

SUELOS AFECTADOS POR SALES

por

DAVID BADIA VILLAS

Unitat d'Ecologia (UAB), Bellaterra, Barcelona

1. Concepto

Los suelos afectados por sales son aquéllos que contienen una elevada concentración de sales solubles (suelos salinos) y/o sodio intercambiable en las arcillas (suelos alcalinos o sódicos) (RICHARD, 1982).

Debemos recordar que, en todo estudio edáfico, el concepto "sales del suelo" únicamente incluye aquellas sales más solubles que el yeso (2 g l^{-1}). Así se excluyen sustancias como la caliza o el propio yeso, sales en sentido amplio, ya que no ejercen una acción semejante a las anteriores (efecto osmótico, ión específico).

Las sales presentes en suelos salinos, como las que se pueden encontrar en la depresión central del Ebro medio, son el cloruro sódico (NaCl), el cloruro magnésico (MgCl_2), el sulfato magnésico (MgSO_4) y el sulfato sódico (Na_2SO_4). Entre estas sales, las tres primeras son las predominantes en el agua del mar, y la cuarta puede aparecer como resultado de las anteriores (tabla 1). Este hecho no resulta extraño en el valle del Ebro, dado que a lo largo del Oligoceno formaba parte del actual Mediterráneo, para convertirse en mar cerrado hacia el Mioceno.

Tabla 1. Tipos de sales en el agua de mar (en HERRERO, 1986).

SALES	g l^{-1}	%
NaCl	27,21	77,76
MgCl_2	3,81	10,88
MgSO_4	<u>2,32</u>	<u>6,62</u>
Total	35,00	100,00

En la porción central del Ebro medio las condiciones climáticas semiáridas han logrado liberar las sales del material litológico sin conseguir su lavado del perfil edáfico. Bajo estas condiciones, aparecen suelos afectados por sales, básicamente suelos salinos o salino-sódicos (PORTA *et al.*, 1983; HERRERO, 1986), cuya colonización corre a cargo de una vegetación muy especializada, la vegetación halófito. El aislamiento de este área continental ha condicionado la presencia y evolución de una serie de taxones que adquieren un elevado valor sistemático y ecológico (BRAUN-BLANQUET y BOLÒS, 1957; BOLÒS, 1969, 1972; DURRIEL y VASSEL, 1972; MASCLANS, 1966; SAPPÀ, 1953; TERRADAS, 1973, 1987). El estudio de estos taxones en relación a su hábitat, y en concreto a los suelos en los que se desarrollan, permite una mejor comprensión de su interacción, y se engloba en los trabajos considerados de correlación edáfico-fitosociológicos (HERRERO, 1980; PORTA *et al.*, 1980; OCHOA, 1982; TORRENTÓ, 1987; BADIA, 1987, 1988).

En los siguientes apartados se proporciona una revisión bibliográfica sobre el porqué de la salinización, los efectos que las sales ejercen en las plantas y como éstas presentan una serie de mecanismos de resistencia que les permite colonizar suelos salinos como los presentes en la depresión central del Ebro medio.

2. Medida de la salinidad y la alcalinidad del suelo

2.1. INTRODUCCIÓN

La estimación del contenido en sales de un suelo guarda relación con el comportamiento de los cultivos frente a estas sales. La planta requiere una energía potencial para absorber el agua del suelo a través de sus raíces. Cuantas más sales aparezcan disueltas en el suelo mayor energía necesitará el cultivo a causa de la presión osmótica generada por la mera existencia de compuestos en solución. Dado que este fenómeno viene determinado por el mismo hecho físico que genera su conductividad eléctrica —la presencia de iones en la solución salina—, se han correlacionado a ambos parámetros, presión osmótica y conductividad eléctrica, para medir la salinidad en el suelo. La medida de la conductividad eléctrica (CE) se realiza sobre el agua o solución extraída del suelo previamente humectado; por eso se habla de conductividad eléctrica del extracto (CE_e). Las unidades que se utilizan para expresar la CE_e son las del sistema internacional, es decir, el siemen/metro (anteriormente, mhocm⁻¹), o subunidades de ésta misma, como el decisiemen/metro (dSm⁻¹).

$$1 \text{ decisiemen per metro} = 1 \text{ milimho per centímetro} = 1000 \text{ micromhos per centímetro}$$

$$1 \text{ dS.m}^{-1} = 1 \text{ mmho cm}^{-1} = 10^3 \text{ } \mu\text{mho cm}^{-1}$$

Por otro lado, dado que la CE aumenta un 2% por grado, es preciso referirla a una temperatura estándar, que, por convenio, es de 25 °C. Esto se efectúa mediante la siguiente ecuación, o aplicando factores de conversión tabulados previo cálculo (PORTA, 1986).

