (desde el punto de vista del Ψ_m) en esa zona inferior de la columna. Se intentó una estimación indirecta del Ψ_m en la parte superior de la columna observando el vacío mínimo al que la sonda a 90 cm. era capaz de extraer solución. Aunque esta estimación es evidentemente grosera, se observó que, en general, vacíos del orden de -0.2 bares eran capaces de extraer solución del suelo, por lo que se deduce que, a esta altura, el efecto de la evaporación sobre el Ψ_m ya es apreciable, puesto que en una situación de equilibrio en ausencia de evaporación el Ψ_m habría sido -0.085 bares.

En la Figura 4-42(B) se presenta la evolución del potencial total del agua en el suelo medido por el psicrómetro situado a 93 cm. sobre el nivel de referencia (2 cm. por debajo de la superficie del suelo). Como se indicó en el capítulo de material y método

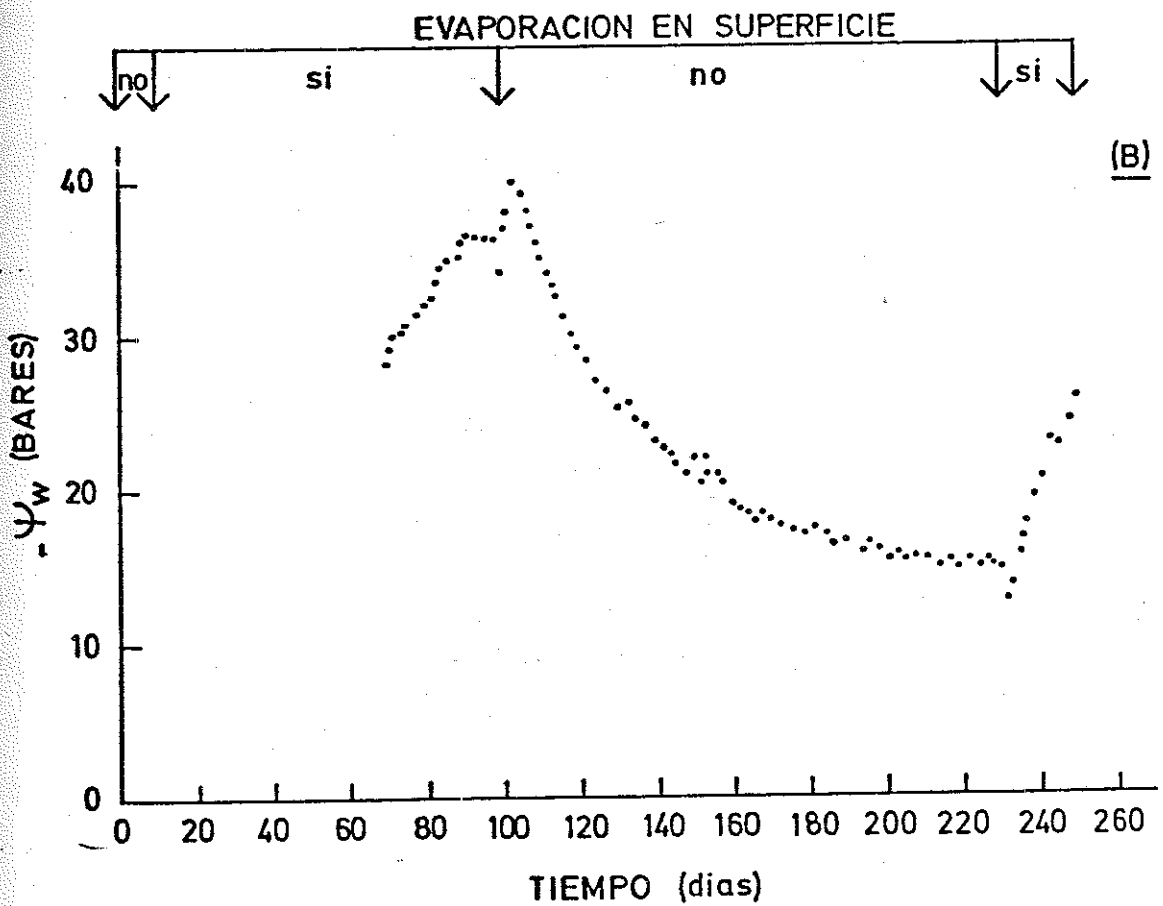
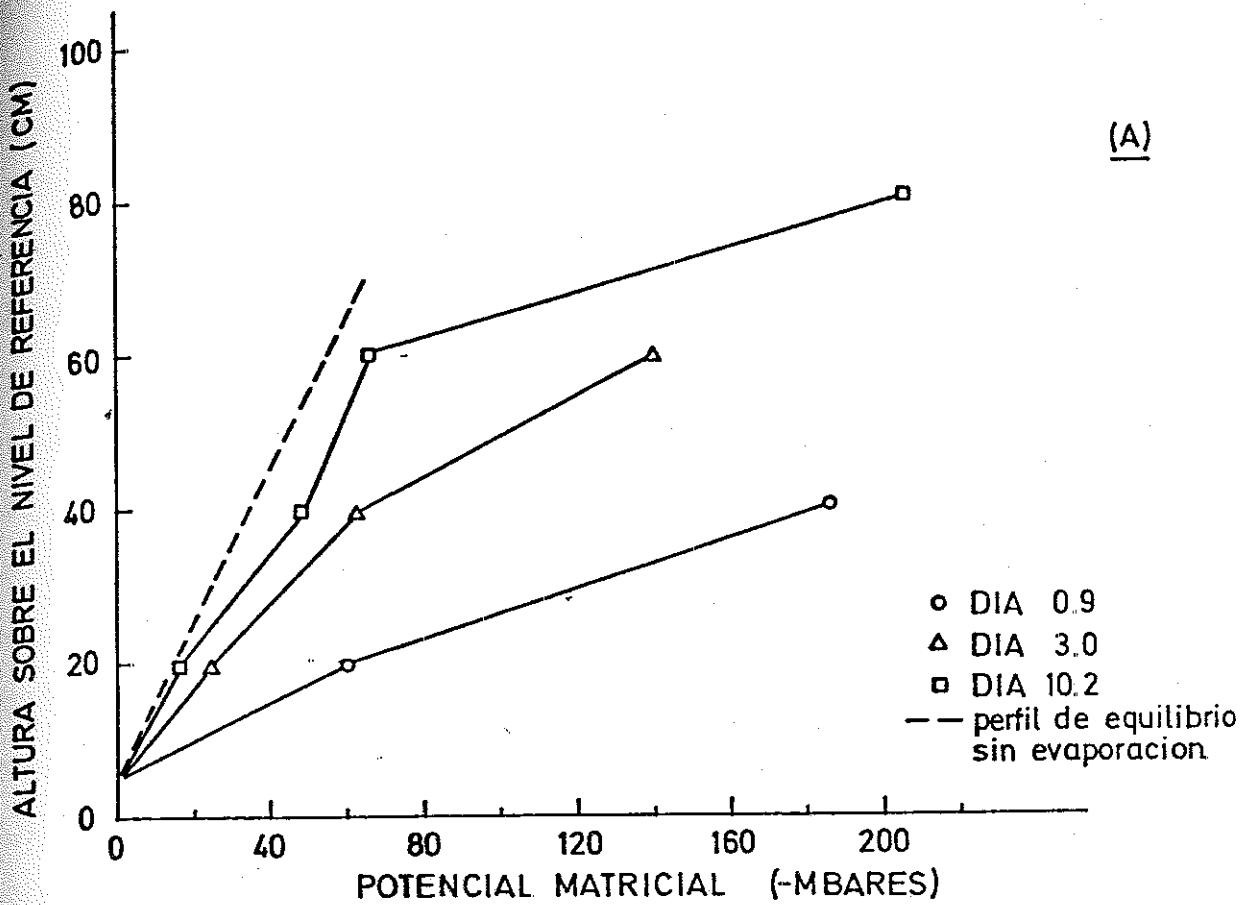


Figura 4-42. (A) Evolución del perfil del potencial matricial.
 (B) Evolución del potencial total de agua en el suelo a 2 cm. de la superficie del mismo.
 (Columna IB).

dos, la validez de los resultados obtenidos con este instrumento es cuestionable. Sin embargo, en este caso, la evolución relativa de los mismos es razonable: durante las etapas de evaporación - - (días 10 a 100 y 230 a 250) el Ψ_w disminuye, y durante la etapa - sin evaporación (días 100 a 230) el Ψ_w aumenta. Las únicas excepciones a este comportamiento general se producen entre los días - 100 a 105 (ausencia de evaporación y disminución del Ψ_w), que puede explicarse por el importante aumento de la concentración de la solución del suelo en esas fechas, lo cual hace que el potencial osmótico Ψ_s (y por lo tanto Ψ_w) disminuya de forma apreciable, y entre los días 230 a 234 (presencia de evaporación y aumento de Ψ_w), debido al aumento de Ψ_s (disminución de la concentración) de la solución del suelo en esas fechas (Figura 4-46). Dado que, de acuerdo con las medidas de θ_v a esa altura, el potencial matricial es de tan sólo unos pocos decibares (negativos), los bajos valores de Ψ_w indican de forma indirecta la posibilidad de elevadas concentraciones de la solución del suelo que, en caso de ser ciertos los Ψ_w medidos, variarían entre unos 100 (día 104) y 29 mmhos/cm (día 232) de conductividad eléctrica ($\Psi_s = -40$ y -12 bares respectivamente). Así, el Ψ_w en el día 250 (final de la experiencia) es de -26 bares, esto es, unos 58 mmhos/cm (Richards, 1954) que, como se verá más adelante, coincide en el orden de magnitud con la concentración del ion cloruro deducida del balance de masas (614 meq/l para la sección de suelo de 90 a 95 cm) y con la analizada en el seccionado final del suelo (533 meq/l para la sección superficial). En resumen, los resultados obtenidos con el

psicrómetro situado a 2 cm. de la superficie del suelo parecen cualitativa y cuantitativamente razonables, indicando una elevada concentración de la solución del suelo superficial y un importante gradiente de potencial osmótico ($\Delta\Psi/\Delta x = \frac{58-13}{93-90} = 15$ bares/cm, día 250) que tiende a difundir las sales hacia el interior de la columna.

Los perfiles de humedad volumétrica de la columna durante los primeros 14 días se presentan en la Figura 4-43. De esta gráfica puede deducirse que únicamente los primeros 20-30 cm inferiores están próximos a saturación, y que el gradiente de humedad en el frente de avance va haciéndose cada vez menor conforme progresa el ascenso de la solución en la columna, lo cual está de acuerdo con la teoría de la dinámica del ascenso capilar (Parlange y Aylor, 1972).

En la Figura 4-44 se presentan los perfiles de humedad para días diferentes una vez que la solución ha alcanzado la superficie del suelo. Así, de acuerdo con los datos experimentales señalados anteriormente, se observa que la humedad volumétrica del suelo (excepto el superficial) aumenta progresivamente con el tiempo (días 22, 30 y 75), y que el perfil va haciéndose más homogéneo. Como ya se indicó, ello es consecuencia de la elevada tasa de infiltración del agua en el suelo durante el primer período de evaporación (unos 26 ml/día, Figura 4-41) y a la relativamente pequeña tasa de evaporación (1 mm/día, equivalente a 20.5 ml/día) impuesta en el sistema. Lógicamente, durante este período el suelo superficial se

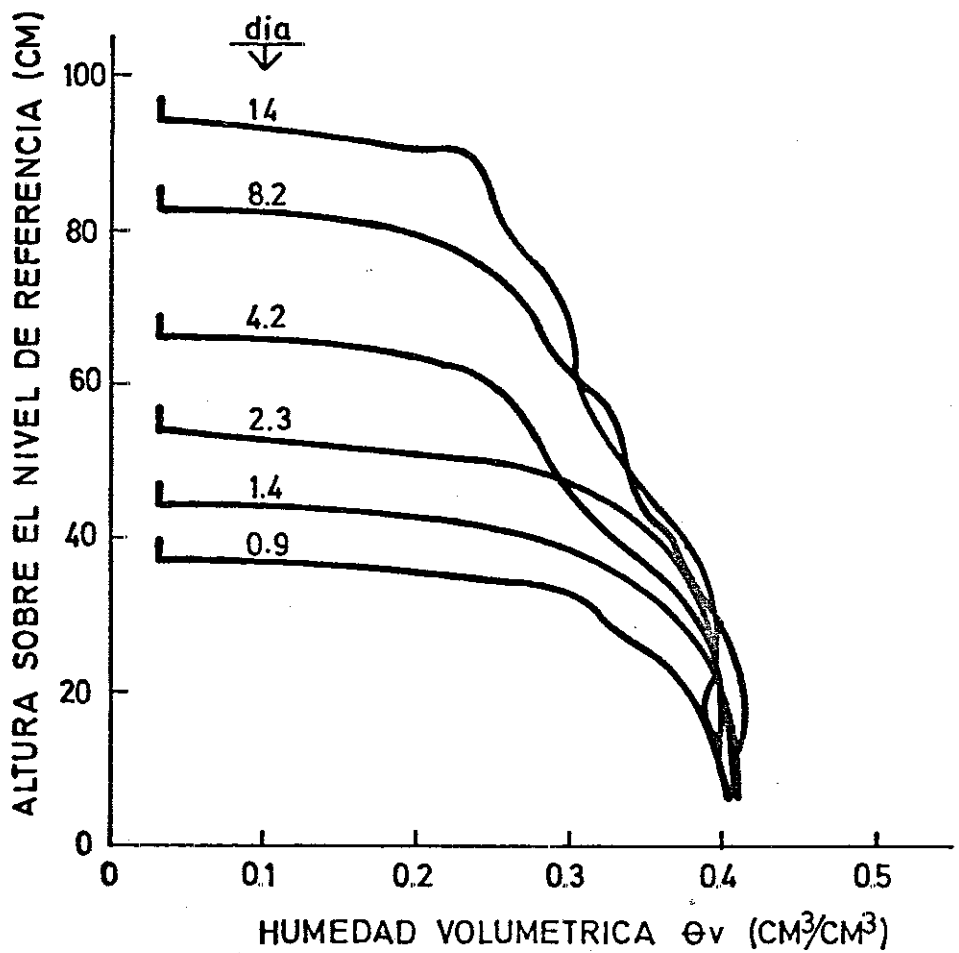


Figura 4-43. Perfiles de humedad volumétrica de la columna IB durante el ascenso capilar de la solución 0.1 N de NaCl (días 0.9 a 14).

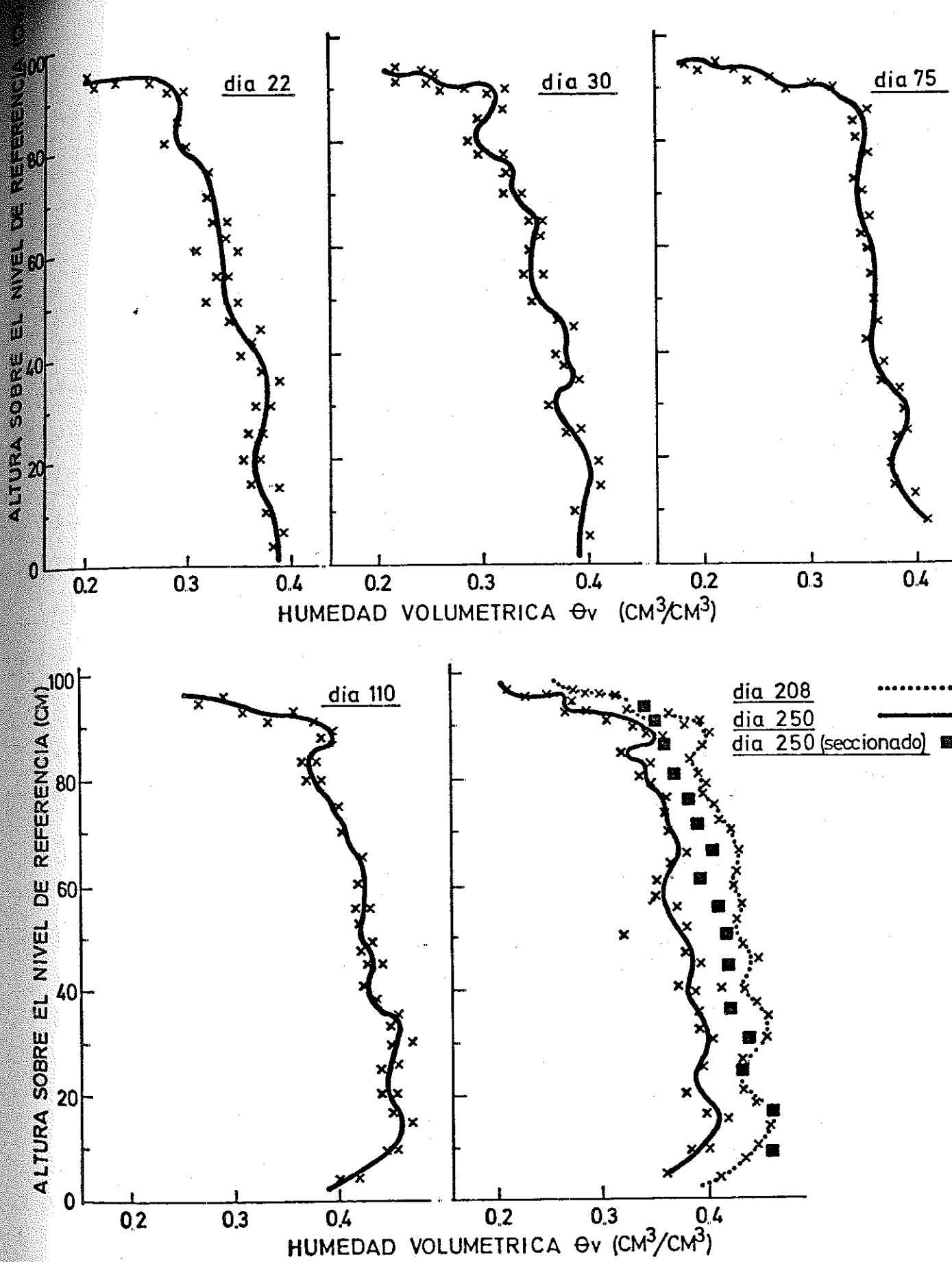


Figura 4-44. Perfiles de humedad volumétrica de la columna IB en las diferentes etapas experimentales (días 22 a 250).

va secando paulatinamente, pero de forma moderada (θ_v superficial (día 75) = $0.18 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$), lo cual evita la formación de un horizonte superficial seco que habría impedido la evaporación (Gardner y Hillel, 1962).

Al cesar la evaporación, toda el agua infiltrada permanece en la columna, y ello hace que θ_v aumente significativamente en todo el perfil (día 110). El perfil del día 208 (al final de la etapa sin evaporación) es prácticamente idéntico al del día 110, lo cual indica el equilibrio hidrofísico de la columna en esta etapa del experimento. Debe indicarse, sin embargo, que ambos perfiles son cuestionables, ya que los valores de θ_v obtenidos son incluso superiores al valor teórico de θ saturación ($0.42 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$).

Finalmente, se presenta el perfil del día 250 en la etapa de evaporación final, que muestra un descenso de θ_v a lo largo de toda la columna. Este descenso puede ser debido a la mayor tasa de evaporación impuesta en esta etapa (1.8 mm/día) y a que la infiltración de solución en el suelo no aumenta apreciablemente en esta etapa final (Figura 4-41). Por consiguiente, la evaporación se realiza a expensas del agua del suelo, por lo que θ_v disminuye en todo el perfil. Gardner y Hillel (1962) han encontrado comportamientos similares en condiciones de evaporación moderadas a bajas.

En la misma Figura 4-44 se han representado los valores deducidos del seccionado final y cálculo de la humedad gravimétrica del suelo. Para representarlo en las mismas unidades, esta hume-

dad gravimétrica (θ_m) se ha convertido en volumétrica utilizando los valores de densidad aparente obtenidos por atenuación de rayos gamma antes del inicio del experimento (Figura 4-39). Esta puede ser una razón de la discrepancia de ambos valores de θ_v el día 250, dado que la atenuación de rayos gamma mide θ_v y ρ_b conjuntamente, y no debe descartarse un cambio de ρ_b durante el experimento. Por otro lado, el seccionado del suelo pudo alterar en mayor o menor medida la densidad aparente de la muestra, afectando así a la conversión de θ_m a θ_v . Por ello, en el balance iónico de la columna se ha utilizado directamente el valor de θ_m deducido del seccionado final de la columna.

En algunos de los perfiles de la Figura 4-44 se aprecia una brusca discontinuidad de θ_v en la zona próxima a la superficie del suelo. Qayyum y Kemper (1961), Scotter y Raats (1970) y otros, han identificado asimismo una acumulación relativa de agua en o cerca de zonas de suelo con elevada proporción de sales. El aumento de θ_v observable en algunos perfiles a la altura de unos 90 cm. sugeriría por lo tanto la presencia en superficie de una elevada concentración o incluso una precipitación de sales. Esta hipótesis se confirma posteriormente por los resultados obtenidos en el extracto de suelo 1:10.

En conclusión, los perfiles de humedad obtenidos indican que la evaporación de la solución del suelo ha venido gobernada por las condiciones evaporativas externas impuestas en el sistema, y no por la conductividad hidráulica del suelo, por lo que, para las

distintas etapas del experimento, se ha mantenido un perfil de humedad relativamente constante y homogéneo. Ello es consecuencia de que las tasas de evaporación impuestas (de 0.1 a 0.2 cm/día según las medidas realizadas por el psicrómetro de ambiente) son mucho menores que la conductividad hidráulica del suelo (1 cm/día y 0.5 cm/día para $\theta_v = 0.32$ y $0.25 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, respectivamente; Nielsen et al., 1970), por lo que la capacidad de transmisión de agua del suelo no ha disminuido a lo largo del experimento.

Variación de la CE en la columna de suelo

En las Figuras 4-45 y 4-46 se presenta la evolución de la CE leída por el sensor de salinidad, CE_{se} (dos sensores a cada altura muestreada) y la medida en las soluciones extraídas por las sondas de succión, CE_{ss} . En general, los resultados obtenidos en la sección de columna de 0 a 70 cm. son similares a los del experimento IA, y las conclusiones antes realizadas son aplicables aquí también en toda su extensión.

Debe resaltarse que de nuevo se observan los elevados valores de CE_{ss} en el frente de avance, incluso superiores (alturas de 70 y 90 cm) a la CE teórica de la solución residente en el suelo, así como valores inferiores (altura de 30 cm) a la CE de la solución infiltrante (10.7 mmhos/cm). Este último aspecto ha sido también observado en otros trabajos (Diestel, 1974; Schaffer, 1975). Asimismo, los valores finales de CE en ambos experimentos son muy parecidos, y en ambos casos próximos a la CE de la solución infiltrante.

Debido a esta similitud, puede concluirse que al menos los 70

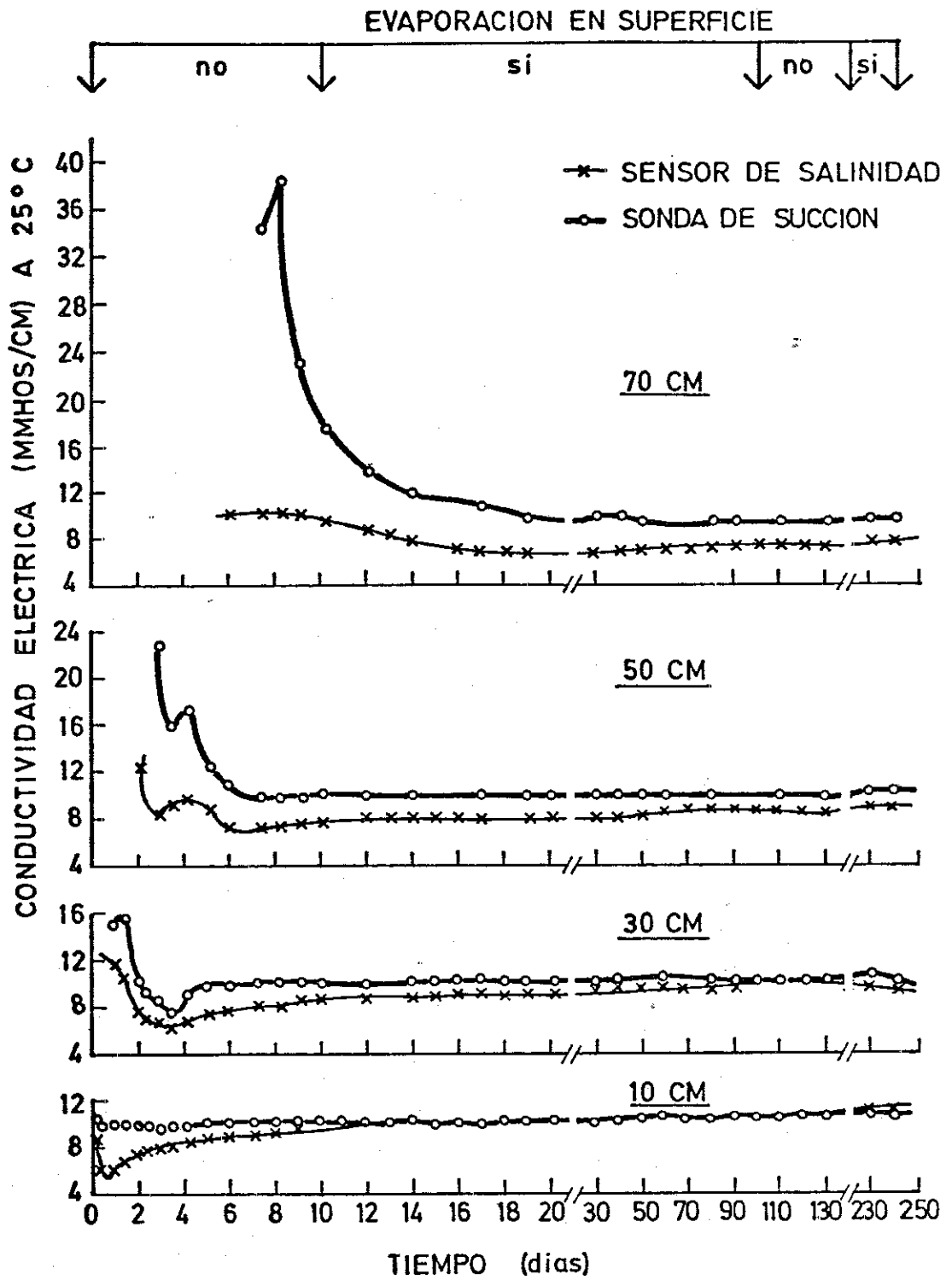


Figura 4-45. Evolución de CE_{se} (sensor de salinidad) y CE_{ss} (sonda de succión) en la columna IB (alturas de 10, 30, 50 y 70 cm.).

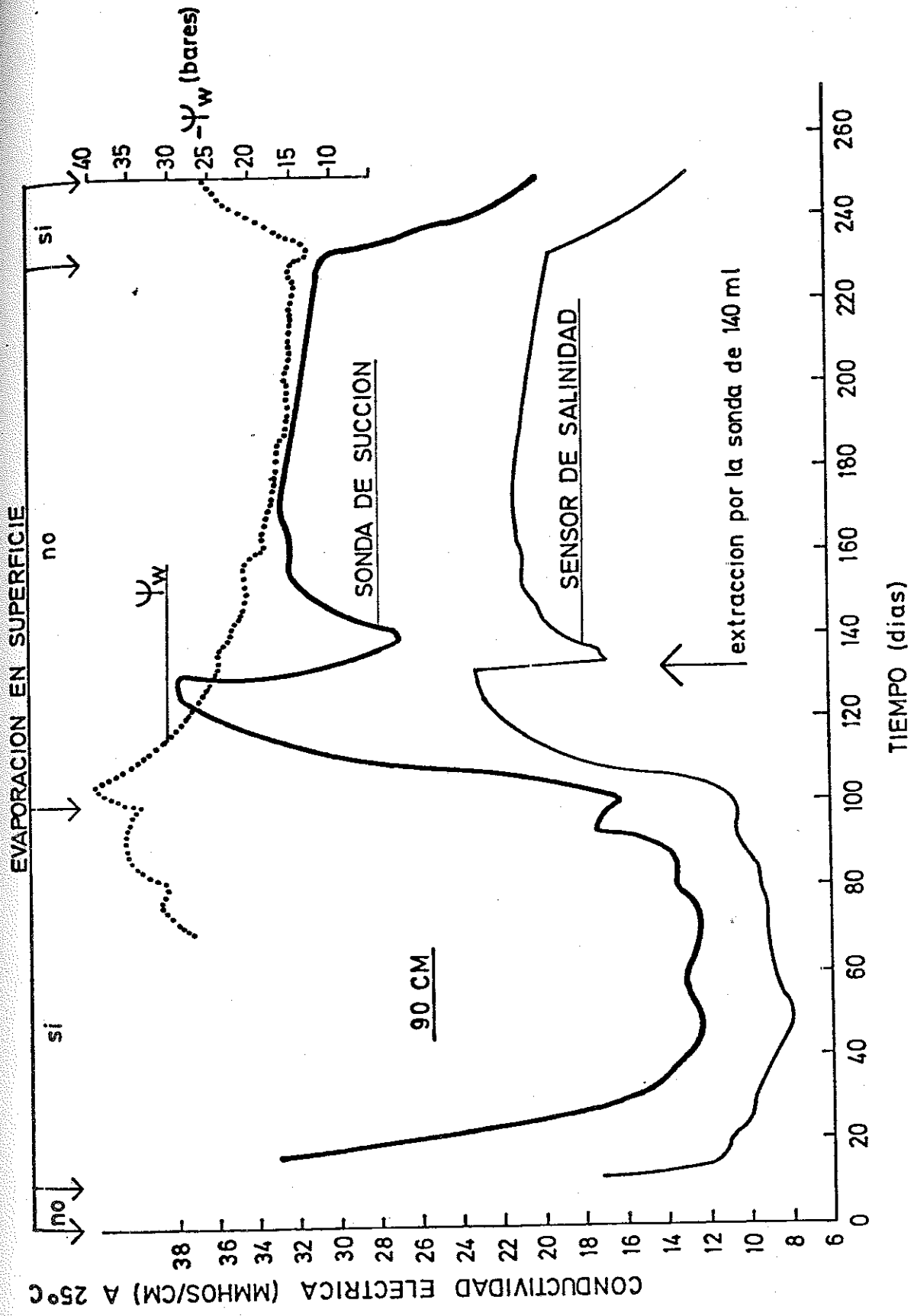


Figura 4-46. Evolución de CE_{se} (sensor de salinidad) y CE_{ss} (sonda de succión) en la columna IB (alturas de CE_{se} y CE_{ss}) y 93 cm (ψ_w).

cm. de la columna de suelo próximos a la capa freática no son afectados de forma apreciable - desde el punto de vista de la salinidad total - por el proceso de evaporación en superficie. Esto es, tanto hidráulica (apartado anterior) como químicamente la tasa de evaporación impuesta sólo afecta a los primeros centímetros superficiales de suelo. Así, los resultados obtenidos a los 90 cm. de altura difieren sustancialmente en ambos experimentos: mientras en el experimento sin evaporación (IA) la CE_{SS} se estabilizó en 18 mmhos/cm, en el experimento con evaporación (IB, Figura 4-46) la CE_{SS} disminuye - por efecto del flujo ascendente de solución de baja concentración - por detrás del frente de avance salino inicial hasta valores próximos a 12.5 mmhos/cm (esto es, sólo un 23% superiores a los de la solución infiltrante) (días 45 a 75), y posteriormente aumenta - hasta alcanzar unos 16 mmhos/cm para el final de la etapa con evaporación.

En el momento en que cesa la evaporación (día 100), el flujo de masas ascendente de solución disminuye o cesa, por lo que el mecanismo de difusión iónica adquiere ahora su máxima importancia, transportando las sales en el sentido del gradiente de potencial osmótico, esto es, desde la superficie hacia el interior de la columna. Consecuentemente, la CE a 90 cm. aumenta drásticamente, desde unos 16 mmhos/cm a valores próximos a 38 mmhos/cm (día 125).

El fenómeno opuesto se produce en el día 230 (evaporación), al predominar de nuevo el flujo ascendente de solución menos concentrada. La misma razón origina el descenso de la CE en el día 132, puesto que la extracción de 140 ml. por la sonda a 90 cm. induce el flu

jo de solución preferentemente ascendente de menor concentración.

En resumen, puede concluirse que, en presencia de evaporación en la superficie del suelo, las sales que son transportadas por el flujo de masas ascendente se concentran en o cerca de la superficie del suelo. Ello origina gradientes de concentración que tienden a desplazar las sales por difusión molecular hacia el interior de la columna y en sentido contrario al flujo de masas ascendente. Cuando este último cesa o disminuye, el proceso de difusión predomina sobre el de convección y tiende a redistribuir las sales superficiales, con lo que la concentración a 90 cm. aumenta significativamente. Asimismo, la mayor densidad de la solución concentrada tendería a desplazarla hacia el interior de la columna. Este segundo mecanismo parece, sin embargo, de menor importancia (Diestel, 1976).

Este efecto de aumento de la concentración debido a la difusión sólo es perceptible, en estas condiciones experimentales, en la sección de columna de 90 a 95 cm. de altura, no apreciándose ningún aumento de la concentración a los 70 cm., incluso después de transcurridos 130 días sin evaporación.

Este hecho se muestra también en la Figura 4-47, en la que se ha representado la CE_{SS} a diferentes alturas en la columna frente al volumen acumulado de solución infiltrada. Como ya se indicó en el experimento IA, los valores iniciales de CE_{SS} obtenidos a cada altura dependen de la distancia relativa del frente de avance en el momento de la extracción. Así, se observa que la menor CE_{SS} ob-

tenida a 90 cm. (en relación con la obtenida a 70 cm.) es debida al mayor número de volúmenes de poros desplazados a 90 cm. (infiltración de 1200 cm³ a la altura de 90 cm. frente a 900 cm³ a la altura de 70 cm.) entre el momento de la primera extracción y la del paso del frente de avance.

Finalmente, los valores relativos de CE_{se} y CE_{ss} (Figuras 4-45 y 46) coinciden con el comportamiento de los mismos en el experimento IA, y confirman de nuevo los resultados obtenidos en el capítulo 4.1.2. A pesar del largo tiempo de contacto sensor-suelo (250 días) la CE_{se} no alcanza el valor "real" de la solución del suelo, esto es, el tiempo de respuesta de un sensor parcialmente desaturado en un medio a subsaturación es infinito (Cuadro 4-9).

Así, a efectos ilustrativos, aunque la evolución de CE_{se} a 90 cm. de altura es prácticamente paralela a la de CE_{ss} , la primera sólo alcanza el 65% del valor de la segunda. En este sentido, la utilidad del sensor estriba en que, al indicar de forma aparentemente correcta las variaciones relativas de CE, sólo es necesario realizar la extracción con la sonda cuando la lectura del sensor cambia, lo cual favorece el procedimiento experimental, ya que la columna no es alterada tan frecuentemente.

Por otro lado, como ya se indicó anteriormente, las diferencias entre el sensor y la sonda pueden ser, al menos en parte, reales, ya que ambos instrumentos no muestrean necesariamente la misma porción de la solución del suelo. Este hecho se deja notar sobre todo en casos como el estudiado, en que el perfil de salinidad no es homogéneo (capítulo 4.1.1).

Variación iónica en la columna de suelo

Las Figuras 4-48 a 4-50 muestran la concentración de los iones Cl, Na, Ca y Mg en las soluciones extraídas con las sondas de succión, frente al tiempo (días). En general, los resultados y conclusiones obtenidos para los primeros 70 cm. de la columna próximos a la capa freática son, como cabría esperar, similares a los del experimento IA. La única diferencia constatable es que el ión sodio ha ascendido algo más en la columna, alcanzando por ejemplo valores de 62 y 34 meq/l a los 30 y 50 cm. de altura respectivamente para el final de la experiencia, frente a 50 y 18 meq/l en el experimento IA. Esto parece lógico por el mayor volumen de poros desplazados y el mayor tiempo de contacto fase sólida-solución del experimento IB. A pesar de ello, el sodio por encima de 70 cm. es prácticamente el mismo en ambos experimentos, lo cual es una indicación, como se señaló anteriormente, de las capacidades relativas de las fases sólida y solución que hacen que la infiltración de casi 4000 cm³ más en el experimento IB no afecten de forma sustancial a los resultados obtenidos.

El ascenso relativo de los distintos iones en la columna se aprecia claramente en los perfiles iónicos representados en las Figuras 4-51 a 4-54. En estas figuras se ha representado también el análisis del seccionado final de la columna de suelo (líneas de trazos) y la variación de las concentraciones iónicas en la sección superior de la columna (70-90 cm.) para las diferentes etapas del experimento.

En general, los valores deducidos del seccionado final son al-

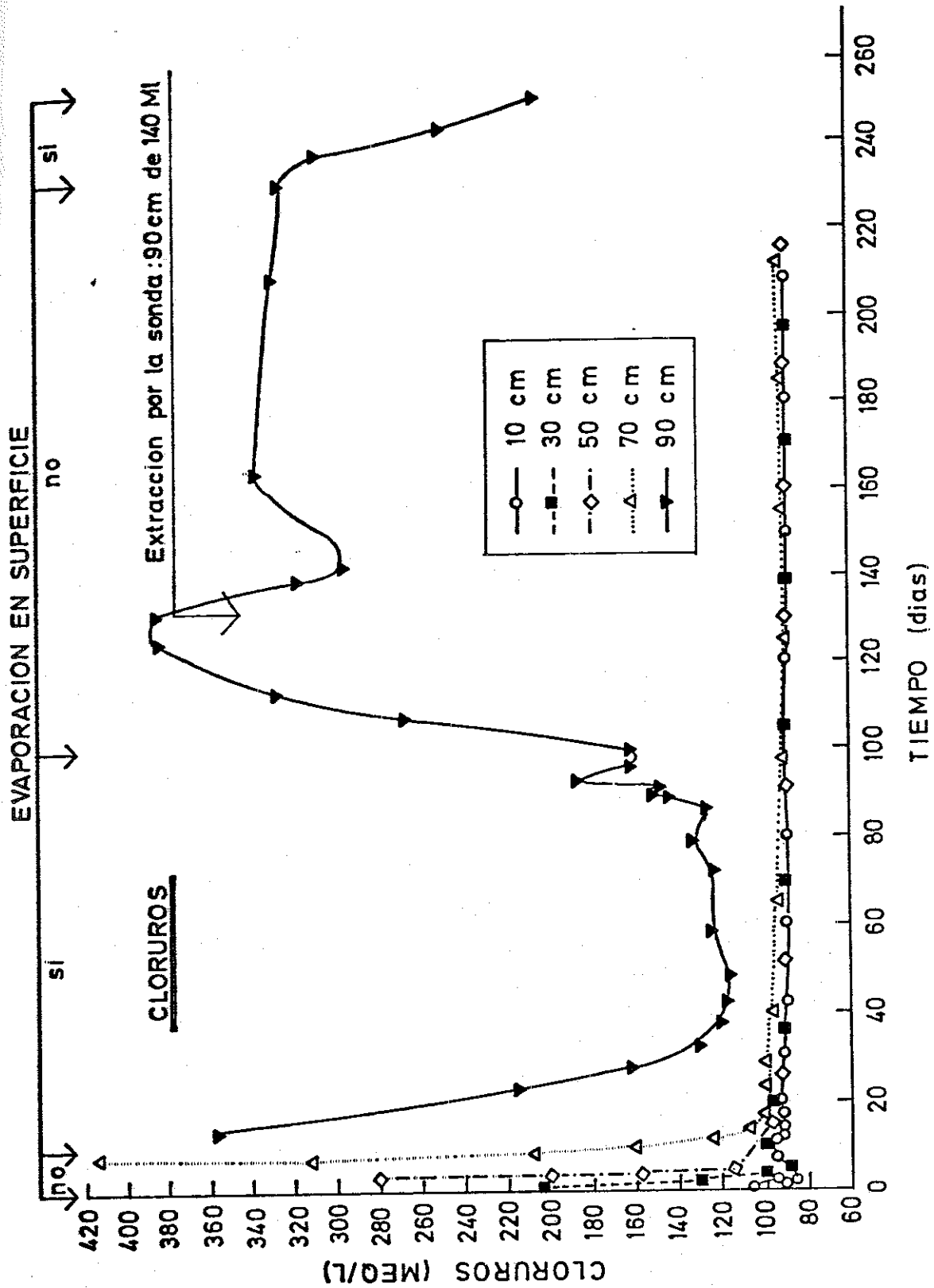
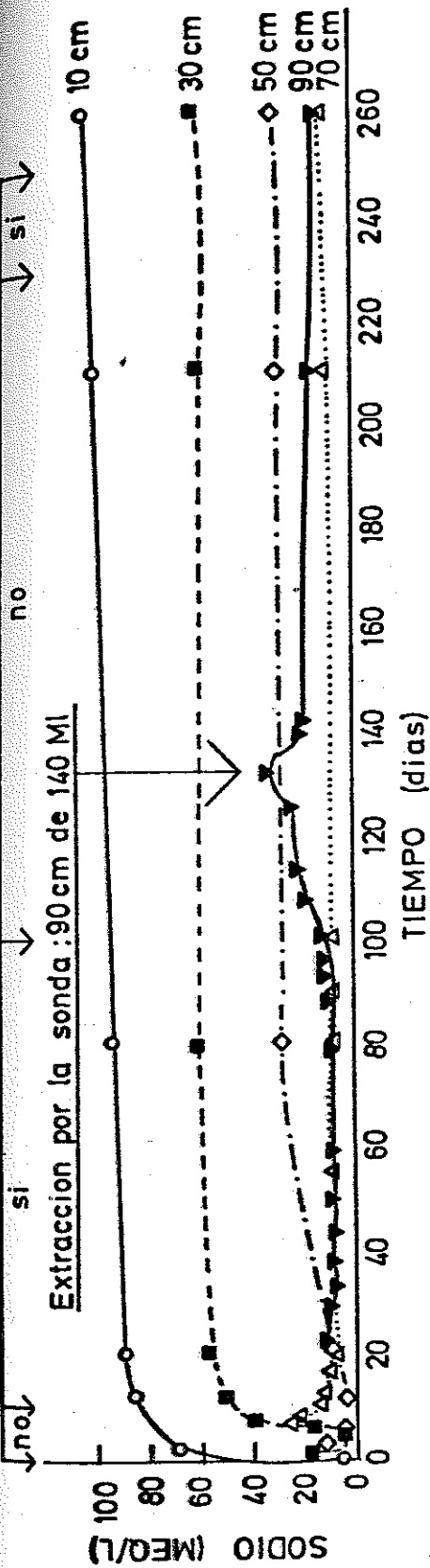


Figura 4-48. Concentración a diferentes alturas del ion Cl durante el proceso de ascenso capilar de la solución infiltrada de NaCl 0.1 N (columna IB).

EVAPORACION EN SUPERFICIE



○	Sonda	Succion a 10 cm	nivel ref
■	"	" 30 "	"
◇	"	" 50 "	"
△	"	" 70 "	"
▼	"	" 90 "	"

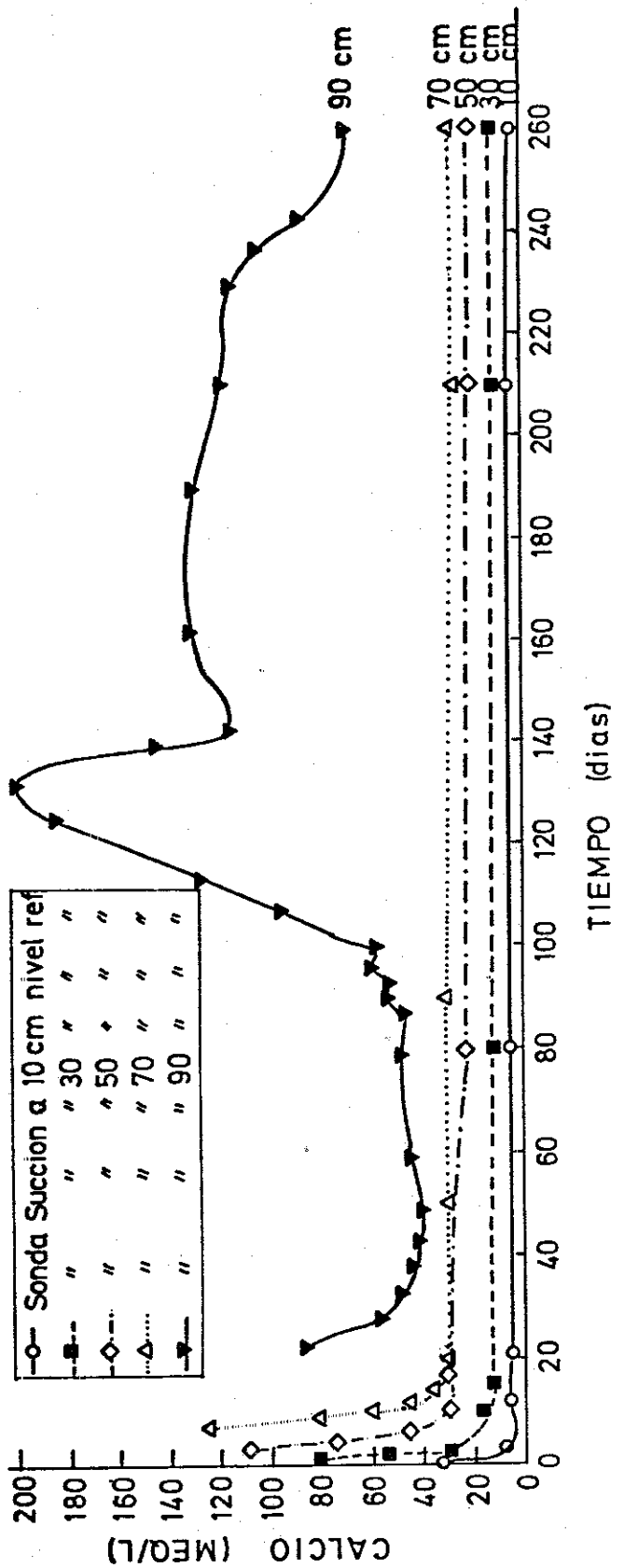


Figura 4-49. Concentración a diferentes alturas de los iones Na y Ca durante el proceso de ascenso capilar de la solución infiltrante de NaCl 0.1 N (columna IB).

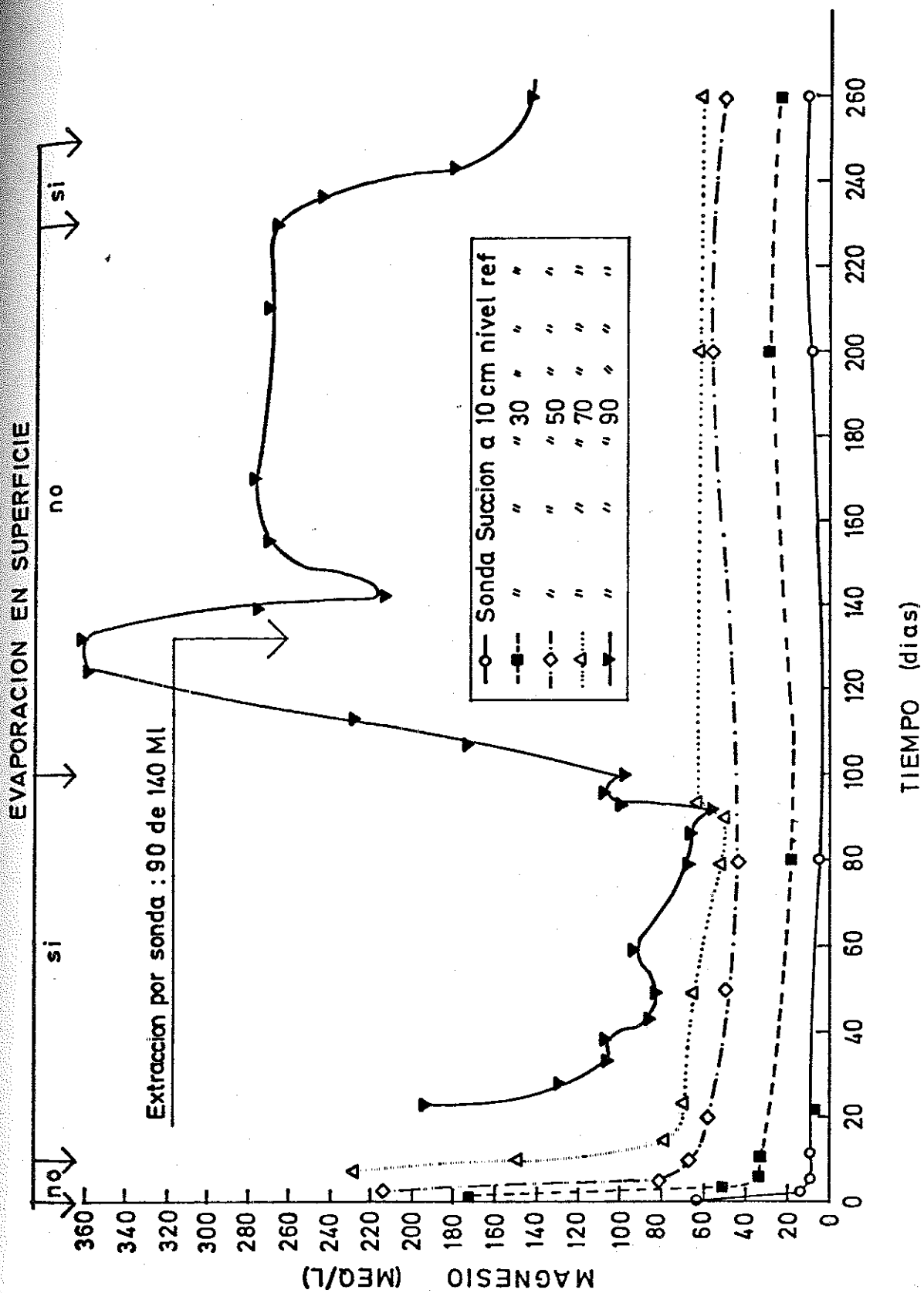


Figura 4-50. Concentración a diferentes alturas del ion Mg durante el proceso de ascenso capilar de la solución infiltrante de NaCl 0.1 N (columna IB).

go superiores a los obtenidos con la sonda en el mismo día, probablemente debido al elevado gradiente de potencial osmótico en la parte superior de la columna, que ha podido desplazar parcialmente las sales durante el período comprendido entre la última extracción y el seccionado del suelo (unas 4 horas).

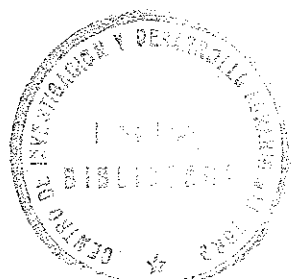
Hasta los 85 cm. de altura los perfiles del día 79 y del seccionado final son relativamente parecidos, lo que confirma que las diferentes etapas posteriores del experimento (evaporación, no evaporación, extracción de solución por la sonda a 90 cm...) sólo afectan de forma sustancial a los primeros diez centímetros de suelo próximos a la superficie. Así, el aumento global de las concentraciones iónicas en la sección 85-95 cm. es evidentemente debido a la evaporación de la solución del suelo. De forma análoga a la CE en la sección 70-90 centímetros, las concentraciones iónicas aumentan con el tiempo en la etapa sin evaporación y disminuyen con el tiempo en la etapa con evaporación. Asimismo, se produce una disminución instantánea en la concentración al extraer solución por la sonda a 90 cm., para volver a aumentar paulatinamente con el tiempo (ver también Figuras 4-48 a 4-50).

El ion sodio en ningún caso supera el valor de 38 meq/l a los 90 cm. de altura, mientras que los iones Ca y Mg alcanzan sus valores máximos en el día 132, antes de la extracción de solución por la sonda de 90 cm. Debe resaltarse asimismo la elevada concentración del ion Mg obtenida a la altura de 93 cm. en el seccionado final.

El hecho de que la relación Mg/Ca en el frente inicial de - -

avance de las curvas a las diferentes alturas (Figuras 4-50 y 4-51) coincide en líneas generales con la relación Mg/Ca en el extracto saturado indica que el mismo está formado fundamentalmente por la solución inicial residente en el suelo. Esta relación de 2:1 se hace posteriormente menor debido a que la fuente principal de Ca y Mg es ahora el complejo de cambio del suelo, en donde la relación Mg/Ca es algo menor que la unidad.