$$CE_{25} = CE_t [1 + 0.02(25-t)]$$

2.2. MEDIDA DE LA SALINIDAD: EXTRACTOS ACUOSOS

Una cuestión adicional es el contenido de agua que hemos de aplicar al suelo para obtener el extracto acuoso. Convencionalmente, se mide la CE en extractos de suelos saturados por ser el método en que menos se diluye la solución, siendo factible la extracción. Además, este punto de saturación considera el efecto de la dilución de las sales que ocurre bajo texturas finas con mayor capacidad para retener agua. Así, la concentración de sales solubles del extracto de saturación se aproxima a la mitad de la concentración del suelo en el límite superior del intervalo de humedad disponible (capacidad de campo) y a la cuarta parte de la correspondiente al límite inferior de dicho intervalo (punto de marchitez permanente). El tener en consideración estos aspectos permite usar la CE_c para determinar directamente el efecto de la salinidad sobre el rendimiento de los cultivos (RICHARDS, 1982).

Existen otras relaciones suelo/agua usadas para obtener extractos de suelo, como la relación 1:5. Aunque este método es más fácil de manejar y requiere menos muestra de suelo, refleja peor las propiedades del mismo y se introducen errores por hidrólisis, intercambio catiónico, disolución de minerales, etc. Así, para suelos de zonas semiáridas, las sales disueltas aumentan del extracto de saturación al 1:5 de dos a nueve veces en suelos yesíferos y dos veces en los calizos. Además, el calcio, magnesio, sodio, potasio y sulfato aumentan con la dilución por efecto catiónico de valencia o dilución del yeso, mientras el cloruro y nitrato tienden a disminuir por el efecto de adsorción negativa de los aniones (ARAGUÉS *et al.*, 1986). Dado que existen diversos parámetros que nos expresan la salinidad del suelo, ofrecemos a continuación toda una serie de relaciones empíricas que las relacionan (tabla 2).

2.3. MEDIDA DE LA ALCALINIDAD

Vista la metodología a utilizar para conocer si un suelo es salino, expongamos ahora cómo determinar si este es alcalino, es decir, si presenta un elevado contenido en sodio intercambiable en las arcillas. Obtenido un extracto acuoso por saturación con agua destilada de una muestra de

Tabla 2. Relaciones entre parámetros de medida de la salinidad.

<p>– Concentración iónica y CE_e (válido para rangos de 1-70 dS/m): C (meq/l) = 9,86 CE_e (dS/m)</p> <p>– Porcentaje de sal y CE_e $\% \text{ sales extracto} = 0.064 CE_e$ (dS/m) $\% \text{ sales suelo} = \frac{\% \text{ sales extracto} \times PS}{100}$</p> <p>con PS = Porcentaje de agua necesario para obtener la saturación del suelo.</p> <p>– Potencial osmótico y CE_e (para rangos de 3 a 30 dS/m). P_o (10 atm) = P_o (1 MPa) = $-0.036 CE_e$ (dS/m)</p> <p>– CE_e entre extractos acuosos: $CE_{1:A} \times A = CE_{1:B} \times B$ siendo A y B los volúmenes de agua por unidad de masa de suelo para los extractos suelo/agua 1:A y 1:B. Se supone que no existen reacciones fisico-químicas en la interfase sólido-solución, ni efectos de carga.</p>
--

suelo, podemos determinar los iones en esta solución. El problema comienza al determinar los iones intercambiables en suelos afectados por sales. Si se procede al lixiviado con una sal tamponada (CMOSA, 1975), no es posible distinguir los iones de cambio de los solubles. Si lavamos previamente el suelo con agua, se hidrolizan cantidades apreciables de Na^+ y Mg^{++} . Ante esta perspectiva, diversos investigadores han puesto de manifiesto que es posible definir cuándo un suelo es alcalino o sódico, al relacionar el porcentaje de sodio intercambiable en función de la concentración del conjunto de cationes solubles mayoritarios (tabla 3).

Tabla 3. Obtención del PS a partir del índice de absorción de sodio (SAR).

$RAS = \frac{Na}{(Ca + Mg)^{1/2}} \quad PSI = \frac{100 (-0,0126 + 0,01475 RAS)}{1 + (-0,0126 + 0,01475 RAS)}$ <p>siendo RAS = Relación de absorción de sodio y PSI = Porcentaje de sodio intercambiable.</p>
--

3. Clasificación de los suelos afectados por sales

Entre los diferentes tipos de suelos salinos o alcalinos existe toda una graduación cuyos efectos sobre el desarrollo de las plantas puede ser variable. En base a esta consideración, se han agrupado los suelos afectados por sales en cuatro categorías (RICHARDS, 1982).

1) Suelos salinos

Este grupo incluye a los suelos que contienen muchas sales en solución, en la fase líquida, resultando perjudiciales para la mayoría de los cultivos. Dado que poseen un bajo contenido en sodio absorbido en las arcillas, en la fase sólida, el suelo se mantiene floculado, estructurado. De esta forma, la infiltración y permeabilidad es igual o mayor que en un suelo normal, y, por lo tanto, el lavado con agua en exceso podría convertirlo en un suelo no salino.

Este concepto queda delimitado técnicamente por la conductividad eléctrica del extracto a saturación (CE_e), que debe superar los 4 dSm^{-1} (aproximadamente, los 40 meq/l de sales), teniendo un porcentaje de sodio intercambiable (PS1) inferior a 15.

2) Suelos alcalinos

Este grupo incluye los suelos que contienen una cantidad muy alta de sodio intercambiable, capaz de interferir en el crecimiento de la mayoría de los cultivos, sin poseer sumas apreciables de sales solubles. La abundancia de un ión monovalente tan activo como el sodio (Na^+), frente a los bivalentes calcio y magnesio (Ca^{++} y Mg^{++}), determina la individualización y dispersión de las partículas del suelo, situación temible desde el punto de vista de su recuperación.

Técnicamente, un suelo alcalino posee un PS1 mayor de 15 y una CE_e inferior a 4 dSm^{-1} . Su pH es alcalino, variable entre 8,5 y 10, debido a la ausencia de H^+ y la abundancia de Na^+ en la solución del suelo.

3) Suelos salino-alcalinos

En estos suelos aparece, junto a un excesivo contenido en sales solubles, un alto PSI. Mientras estos suelos mantienen sales en la fase líquida del suelo, sus características son semejantes a las de los suelos salinos. Sin embargo, su lavado con agua de bajo contenido electrolítico (de "buena calidad") conducirá a la formación de suelos alcalinos, mucho más problemáticos. En estos suelos se verifica que la CE_e sea mayor de 4 dSm^{-1} y el PDI, mayor de 15.

4) Suelos normales

En este grupo encontramos los suelos que no poseen sales como para resultar perjudiciales para los cultivos, siendo la CE_e inferior a 4 dSm^{-1} y el PSI inferior a 15.

4. Origen de las sales

El origen de las sales es un factor a conocer dentro del análisis del estatus salino de una región. Las sales solubles presentes en la superficie

terrestre, dejando aparte la actividad volcánica y los aportes cósmicos, han podido tener un origen marino, litológico o antrópico.

1) Origen marino. En zonas del litoral mediterráneo encontramos procesos de salinización por transporte de las sales desde el mar (sal cíclica). Esto puede ser debido a la formación de aerosoles ricos en sales, que son transportados y depositados tierra adentro, a la infiltración subterránea del agua marina o a la redisolución de sales fósiles.

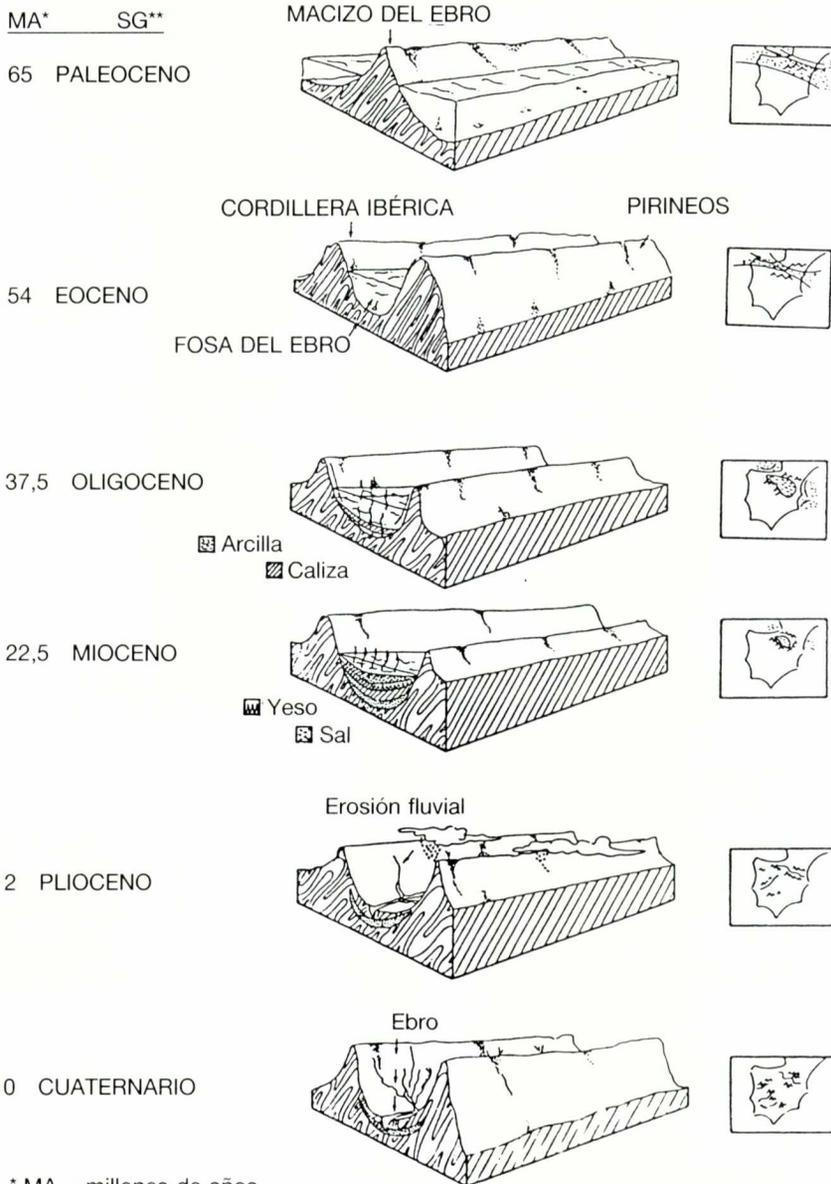
2) Origen litológico. Algunos materiales litológicos sobre los que actualmente se ha desarrollado un suelo son ricos en sales al tratarse de materiales que sedimentaron en condiciones marinas; esto es especialmente válido para el valle del Ebro (fig. 1).