La existencia de elevadas concentraciones de Mg (y Ca) en el suelo superficial apoya la afirmación antes realizada de la posible existencia de sales precipitadas en o cerca de la superficie del suelo. Así, de acuerdo con el extracto 1:10 realizado en el suelo al final del experimento, las concentraciones de Ca y Mg obtenidas en este extracto para las secciones de suelo 92-94 cm. y 94-95 cm. (ver Figura 3-9) y transformadas al contenido de agua real del suelo ($c(\theta) = c(1:10) \times \frac{10}{\theta}$, donde c se refiere a las concentraciones iónicas en el extracto a θ y en el extracto 1:10 y θ es el contenido gravimétrico de agua del suelo) superan de forma significativa a las concentraciones obtenidas en el extracto a θ , $c'(\theta)$, lo cual es una indicación evidente de la existencia de sales precipitadas en esas secciones superficiales de suelo. Por el contrario, tanto para el resto de las secciones como para el ion sodio a lo largo de toda la columna (incluyendo las secciones superficiales) no se observan incrementos significativos de concentración entre $c(\theta)$ y $c'(\theta)$, por lo que puede concluirse que sólo han precipitado superficialmente sales de Ca y Mg, presumiblemente en forma de carbonatos, aunque la concentración de sulfatos en el horizonte superficial debe ser también al-



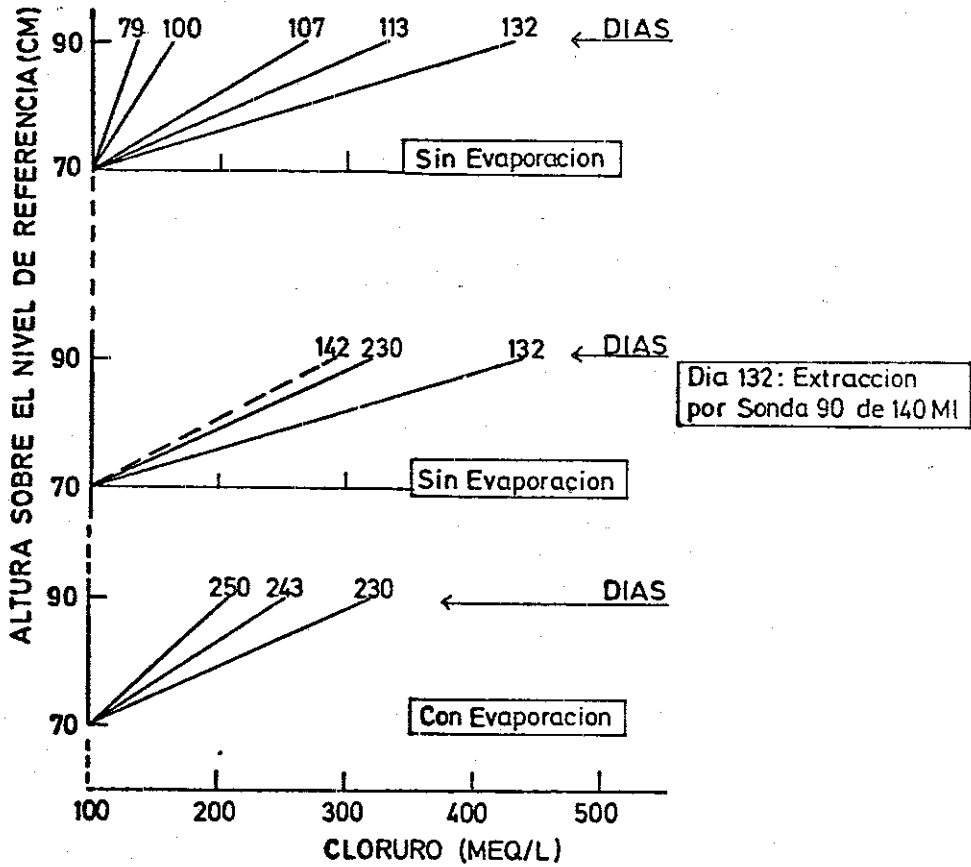
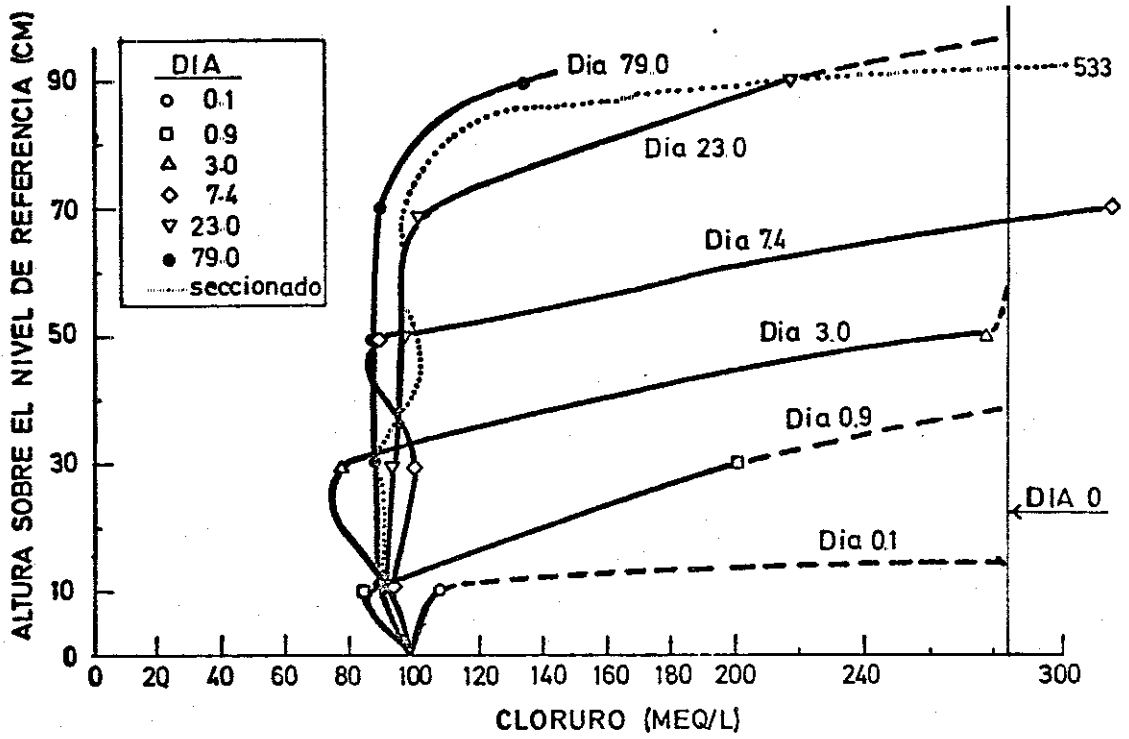


Figura 4-51. Evolución del perfil de concentración del ion cloruro (columna IB).

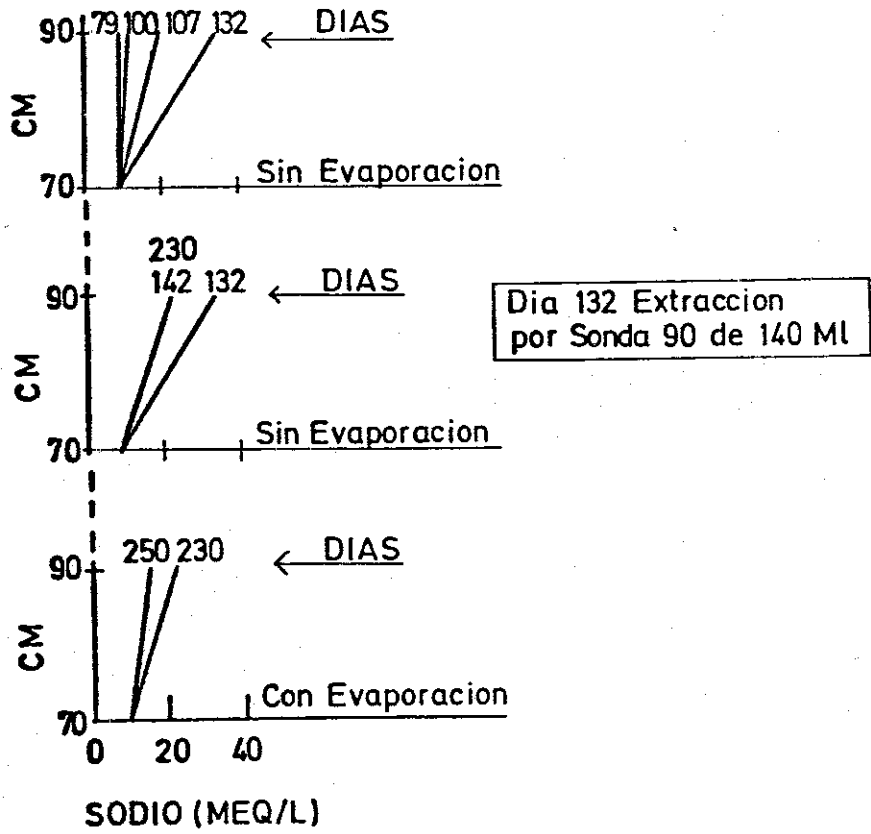
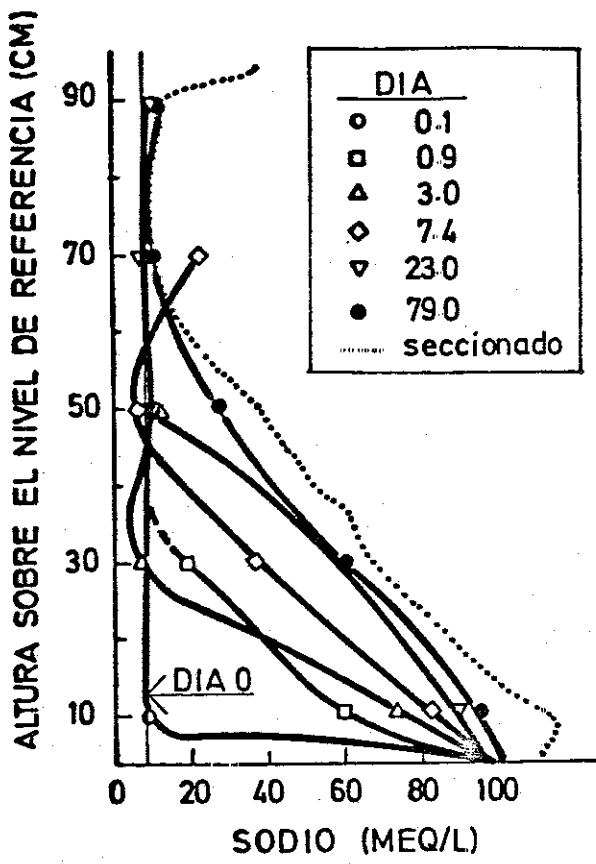


Figura 4-52. Evolución del perfil de concentración del ion sodio (columna IB).

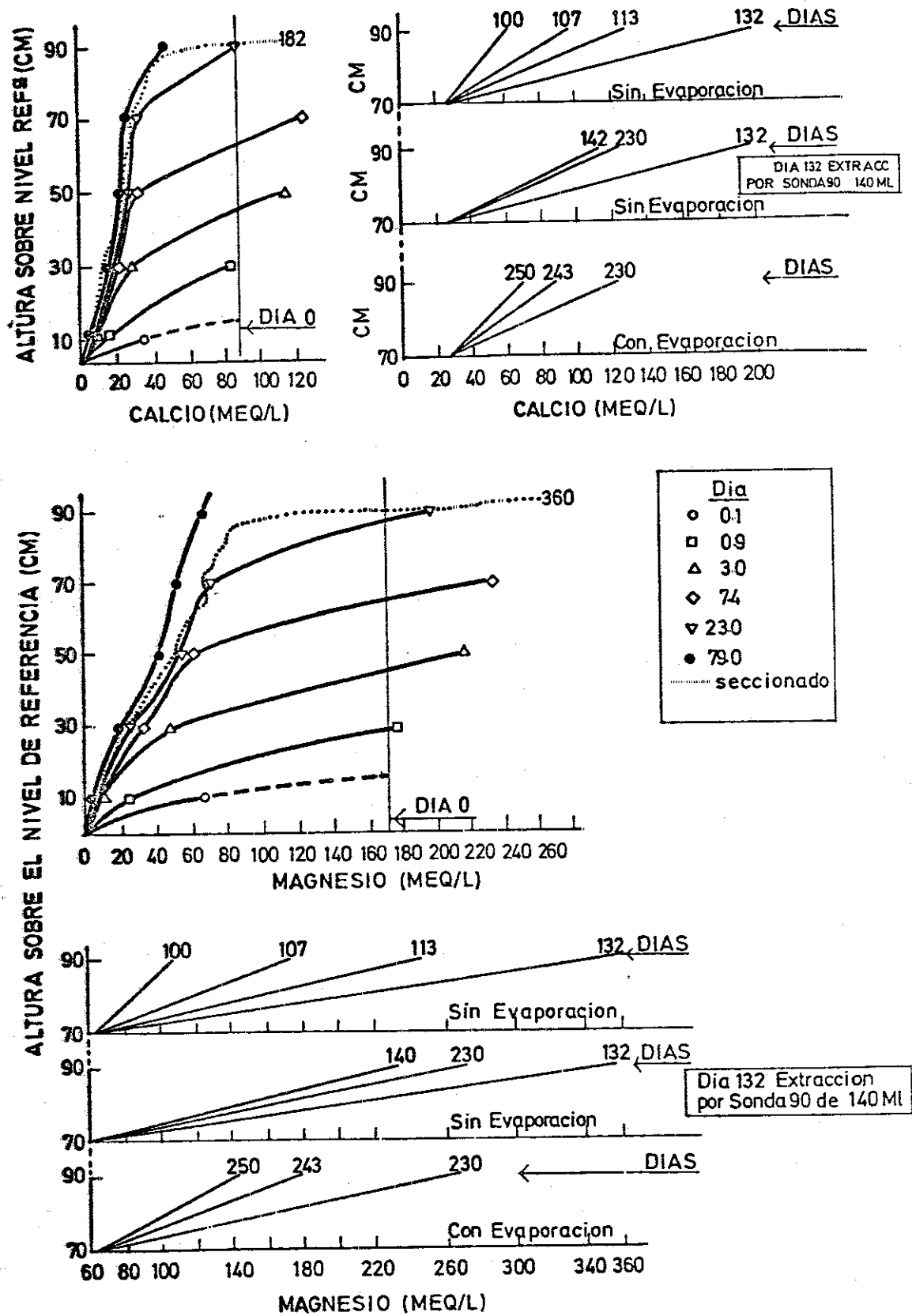


Figura 4-53. Evolución del perfil de concentración del ion calcio y magnesio (columna IB).

ta. No obstante, no puede concluirse a través de este análisis la precipitación de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (yeso) debido al efecto salino ($\text{Cl} = 533 \text{ meq/l}$).

En las Figuras 4-51 a 4-54 se ha representado también el perfil del día cero, que es la concentración de la solución inicial del suelo deducida a través del modelo de Oster y Dell'Osso. Mientras en el experimento IA sólo excepcionalmente se sobrepasaron estas concentraciones iónicas, la Figura 4-53 muestra que los perfiles de calcio y magnesio sobrepasan frecuentemente las mismas.

El perfil de SAR (Figura 4-54) integra los complejos mecanismos que afectan a la concentración de los iones Na, Ca y Mg y muestra que la columna se ha sodificado ($\text{ESP} > 15$) hasta una altura de unos 30 cm., esto es, sólo 5 cm. más que en el experimento IA, a pesar del volumen de solución infiltrada sustancialmente mayor. Esto es consecuencia de que se infiltraron 1076 meq de Na en la columna (10.760 cm^3 de solución NaCl 0.1 N), lo cual supone tan sólo el 22 % de la capacidad de intercambio catiónico de la misma (4848 meq).

Como era de esperar, el perfil del sodio de cambio (Figura 4-55) sigue una forma parecida al SAR, tanto cualitativa como cuantitativamente (de forma aproximada se cumple que $\text{SAR} \approx \text{ESP}$). Lógicamente, el máximo ESP del suelo se obtiene para los primeros centímetros próximos a la capa freática. Sin embargo, a pesar de que la misma es teóricamente una solución de SAR infinito (NaCl 0.1 N), la Figura 4-54 muestra que el valor del SAR es sensible-

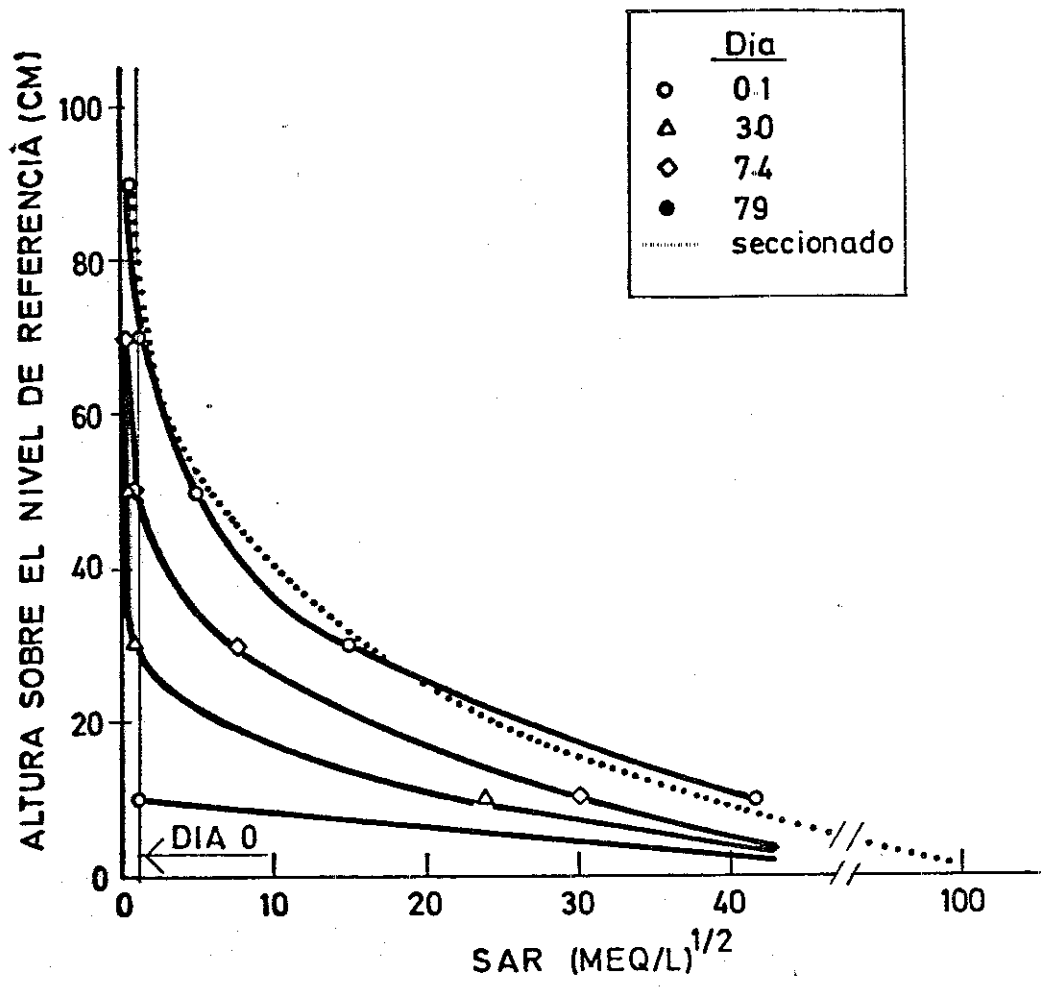


Figura 4-54. Evolución del perfil de SAR (columna IB).

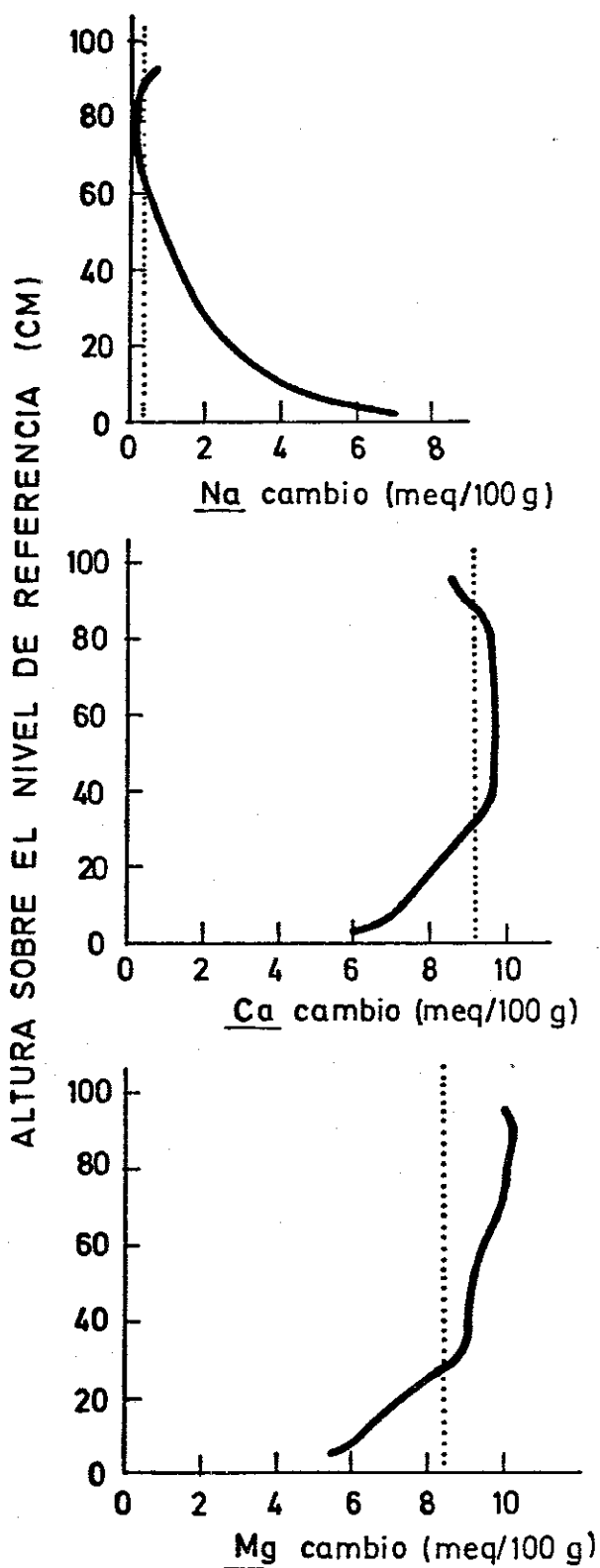


Figura 4-55. Perfiles de los cationes de cambio Na, Ca y Mg. (Columna IB, seccionado final).

mente menor y la Figura 4-55 muestra que el ESP (Na cambio/0.179) sólo alcanza el 40 % en esa zona. Los perfiles del calcio y magnesio de cambio siguen una tendencia opuesta a la del sodio de cambio, esto es, sus concentraciones (meq/100 g de suelo) aumentan con la altura en la columna, excepto para los primeros centímetros superficiales de suelo. Este último hecho está de acuerdo con el principio conocido de que, para una composición iónica constante, al aumentar la concentración de la solución del suelo los cationes monovalentes (Na) se adsorben preferentemente sobre los divalentes (Ca, Mg).

Finalmente, debe observarse que, debido al intercambio $X - (Ca-Mg) + Na^+ \rightleftharpoons Na-X + Ca^{++} + Mg^{++}$ (siendo X las posiciones de cambio del suelo) y el subsiguiente desplazamiento ascendente de los iones Ca y Mg desorbidos, la concentración de estos iones en solución aumenta hasta que llega un momento en que la ecuación anterior invierte su sentido, por lo que el Ca y Mg de cambio en la parte media y superior de la columna (excepto en el suelo más superficial) es mayor que el inicialmente presente en el suelo (líneas de trazos verticales). El hecho de que la suma de los cationes de cambio determinados alcance valores superiores a 17.9 meq/100 g puede deberse, al menos en parte, al desplazamiento del K de cambio (no determinado) por los cationes divalentes Ca y Mg.

Balance de masas iónico

Tanto las ventajas como las limitaciones señaladas en el ba-

balance de la columna IA (ascenso sin evaporación) son aplicables al balance de la columna IB (ascenso con evaporación), excepto la limitación 2. Aquí se ha utilizado la humedad gravimétrica deducida del seccionado final, con lo que la precisión de esta variable debe ser mayor que la deducida en la columna IA a partir del potencial matricial y de la curva característica de retención de humedad.

Los Cuadros 4-18, 4-19 y 4-20 presentan el balance de masas de los iones Cl, Na y Ca + Mg, respectivamente. Las notas a pie de cuadro explican los cálculos realizados. El balance se ha aplicado al día 250, esto es, al final de la experiencia.

El balance de agua de la columna (Cuadro 4-18, nota 5) indica que el volumen de solución final estimado en la misma (7568 cm^3) es próximo al medido en su seccionado (7724 cm^3), con un error en la estimación del -2 %, lo cual valida el procedimiento experimental y confirma la precisión del cálculo de la evaporación realizado según el procedimiento descrito en el capítulo 3.2.3 (psicrómetro de ambiente y caudalímetro).

El balance de masas del ion cloruro (Cuadro 4-18) muestra de nuevo un aporte neto de este ion en todas las secciones de la columna. En relación con el experimento IA, los resultados obtenidos para los primeros 70 cm. son similares. El efecto de la evaporación se deja notar de forma apreciable en la sección 70-90 cm (13.1 meq/cm en la columna IB frente a 8.9 meq/cm en la IA) y de forma muy acusada en la sección 90-95 cm (41.8 meq/cm en IB frente

a 21.5 meq/cm en IA). Así, del balance de masas se deduce que la concentración media del cloruro en esta última sección es de 614 meq/l (331 meq/l en IA), que coincide en el orden de magnitud con el valor medido de 533 meq/l en el seccionado final de la columna (debe entenderse que ambos valores no son comparables en rigor, puesto que el análisis del seccionado final se realizó sobre la sección 92-94 cm, esto es, porque el primer centímetro - presumiblemente con la máxima concentración en sales - no se analizó, ya que se reservó para el extracto 1:10).

Por otro lado, es evidente que los procesos de evaporación y salinización están íntimamente ligados, ya que el segundo es consecuencia del primero. Así, Doering et al. (1964) han calculado la tasa de evaporación en presencia de una capa freática a través de la medida de la salinización del suelo, obteniendo buenos resultados. Aquí se utiliza este enfoque para evaluar por otro método el grado de confianza del procedimiento experimental y del balance de masas realizado para las columnas IA y IB.

Como se vio en el apartado de relaciones agua-suelo, el factor de concentración del agua en el suelo en el experimento IB fue 1.34. Por consiguiente, la salinización del perfil del suelo debida a la evaporación (IB) respecto a la del proceso sin evaporación (IA) debe estar en una relación próxima a este valor.