Bajo climas húmedos, las sales son lavadas del suelo por la lluvia, pasando a los ríos y, finalmente, al mar. Sin embargo, en un ambiente árido o semiárido, las sales, aun desplazándose dentro del perfil edáfico, no son eliminadas del suelo. Así sucede en la depresión media del Ebro, donde las escasas precipitaciones caídas conducen a la liberación de sales, por humectación y alteración de materiales salinos, sin que puedan ser lavadas de su lugar de liberación. Según Waisel (1972), en la región mediterránea la tasa de alteración de la roca madre, bajo clima semiárido, oscila entre los 10 y los 50 mm por milenio, según se trate de llanuras o vertientes. La alteración de una roca con un 0,04 % de cloruros, ión de máxima movilidad, liberará entre 0,16 y 0,80 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ de sal. La repetición anual de este proceso ha conducido a las actuales acumulaciones salinas naturales. Además del agua, el viento ejerce un importante papel, especialmente en las regiones áridas y semiáridas, como redistribuidor de materiales, entre ellos las sales.

3) Origen antrópico: salinización secundaria

Muchas actividades humanas ejercen un gran impacto sobre la naturaleza, teniendo la agricultura una particular importancia. La irrigación, una de las prácticas más antiguas de la agricultura, ha conducido a resultados favorables y desfavorables; entre los causantes principales de resultados desfavorables esta la salinización, que por su inducción antrópica es denominada *salinización secundaria* (SZABOLCS, 1979). La irregular distribución de la lluvia en el área mediterránea de la península Ibérica ha motivado la transformación en regadío de numerosas zonas, especialmente en las últimas décadas. Se ha pasado de tener una superficie de regadío de 1.450.000 ha en 1950 a otra de 3.261.000 en 1986, además, está previsto que en el año 2010 se eleve esta superficie hasta las 4.200.000 ha (BALSA y MONTES, 1991). Según las estimaciones de la FAO-UNESCO (SZA-

EVOLUCIÓN GEOLÓGICA DEL VALLE DEL EBRO Y DE LA PENINSULA IBÉRICA



* MA = millones de años

** SG = serie geológica

Figura 1. Evolución geológica del valle del Ebro: muchos de los actuales problemas de salinidad derivan del origen marino del material litológico.

BOLCS, 1986), varios millones de hectáreas de tierras irrigadas son abandonadas anualmente como consecuencia de la salinización secundaria. Los mecanismos por los que se provoca esta salinización son variados:

a) Por aporte de aguas de baja calidad (aguas de reutilización agrícola, aguas residuales industriales o urbanas). Las áreas de alta tasa de evaporación, como las que aquí se tratan, son especialmente sensibles a la salinización por riego con aguas de escasa calidad. Así, el riego con aguas del río Jordán (con $0,5 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$ de sales solubles) ha llegado a incorporar hasta 500 g de sales por m^2 y año en suelos israelíes (WASEL, 1972). En la península Ibérica encontramos algunos ejemplos semejantes en áreas del bajo Guadalhorce y en la vega baja del Segura.

b) Por elevación del nivel freático salino. Por efecto de la tensión superficial del agua se produce un movimiento ascendente de la capa freática; al evaporarse en la superficie edáfica deja las sales que contenía en disolución.

c) Por intercepción del drenaje natural. La presencia de obstáculos a la fluencia del agua no permite el lavado y arrastre de sales a favor de la pendiente. Un caso ilustrativo se dió en el valle del Nilo; fue irrigado durante miles de años bajo clima árido sin problemas de salinización gracias al buen drenaje y al efecto de succión de la corriente del río. Los sistemas de presas y canalizaciones construídos a lo largo del siglo pasado rompieron esta dinámica. Actualmente el delta del Nilo requiere de costosos sistemas artificiales de drenaje para eliminar las sales en exceso (WASEL, 1972). En otras ocasiones son las vías de comunicación las que han dificultado el desagüe de torrentes o glaciares provocando su salinización, como sucede con la N-II a su paso por el bajo Cinca o Los Monegros.

d) Por exposición de materiales litológicos de alto contenido en sales. En ocasiones las nivelaciones y otras obras de ingeniería han expuesto a la intemperie materiales salinos que al ser regados sirven de centro de redistribución de sales (fig. 2). En el sistema Flumen-Monegros, siendo el agua de riego de buena calidad, se han salinizado por esta causa cerca de 40.000 ha , estimándose en más de 300.000 las hectáreas afectadas en el conjunto del valle del Ebro (HERRERO, 1986).