El Cuadro 4-21 muestra el factor de concentración de una columna respecto a la otra, en base a los meq de Cl por unidad de volumen para la sección superior de la columna de 70 a 95 (aque-

11a en la que el efecto de la evaporación es apreciable) y para toda la columna (0-95 cm). Los resultados muestran que el factor de concentración para la sección superior es de 1.44 y de 1.16 para toda la columna. Finalmente, el cálculo del factor de concentración de sales basado en los meq de Cl por unidad de masa de suelo para toda la columna arroja un valor de $IB/IA = 1.34$. Por consiguiente, puede concluirse que los factores de concentración de volumen (medido) y de sales (estimado) son razonablemente próximos, lo cual valida de forma indirecta los trabajos realizados.

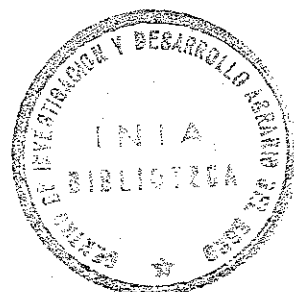
El balance del ion sodio (Cuadro 4-19) muestra un descenso en su concentración (en meq/cm, columna 14) conforme asciende en su columna sensiblemente menor que el experimentado en la columna IA (Cuadro 4-10, columna 14), confirmando el ascenso superior de este ion en el experimento IB hasta la altura de 70 cm. La comparación del sodio de cambio estimado (columna 13) y medido (columna 15) sugiere que la efectividad del intercambio de Ca y Mg por Na es menor del 100 %, especialmente para la parte inferior de la columna. Esta posibilidad se discutió ya en el balance de la columna IA.

Finalmente, del balance de masas de Ca + Mg (Cuadro 4-20) se deduce que la masa de estos iones en solución se ha incrementado en todas las secciones de suelo excepto en la más baja (0-10 cm) (columnas 7 + 11 frente a columnas 9 + 13), y que este incremento se ha realizado a expensas de un descenso del (Ca + Mg) cambio, fundamentalmente en los 50 cm. inferiores de la columna, de 547 meq. El descenso equivalente en la columna IA fue de 448 meq, con-

firmándose de nuevo la mayor sodificación (mayor proporción de Na - en las posiciones de cambio) de la parte inferior de la columna IB.

El balance de masas catiónico global para la sección superficial de suelo (90-95 cm) indica que la masa de (Na+Ca+Mg) en la fase solución es de 102.3 meq, lo que equivale a una concentración de 301 meq/l. Este valor es sólo la mitad de la concentración de Cl estimada en la misma sección (614 meq/l). Dado que la electroneutralidad de la solución debe cumplirse, ello significa que la contribución de los otros aniones no medidos (fundamentalmente sulfatos y bicarbonatos) es significativa y/o que se ha sobreestimado la capacidad de intercambio catiónico efectiva. Ya se indicó que las capacidades relativas de las fases de cambio y solución son tan diferentes (la primera es mucho mayor que la segunda) que el mínimo error producido en la estimación de la primera conduce a importantes errores en el cálculo de la segunda. Así, la diferencia entre los meq - estimados de Cl y de (Na + Ca + Mg) en la sección 90-95 cm es de - 106.5 meq, lo cual supone tan sólo poco más del 2 % de la capacidad de intercambio catiónico de la columna (4848 meq).

En conclusión, el balance de masas iónico realizado es adecuado para la estimación del ion cloruro en la sección de suelo superficial, y los valores obtenidos en ambas columnas así lo confirman, pero es inapropiado para la estimación de los cationes debido a la gran sensibilidad de los mismos respecto a la variable capacidad de cambio. Sin embargo, el balance sirve para ilustrar algunos procesos interesantes del transporte de masas en un medio reactivo, sig



Cuadro 4-18. Balance de masas del ion cloruro. Ascenso con evaporación (Experimento IB)

1 altura columna cm	2 suelo -g	4 θm g/g	5 volumen solución cm ³	6 solución inicial meq	7 solución final meq/l	8 solución final meq	9 solución final meq/cm
90-95	1435	0.237	340	11.5	(614)**	(208.8)*	(41.8)
70-90	5839	0.256	1495	46.7	175	261.6	13.1
50-70	5899	0.279	1646	47.2	93	153.1	7.7
30-50	5920	0.293	1735	47.4	93	161.4	8.1
10-30	5940	0.310	1841	47.5	94	173.1	8.7
0-10	2051	0.325	667	16.4	97	64.7	9.2
TOTAL	27084		7724	216.7			

NOTAS

Columna #

- 1 Altura de la columna sobre el nivel de referencia.
- 2 Gramos de suelo en la sección considerada. Calculado del volumen de la columna y de la densidad aparente de cada sección de suelo obtenida por atenuación de rayos γ. $\bar{\rho}_b$ media = 1.458; ρ_b (0-10) = 1.445; ρ_b (10-30) = 1.465; ρ_b (30-50) = 1.460; ρ_b (50-70) = 1.455; ρ_b (70-90) = 1.440; ρ_b (90-95) = 1.445.
- 4 Humedad gravimétrica (día 250) deducida del seccionado de la columna y análisis gravimétrico.
- 5 cm³ de solución en la sección considerada (día 250) = $\theta m \times gm \text{ suelo} (\rho \text{ solución} = 1 \text{ gm/cm}^3)$
 cm³ iniciales en la columna = $\theta m \text{ inicial} \times gm \text{ suelo} = 0.0281 \times 27084 = 761 \text{ cm}^3$ (a)
 cm³ infiltrados en la columna (día 250) = 10760 cm³ (b)
 cm³ extraídos con las sondas de succión = 1370 cm³ (c)
 cm³ evaporados; área columna = $204.8 \times 10^{-4} \text{ m}^2$;
 Evaporación diaria media
 - días 10 a 100: $1 \text{ mm/día} \times 204.8 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \times 90 \text{ días} = 1845 \text{ cm}^3$
 - días 230 a 250: $1.8 \text{ mm/día} \times 204.8 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \times 20 \text{ días} = 738 \text{ cm}^3$
 - cm³ totales evaporados = $1845 + 738 = 2583 \text{ cm}^3$
 cm³ netos en la columna = $a + b - c - d = 7568 \text{ cm}^3$. Comparado con el volumen real de solución del suelo (columna 5) de 7724 cm³ el error es del 2.0%
- 6 Cl sol. inicial = 285 meq/l; Cl sol. ini. (meq) = $285 \times \theta m \text{ ini.} \times gm \text{ suelo}/1000 = 0.008 \times gm \text{ suelo sección}$
- 7 Para cada sección, media de los valores extremos de la sección (día 250) (Figura 4-48)
- 8 Cl sol. final (meq) = Cl sol. final (meq/l) \times l. solución en cada sección
- 9 meq por sección de suelo de un cm de altura. Para la sección 0-10 cm se ha considerado que 3 cm están ocupados por el sistema de drenaje y no por suelo.

* Cl final (sección 90-95), meq = Cl incorp. + Cl sol. ini. - Cl sol. final (sección 0-90 cm) - Cl ext.; Cl incorporado en la columna = $10.760 \text{ l} \times 100 \text{ meq/l} = 1076 \text{ meq}$; Cl extraído en sondas succión = 270 meq.

Cl final (sección 90-95), meq = $1076 + 216.7 - 813.9 - 270 = 208.8 \text{ meq}$.

** Cl final (sección 90-95), meq/l = $208.8 / 340 = 614 \text{ meq/l}$.

Diagrama 4-19. Balance de masas del ion sodio. Ascenso con evaporación. (Experimento IB)

Columna #	2	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	suelo	θm	volumen solución	capacidad intercambio catiónico	solución inicial	solución final	solución final	cambio inicial	relación adsorción sodio(SAR) (meq/l) ^{1/2}	porcentaje sodio cambio (ESP) %	cambio final	solución final	cambio final (medido)
	g	g/g	cm ³	meq	meq	meq/l	meq	meq			meq	meq/cm	meq
95	1435	0.237	340	257	0.3	-	F*	4.3	-	-	G*		10
90	5839	0.256	1495	1045	1.3	12	17.9	17.5	1.4	0.8	8.4	0.9	10
70	5899	0.279	1646	1056	1.3	22	36.2	17.7	3.4	3.6	38	1.8	30
50	5920	0.293	1735	1060	1.3	50	86.8	17.8	9.3	10.9	116	4.3	83
30	5940	0.310	1841	1063	1.3	84	154.6	17.8	21.9	23.7	252	7.7	160
10	2051	0.325	667	367	0.5	104	69.4	6.2	-	-	220	9.9	120
	27084		7724	4848	6.0		364.9+F	81.3			634.4+G		

Altura de la columna sobre el nivel de referencia.

Gramos de suelo en la sección considerada. Calculado del volumen de la columna y de la densidad aparente de cada sección de suelo obtenida por atenuación de rayos γ. $\bar{\rho}_b$ media = 1.458; ρ_b (0-10) = 1.445; ρ_b (10-30) = 1.465; ρ_b (30-50) = 1.460; ρ_b (50-70) = 1.455; ρ_b (70-90) = 1.440; ρ_b (90-95) = 1.445.

Humedad gravimétrica (día 250) deducida del seccionado de la columna y análisis gravimétrico. cm³ de solución en la sección considerada (día 250) = $\theta m \times \text{gm suelo}$ (ρ solución = 1 gm/cm³).

Capacidad de intercambio catiónico en la sección considerada (meq) = 0.179 meq/gm x gm suelo en sección.

Na sol. inicial = 7.91 meq/l; Na sol. ini. (meq) = 7.91 x θm ini. x gm suelo/1000 = 22.23 x 10⁻⁵ x gm suelo en sección.

Para cada sección, media de los valores extremos de la sección (día 250) (Figura 4-49).

Na sol. final (meq) = Na sol. final (meq/l) x l. solución en cada sección.

Na cambio inicial = 0.003 (meq/gm) x gm suelo en cada sección.

Sección 0-10 cm: los primeros 5.5 están bajo la capa freática de NaCl 0.1 N, en los que Na = 100 meq/l, y Ca, Mg = 0 meq/l, por lo que ESP = 100%. De estos 5.5 cm, 3 cm están ocupados por el sistema de drenaje, y el resto (2.5 cm) es suelo. En estos 2.5 cm hay 2.5 x 293 gm/cm = 732.5 gm de suelo; Na cambio (3-5.5 cm) = 732.5 gm x 0.179 meq/gm = 131 meq. El resto de suelo (1318.5 gm) se asume con un SAR de 42 (SAR a 10 cm) equivalente a un ESP de 37.8; Na cambio (5.5-10 cm) = 37.8 x 0.179 x 1318.5/100 = 89 meq; Na cambio (0-10 cm) = 131 + 89 = 220 meq.

Resto secciones: SAR = Na / [(Ca + Mg)/2]^{1/2}; Na, Ca, Mg = valores extremos de la sección en meq/l, día 250.

ESP = porcentaje de sodio de cambio = $[100'(-0.0126 + 0.01475 \text{ SAR})] / [1 + (-0.0126 + 0.01475 \text{ SAR})]$

Na cambio final = ESP x CIC (meq)/100.

meq por sección de suelo de un cm de altura. Para la sección 0-10 cm se ha considerado que 3 cm están ocupados por el sistema de drenaje y no por el suelo.

Na de cambio final medido en el seccionado de la columna.

Na final (sección 90-96 cm), meq (F + G) = Na incorporado + Na sol. ini. + Na cambio ini. - Na sol. final (0-96 cm) - Na cambio final (0-90 cm) - Na extraído; (valores en meq); Na incorporado en la columna = 1076 meq; Na extraído con sondas de succión = 98 meq.

F + G = 1076 + 6.0 + 81.3 - 364.4 - 634.4 - 98 = 66.0 meq.

Quadro 4-20. Balance de masas del ion calcio y magnesio. Ascenso con evaporación. (Experimento IB)

1	2	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
altura columna	suelo	θm	wolu men solución	capaci- dad in- tercam- bio ca- tiónico	Ca solu- ción ini- cial	Ca solu- ción final	Ca solu- ción final	Ca cambio ini- cial	Mg solu- ción ini- cial	Mg solu- ción final	Mg solu- ción final	Mg cambio ini- cial	Ca+Mg cambio final	Ca solu- ción final	Mg solu- ción final
cm	g	g/g	cm ³	meq	meq	meq/l	meq	meq	meq	meq/l	meq	meq	meq	meq/cm	meq/cm
90-95	1435	0.237	340	257	3.5	-	H	132	6.9	-	I	121	J		
70-90	5839	0.256	1495	1045	14.2	55.2	82.5	537	27.9	102.4	153.1	490	1037	4.1	7.7
50-70	5899	0.279	1646	1056	14.4	25.4	41.8	543	28.2	57.0	93.8	496	1018	2.1	4.7
30-50	5920	0.293	1735	1060	14.4	18.3	31.8	545	28.3	39.6	68.7	497	944	1.6	3.4
10-30	5940	0.310	1841	1063	14.5	10.9	20.0	547	28.4	18.6	34.2	499	811	1.0	1.7
0-10	2051	0.325	667	367	5.0	2.0	1.3	189	9.8	6	4.0	172	147	0.2	0.6
	27084		7724	4848	66			177.4+H	2493	129.5		353.8+I	2275	3971+J	

NOTAS

- Columna #
- Altura de la columna sobre el nivel de referencia.
 - Gramos de suelo en la sección considerada. Calculado del volumen de la columna y de la densidad aparente de cada sección de suelo obtenida por atenuación de rayos γ. $\bar{\rho}$ media = 1.458; ρ_b (0-10) = 1.445; ρ_b (10-30) = 1.465; ρ_b (30-50) = 1.460; ρ_b (50-70) = 1.455; ρ_b (70-90) = 1.44-; ρ_b (90-95) = 1.445.
 - Humedad gravimétrica (día 250) deducida del seccionado de la columna y análisis gravimétrico.
 - cm³ de solución en la sección considerada (día 250) = $\theta m \times gm \text{ suelo}$ (ρ solución = 1 gm/cm³).
 - Capacidad de intercambio catiónico en la sección considerada (meq) = .179 meq/gm x gm suelo en sección.
 - Ca sol. inicial = 86.8 meq/l; Ca sol. ini. (meq) = 86.8 x θm ini. x gm suelo/1000 = 243.9 x 10⁻⁵ x gm suelo en sección.
 - Para cada sección, media de los valores extremos de la sección (día 250) (Figura 4-49).
 - Ca sol. final (meq) = Ca sol. final (meq/l) x l. solución en cada sección.
 - Ca cambio inicial = 0.092 (meq/gm) x gm suelo en cada sección.
 - Mg sol. inicial = 170 meq/l; Mg sol. ini. (meq) = 170 x θm ini. x gm suelo/1000 = 477.7 x 10⁻⁵ x gm suelo en sección.
 - Para cada sección, media de los valores extremos de la sección (día 34) (Figura 4-50).
 - Mg sol. final (meq) = Mg sol. final (meq/l) x l. solución en cada sección.
 - Mg cambio inicial = 0.084 (meq/gm) x gm suelo en cada sección.
 - (Ca + Mg) cambio final = Capacidad Intercambio Catiónico (meq) - Na cambio final (meq) en cada sección.
 - meq por sección de suelo de un cm de altura. Para la sección 0-10 cm se ha considerado que 3 cm están ocupados por el sistema de drenaje y no por suelo.
- (Ca + Mg) final (sección 90-95 cm) (H+I+J), meq = (Ca + Mg) incorporado + (Ca + Mg) sol. ini. + (Ca + Mg) cambio ini. - (Ca + Mg) sol. final (0-90 cm) - (Ca + Mg) cambio final (0-90 cm) - (Ca + Mg) extraído (valores en meq). Ca y Mg incorporados en la columna = 0 meq; Ca y Mg extraídos con sondas de succión = 168 meq.
- H+I+J = 66.0 + 129.5 + 2493 + 2275 - 177.4 - 353.8 - 3971 - 168 = 293.3 meq.

BALANCE GLOBAL (Na + Ca + Mg)

(1) F+G = 66; (2) H+I+J = 293.3; (3) G+J = 257

(1) + (2) - (3): F+H+I = 66 + 293.3 - 257 = 102.3 meq = 102.3/.34 = 301 meq/l de Na + Ca + Mg en solución en la sección 90-96 cm.

Cuadro 4-21. Comparación del factor de concentración del agua en el suelo con el factor de concentración de sales.

A - Para la sección de columna de 70 a 95 cm.

	<u>columna IB</u>	<u>columna IA</u>
meq de Cl	470.4	306.0
volumen de solución (litros)	1.835	1.728
meq/l de Cl	256.3	177.6
factor de concentración de sales (IB/IA)	$256.3/177.6 = 1.44$	

B - Para toda la columna

	<u>columna IB</u>	<u>columna IA</u>
meq de Cl	1022.7	778.1
volumen de solución (litros)	7.724	6.828
meq/l de Cl	132.4	113.9
factor de concentración de sales (IB/IA)	$132.4/113.9 = 1.16$	
factor de concentración del agua en el suelo (valor medido)	1.34	



nificando la gran importancia de la capacidad de cambio de los suelos y su influencia sobre la composición final de la solución de los mismos.

Estimación de la concentración en el frente de avance ascendente

Como se señaló anteriormente, tanto el sensor de salinidad (por su elevado tiempo de respuesta) como la sonda de succión (por su incapacidad para extraer solución a potenciales matriciales bajos) son instrumentos inapropiados para medir la salinidad de la solución en el frente de avance. Un método alternativo para estimarla es la realización de un balance de masas como el realizado más arriba. Este balance sirve además de validación indirecta de los instrumentos utilizados para la medida de la salinidad en el resto de la columna (en este caso la sonda de succión).

A efectos ilustrativos, el Cuadro 4-22 presenta el balance de masas del ion Cl en la columna para los primeros estadios de ascenso de la solución. En la columna 7 se indica en paréntesis la concentración estimada de la porción superior de suelo mojado no controlada instrumentalmente. Todos los cálculos realizados en estos balances son como los señalados en el Cuadro 4-18, con la única diferencia de que en el Cuadro 4-22, θ_v es el medido por atenuación de rayos gamma.

La mayor dificultad de estos balances es que están basados en cálculos por diferencias de masas medidas; ello implica conocer el contenido de agua y la concentración instantáneos de la columna de

Quadro 4-22. Balance de masas del ion cloruro aplicado a los primeros estadios de ascenso de la solución del suelo.

Día 0.9 (Altura del frente de avance = 36.8 cm; litros netos infiltrados = 2.47 l; Cl incorporado = 247 meq)

1	2	3	4	5	6	7	8	
altura columna cm	suelo g	θ_v cm^3/cm^3	θ_m g/g	volumen solución cm^3	solución inicial meq	solución final meq/l	solución final meq	$272 + A = 247 + 81$ $A = 56 \text{ meq}$
30-37	2072	0.17	0.12	249	17	(225)	(A = 56)	
10-30	5940	0.36	0.25	1485	48	145	215	
0-10	2051	0.42	0.30	615	16	93	57	
					81		272 + A	

Día 4.2 (Altura frente avance = 66.2 cm; litros netos infiltrados = 4.51 l; Cl incorporado = 451 meq)

1	2	3	4	5	6	7	8	
								$368 + A = 451 + 144$ $A = 227 \text{ meq}$
50-66	4179	0.20	0.14	585	33	(388)	(A = 227)	
30-50	5920	0.33	0.23	1361	47	121	165	
10-30	5940	0.40	0.28	1663	48	87	145	
0-10	2051	0.42	0.30	615	16	95	58	
					144		368 + A	

Día 8.2 (Altura frente avance = 81.8 cm; litros netos infiltrados = 5.44 l; Cl incorporado = 544 meq)

1	2	3	4	5	6	7	8	
								$711 + A = 544 + 186$ $A = 19 \text{ meq}$
70-82	3503	0.18	0.13	455	28	(42)	(A = 19)	
50-70	5899	0.31	0.21	1239	47	259	321	
30-50	5920	0.37	0.26	1539	47	104	160	
10-30	5940	0.41	0.28	1663	48	102	170	
0-10	2051	0.42	0.30	615	16	98	60	
					186		711 + A	

Día 14 (Altura frente avance = 94.8; litros netos infiltrados = 6.25 l; Cl incorporado = 625 meq)

1	2	3	4	5	6	7	8	
								$491 + A = 625 + 217$ $A = 351 \text{ meq}$
90-95	1435	0.14	0.10	144	12	} 294	} A = 351	
70-90	5839	0.26	0.18	1051	47			
50-70	5899	0.31	0.21	1239	47	103	128	
30-50	5920	0.37	0.26	1539	47	96	148	
10-30	5940	0.41	0.28	1663	48	93	155	
0-10	2051	0.42	0.30	615	16	97	60	
					217		491 + A	

suelo, valores aleatorios y difíciles de extrapolar en situaciones de no equilibrio como las aquí descritas. Así, la concentración deducida del balance para la sección de suelo de 70 a 82 cm en el día 8.2 es de 42 meq/l, cifra evidentemente baja y debida probablemente al error cometido en la extrapolación de la concentración media en la sección de suelo de 50 a 70 cm. El mismo problema se presenta al intentar calcular valores medios de humedad en secciones de suelo con gradientes instantáneos extremadamente altos.

A pesar de estas limitaciones, el resto de los balances realizados muestran la elevada concentración estimada del frente de avance, con valores que están dentro del orden de magnitud de los deducidos en el balance del ion cloruro en la columna sin evaporación ($Cl = 331 \text{ meq/l}$).

No obstante, parece evidente que es más recomendable medir la concentración del frente de avance, a través de técnicas no destructivas de carácter puntual, del tipo de las radiactivas ya utilizadas en algunos trabajos (Kirda et al., 1973; IAEA, 1974) debido a la sensibilidad del balance de masas. Por ello, no se ha intentado, en estos casos de no equilibrio, un balance de los cationes, mucho más sensible todavía debido al enorme peso específico de la capacidad de intercambio catiónico sobre los resultados finales.

4.2.2. Dinámica del lavado de sales en presencia de una capa freática de nivel constante (experimento II)

Como se indicó en el apartado 3, en este experimento se estudia el movimiento de los iones de la solución del suelo en la columna, así como la eficacia del lavado, a través de su extracción con sondas de succión. También se comprueba la calidad de la respuesta que el sensor había dado en experimentos sobre suelo saturado (apartado 4.1.2.5).

Relaciones suelo-agua

El proceso de lavado se realizó sobre la columna IA, una vez finalizado el experimento de ascenso sin evaporación, por lo que los perfiles de humedad y de sales iniciales del experimento II - (dinámica del lavado) corresponden a los perfiles finales del experimento IA descritos en el día 34. El lavado se realizó con una solución de CaSO_4 0.01 N, manteniendo una altura hidráulica constante de 3 cm. en la superficie del suelo, y con la capa freática a 5.5 cm. sobre el nivel de referencia.

La Figura 4-56 muestra el volumen de solución que infiltra la superficie del suelo (solución infiltrada, SI) y el que percola la columna más el extraído por las sondas de succión (solución percolada, SP), así como la diferencia entre ambos volúmenes (SI-SP) frente al tiempo transcurrido desde el inicio del experimento. Puede observarse que tanto la tasa de infiltración como la de percolación disminuyen con el tiempo, y que la tasa de infiltración

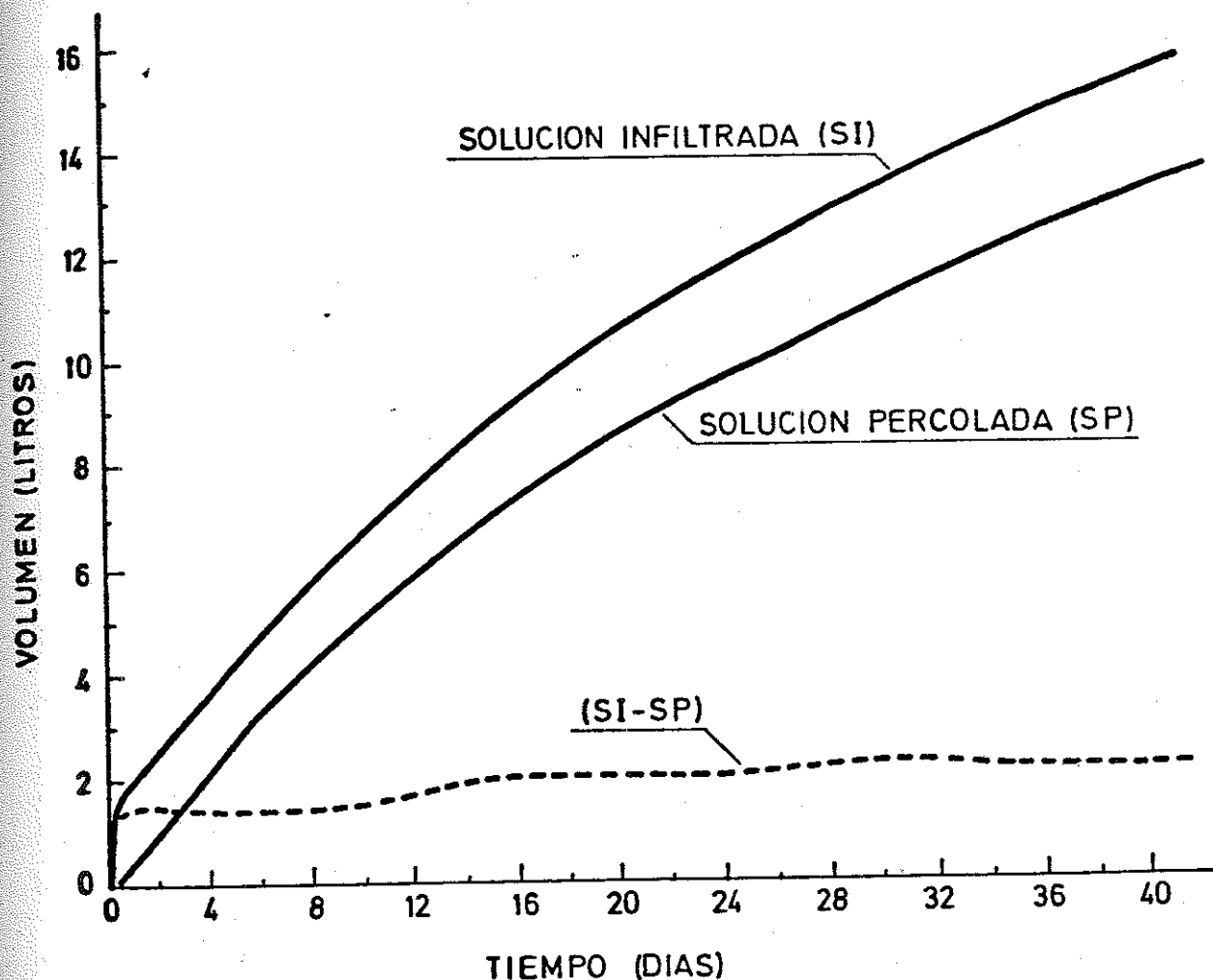


Figura 4-56. Volumen de solución infiltrada (SI), percolada más extraída por las sondas de succión (SP), y diferencia entre ambos volúmenes (SI-SP), frente al tiempo transcurrido desde el inicio del experimento II (Dinámica del lavado).

final (pendiente de la curva) es de unos 0.9 cm/día (equivalente a unos 190 cm³/día). Dado que el gradiente de potencial en la columna es prácticamente la unidad, esta tasa de infiltración equivale aproximadamente a la conductividad hidráulica del suelo a saturación. Finalmente, el volumen total de solución infiltrada en la columna fue de 15.570 cm³ en un tiempo transcurrido de 41.2 días, lo que implica una velocidad media de infiltración de 1.79 cm/día (378 cm³/día).

De la diferencia (SI-SP) puede concluirse que la columna empezó a drenar cuando el suelo había infiltrado 1.375 cm³. Este volumen habría sido de 1.875 cm³ si la solución infiltrada hubiera ocupado todo el volumen de poros llenos de aire (el 22 % del volumen total de poros según los resultados obtenidos en el experimento IA) antes de comenzar la percolación. Por consiguiente, ello significa que los primeros estadios del lavado se realizaron a subsaturación, y que la columna no se saturó hasta al menos después de 13 días de iniciado el lavado (momento en que SI-SP = 1.875 cm³).

El hecho de que para el final de la experiencia SI-SP sea mayor de 1.875 cm³ (SI-SP = 2.150 cm³) puede deberse a un aumento del volumen de poros de la columna durante la experiencia, como consecuencia del lavado de partículas del suelo que son evacuadas por las aguas de drenaje, por la contracción de la matriz del suelo debida a la sustitución del Na por Ca en las posiciones de cambio, y/o a posibles errores en la estimación del volu-

men de poros de la columna derivados de la asunción de que la densidad real del suelo Yolo es 2.65 g/cm^3 (valor no medido).

De lo expuesto hasta aquí es evidente que el volumen de poros llenos de solución va aumentando conforme progresa la infiltración de solución en la columna. Dada la importancia del concepto "número de volúmenes de poros desplazados por la solución infiltrante, NVP" para la explicación y discusión de algunos de los fenómenos físico-químicos que se producen durante el lavado, se ha realizado su estimación para el total y para cada una de las alturas instrumentadas de la columna.

Para ello, se ha estimado en primer lugar el volumen de poros (VP) llenos de solución de la columna (equivalente al contenido de agua volumétrico de la columna). Al ser éste variable, se han considerado sus dos extremos hipotéticos: (i) el contenido de agua inicial de la columna no varía durante el experimento, y por lo tanto VPI (volumen de poros inicial) equivale a la humedad volumétrica inicial del suelo en la columna (θ_i), y (ii) cada sección del suelo se satura con la solución infiltrante antes de percolar, por lo que VPF (volumen de poros final) equivale a la humedad volumétrica final del suelo en la columna ($\theta_f = 0.42 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$):

1. En el primer caso ($\theta = \theta_i = \text{cte}$), $\text{NVP} = \frac{\text{VI}}{\text{VPI}}$ y corresponde al máximo número de volúmenes de poros que es capaz de desplazar un determinado volumen de solución infiltrada (VI).

2. En el segundo caso ($\theta = \theta_f = \text{cte}$), $NVP = \frac{VI - (VSP-VSI)_a}{VPF}$, y corresponde al mínimo número de volúmenes de poros que es capaz de desplazar un determinado volumen de solución infiltrada (VI).

En este caso, el volumen de solución necesario para saturar el suelo hasta el punto de la columna que se considere $[(VSP-VSI)_a]$ debe sustraerse del volumen infiltrado, puesto que no contribuye al desplazamiento de la solución del suelo.

El Cuadro 4-23 resume los cálculos realizados para la estimación del volumen de poros correspondiente a los dos extremos hipotéticos (columnas 7 y 8, respectivamente). En las columnas 9 y 10 se indica el volumen de solución infiltrada que equivale a un volumen de poros (1 VP). En las notas al pie del Cuadro 4-23 se indican en detalle el significado de cada columna y los cálculos realizados.

La Figura 4-57 presenta las medidas de θ_v (humedad volumétrica) obtenidas por atenuación de rayos gamma. El perfil de humedad del día cero corresponde al contenido de agua en la columna antes de iniciarse el lavado y coincide en líneas generales con el perfil teórico de equilibrio deducido de la medida del potencial matricial y la curva característica del suelo (experimento IA, Cuadro 4-15, columna 3).

Si se acepta que θ_v a saturación es igual a $0.42 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ (Figura 3-2), la Figura 4-57 indica el grado de saturación de la columna, observándose que para los días 0.2 y 3 la parte superior -

Cuadro 4-23. Estimación del rango de volumen de poros llenos de solución para cada altura de la columna con instrumentación de sondas de succión.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
AC	SC	VS	VSI	VSF	(VSF-VSI) _a	VP		NVP = 1	
altura columna	sección columna	volumen de la sección	volumen solución inicial	volumen solución final	diferencia acumulada	volumen de poros		I	F
cm	cm	cm ³	cm ³	cm ³	cm ³	VPI cm ³	VPF cm ³	cm ³	cm ³
90	90-96	1216	390	511	121	390	511	390	632
70	70-90	4055	1338	1703	486	1728	2214	1728	2700
50	50-70	4055	1422	1703	767	3150	3917	3150	4684
30	30-50	4055	1500	1703	970	4650	5620	4650	6590
10	10-30	4055	1581	1703	1092	6231	7323	6231	8415
0	0-10	1419	597	597	1092	6828	7920	6828	9012

NOTAS

Columna

- 3 VS = volumen de la sección considerada en (2). VS (CM³) = altura de la sección x área superficial de la columna = altura sección x 202.725 cm².
- 4 VSI = volumen de la solución inicial (cm³). Para cada sección, VSI = $\theta_i \times (3)$. Valores de θ_i extrapolados del perfil de humedad del día cero (Figura 4-57).
- 5 VSF = volumen de la solución final (cm³). Para cada sección VSF = $\theta_f \times (3)$; $\theta_f = 0.42 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$.
- 6 (VSF-VSI)_a = volumen acumulado de solución necesario para saturar el suelo desde la superficie hasta la altura de la columna en consideración.
- 7 VPI = volumen de poros saturados de solución asumiendo que $\theta = \theta_i = \text{cte.}$ a lo largo del experimento. El volumen de poros saturados para una altura determinada equivale al volumen de solución inicial en la columna desde esa altura hasta la superficie del suelo.
- 8 VPF = volumen de poros saturados de solución asumiendo que $\theta = \theta_f = \text{cte.}$ a lo largo del experimento. El volumen de poros saturados para una altura determinada equivale al volumen de solución final en la columna desde esa altura hasta la superficie del suelo.
- 9 Volumen de solución infiltrada (VI) equivalente a 1 VP en el caso hipotético de $\theta = \theta_i = \text{cte.}$

$$1 \text{ VP} = \text{VI}/\text{VPI}$$
- 10 Volumen de solución infiltrada (VI) equivalente a 1 VP en el caso hipotético de $\theta = \theta_f = \text{cte.}$

$$1 \text{ VP} = \frac{\text{VI} - (\text{VSF}-\text{VSI})_a}{\text{VPF}}$$

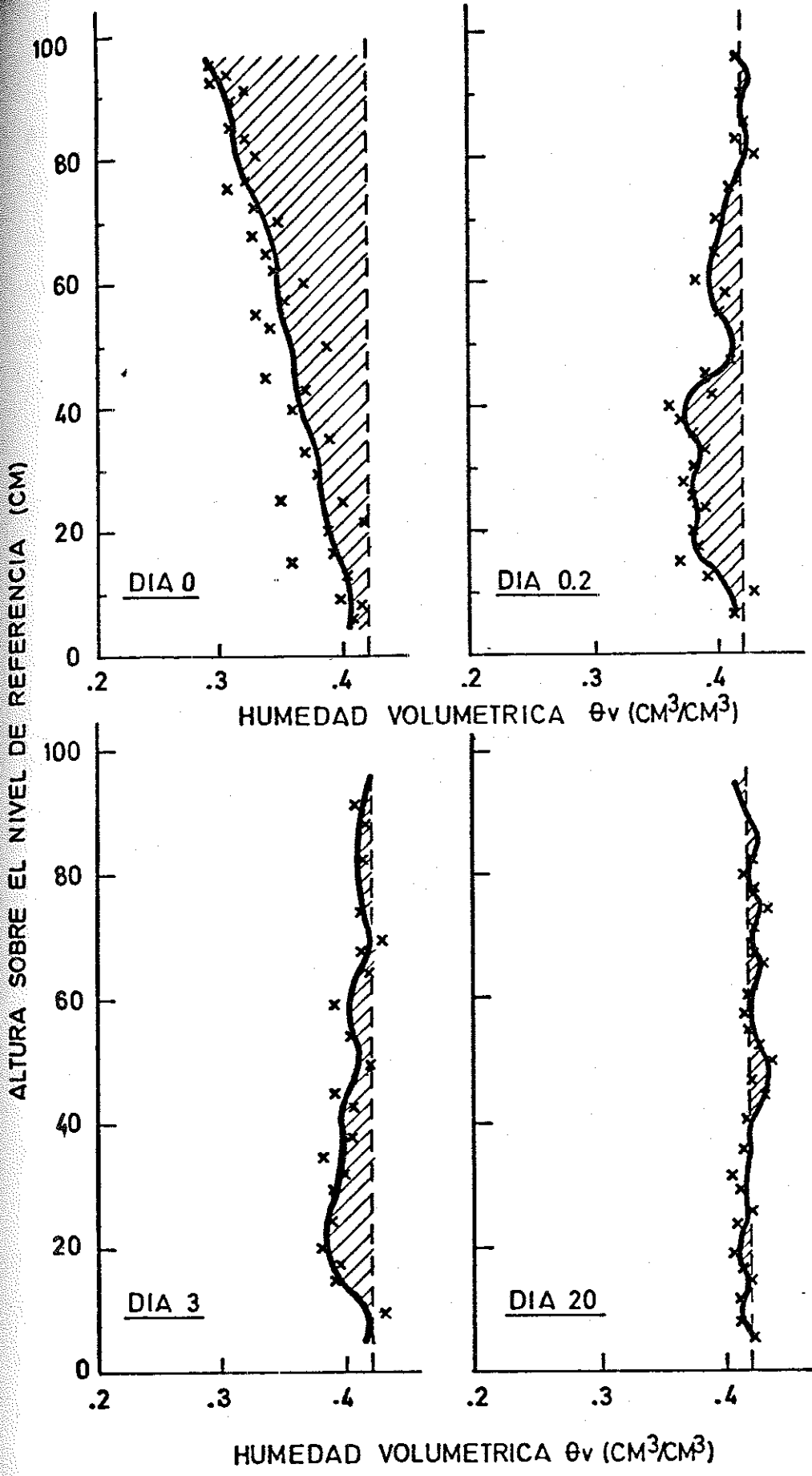


Figura 4-57. Perfiles de humedad volumétrica. Columna II.

de la misma está ya prácticamente saturada, mientras que la parte inferior todavía está lejos de saturación. Esto confirma el hecho antes apuntado de que la columna comenzó a drenar antes de su total saturación, esto es, puede concluirse la existencia en la misma de poros estagnantes que permanecen llenos de aire por un tiempo prolongado.

En este sentido, la presencia de una capa freática puede impedir el libre desplazamiento del aire, y de ahí que la zona más subsaturada de la columna (días 0.2 y 3.0) sea la inferior (en contraste con el perfil del día cero), dando a entender que el aire desplazado de la parte superior de la misma se acumula encima de la capa freática y sólo es capaz de fluir lentamente al exterior disolviéndose con el agua de drenaje.

Finalmente, el perfil del día 20 muestra la práctica total saturación del perfil, incluso con valores superiores a θ_v saturado en la parte alta de la columna (lo cual puede explicar, al menos en parte, la paradoja aparente señalada anteriormente de que $(SI-SP) > 1875 \text{ cm}^3$ para el final de la experiencia).

En conclusión, el proceso de lavado descrito es bastante complejo, puesto que tanto las tasas de infiltración y drenaje como θ_v y el volumen de poros llenos de solución varían a lo largo del mismo. Evidentemente, ello implica que el estudio del movimiento de las sales en la columna no es sencillo y, por otro lado, que no es posible aplicar de forma rigurosa la teoría del desplazamiento miscible (Biggar y Nielsen, 1967) u otras teorías del desplazamiento de sales válidas en sistemas de régimen permanente.

Densidad óptica de la solución del suelo

La estimación del grado de partículas dispersadas en la columna (arcillas y limos principalmente) es importante en el estudio de la recuperación de suelos afectados por sales, puesto que este fenómeno, puede ser el responsable de un taponamiento, más o menos parcial, de los poros del suelo y del consiguiente descenso de su conductividad hidráulica.

Una forma indirecta de estimar esta concentración de partículas dispersas es la medida de su densidad óptica, ya que este parámetro, a una longitud de onda dada y a una temperatura constante, es proporcional al logaritmo de la concentración de las partículas (Felhendler et al., 1974).

Dado que el fenómeno de dispersión está íntimamente ligado a la concentración y al SAR de la solución del suelo (McNeal y Coleman, 1966; Frenkel et al., 1978), en la Figura 4-58 (A) se presentan conjuntamente estas tres variables (% Transmisión - inversamente proporcional a la concentración de partículas dispersas -, CE y SAR) para el efluente de la columna, y en la Figura 4-58 (B) se presentan los perfiles del % Transmisión y de la CE para las soluciones extraídas con las sondas de succión. En este último caso no se presenta el SAR, dado que sus valores dentro de la columna fueron muy pequeños y por lo tanto no deben afectar a los resultados obtenidos.

De la Figura 4-58 (A) puede deducirse que la migración de las partículas con el efluente (indicada por el descenso de % T) es -

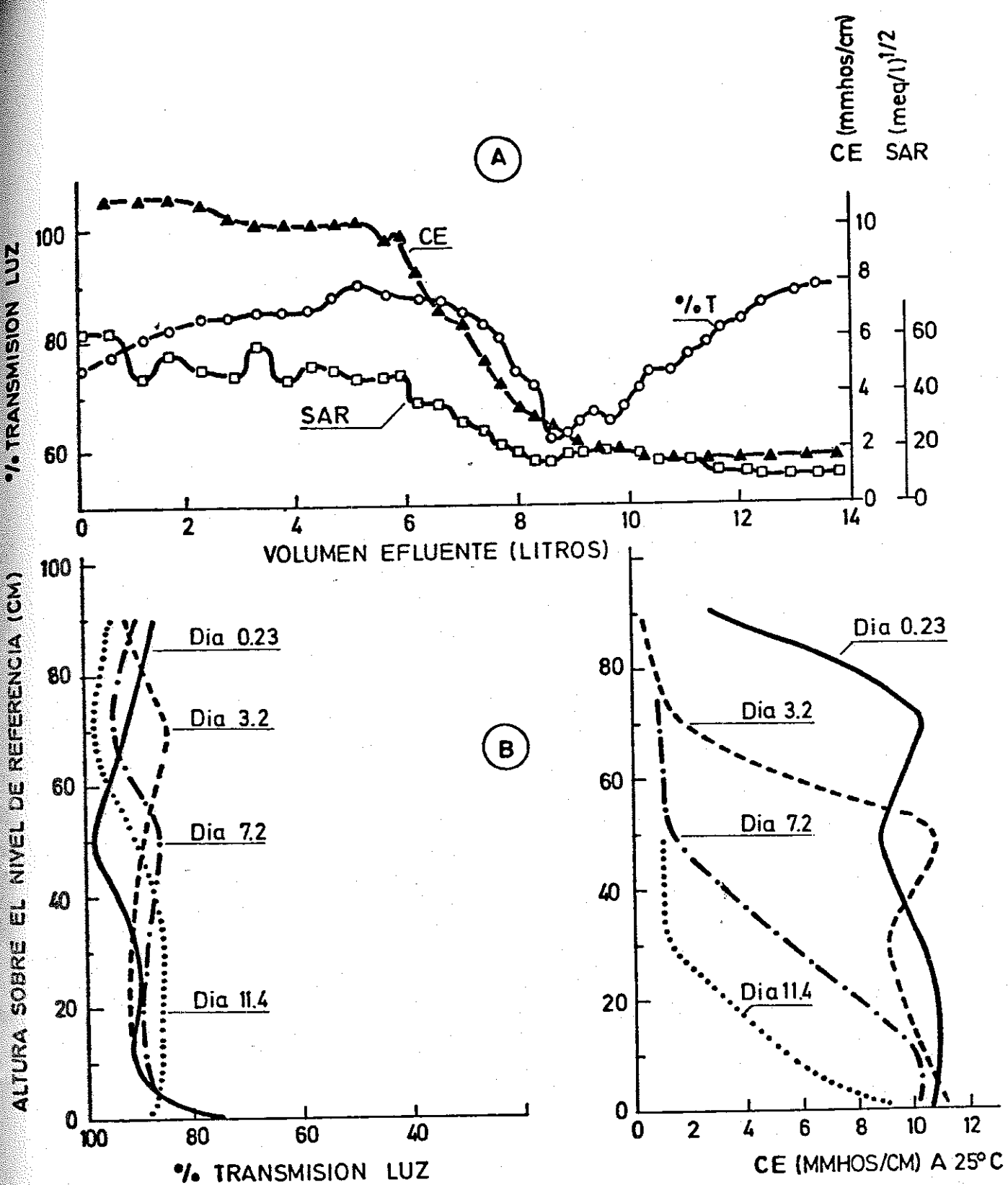


Figura 4-58. (A): % Transmisión, CE y SAR del efluente de la columna II.
 (B): perfiles del % Transmisión y de la CE de las soluciones extraídas con las sondas de succión.

apreciable, adquiriendo un pico de máxima concentración (mínimo % T) para un volumen de efluente de 8.6 litros. Esto significa que una parte importante de partículas dispersas han percolado con el efluente y no han taponado los poros del suelo, al menos en un grado tal como para afectar de forma brusca a la tasa de infiltración (Figura 4-56). Por otro lado, se observa claramente que el aumento de la dispersión coincide con el descenso de la CE, lo cual está de acuerdo con los resultados de los trabajos señalados anteriormente.

Como era de esperar, los picos de concentración de partículas dispersas en las soluciones extraídas con sondas de succión (Figura 4-58 (B)) son mucho menos pronunciados que el obtenido en el efluente, dado que las cápsulas porosas de las sondas son de un diámetro suficientemente pequeño para impedir el paso de la mayor parte de las partículas dispersadas. A pesar de ello, puede observarse un pico de máxima concentración que va desplazándose con el tiempo. Es importante resaltar que estos picos no coinciden con los picos de CE representados para los mismos días en la parte derecha de la gráfica, sino que van sustancialmente retrasados respecto a estos. Así, puede observarse que los picos aparecen inmediatamente detrás del paso del frente de avance disperso de sales, cuando la CE de la solución del suelo disminuye a valores próximos a 1 mmho/cm en cada una de las alturas de la columna muestreadas.

Teniendo en cuenta el volumen de solución infiltrada al que

se presentan los picos de máxima concentración de partículas dispersas y de máxima concentración de sales para cada una de las alturas de la columna muestreadas (Figura 4-58), y el volumen de solución infiltrada equivalente a un volumen de poros (Cuadro 4-23, columnas 9 y 10), puede obtenerse el número de volúmenes de poros desplazados a los que se presentan estos máximos (Cuadro 4-24, columnas 3 y 5).

Así, puede observarse que mientras el frente de sales aparece en el efluente a 0.8 - 1.0 NVP, el frente de partículas dispersas lo hace a 1.2 - 1.6 NVP; esto es, el frente de sales va adelantado unos 0.5 NVP respecto al frente de partículas dispersas. Esta observación es aplicable también en términos generales al resto de las alturas muestreadas en la columna.

Por otro lado, puede deducirse del Cuadro 4-24 que el frente de partículas dispersas aparece entre 1.1 y 1.9 NVP. Así, para el efluente, donde el pico de máxima concentración está muy bien definido, este valor es de 1.2-1.6 NVP. Este rango del NVP ha sido observado también en otros trabajos (Pupisky y Shainberg, 1979; - - Shainberg et al., 1981) y se ha concluido que es compatible con la teoría de Emerson y Bakker, que sugieren que la dispersión de arcillas depende de (1) la concentración de sales del electrolito (la dispersión aumenta abruptamente cuando la concentración de sales baja por debajo del "umbral de concentración"), y (2) del gradiente de concentración de sales entre los microporos (intra-agregados) y los macroporos (inter-agregados), que induce un movimiento

Cuadro 4-24. Número de volúmenes de poros desplazados a los que aparecen los picos de máxima concentración de partículas dispersas y de máxima concentración de sales.

1	2	3	4	5
Partículas dispersas			Sales disueltas	
Altura columna cm	Pico conc. máxima a VI (1) =	NVP	Pico conc. máxima a VI (1) =	NVP
90	-	-	-	-
70	3.2	1.2-1.9	2.2	0.8-1.3
50	5.2	1.1-1.7	2.6	0.5-0.8
30	7.2	1.1-1.5	4.2	0.6-0.9
10	-	-	5.7	0.6-0.9
Efluente	10.8	1.2-1.6	7.1	0.8-1.0

NOTAS

Columna #

- 1 Alturas muestreadas en la columna, y efluente recogido en el colector de fracciones.
- 2 Volumen de solución infiltrada (VI) en litros al que se presenta el pico de máxima concentración de partículas dispersas.
- 3 Rango del número de volúmenes de poros desplazados por la solución infiltrada.
- 4 Volumen de solución infiltrada (VI) en litros al que se presenta el pico de máxima concentración de sales.
- 5 Rango del número de volúmenes de poros desplazados por la solución infiltrada.

osmótico de agua hacia el agregado que provoca su hinchamiento y destrucción. Este gradiente es máximo en el paso del frente de avance de sales disperso, o quizá (de acuerdo con nuestros resultados) inmediatamente después del paso de este frente, cuando la solución infiltrante más diluída ha atravesado un determinado punto de la columna, en un flujo preferente a través de los macroporos, mientras los microporos todavía permanecen sustancialmente llenos de la solución residente del suelo, de mayor concentración. El ajuste difusional posterior entre los micro y los macroporos disminuye el gradiente osmótico, y esto, junto con la pérdida ya producida de las partículas más fácilmente dispersables, hace disminuir de nuevo su concentración, lo cual se refleja en un aumento del % T (Figura 4-58 (A)).

Aunque esta teoría concuerda con los resultados obtenidos, no debe descartarse también la influencia de los efectos físico-químicos de hidratación de las partículas asociadas al intercambio Na - Ca y al efecto del aire atrapado en los poros del suelo.

Variación de la CE en la columna de suelo y en el efluente

El proceso de infiltración y lavado de la columna consiste en el desplazamiento de una solución residente en el suelo; de concentración relativamente elevada (ver Figura 4-60, perfil día cero), por una solución infiltrante de CE igual a 0.9 mmhos/cm (CaSO_4 0.01 N).

En la Figura 4-59 se presenta la evolución de la CE leída

por el sensor de salinidad (CE_{se}) y la medida en las soluciones extraídas por las sondas de succión (CE_{ss}) en función del volumen de solución infiltrada en la columna (litros).

De la comparación de los valores de CE_{se} y CE_{ss} se deduce que el sensor de salinidad es mucho más fiable (mayor precisión y menor tiempo de respuesta) en condiciones próximas a saturación (las de este experimento II) que en condiciones de subsaturación (como las de los experimentos IA y IB). Así, a las alturas de 10 y 30 cm, CE_{se} y CE_{ss} son prácticamente idénticos, mientras para las alturas superiores estas diferencias, aunque algo mayores, son sustancialmente más bajas que las correspondientes obtenidas en el experimento I. Estos resultados están de acuerdo con los obtenidos en el estudio previo del sensor de salinidad (capítulo 4-1.2).

Por otro lado, se observa que, a la altura de 90 cm., $CE_{se} > CE_{ss}$ para los primeros estadios del lavado, comportamiento único a lo largo de los trabajos realizados, en los que CE_{se} ha sido siempre menor o igual a CE_{ss} , pero nunca superior. La razón de este hecho se debe a que la solución infiltrante (de baja CE) percola preferentemente por los poros más grandes, mientras que los poros más pequeños permanecen más tiempo en equilibrio con la solución residente del suelo, de elevada concentración. Dado que la sonda de succión extrae solución preferentemente de los poros más grandes (por ser los que se desaturan más fácilmente), mientras que el sensor está en equilibrio con el rango de poros del suelo, es evidente que, en la situación descrita, la sonda extrae succión menos concentrada que la que lee el sensor, y por lo tanto su CE es me-

nor. Este hecho se observa claramente en el suelo próximo a la superficie, enmascarándose a mayores profundidades por el efecto de la dispersión hidrodinámica de la solución. Miller et al. (1965), y Oster y Willardson (1971) han encontrado resultados similares en procesos de lavado como el aquí descrito.

Este comportamiento confirma claramente la conclusión obtenida en el capítulo 4.1 (La sonda de succión y el sensor de salinidad) de que ambos instrumentos muestrean de hecho porciones diferentes de la solución del suelo, por lo que en situaciones de perfiles no homogéneos o de falta de equilibrio entre los poros del suelo, las diferencias obtenidas son reales y no deben atribuirse a un mal funcionamiento del sensor.

Las curvas de lavado que se presentan en la Figura 4-59 no son ciertamente sencillas. Como ya se indicó anteriormente, la hidrofísica del proceso es de por sí compleja, y a ello hay que añadir que el perfil de salinidad de la columna no es inicialmente uniforme. Por ello, estas curvas son indicativas no sólo de las características del desplazamiento en el punto de muestreo, sino también de los procesos producidos por encima de ese punto. Por ello, puede observarse que, antes de iniciarse el descenso final de la CE, hay un aumento de la misma como resultado de que la solución infiltrante que llega a un punto de la columna es inicialmente superior a la residente en el suelo en ese punto. Este aumento va siendo relativamente menor conforme se desciende en la columna, debido a la dispersión de la solución infiltrante que hace que disminuya su CE.