5. Efectos de las sales sobre el crecimiento vegetal

Los efectos que producen las sales sobre las plantas han sido ampliamente estudiados (BERNSTEIN y HAYWARD, 1958; WASEL, 1972; MUNNS *et al.*, 1983). A continuación daremos un rápido repaso a los mismos. Hay que diferenciar entre un efecto osmótico, un efecto de toxicidad causada por un ión específico y un efecto indirecto derivado de la abundancia de sodio en el complejo de cambio del suelo (tabla 4).

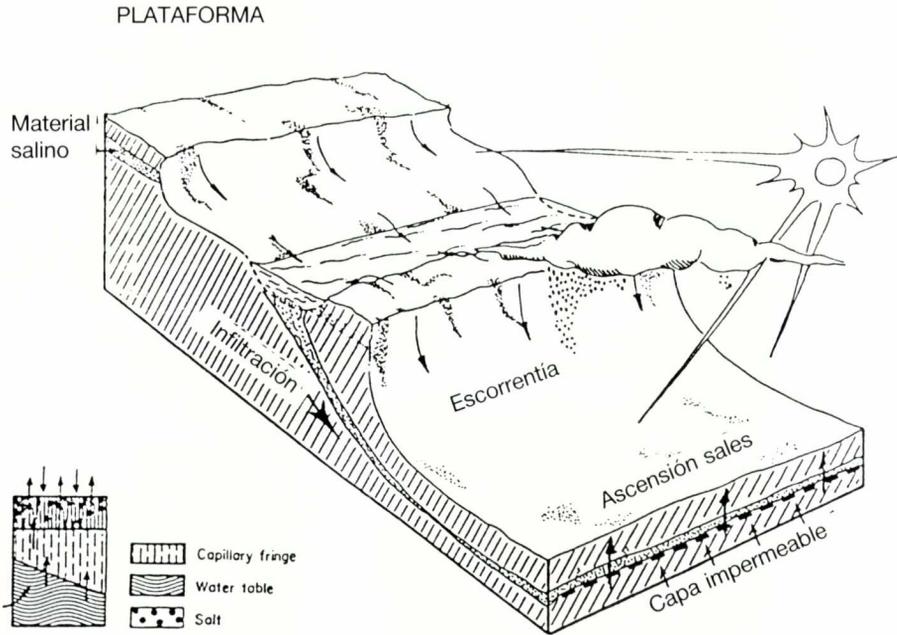


Figura 2. Mecanismos hipotéticos de salinización secundaria: redistribución por riego y ascensión de capa freática.

Tabla 4. Mecanismos de inhibición del crecimiento vegetal por estrés salino.

- **Efecto osmótico:**
 - Estrés hídrico: pérdida de turgencia --- inhibición de la extensión celular, inhibición de la acumulación de clorofila en hojas, pérdida de regulación estomática, etc. --- inhibición del crecimiento.
 - Modificación de la conformación proteica --- inactividad enzimática --- inhibición del crecimiento.
 - Cambio en la permeabilidad de la membrana --- déficit nutritivo --- inhibición del crecimiento.
- **Efecto iónico específico:**
 - Competencia en la absorción de nutrientes --- de potasio por el sodio y de nitrato por el cloro --- déficit nutritivo.
 - Cambio estructural en la membrana --- exceso de sulfato.
- **Efecto del sodio intercambiable:**
 - Deterioro de las propiedades físicas del suelo --- reducción del porcentaje de germinación anoxia, etc.

1) Efecto osmótico. En primer lugar, la presencia de sales en la solución del suelo reduce la disponibilidad hídrica para la planta al aumentar la presión osmótica de dicha solución (efecto osmótico). Llega un momento en que será tal la cantidad de sales que, a pesar de que el suelo contenga agua, la planta no podrá extraerla y sufrirá un estrés hídrico (sequía fisiológica).

2) Efecto de ión específico. Sobreimpuesto al efecto osmótico, debido a la actividad conjunta de las sales en solución, hay que añadir la acción tóxica de determinados iones. Este efecto puede ser debido a la toxicidad directa causada por la acumulación de un determinado ión, por la formación de productos tóxicos para la planta o bien por interacción en el equilibrio nutritivo de la misma.