El efecto de la dispersión sobre las curvas de avance se ve también claramente porque el pico de máxima concentración va haciéndose cada vez menos abrupto, y se va ensanchando hasta hacerse prácticamente una curva continua en el efluente. En este último caso la influencia de la capa freática parece evidente, en el sentido de una mayor importancia relativa de la difusión molecular al disminuir la velocidad efectiva de avance de la solución, y al hacerse accesible toda la solución a este mecanismo (ausencia de suelo en el sistema de drenaje).

En la Figura 4-59 se ha representado - zona rayada - el volumen de solución infiltrada equivalente a un volumen de poros (Cuadro 4-23, columnas 9 y 10). Si se acepta que el frente de avance de solutos viene indicado por el pico de máxima concentración, previo al descenso final de la CE, puede deducirse que el frente de avance del agua (zona rayada) va retrasado respecto al frente de solutos, y que este retraso es tanto mayor cuanto mayor es la distancia recorrida por la solución infiltrante.

De acuerdo con la teoría del desplazamiento miscible (Nielsen y Biggar, 1962) esta traslación de la curva de avance a la izquierda de 1 VP es una consecuencia de la presencia de poros estagnantes o poco conductores en la columna. Debido a ellos, la velocidad efectiva de avance de la solución por los poros conductores es mayor que la velocidad media de infiltración, por lo que la solución infiltrante aparece antes de lo previsto por esta velocidad media. Dado que la proporción de poros estagnantes aumenta con el volumen

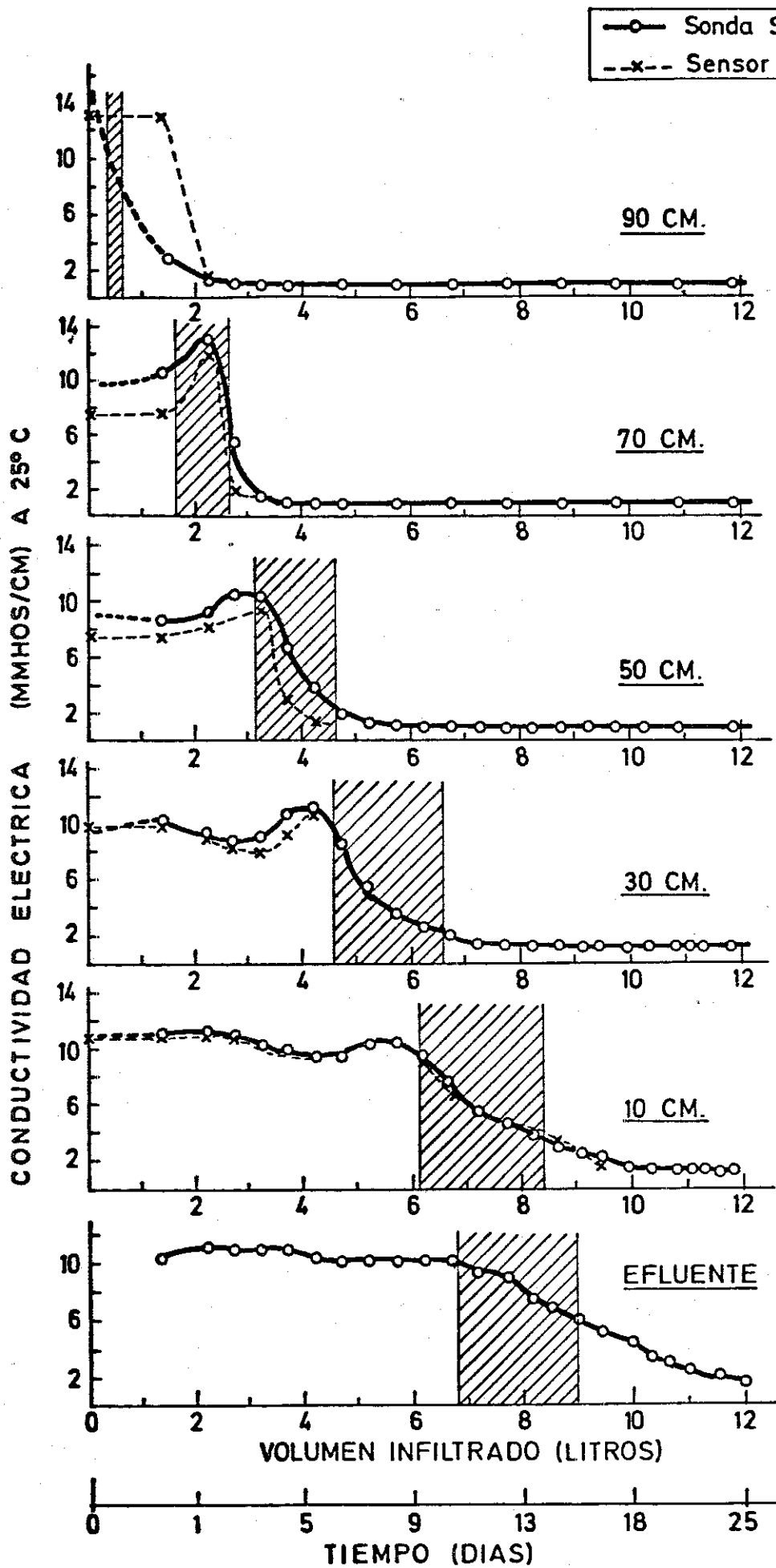


Figura 4-59. Evolución de CE_{se} (sensor de salinidad) y CE_{ss} (sonda de succión) durante el proceso de lavado (columna II).

del suelo, las curvas de avance van desplazándose más y más hacia la izquierda conforme descendemos en la columna. Este resultado confirma la presencia de poros estagnantes o poco conductores en la columna, e ilustra la importancia que los mismos tienen sobre las curvas de avance de solutos.

Evidentemente esta presencia de poros estagnantes hace que, aunque la eficacia aparente inicial del lavado parezca alta, su eficiencia final disminuya, puesto que la porción de solución residente del suelo (de elevada concentración) "atrapada" en los poros estagnantes sólo puede equilibrarse con la solución infiltrante por difusión, proceso mucho más lento e ineficiente que el transporte de masas. Por ello, la parte inferior de la columna y el efluente tienden a equilibrarse lentamente con la solución infiltrante. Así, incluso después de infiltrados 16 litros de solución, los valores finales de CE obtenidos en el efluente y a 10 cm. de altura en la columna fueron 1.6 y 1.3 mmhos/cm, respectivamente; esto es, todavía sensiblemente mayores a la CE de la solución infiltrante (0.9 mmhos/cm).

Por otro lado, los resultados obtenidos están de acuerdo con los trabajos de Kirda et al. (1973) y otros, en el sentido de que cuando la humedad inicial del suelo es baja (situación de la parte superior de la columna II) los frentes de avance de agua y solutos coinciden, mientras que cuando la humedad inicial es alta (parte inferior de la columna) el agua infiltrante desplaza a la solución residente del suelo, que es la que forma el frente de avance, por

lo que en este caso el frente de sales va por delante del frente de agua.

Finalmente, en la Figura 4-60 se presentan varios perfiles de salinidad durante el proceso de lavado, observándose cómo progresa el frente de avance de solutos, que va haciéndose menos abrupto por efecto de la dispersión.

Una estimación de la eficiencia global del lavado de la columna puede obtenerse midiendo, para los diferentes días representados, las áreas comprendidas por los ejes de coordenadas y los perfiles de salinidad. Si se expresan estas áreas como porcentaje del área del día cero, se genera la Figura 4-61 en la que se ha representado el porcentaje de reducción de salinidad (respecto de la inicial) frente al volumen infiltrado de solución. En la curva así obtenida, puede observarse un primer tramo de pendiente pequeña que indica el pequeño porcentaje de reducción de salinidad por unidad de volumen infiltrado. Ello es lógico, puesto que la mayor parte de ese volumen infiltrado ha tendido a saturar los poros llenos de aire, por lo que su contribución al desplazamiento de sales fuera de la columna ha sido escaso. Posteriormente, hay un tramo de máxima pendiente (en valores absolutos) que correspondería al lavado de los solutos fácilmente desplazables, y por fin la pendiente vuelve a disminuir en el tramo final de la curva, indicando que la eficiencia del lavado disminuye, probablemente debido a que la mayor parte de las sales todavía presentes en el suelo se encuentran en regiones del mismo poco accesibles al movimiento de masas (po-

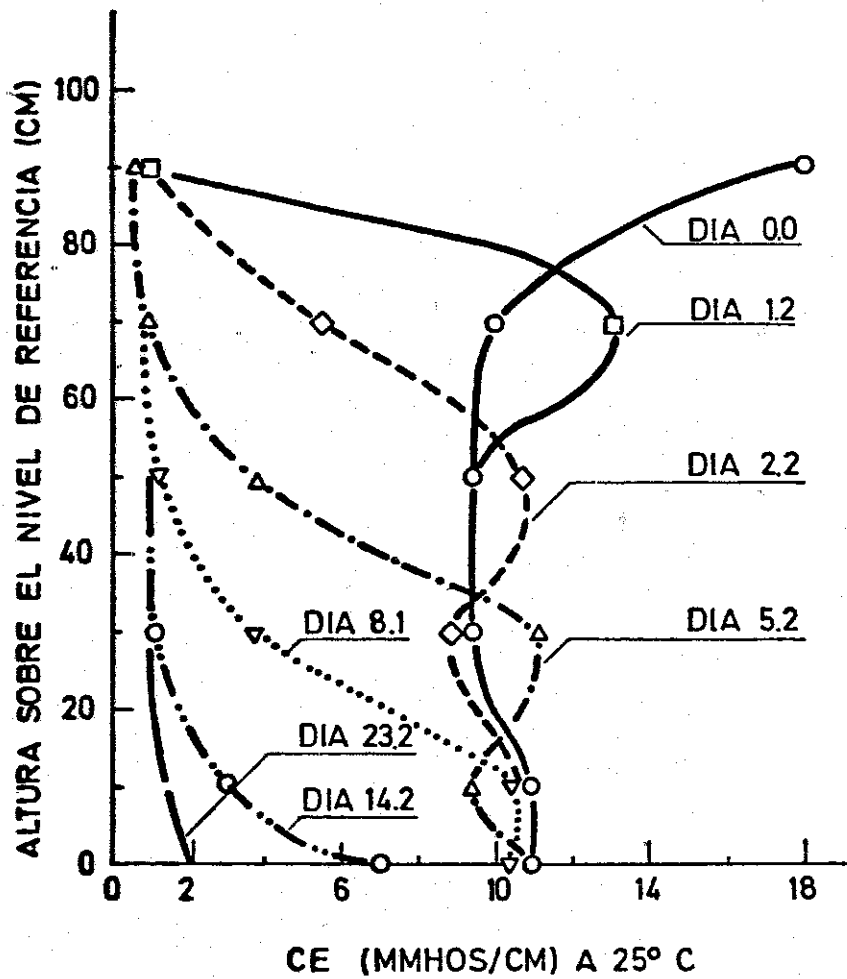


Figura 4-60. Evolución del perfil de Conductividad Eléctrica (columna II).

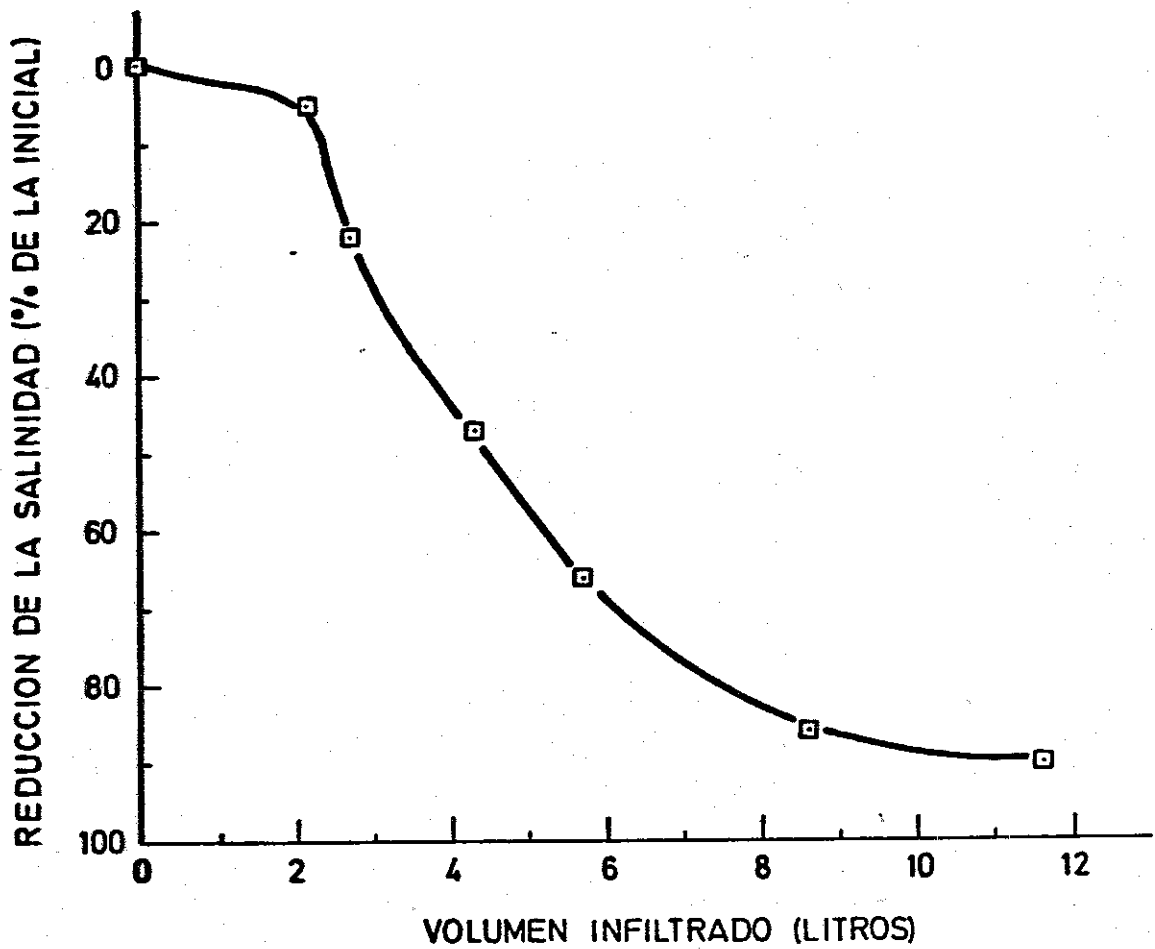


Figura 4-61. Porcentaje de reducción de salinidad respecto de la inicial por efecto del lavado de la columna - II con una solución de CaSO_4 0.01 N.

ros estagnantes), por lo que su desplazamiento requiere de un proceso de difusión más lento e ineficiente, y a los complejos procesos de intercambio catiónico que retrasan el equilibrio final de la columna.

Variación iónica en la columna de suelo y en el efluente

La Figura 4-62 muestra la concentración de los iones Cl, Na, Ca y Mg en las soluciones extraídas con las sondas de succión y en el efluente durante el proceso de lavado con una solución de CaSO_4 0.01 N. En las mismas no se han representado los valores de Ca y Mg en el efluente por dar valores pequeños y muy constantes (próxi- mos a 4-5 meq/l).

Otra forma de expresar estos resultados es representando las concentraciones iónicas relativas C/C_0 frente al volumen de efluente (Figura 4-63). Por concentración iónica relativa se entiende el cociente entre la concentración actual de un ion en un punto de la columna (o en el efluente) en el momento del muestreo (C) y su concentración inicial en ese punto antes del inicio del lavado (C_0). De esta manera es más fácil visualizar las variaciones relativas de la concentración en función de la composición de la solución que infiltra la columna.

El cloruro, ion considerado típicamente inerte respecto al medio poroso, muestra en general variaciones paralelas a la CE. El efecto de la dispersión se observa claramente en estas curvas en el sentido de que los picos de máxima concentración van paulatina-

mente disminuyendo y abriéndose, de tal manera que la pendiente del tramo de descenso de las curvas va siendo cada vez menor en valor absoluto. Esto puede ser también indicativo de la presencia de poros estagnantes o regiones menos conductoras que incrementan sustancialmente la mezcla entre la solución infiltrante y la residente en el suelo.

Por otro lado, y por efecto de la elevada concentración del ion cloruro en la parte alta de la columna, los valores Cl/Cl_0 (Figura 4-63) son superiores a 1.0 en el frente de avance, excepto a la altura de 10 cm. y en el efluente (pues los valores iniciales en estos dos puntos son superiores a los de la zona media de la columna. Ver el perfil del día cero de la Figura 4-60). Puede observarse que las curvas de avance del Cl son en general simples, sin grandes fluctuaciones, debido al carácter inerte de este ion, y que tienden a una concentración final cero, en contraste con los cationes cuyos valores finales son en todos los casos superiores a cero.

En el caso del ion sodio, debido a su perfil inicial, cuya concentración disminuye con la altura en la columna, no se aprecian picos de máxima concentración, sino que todas las curvas disminuyen más o menos de forma continua (Figura 4-62).

Sin embargo, en la Figura 4-63 se observa la elevada complejidad de las curvas de lavado Na/Na_0 , que vienen influenciadas por el carácter no inerte de este ion y por las características del desplazamiento. Así, algunas de las complejidades de este desplazamiento son: (i) cambio de la composición catiónica de la solución de lava-



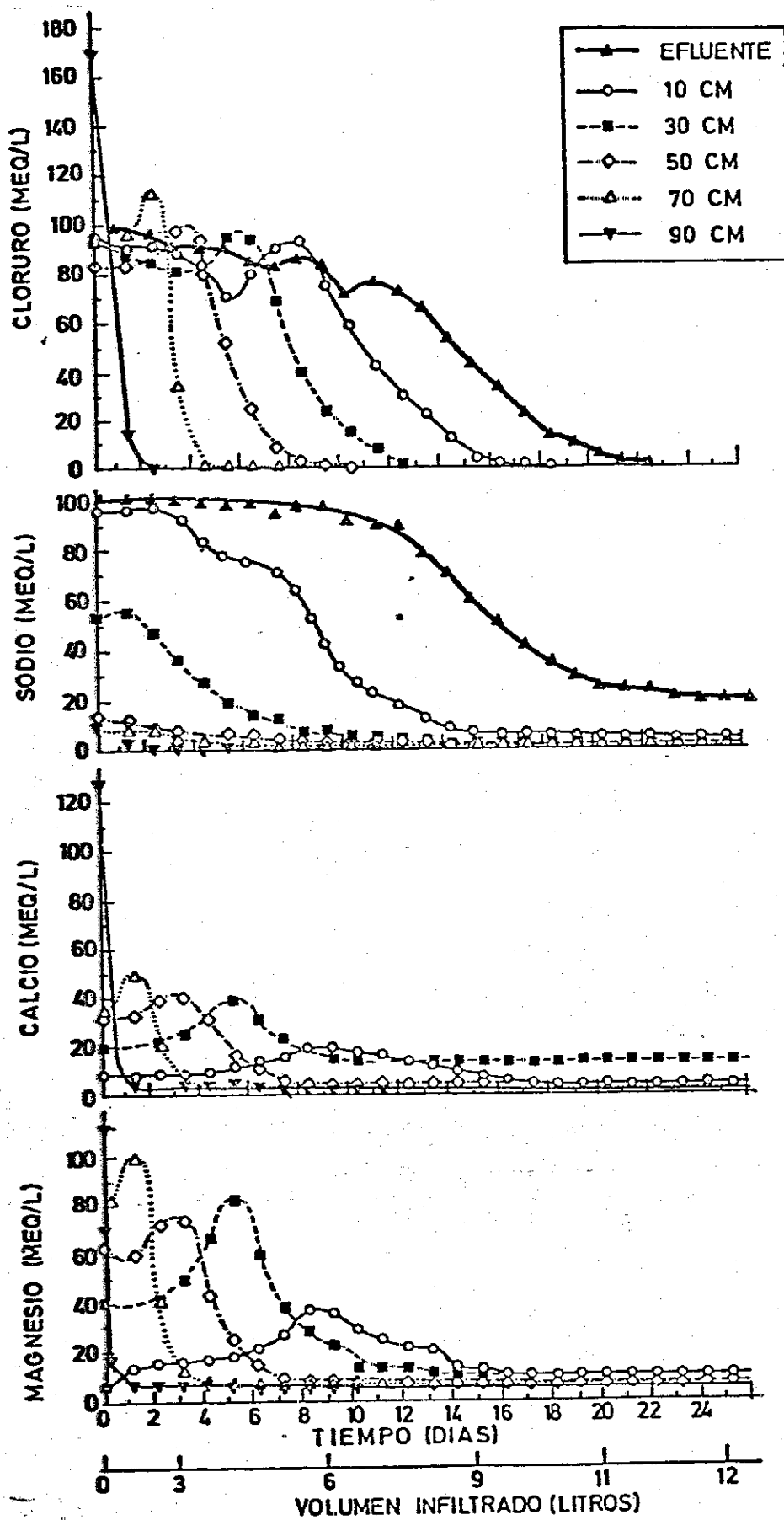


Figura 4-62. Concentración a diferentes alturas y en el efluente de los iones Cl, Na, Ca y Mg durante el proceso de lavado con una solución infiltrante de CaSO_4 0.01 N (experimento II).

do conforme infiltra la columna, (ii) regiones subsaturadas o con aire en las que el intercambio catiónico es prácticamente nulo, - (iii) zonas estagnantes en las que el intercambio se realiza con dificultad, (iv) falta de equilibrio entre las posiciones de cambio y el fluido desplazante, (v) estados diferentes de intercambio en poros de distinto tamaño y (vi) las complejidades típicas de todo proceso miscible en un medio poroso (dispersión hidrodinámica, difusiones transversales y longitudinales, diferentes velocidades eficaces de la solución, etc.).

Como resultado de estos y otros procesos puede observarse - que el descenso de concentración del ion sodio es en general más lento que el del cloruro, y que posiblemente por efecto del intercambio del sodio de cambio por el calcio (y magnesio), proceso - lento, los valores finales de Na en el efluente son bastante elevados.

Las curvas de lavado de calcio y magnesio (Figura 4-63) muestran de nuevo los picos de máxima concentración antes de iniciarse el descenso final, debido a las elevadas concentraciones de estos cationes en la parte superior de la columna. Debido a ello y a sus valores bajos en la parte inferior de la misma, los valores C/C_0 muestran unos picos muy acentuados, y aumentando conforme se desciende en la columna, hasta alcanzar valores de 2.4 y 7.4 a los 10 cm. de altura para Ca y Mg, respectivamente, esto es, valores Mg/Mg_0 tres veces superiores a Ca/Ca_0 . Dado que la relación inicial Mg_0/Ca_0 en la columna no es en ningún caso superior

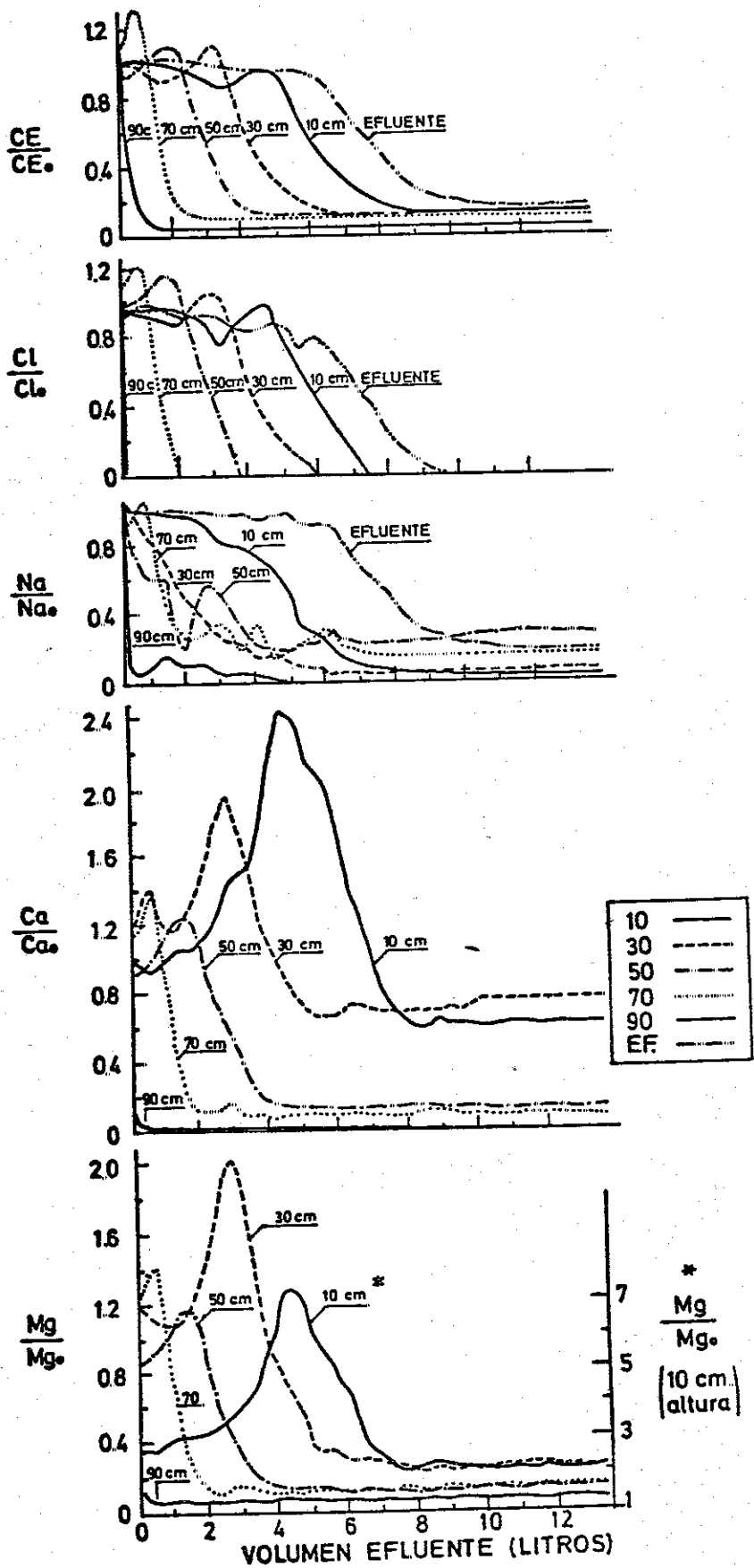


Figura 4-63. Concentraciones iónicas relativas (C/C_0) del Cl, Na, Ca y Mg en función del volumen de efluente (litros).

a dos, puede concluirse que el Mg soluble se ha incrementado a expensas del Ca soluble, lo cual ha debido ser a través de la sustitución del Mg por Ca en las posiciones de cambio del suelo. Ello explicaría asimismo el que los picos de máxima concentración del Ca sean mucho más planos que los del Mg (Figura 4-62). La razón de ello puede deberse a que el calcio tiene una afinidad por las posiciones de cambio algo mayor que el Mg y, fundamentalmente, a que el lavado se está realizando con una solución pura de Ca y por lo tanto tiende a desplazar el equilibrio de intercambio catiónico en el sentido antes apuntado.