Los principales elementos con efecto iónico específico son: el sodio, el cloruro y el boro pero su efecto varía incluso entre especies vegetales cercanas. Así, la tomatera silvestre (*Lycopersicon cheesmanii*) no tolera altas concentraciones de sodio pero sí de potasio, mientras que con la tomatera cultivada (*L. esculentum*) sucede lo contrario (RUSH y EPSTEIN, 1981). En el guisante (*Pisum sativum*) se observa alteraciones inducidas por cloruros pero no por sulfatos (PORATH y POLJAKOFF-MAYBER, 1964, 1968). Por otro lado, se admite que el sodio y el cloruro provocan fenómenos de competencia a nivel de absorción con el potasio y los nitratos, respectivamente (KAFKAFI, 1987; SILBERBUSH y BEN ASHER, 1987).

3) Efecto del sodio intercambiable. Finalmente, la abundancia de sodio frente al calcio y magnesio absorbido en las arcillas del suelo puede determinar la individualización y dispersión de estas partículas (suelo alcalino o sódico). Bajo estas condiciones, la aireación puede ser deficiente, lo puede conllevar a problemas de germinación o podredumbres en las plantas. Pero ¿cómo se explica esa individualización de las partículas del suelo? Según la teoría de la doble capa de Gouy-Chapman (POLJAKOFF y GALE, 1975), las partículas de arcilla compensan sus cargas negativas rodeándose de cationes, los cuales se ven sometidos a dos tendencias opuestas; éstas son: una fuerza electrostática de atracción y una de difusión, desde la superficie de la arcilla donde están intercambiados, hacia la solución del suelo donde la concentración catiónica es menor. Esta situación es similar a la de la atmósfera terrestre, en la que las moléculas de aire están sujetas a dos tendencias opuestas: la atracción gravitacional hacia el centro de la Tierra y la repulsión por difusión. El resultado de estas dos tendencias es una distribución "atmosférica, donde la concentración de las moléculas de gas es más alta cerca de la superficie terrestre y su concentración decrece con el incremento de la distancia (fig. 3).

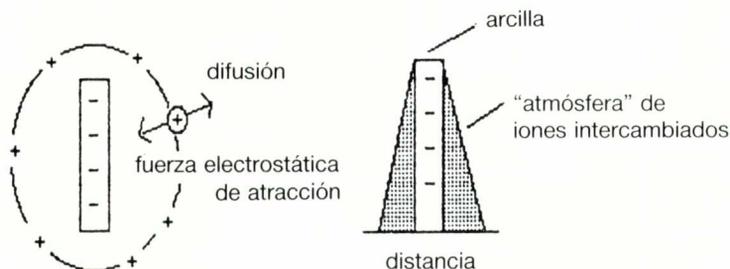


Figura 3. Representación esquemática de la distribución "atmosférica" de cargas iónicas alrededor de las arcillas.

La configuración de la doble capa difusa puede verse modificada tanto por la relación entre iones divalentes: monovalentes (básicamente, calcio sodio) como por la concentración electrolítica (CE) en la solución del suelo (fig. 4). En un sistema con idéntica CE, es decir, con semejante tendencia a la difusión del sodio que del calcio, este último, como divalente, presenta una fuerza electrostática de atracción doble al primero, monovalente. En un sistema monoiónico (por lo tanto, con idéntica fuerza de atracción para los iones), por ejemplo un sistema arcillo-sódico, un incremento en la concentración de sales provoca una disminución de la tenden-

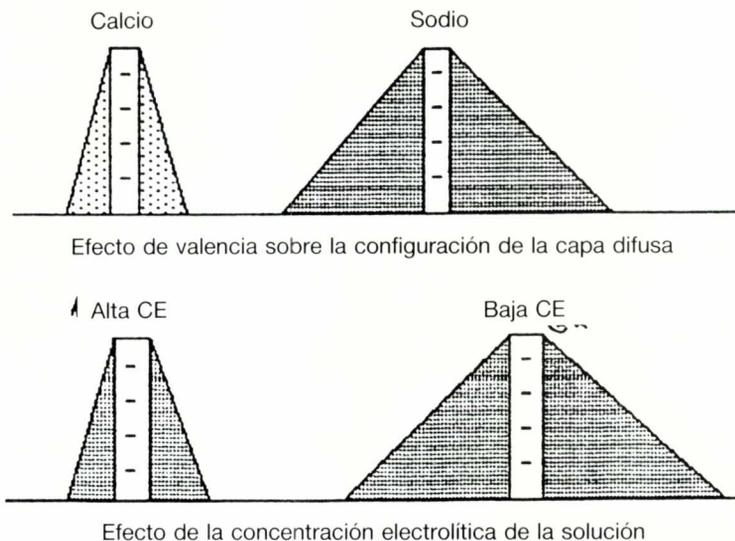


Figura 4. Efecto de valencia y de la concentración electrolítica de la solución sobre la configuración de la capa difusa.

cia a difundir hacia fuera de la arcilla y, por lo tanto, una doble capa difusa más comprimida hacia su superficie.

Las partículas de arcilla se mantienen unidas cuanto más comprimida esté la doble capa, la "atmósfera" iónica de la arcilla; en ese momento existe un equilibrio entre las fuerzas de atracción y repulsión entre las "atmósferas" y las micelas de arcilla. Esto se logra bajo dominancia del calcio o con una elevada concentración electrolítica de la solución del suelo (fig. 5).

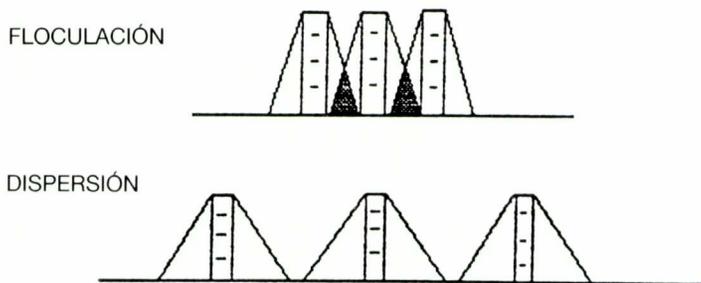


Figura 5. Estados de floculación y dispersión de las arcillas.

Resumiendo, con una gran concentración de sodio de cambio (alto PSI) las fuerzas electrostáticas de repulsión entre partículas del suelo predominan sobre las de atracción, produciéndose dicha dispersión, salvo que exista una elevada CE de la solución. Así pues, cuando la relación PSI suelo/CE agua es suficientemente alta como para superar la capacidad de estabilidad de las arcillas se produce su individualización y movimiento, colapsándose la porosidad. Con ello se desmoronan los agregados del suelo, la porosidad se vuelve ineficaz, degradándose la estructura edáfica. A nivel superficial, se puede producir un encostramiento que condiciona una baja infiltración hídrica. Esto, a su vez, provoca escorrentía, erosión, ineficacia en el uso del agua y daños al cultivo por encharcamiento temporal (POLJAKOFF y GALE, 1975); una vez seca la costra puede ser lo suficientemente dura como para no poder ser atravesada por la plántula recién germinada (AGASSI *et al.*, 1981; MORIN *et al.*, 1981).

6. Mecanismos de resistencia de las plantas frente a las sales: vegetación halófila

La mayoría de cultivos agrícolas presentan dificultades para crecer en condiciones salinas; se trata de plantas glicófilas o glicófitos. Sin embargo, la salinidad natural se ha dado en forma más o menos extensa desde su

origen. Por ello, numerosas plantas han desarrollado mecanismos adaptados para crecer en medios salinos; se trata de las plantas halófilas o halófitos.

6.1. CARACTERISTICAS GENERALES DE LOS HALOFITOS

La salinidad induce muchos cambios estructurales en halófitos: tienden a poseer gran número de estomas, células más anchas y un tejido de reserva de agua bien desarrollado. Se ha observado que, generalmente, el estado germinativo es un período más sensible que el adulto. En condiciones naturales, las semillas de halófitos permanecen en dormición hasta que el nivel de salinidad baja a cierto valor umbral. En ciertos casos, existe un dimorfismo en las semillas que se traduce en una diferencial resistencia a las sales (ORTIZ, 1988); de esta manera a la especie se asegura la supervivencia en un rango mayor de salinidad edáfica.

Las raíces de halófitos no ven afectado su crecimiento por la presencia de sales; en plantas como la osagra (*Atriplex halimus*), tan habituales en los bordes de caminos del valle medio del Ebro, pueden alcanzar más de 5 metros de profundidad.

Ciertas plantas pueden servir como indicadores del grado de salinidad o alcalinidad del suelo (PORTA *et al.*, 1980) o de la presencia de un determinado ión (BADIA *et al.*, 1989).

6.2. ESTRATEGIAS DE RESISTENCIA

Las plantas que crecen en suelos salinos manifiestan una serie de mecanismos de resistencia o estrategias para lograr su supervivencia. Así, existen algunos terófitos que colonizan suelos afectados por sales cuando éstos tienen una baja conductividad eléctrica, y, por lo tanto, no son en realidad halófitos; estos últimos pueden utilizar uno de los siguientes mecanismos:

a) *Dilución*. Dado que la elevada concentración de iones en la planta resulta tóxica algunos halófitos proceden a diluirlos desarrollando un alto grado de suculencia. Esto sucede en las candeleras (*Salicornia herbacea*, *Arthrocnemum glaucum*), en diversas especies de *Suaeda*, etc., tan abundantes en la depresión del Ebro. La suculencia desarrollada es debida a la formación de grandes células en el mesófilo esponjoso y a la presencia de tejido en empalizada de capas múltiples.

b) *Exclusión*. La exclusión implica la impermeabilidad de la membrana celular del vegetal a ciertas sales o sus iones. Así, las variedades más resistentes de cebada tienen más alto contenido en potasio, excluyendo en cierta medida los cloruros y el sodio.