Finalmente, en la Figura 4-64 se presentan los perfiles de concentración iónica para diferentes días. Los perfiles del día cero corresponden a las concentraciones iónicas en la columna antes del inicio del lavado.

En general, se observa que el cloruro se lava eficientemente, mientras que los cationes dejan una cierta concentración residual en la columna. En este sentido, debe significarse que la concentración del ion magnesio en la columna en alguno de los estadios del lavado (por ejemplo en el día 14.2) es incluso superior a la concentración del ion calcio, a pesar de ser la solución de lavado CaSO_4 0.01 N. Esto concuerda con la afirmación hecha anteriormente de que el Mg está siendo sustituido por el Ca en las posiciones de cambio del suelo.

La reducción iónica global en la columna - expresada como % - del valor inicial para cada ion - se ha calculado de forma análoga

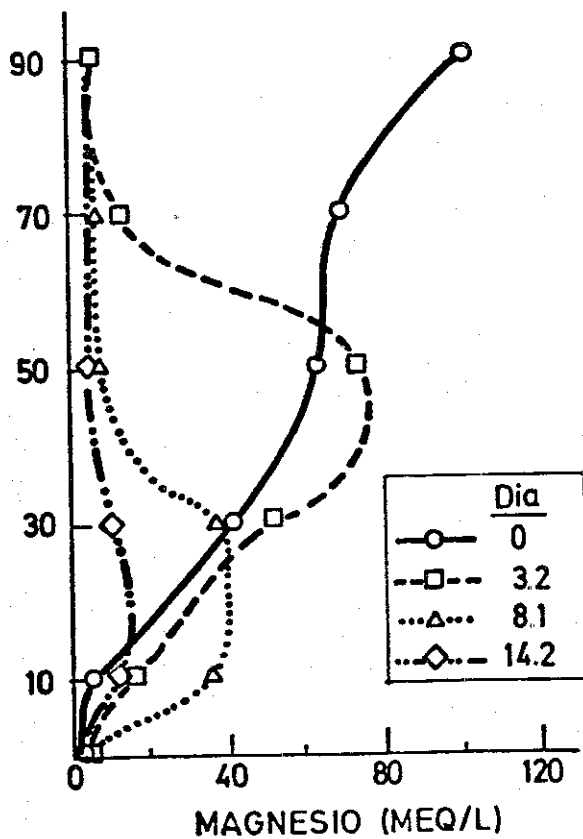
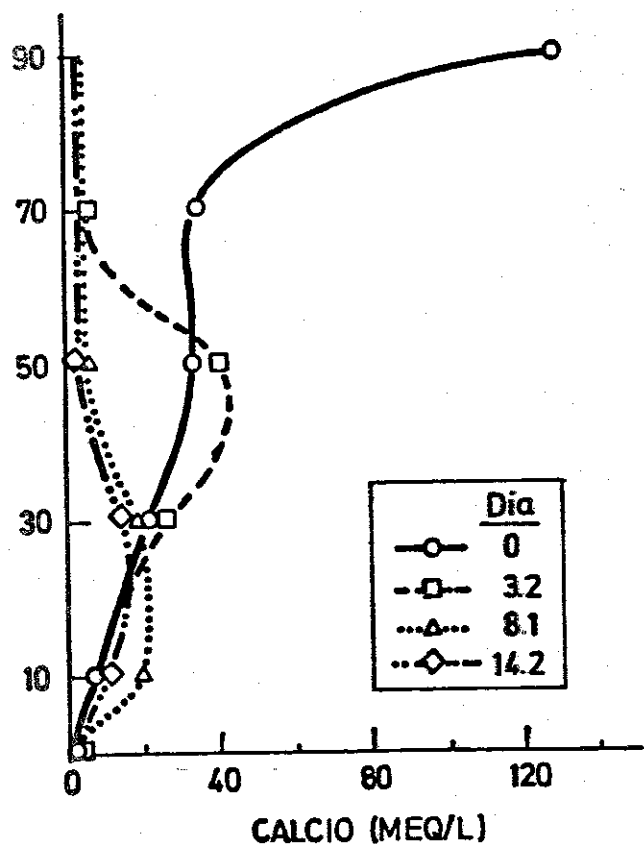
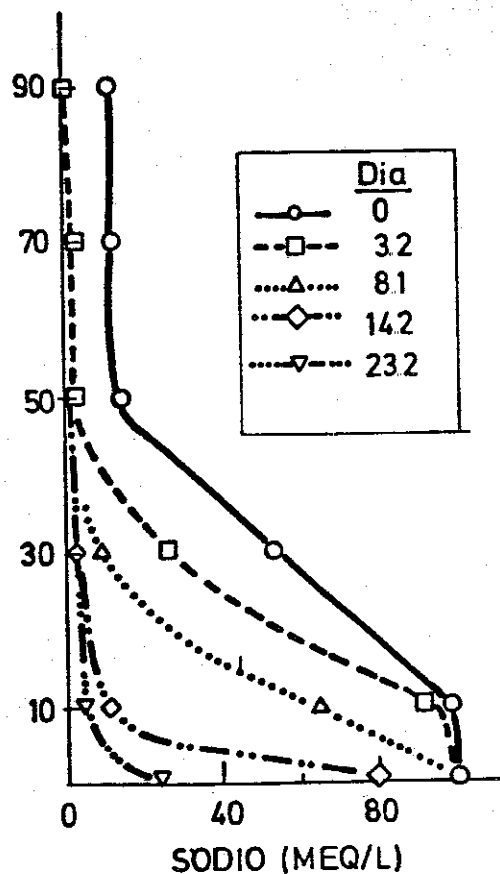
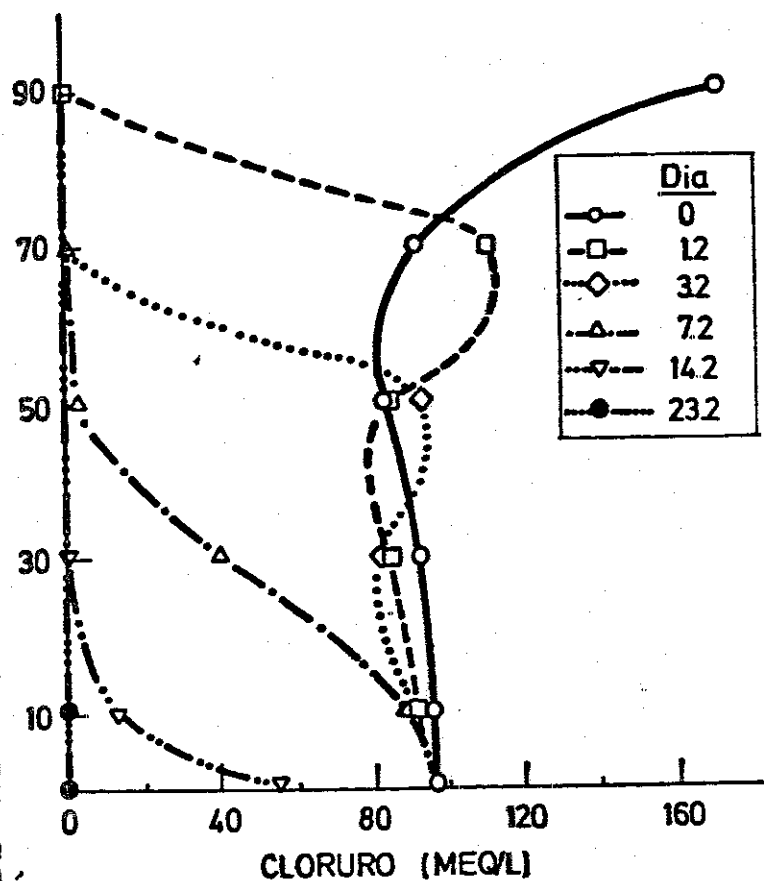


Figura 4-64. Evolución de los perfiles de concentración de los iones Cl, Na, Ca y Mg durante el período de lavado (columna II).

a la descrita para la salinidad total (CE) y se presenta en la Figura 4-65. De estas gráficas puede deducirse el volumen de solución que ha de infiltrar la columna para que se produzca una determinada reducción iónica en la misma. En el Cuadro 4-25 se presenta este volumen para reducciones del 20,50 y 80 % de cada uno de los iones.

Tomando como referencia el ion cloruro, se observa que para obtener un 20 % de reducción del ion Ca, sólo se necesitan 1.4 l. (esto es, menos que para el Cl), mientras que para el Mg se requieren 2.6 l. (esto es, más que para el Cl). Esto significa que el Ca está inicialmente disminuyendo más de lo que podría anticiparse de un lavado del suelo sin interacciones fase sólida-solución (caso del ion Cl), debido a que parte del Ca que se desplaza en profundidad es adsorbido (esto es, "desaparece" de la solución) en las posiciones de cambio del suelo. Correspondientemente, la salida del magnesio de esas posiciones hace que el volumen infiltrado necesario para obtener una reducción del 20 % sea mayor, pues se están aportando iones Mg a la solución del suelo.

El mismo razonamiento puede aplicarse para obtener reducciones iónicas del 50 %. En este caso, la parte inferior de la columna ya ha entrado en contacto con la solución infiltrante, por lo que el ion sodio interviene (junto con el Mg) en el proceso de intercambio (una parte sustancial de las posiciones de cambio del suelo de la parte inferior de la columna están saturadas en sodio; así, el SAR a 10 cm. era inicialmente $38 \text{ (meq/l)}^{1/2}$) y es sustituido por el calcio (y magnesio). La salida de este sodio desorbido hace que el vo-

lumen requerido para obtener una reducción del 50 % sea sustancialmente superior al del cloruro (Cuadro 4-25); el del magnesio sigue siendo algo superior y el del calcio es de nuevo inferior al del ion inerte. La misma situación se presenta para una reducción iónica del 80 %, con la única diferencia de que, en este caso, el Ca necesita de un volumen de solución infiltrada sustancialmente mayor, probablemente porque la adsorción de Ca en la columna ya es menor (debido a la proximidad del equilibrio fase sólida-solución) y fundamentalmente a que la aportación continua de iones calcio por la solución de lavado impide reducciones adicionales del mismo en la columna.

Cuadro 4-25. Volumen de solución infiltrada (en litros) a la que se presentan reducciones iónicas en la columna del 20, 50 y 80 % del valor inicial, respectivamente.

<u>% reducción</u>	<u>Volumen de solución infiltrada (litros)</u>			
	<u>Cl</u>	<u>Na</u>	<u>Ca</u>	<u>Mg</u>
20	2.3	1.8	1.4	2.6
50	4.2	4.8	3.7	4.4
80	7.2	8.2	9.0	7.4

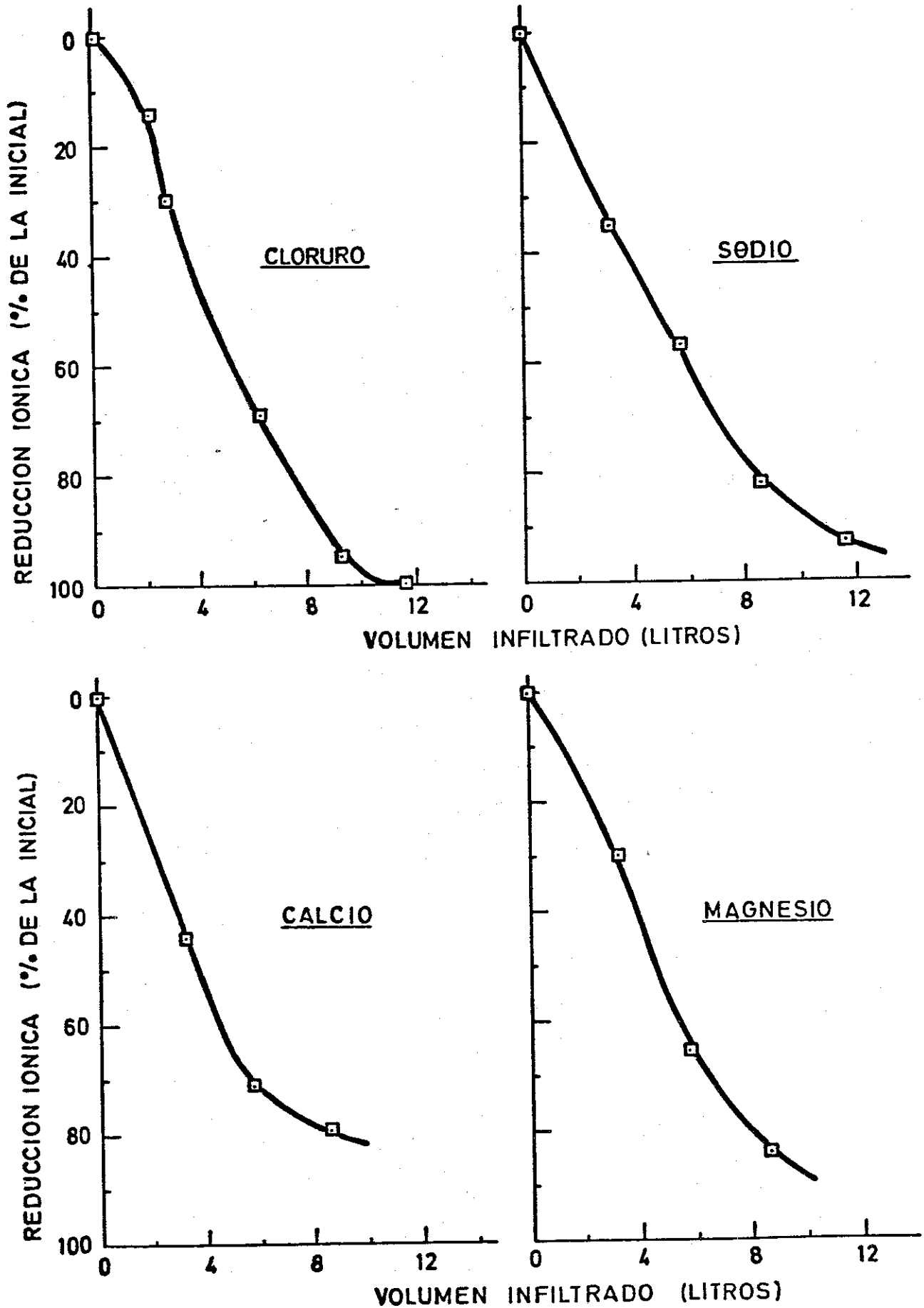


Figura 4-65. Porcentaje de reducci3n i3nica respecto de la inicial para los iones Cl, Na, Ca y Mg por efecto del lavado de la columna II con una soluci3n de CaSO_4 0.01 N.

5. **RESUMEN Y CONCLUSIONES**
=====

5. RESUMEN Y CONCLUSIONES

5.1. Sonda de succión

El desarrollo de la sonda de succión y la verificación de sus ventajas y limitaciones ha supuesto, como técnica no destructiva de fácil manejo, un avance significativo en el estudio de las relaciones agua-suelo, aun cuando su restricción fundamental radica en que, por razones físicas, sólo es operativa para contenidos de humedad relativamente elevados; siendo inviable la extracción de solución cuando el potencial matricial del suelo (Ψ_m) es menor de unos -0.8 bares.

La utilización de la sonda para la medida de la salinidad en los experimentos del movimiento de sales en columna exigió un estudio previo de la misma que ha llevado a las siguientes conclusiones:

1. El efecto de la retención de solución por las paredes de la sonda requiere atención en ciertos casos, debido a la posible contaminación de las muestras obtenidas en extracciones posteriores.

2. Se recomienda la aplicación de un nivel de vacío relativamente elevado (0.6 bares) y -si ello fuera posible- constante con el tiempo. En el caso de suelos con potenciales matriciales del orden de -0.4 bares o inferiores, puesto que la velocidad de extrac

ción de la sonda disminuye drásticamente en medios a subsaturación, se recomienda el máximo nivel de vacío aplicable con el fin de disminuir en la medida de lo posible el tiempo de extracción.

3. La influencia instantánea de la extracción sobre el perfil matricial del suelo es considerable. En nuestras condiciones experimentales, la situación de equilibrio se reestableció después de unas 35-40 horas, aunque a las 24 horas las diferencias de lectura con las anteriores a la extracción eran ya pequeñas (del orden de 5 cm. de agua de potencial matricial).

4. En condiciones de no equilibrio, el nivel de vacío aplicado, al producir la extracción de regiones diferentes en la matriz del suelo, condiciona la conductividad eléctrica (CE) de la solución extraída: conforme mayor es el nivel de vacío aplicado, la solución pertenece cada vez más a la de los poros relativamente más pequeños, así como a regiones más alejadas de la sonda.

5. El diseño y construcción de las sondas ha mostrado una resistencia y comportamiento excelentes. Además, el precio del material utilizado y el tiempo requerido en su construcción son bajos.

5.2. Sensor de salinidad

La técnica del sensor de salinidad se ha desarrollado comercialmente en los años setenta, y ha supuesto un avance importante por tratarse de un método no destructivo de medida "in-situ" de la

conductividad eléctrica (CE) de la solución del suelo.

La innovación fundamental del sensor de salinidad reside en la combinación de una cerámica, que se satura y equilibra con la fase líquida del suelo, y unos electrodos encastrados en la misma que miden la salinidad a través de la conductividad eléctrica. El diseño incorpora además un termistor para medir la temperatura. - Esta configuración, y en especial el carácter poroso de la cerámica, ocasiona limitaciones inherentes al mismo. Tanto las ventajas como las limitaciones del sensor se detallan en las siguientes conclusiones:

- En relación con el diseño y construcción del sensor:

1. El diseño y disposición de los electrodos en la cerámica es el apropiado para minimizar la corriente externa al sensor (valores menores al 1 % de la resistencia total), por lo que la CE leída por el mismo es independiente de ella.

2. El pequeño tiempo de respuesta del elemento termistor (4 minutos) y su buena precisión ($\pm 0.3^{\circ}$ C) hace que la CE leída por los sensores sea adecuadamente corregida a la temperatura estándar de 25° C.

3. Se demuestra la presencia de poros estagnantes o no conductores en la cerámica de algunos sensores y sus efectos negativos sobre la calibración, histéresis y tiempo de respuesta de los mismos.

4. Después de un período de 14 meses de uso, sólo el 23 % de los sensores examinados se consideraron estables en su calibración. De los sensores inestables, el 93 % muestra un cambio típico en la calibración que tiende a subestimar la conductividad eléctrica de la solución del suelo, especialmente para elevadas concentraciones. Se discuten las razones aparentes de esta falta de estabilidad.

5. La precisión estimada de la conductividad eléctrica medida por los sensores después de más de un año de operación es ± 0.8 mmhos/cm para los sensores estables y ± 2 mmhos/cm para los sensores inestables.

- En relación con el suelo o medio poroso externo:

6. La correlación de los resultados obtenidos entre los sensores y las sondas de succión es buena, excepto para aquellos casos de medios porosos con un amplio rango en la distribución del tamaño de poros y/o situaciones de no equilibrio, y en sistemas con propiedades de carga superficial elevada o baja humedad.

7. El comportamiento de los sensores en medios porosos saturados es en general bueno. Así, el tiempo de respuesta (para un 63 % del cambio total) es menor de 3.6 horas, adecuado para la mayoría de las situaciones prácticas. Por el contrario, el comportamiento del sensor en medios parcialmente saturados es muy limitado; así, los tres problemas fundamentales que presenta son: (i) -

elevados tiempos de respuesta, (ii) falta de contacto eficaz entre el sensor y la solución del suelo y (iii) desaturación parcial de la cerámica para valores de potencial matricial inferiores a -1 ± 0.5 bares.

8. Se demuestra que el efecto de la adsorción negativa (más importante conforme mayor es la capacidad de intercambio catiónico de un suelo (CIC) y menor es la concentración de su solución) tiende a incrementar sustancialmente los valores de la conductividad eléctrica del sensor, y de forma más moderada los de la solución extraída con la sonda de succión. Sin embargo, este efecto es pequeño o moderado para situaciones reales de campo, donde $CIC < 20$ meq/100 g.

5.3. Dinámica de la salinización por capa freática de nivel constante

La dinámica del ascenso capilar de una solución de NaCl 0.1 N (experimentos IA y IB) se ha estudiado en una columna de suelo de 100 cm. de longitud, manteniendo una capa freática estacionaria a 90 cm. de la superficie del suelo. En el experimento IA el ascenso se realizó en ausencia de evaporación y en el experimento IB se mantuvo una tasa de evaporación constante en diversos períodos del proceso.

Los resultados de este estudio conducen a las conclusiones siguientes:

- Sobre algunos aspectos previos y de instrumentación:

1. El comportamiento del sensor de salinidad en los experimentos IA y IB concuerda con las conclusiones deducidas en el estudio previo de este instrumento y demuestra las limitaciones del sensor en procesos de no equilibrio a subsaturación.

2. La composición de la solución inicialmente presente en el suelo seco al aire ($\theta_m = 2.81 \%$) es una variable importante para la posterior explicación de los resultados obtenidos en los procesos en columna. La misma se ha estimado - a partir del análisis químico del extracto saturado - por medio del modelo de Oster y Dell'Osso, basado en el cálculo numérico del equilibrio intercambio iónico-pares iónicos-sales solubles para diferentes humedades del suelo. Dado que el modelo sólo fue capaz de realizar este cálculo hasta un $\theta_m = 5.1 \%$, la composición a $\theta_m = 2.81 \%$ se obtuvo por extrapolación de la función. Los resultados obtenidos posteriormente indican que esta extrapolación fue aceptable.

3. Con el fin de mantener durante los períodos con evaporación el ascenso continuo de la solución en la columna IB, y hacerlo equiparable con la columna IA, las tasas de evaporación impuestas en la misma (0.1 a 0.2 cm/día) fueron siempre inferiores a la conductividad hidráulica del suelo. Los perfiles de humedad deducidos por atenuación de rayos gamma, relativamente constantes y elevados (excepto en la sección superficial de suelo) confirmaron estas previsiones.

- Sobre las relaciones agua-suelo:

4. Los perfiles de potencial matricial deducidos de las lecturas de los tensiómetros en la columna IB (ascenso con evaporación) indican que, en nuestras condiciones experimentales, el efecto de la evaporación sobre el Ψ_m es inapreciable a profundidades mayores de unos 25 cm. y moderado a mayores de unos 6 cm.

Los valores del potencial total del agua a 2 cm. de la superficie - deducidos de las lecturas del psicrómetro de suelo - reflejan con precisión las diferentes etapas evaporativas impuestas en la columna IB. Los valores obtenidos, muy negativos (de -15 a -40 bares) demuestran que el efecto de la evaporación es muy importante, y sugieren que la concentración de la solución del suelo superficial es elevada, concordando cualitativa y cuantitativamente con datos posteriores experimentales y con los deducidos en el balance de masas.

- Sobre el movimiento de sales:

5. La solución inicial residente en el suelo y desplazada por la solución infiltrante se mueve en y con el frente de avance de agua, alcanzando una concentración salina próxima o incluso superior (por razones que se discuten) a la inicial del suelo. Se comprueba la elevada eficacia del desplazamiento ascendente.

6. En presencia de evaporación, las sales son transportadas por el flujo de masas de agua ascendente, concentrándose en o cer

ca de la superficie del suelo. Ello origina pronunciados gradientes de concentración que tienden a desplazar las sales por difusión molecular hacia el interior de la columna y en sentido contrario al flujo de masas. Cuando este último cesa o disminuye (ausencia de evaporación en superficie) el proceso de difusión se hace predominante. Debido a ello, en la columna IB, tanto la CE como las concentraciones iónicas en la sección de suelo de 70 a 90 cm. de altura aumentan con el tiempo en la etapa sin evaporación y disminuyen con el tiempo en la etapa con evaporación.

7. Los perfiles de CE e iónicos de la solución del suelo medidos en el seccionado final de la columna IB coinciden en general con los obtenidos de las sondas de succión en el mismo día, aunque los primeros son en algunos casos algo mayores que los segundos. Asimismo, el perfil de sodio de cambio (expresado como porcentaje - ESP - de la capacidad total de intercambio) es similar al perfil de SAR (relación de adsorción de sodio), disminuyendo ambos con la altura en la columna, mientras que los perfiles de calcio y magnesio de cambio siguen una tendencia opuesta, esto es, sus concentraciones aumentan con la altura en la columna, excepto para los primeros centímetros superficiales de suelo.

8. La evolución del ion cloruro muestra en general variaciones paralelas a las de CE. La eficiencia de su desplazamiento se manifiesta por la elevada concentración en el frente de avance y por el rápido descenso a valores de concentración próximos a los

de la solución infiltrante (100 meq/l). No debe descartarse la existencia de efectos de exclusión aniónica que inducen valores en la concentración de cloruro superiores a los de la solución inicial del suelo.

9. El ion sodio sólo asciende en ambas columnas hasta alturas próximas a los 50 cm. debido a su adsorción en las posiciones de cambio del suelo, cuya capacidad es mucho mayor que la de la fase solución. Así, sólo los primeros 25-30 cm. de suelo próximos a la capa freática adquieren carácter de suelo sódico (porcentaje de sodio de cambio, $ESP > 15$). La adsorción de sodio va acompañada de una desorción equivalente de los iones calcio y magnesio; por ello, el descenso en las concentraciones de estos iones detrás del frente de avance es mucho menos abrupto, pues estos procesos de intercambio catiónico retrasan el equilibrio con la solución infiltrante.

- Sobre el balance de masas:

10. A pesar de las limitaciones del balance de masas de las columnas IA y IB, el mismo ha permitido (i) comprobar una buena precisión del trabajo experimental, (ii) calcular el movimiento total y relativo de masas de cada ión, (iii) estimar la concentración y la masa de los iones en la sección superior de las columnas, sobre las que no existe información experimental, y (iv) deducir la masa y concentración de los cationes de cambio a lo lar-

go de las columnas.

11. El balance de masas del ion cloruro (considerado inerte respecto al medio poroso) permite establecer que el factor de concentración de las sales en la columna IB respecto de la columna IA ($IB/IA = 1.44$ para la sección de 70 a 95 cm. y $IB/IA = 1.16$ para toda la columna) es razonablemente próximo al factor correspondiente de concentración del agua en el suelo debido a la evaporación (1.34), lo cual valida de forma indirecta el procedimiento experimental y los balances de masas realizados.

12. El balance de masas de los cationes ilustra algunos procesos del transporte de masas en un medio reactivo, significando la gran importancia de la capacidad de cambio de los suelos y su influencia sobre la composición de sus soluciones. Desde el punto de vista cuantitativo, el balance catiónico no es correcto debido precisamente a la gran capacidad de cambio de la columna de suelo (del orden de 4850 meq).

5.4. Dinámica del lavado de sales en presencia de una capa freática de nivel constante (experimento II)

El lavado de la columna IA se realizó con una solución de CaSO_4 0.01 N manteniendo una altura hidráulica constante de 3 cm. en la superficie del suelo, y con la capa freática estacionaria a 90 cm. de profundidad.

Los resultados de este estudio conducen a las conclusiones -

siguientes:

- Sobre algunos aspectos previos y de instrumentación:

1. De la comparación de los valores de CE_{se} (sensor) y CE_{ss} (sonda) se concluye que el sensor de salinidad es mucho más fiable en condiciones próximas a saturación, y se confirma claramente que ambos instrumentos muestrean de hecho porciones diferentes de la solución del suelo, por lo que en situaciones de no equilibrio, las diferencias obtenidas entre ambos procedimientos son (al menos en parte) reales y no deben atribuirse a un mal funcionamiento del sensor.

2. Debido a la importancia del término "número de volúmenes de poros llenos de solución desplazados por la solución infiltrante", el mismo se ha estimado para cada una de las alturas instrumentadas y para el total de la columna, a través de dos hipótesis extremas: (1) $\theta_{actual} = \theta_{inicial} = constante$, y (2) $\theta_{actual} = \theta_{saturación} = constante$. Así, el desplazamiento de un volumen de poros para el total de la columna requiere entre 6.8 y 9.0 litros de solución infiltrada.

- Sobre las relaciones agua-suelo:

3. El proceso de lavado realizado es bastante complejo, puesto que tanto las tasas de infiltración y drenaje como la humedad del suelo (θ_v) y el volumen de poros llenos de solución va

rían a lo largo del mismo. Así, cuando la columna inició el percolado, todavía había un 6 % del volumen total de poros llenos de aire, no saturándose el perfil del suelo hasta 13 días después de iniciado el lavado.

La medida de la humedad del suelo por atenuación de rayos gamma confirma este hecho, y sugiere que la capa freática actúa a modo de barrera más o menos parcial para la libre salida al exterior del aire desplazado a lo largo de la columna.

4. La concentración de partículas dispersadas en las soluciones extraídas con las sondas de succión y en el percolado se ha estimado a través de la medida de su densidad óptica. El aumento de la dispersión en el efluente coincide con el descenso de su CE, y adquiere un pico de máxima concentración para aproximadamente un volumen de poros (volumen de efluente de 8.6 litros).

A pesar de la tamización de las sondas porosas, puede observarse también en las soluciones extraídas por las mismas la existencia de un pico de máxima concentración de partículas dispersas que va desplazándose en profundidad. Este pico va retrasado respecto al de máxima CE. Así, en términos generales, el frente de máxima concentración de sales (CE) aparece para un número de volúmenes de poros desplazados (NVP) de entre 0.5 y 1.3, mientras que el frente de máxima concentración de partículas dispersas coincide con $NVP = 1.2 - 1.9$ (dependiendo de la altura muestreada en la columna).

- Sobre el movimiento de sales:

5. Las curvas de lavado de sales son relativamente complejas, debido a la complejidad de la hidrofísica del proceso y a que el perfil inicial de salinidad de la columna no es uniforme. El efecto de la dispersión hidrodinámica sobre las curvas de avance de solutos se deduce del progresivo decaimiento del pico de máxima concentración, que va haciéndose menos abrupto y más ancho hasta hacerse prácticamente una curva de gradiente constante en el efluente, condicionada en parte por el efecto de la difusión en la capa freática.

6. El frente de avance de solutos en la columna y en el efluente aparece antes del desplazamiento de un volumen de poros, consecuencia evidente de la presencia de poros estagnantes o poco conductores en la columna. Esta traslación a la izquierda de 1 VP hace que, aunque la eficacia aparente inicial del lavado parezca alta, la eficiencia final disminuya, puesto que la porción de solución perteneciente a estos poros estagnantes no se encuentra en la región de desplazamiento por flujo de masas, y su equilibrio con la solución de lavado debe hacerse por lo tanto por difusión, proceso más lento e ineficaz.

7. Mientras las curvas de avance del ion cloruro son simples y tienden a una concentración final cero, las de los cationes son en general complejas (debido a que el calcio sustituye inicialmente al magnesio y más tarde fundamentalmente al sodio adsorbido en

las posiciones de cambio) y con valores finales superiores a cero (debido a la elevada capacidad de cambio del medio poroso que - - alarga considerablemente el tiempo de equilibrio).

8. A partir de los perfiles iónicos de la columna se ha calculado el volumen de solución de lavado que ha de infiltrar el suelo para producir reducciones iónicas en la misma del 20, 50 y - 80 %. Así, mientras el ion cloruro tiene un 80 % de reducción para 7.2 l. de solución infiltrada, el ion calcio requiere de 9.0 - litros para una reducción similar. Estas diferencias son fundamentalmente debidas a las interacciones fase sólida-cationes.

6. B I B L I O G R A F I A

6. BIBLIOGRAFIA

- Alberts, E.E., Burwell, R.E. y Schuman, G.E. 1977. Soil nitrate-nitrogen determined by coring and solution techniques. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41: 90-92.
- Aragüés, R. y Alberto, F. 1978. El proceso de recuperación de - dos suelos salinos de la Depresión Media del Ebro. I. Evolu-
ción de la Conductividad Eléctrica, Conductividad Hidráulica y pH durante el lavado. *An. Est. Exp. Aula Dei*, 14 (1/2): 230-244.
- Ardakani, M.S. y McLaren, A.D. 1972. Absence of local equili- -
brium during ammonium transport in a soil column. Manuscri-
to no publicado.
- Ardakani, M.S., Rehbock, J.T. y McLaren, A.D. 1973. Oxidation of
nitrite to nitrate in a soil column. *Soil Sci. Soc. Am. - -
Proc.*, 37: 53-56.
- Babcock, K.L. 1963. Theory of the chemical properties of soil -
colloidal systems of equilibrium. *Hilgardia*, 34: 417-542.
- Bahattin Oztan y Krashevski, St.H. 1964. Rates of soil saliniza-
tion from salty groundwater. 8th Con. Soil Sci. Bucharest,
Rumania, pp. 835-844.
- Bandyopadhyaya, A.K. 1973. Studies on depth and quality of water -
on soil salinization: Behaviour of anions in the soil pro-
file with reference to the position of water-table. *J. In-
dian Soc. Soil Sci.*, Vol 21(4): 485-489.
- Biggar, J.W. y Nielsen, D.R. 1967. Miscible displacement and -
leaching phenomenon. *Irrigation of Agricultural Lands*, chap-
ter 14, Agronomy 11. ASA.
- Biggar, J.W. y Tanji, K.K. 1975. Salt interactions with soil in
relation with leaching. *ASAE Paper No. 75: 2063.*
- Boast, C.W. 1973. Modeling the movement of chemicals in soils by
water. *Soil Science*, 115(3): 224-230.
- Bohn, H.L., McNeal, B.L. y O'Connor, G.A. 1979. *Soil Chemistry.*
Wiley-Interscience. New York. 329 p.
- Bolland, M.D.A., Posner, A.M. y Quirk, J.P. 1976. Surface charge
on kaolinites in aqueous suspension. *Australian Journal of
Soil Res.*, 14(2): 197-216.

- Bolt, G.H. y Bruggenwert, M.G.M. 1976. Soil Chemistry. A. Basic elements. Elsevier Pub. Co., Inc., New York. 281 p.
- Bower, C.A. y Goertzen, J.O. 1955. Negative adsorption of salts by soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 19: 197-151.
- Bresler, E. y Hanks, R.J. 1969. Numerical method for estimating simultaneous flow of water and salt in unsaturated soils. Soil Sci. Soc. of Am. Proc., 33: 827-832.
- Bresler, E. y Laufer, A. 1974. Anion exclusion and coupling - - effects in non-steady transport through unsaturated soils. II. Laboratory and numerical experiments. Soil Sci. Soc. - Am. Proc., 38: 213-218.
- Brooks, R.H., Goertzen, J.O. y Bower, C.A. 1958. Prediction of changes in the composition of the dissolved and exchangeable cations in soils upon irrigation with sodium waters. - Soil Sci. Soc. Am. Proc., 22: 122-124.
- Calvin Giddins, J. 1967. Physico-chemical basis of chromatography. Journal of Chemical Education, 44(12): 404-709.
- Cameron, D.R. y Klute, A. 1977. Convective-dispersive solute - transport with a combined equilibrium and kinetic adsorption model. Water Resources Research, 13(1): 183-188.
- Cassel, D.K., Van Genuchten, M.Th. y Wierenga, P.J. 1975. - - Predicting anion movement in disturbed and undisturbed - soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 39(6): 1015-1019.
- Chapman, H.D. 1965. Cation exchange capacity. Methods of soil - analysis. Part 2: 891-901. Agronomy, No. 9. ASA. Madison, Wisconsin, USA.
- Dahiya, I.S., Mohinder Singh, Mahendra Singh and Hajrasuliha, - S. 1980. Simultaneous transport of surface applied salts - and water through unsaturated soils as affected by infiltration, redistribution, and evaporation. Soil Sci. Soc. - Am. J., 44(2): 223-228.
- Day, P.R. 1965. Particle formation and particle-size analysis. Methods of soil analysis. Part 1: 545-567. Agronomy, No. - 9. ASA. Madison, Wisconsin, USA.
- De Haan, F.A.M., 1965. Determination of the surface area of - soils on the basis of anion exclusion measurements. Soil - Sci., 99: 379-386.

- De Jong, E., Ballantyne, A.K., Cameron, D.R. y Read, P.W.L. 1979. Measurement of apparent electrical conductivity of soils by an electromagnetic induction probe to aid in salinity surveys. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43: 810-812.
- Diestel, H. 1974. Salt displacement mechanisms in the unsaturated zone under evaporation. Preliminary results. *Mitteilungen Dtsch. Bodenkundl. Gesselsch.*, 20: 347-361.
- Diestel, H. 1976. Model experiments on salt displacement mechanisms in unsaturated porous media under temperature gradients. System simulation in water resources. Ed. G.C. Vansteenkiste. North-Holland Publishing Co.
- Doering, E.J., Reeve, R.C. y Stockinger, K.R. 1964. Salt accumulation and salt distribution as an indicator of evaporation from fallow soils. *Soil Sci.*, 97: 312-319.
- Dutt, G.R., Shaffer, M.J. y Moore, W.J. 1972. Computer model of dynamic biophysiochemical processes in soils. *Univ. Arizona, Tucson. Tech. Bull.*, 196, p. 101.
- Dyer, K.L. 1965. Unsaturated flow phenomena in Panoche Sandy Clay Loam as indicated by leaching of chloride and nitrate ions. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 29(2): 121-126.
- Enfield, C.G. y Evans, D.D. 1969. Conductivity instrumentation for "in-situ" measurement of soil salinity. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 33: 787-789.
- England, C.B. 1974. Comments on "A technique using porous cups for water sampling at any depth in the unsaturated zone" by Warren W. Wood. *Water Resour. Res.*, 10: 1049.
- Felhendler, R., Shainberg, I. y Frenkel, H. 1974. Dispersion and the hydraulic conductivity of soils in mixed solutions. *Int. Congr. Soil Sci. Trans.*, 10th Vol. 1: 103-111.
- Ferrari, Th.J. y Cuperus, J.L. 1973. Dynamic simulation of vertical non-adsorbed anion transport. *Plant and Soil*, 38: 425-438.
- Frenkel, H., Goertzen, J.O. y Rhoades, J.D. 1978. Effects of clay type and content, exchangeable sodium percentage, and electrolyte concentration on clay dispersion and soil hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am.*, 42(1): 32-39.
- Gallez, A., Stitou, M. y Dufey, J.E. 1981. Dessalage et désodification d'un sol marocain irrigué. *Agronomie*, 1(4): 265-272.

- Gardner, W.R. y Brooks, R.H. 1957. A descriptive theory of leaching. *Soil Sci.*, 83(4): 295-304.
- Gardner, W.R. 1958. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water-table. *Soil Sci.*, 85: 228-232.
- Gardner, W.R. y Fireman, M. 1958. Laboratory studies of evaporation from soil columns in the presence of a water table. - *Soil Sci.*, 85: 244-249.
- Gardner, W.R. y Hillel, D.I. 1962. The relation of external evaporative conditions to the drying of soils. *Journal of Geophysical Research*, 67(11): 4319-4325.
- Ghuman, B.S. y Prihar, S.S. 1980. Chloride displacement by water in homogeneous columns of three soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44(1): 17-20.
- Grammaticati, O.G. y Polikarpova. 1965. Utilization of soil moisture and groundwater by cotton plants in the case of saline groundwater. 9th Int. Cong. Soil Sci. Trans., pp. 465-472.
- Grover, B.L. y Lamborn, R.E. 1970. Preparation of porous ceramic cups to be used for extraction of soil water having low - - solute concentrations. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 34: 706-708.
- Hanks, R.J., Klute, A. y Bresler, E. 1969. A numeric method for - estimating infiltration, redistribution, drainage and evaporation of water from soil. *Water Res. Research*, 5(5): 1064-1069.
- Hansen, E.A. y Harris, A.R. 1975. Validity of soil-water samples collected with porous ceramic cups. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 39: 528-536.
- Harris, A.R. y Hansen, E.A. 1975. A new ceramic cup soil-water - sampler. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 39: 157-158.
- Hassan, F.A. y Ghaibeh, A.Sh. 1977. Evaporation and salt movement in soils in the presence of water table. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41(3): 470-478.
- Hwang, R.B., Tanji, K.K., Luthin, J.N. y Robinson, F.E. 1975. A - computer model of salt accumulation in the root zone from a saline stationary water table. *Water Sci. & Eng. paper*, No. 4009.
- IAEA. 1974. International Atomic Energy Agency. Isotope and radiation techniques in soil physics and irrigation studies, 1973. Vienna, 1974.

- Ingvalson, R.D., Oster, J.D., Rawlins, S.L. y Hoffman, G.J. 1970. Measurement of water potential and osmotic potential in soil with a combined thermocouple psychrometer and salinity sensor. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 34: 570-574.
- Jackson, D.R., Brinkley, F.S. y Bendetti, E.A. 1976. Extraction of soil water using cellulose-acetate hollow fibers. Soil Sci. Soc. Am. J., 40: 327-329.
- Jackson, M.L. 1969. X-ray diffraction analysis of soil minerals. En "Soil chemical analysis-Advanced course: 169-249". U. Wisconsin. Madison, Wisconsin, USA.
- Jury, W.A. y Weeks, L.V. 1978. Solute travel-time estimates for tilled-drained fields: III. Removal of a Geothermal brine spill from soil by leaching. Soil Sci. Soc. Am. J., 42(5):670-685.
- Jury, W.A., Jarrell, W.M. y Devitt, D. 1979. Reclamation of saline-sodic soils by leaching. Soil Sci. Soc. Am. J., 43(6): 1100-1106.
- Kandil, M.F., Fathi, A. y Abdel Aal, R. 1977. Effect of ground water on soil salinity. Egypt. J. Soil Sci. 17, No. 2, pp. 131-142.
- Kapp, L.C. 1937. Extracting a submerged soil solution. Arkansas Agric. Exp. Sta. Bull., 351, p. 28.
- Keller, J. y Alfaro, J.F., 1966. Effect of water application rate on leaching. Soil Sci., 102(2): 108-114.
- Kemper, W.D. 1959. Estimation of osmotic stress in soil water from the electrical resistance of finely porous ceramic units. Soil Sci., 87: 345-349.
- Kemper, W.D. 1969. Water and ion movement in thin films as influenced by the electrostatic charge and diffuse layer of cations associated with clay mineral surfaces. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 24: 10-16.
- Khan, S.U. y Webster, G.R. 1968. Sulphate distribution in solonchic soil with water table. Journal of Soil Sci., 19(1).
- Kirda, C., Nielsen, D.R. y Biggar, J.W. 1973. Simultaneous transport of chloride and water during infiltration. Soil Sci. Soc. of Am. Proc., 37(3): 339-345.
- Kirda, C., Nielsen, D.R. y Biggar, J.W. 1973. The combined effects of infiltration and redistribution on leaching. Soil Sci., 117: 6, 323-330.

- Kirkham, D. y Powers, W.L. 1972. *Advanced Soil Physics*. Wiley-Interscience. New York. 534 p.
- Kovda, Y.A. y Szabolcs, I. 1979. Modeling of soil salinization and alkalization. *Agrokemia Es Talajtan* 28 (1979). Supplementum 1: 208.
- Krone, R.B., Ludwig, H.F. y Thomas, J.F. 1952. Porous tube - device for sampling soil solutions during water-spreading operations. *Soil Sci.*, 73: 211-219.
- Krugel, C., Dreyspring, C. y Heins, W. 1935. A new suction apparatus for the complete separation of the soil solution from the soil itself. *Superphosphate*, 8: 101-108.
- Krupp, H.K. y Elrick, D.E. 1969. Density effects in miscible - displacement experiments. *Soil Sci.*, 197: 372-380.
- Lapidus, L. y Amundson, N.R. 1952. Mathematics of adsorption - in beds: VI. The effect of longitudinal diffusion in ion exchange and chromatographic columns. *J. Phys. Chem.*, 56: 48-49.
- Leo, M.W.M. 1963. Effects of cropping and fallowing on soil - salinization. *Soil Sci.*, 96: 422-427.
- Levin, M.J. y Jackson, D.R. 1977. A comparison of in-situ extractors for sampling soil water. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41: 535-536.
- Long, F.L. 1978. A glass filter soil solution sampler. *Soil - Sci. Soc. Am. J.*, 42: 834-835.
- McNeal, B.L. and Coleman, N.T. 1966. Effect of solution composition on soil hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 30(3): 308-312.
- Miller, R.J., Biggar, J.W. y Nielsen, D.R. 1965. Chloride displacement in panoche clay loam in relation to water movement and distribution. *Water Resour. Res.*, 1: 63-73.
- Mokady, R.S. y Bresler, E. 1968. Reduced sodium exchange capacity in unsaturated flow. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 32(4): 463-467.
- Nakayama, F.S., Jackson, R.D., Kimball, B.A. y Reginato, R.J. 1973. Diurnal soil-water evaporation: Chloride movement - and accumulation near the soil surface. *Soil Sci. Soc. - Am. Proc.*, 37(4): 509-513.

- Nielsen, D.R. y Biggar, J.W. 1962. Miscible displacement. III. Theoretical considerations. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 26: 216-221.
- Oster, J.D. e Ingvalson, R.D. 1967. "In-situ" measurement of soil salinity with a sensor. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 31: 572-574.
- Oster, J.D., Rawlins, S.L. e Ingvalson, R.D. 1969. Independent measurement of matric and osmotic potential of soil water. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 33: 188-192.
- Oster, J.D. y McNeal, B.L. 1971. Computation of soil solution composition variation with water content for desaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 35: 436-442.
- Oster, J.D. y Willardson, L.S. 1971. Reliability of salinity sensors for the management of soil salinity. Agronomy Journal, 63: 695-698.
- Parizek, R.R. y Lane, B.E. 1970. Soil-water sampling using pan and deep pressure-vacuum lysimeters. J. Hydrol., 11: 1-21.
- Parker, F.W. 1925. The absorption of phosphates by Pasteur-Chamberland filters. Soil Sci., 20: 149-158.
- Parlange, J.Y. y Aylor, D. 1972. Theory of water movement in soils: 9. The dynamics of capillary rise. Soil Science, 114(2): 79-81.
- Peck, A.J. 1978. Note on the role of a shallow aquifer in dry-land salinity. Aust. J. Soil Res., 16: 237-240.
- Pupisky, H. y Shainberg, I. 1979. Salt effects on the hydraulic conductivity of a sandy soil. Soil Sci. Soc. Am. J., 43 (3): 429-433.
- Qayyum, M.A. y Kemper, W.A. 1961. Salt concentration gradients in soils and their effects on moisture movement and evaporation. Soil Sci., 93: 333-342.
- Rao, P.S.C., Rolston, D.E., Jessup, R.E. y Davidson, J.M. 1980. Solute transport in aggregated porous media: Theoretical and experimental evaluation. Soil Sci. Soc. Am. J., 44: 1139-1146.
- Reeve, R.C., Pillsbury, A.F. y Wilcox, L.U. 1955. Reclamation of a saline and high Boron soil in the Coachella Valley of California. Hilgardia, 24: 69-91.
- Reeve, R.C. y Doering, E.J. 1965. Sampling the soil solution for salinity appraisal. Soil Sci., 99: 339-344.

- Reginato, R.J. y van Bavel, C.H.M. 1964. Soil water measurement with gamma attenuation. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 28(6): 721-724.
- Reicosky, Donald, C., Millington, R.J. y Peters, D.B. 1970. A salt sensor for use in saturated and unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 34: 214-217.
- Reitemeier, R.F. 1946. Effect of moisture content on the dissolved and exchangeable ions of soils of arid regions. *Soil Sci.*, 61: 195-215.
- Rhoades, J.D. 1972. Quality of water for irrigation. *Soil Sci.*, 113: 277-283.
- Rhoades, J.D. y Corwin, D.L. 1981. Determining soil electrical conductivity-depth relations using an inductive electromagnetic soil conductivity meter. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45: 255-260.
- Rible, J.M. and Davis, L.E. 1955. Ion exchange in soil columns. *Soil Sci.*, 79(1): 41-47.
- Richards, L.A. (Ed.). 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkaline soils. *Agr. Handbook*, 60. USDA, Washington D.C.
- Richards, L.A. 1966. A soil salinity sensor of improved design. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 30: 333-337.
- Rieu, M. y Cheverry, C. 1976. Mise au point bibliographique sur quelques recherches récentes en matière de sols salés. *Cah. ORSTOM, Ser. Pédol.*, 14: 39-61.
- Rose, D.A. y Passioura, J.B. 1971. The analysis of experiments on hydrodynamic dispersion. *Soil Science*, 111(4): 252-257.
- Rose, D.A. y Passioura, J.B. 1971. Gravity segregation during miscible displacement experiments. *Soil Science*, 111(4): 258-265.
- Schaffer, G. 1975. Zur Frage der Salzdynamik in Böden. Sonderdruck aus *Zeitschrift für Bewässerungswirtschaft*. 10 Jahrgang, Heft 1, Juni 1975, Seite 25-46.
- Shainberg, I., Rhoades, J.D. y Prather, R.J. 1981. Effect of low electrolyte concentration on clay dispersion and hydraulic conductivity of a sodic soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45: 273-277.
- Shainberg, I., Rhoades, J.D., Suárez, D.L. y Prather, R.J. 1981. Effect of mineral weathering on clay dispersion and hydraulic conductivity of sodic soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45: 287-291.

- Sharma, D.R. y Primar, S.S. 1973. Effect of depth and salinity of ground water on evaporation and soil salinization. *Ind. J. of Agric. Sci.*, 43(6): 582-586.
- Schofield, R.K. 1947. Calculation of surface areas from measurements of negative adsorption. *Nature*, 160: 408-410.
- Scotter, D.R. y Raats, P.A.C. 1970. Movement of salt and water near crystalline salt in relative dry soil. *Soil Science*, 109(3): 170-178.
- Scotter, D.R. 1978. Preferential solute movement through larger soil voids. I. Some computations using simple theory. *Aust. J. Soil Res.*, 16: 257-67.
- Smiles, D.E. y Philip, J.R. 1978. Solute transport during absorption of water by soil: Laboratory studies and their practical implications. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 42(4): 537-544.
- Szabolcs, I. y Lesztak, J. 1968. The movement of different salt solutions in soil profiles. *Agrokem. Talajt.*, 15: 407-422.
- Talsma, T. 1963. The control of saline groundwater. *Meded. Landbouwhogesch. Wageningen*, 63(10): 1-68.
- Tanji, K.K. 1969. Predicting specific conductance from electrolytic properties and ion association in some aqueous solutions. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 33(6): 887-890.
- Terkeltoub, R.W. y Babcock, K.L. 1971. A simple method for predicting salt movement through soil. *Soil Sci.*, 111(3): 182-188.
- Thomas, G.W. y Phillips, R.E. 1979. Consequences of water movement in macropores. *J. of Envir. Quality*, 8(2): 149-152.
- Thomas, G.W. y Swoboda, A.R. 1970. Anion exclusion effects on chloride movement in soils. *Soil Sci.*, 110(3): 163-166.
- Todd, R.M. y Kemper, W.D. 1972. Salt dispersion coefficients near an evaporating surface. *Soil Sci. Soc. of Am. Proc.*, 36: 539-543.
- Van der Molen, W.H. 1956. Desalinization of saline soils as a column process. *Soil Science*, 81(1): 19-27.
- Van der Ploeg, R.R. y Beese, F. 1977. Model calculations for the extraction of soil water by ceramic cups and plates. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41: 466-470.

- Wagner, G.H. 1962. Use of porous ceramic cups to sample water within the profile. *Soil Sci.*, 94: 379-386.
- Warrick, A.W., Biggar, J.W. y Nielsen, D.R. 1971. Simultaneous solute and water transfer for an unsaturated soil. *Water Res. Research*, 7(5): 1216-1225.
- Wesseling, J. y Oster, J.D. 1973. Response of salinity sensors to rapidly changing salinity. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 37: 553-557.
- Wiebe, H.H., Barket, J. y Brown, R.W. 1977. Soil temperature gradient effects on in situ hygrometer measurements of water potential. *Utah Agric. Exp. Sta.*, paper 2131.
- Wierenga, P.J., Shaffer, M.J., Gómez, S.P. y O'Connor, G.A. 1975. Predicting ionic distribution in large soil columns. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 39(6): 1080-1084.
- Wierenga, P.J. 1977. Solute distribution profiles computed with steady-state and transient water movement models. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41(6): 1050-1055.
- Wolff, R.G. 1967. Weathering woodstocks granite near Baltimore, Maryland. *Am. J. Sci.*, 265: 106-117.
- Wood, J.D. 1978. Calibration stability and response time for salinity sensors. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42: 248-251.
- Wood, W.W. 1973. A technique using porous cups for water sampling at any depth in the unsaturated zone. *Water Resour. Res.*, 9: 486-488.