Existen plantas que protegen sus órganos más sensibles del efecto de las sales, de esta forma suele detectarse un gradiente de concentración desde las raíces hasta las hojas más jóvenes; esto puede observarse en algunas variedades de tomatera (BADIA y MEIRI, 1989). Se trata de una compartimentación no celular sino histológica.

c) *Secreción*. Además de casos de exclusión pasiva de las sales, pueden darse casos de extracción activa o secreción. En halófitos bien adaptados, los mecanismos de secreción se localizan en glándulas. Así sucede en la osagra (*A. halimus*), que dispone de glándulas vesiculares en forma de pelos (tricomas) a nivel epidérmico. En estas glándulas, situadas en las hojas, se concentran grandes cantidades de iones, en especial cloruros, transportados contragradiante de concentración, es decir con gasto energético. Otro tipo de células aparece en géneros tan comunes en el valle medio del Ebro como *Tamarix*, *Frankenia* o *Limonium*. En estas plantas, las células glandulares quedan incluidas bajo la epidermis produciéndose una secreción activa de las sales hacia el exterior.

d) *Estabilización*. Algunas plantas son capaces de generar sustancias estabilizantes de sus macromoléculas protegiéndolas de las sales. En otros casos, presentan una inherente estabilidad de sus membranas, sistemas enzimáticos y macromoléculas en medio salino.

e) *Inactivación*. En ocasiones, los diferentes iones no se acumulan en glándulas o se excretan al exterior sino que permanecen en el citoplasma celular, pero acomplexados con ácidos orgánicos (por ejemplo, el ácido oxálico, con activos grupos carboxilo, originando oxalato sódico), con lo que se inactiva su perjudicial efecto.

f) *Osmorregulación*. Aparte del efecto de toxicidad iónica, las plantas que viven en suelos salinos tienen graves problemas para disponer del agua existente en estos suelos. Para solucionar este problema sintetizan sustancias orgánicas osmóticamente activas como azúcares, prolina, carotenoides o ácidos orgánicos.

7. Recuperación de suelos agrícolas afectados por salinidad

Algunas de las medidas que podemos adoptar para recuperar suelos afectados por sales son enumeradas a continuación.

7.1. LAVADO

Si el suelo mantiene un buen nivel de infiltración, el aporte de agua en exceso lavará las sales. Un requisito necesario antes de ese aporte es el nivelar adecuadamente el campo para favorecer la homogénea distribución del agua de lavado. Cuando el suelo es alcalino, este lavado no

será efectivo; en primer lugar, deberán mejorarse sus propiedades físicas a través de enmiendas químicas u orgánicas, como veremos en los próximos apartados. Una técnica adicional en suelos con reducida permeabilidad consiste en la aplicación de aguas de mayor a menor salinidad en los sucesivos lavados.

La cantidad de agua y el tiempo requerido para el lavado de un suelo dependen del contenido inicial de sales, del nivel de salinidad final deseado, calidad del agua aplicada, características del suelo, etc. Convencionalmente, se considera que entre 5 y 10 mm de agua son necesarios para lavar hasta un 80 % de las sales del primer centímetro superficial del suelo (SHARMA y GUPTA, 1987).

Debe tenerse en cuenta que las sales lavadas de la superficie del suelo deberían ser eliminadas del perfil edáfico a través de sistemas de drenaje (canales abiertos, drenes subterráneos, etc.).

7.2. ENMIENDAS QUÍMICAS

Las adiciones de diferentes sustancias químicas pueden permitir la recuperación de suelos salino-alcálicos y alcálicos en los que la técnica del lavado no es aplicable desde un inicio. Se trata de neutralizar el pH del suelo y sustituir el sodio intercambiable de las arcillas por calcio. Estas sustancias químicas pueden agruparse en dos categorías.

- a) Sales con calcio de relativa solubilidad, como el yeso o el fosfoyeso.
- b) Materiales acidificantes, como sulfúrico, pirita, residuos industriales.

La aplicación de esas sustancias combinadas con un buen uso del agua de lluvia o de riego pueden acelerar el proceso de recuperación de suelos afectados por sales. En el caso del yeso debe utilizarse la forma dihidratada y particulada, por ejemplo entre 2 y 5 mm. Se aconseja distribuirlo homogéneamente y mezclado con arado seguido de rastra de discos, en condiciones de escasa humedad. El requerimiento de yeso puede ser determinado por el método de Schoonover (RICHARDS, 1982).

$$\text{Requerimiento de yeso (cmol}\cdot\text{kg}^{-1}) = \text{CIC (PIS}_o\text{-PSI}_f\text{)}/100$$

siendo CIC la capacidad de intercambio catiónico del suelo, y PIS_o y PSI_f, el porcentaje de sodio intercambiable inicial y final.

Si bien la solubilidad del yeso es muy limitada en condiciones normales (2,5 gl⁻¹, aproximadamente), esta puede aumentarse con la aplicación de abono verde o *compost*. En muchos suelos de la depresión del Ebro la aplicación de estas enmiendas orgánicas, dada la presencia de yeso y caliza, puede facilitar la recuperación de suelo afectados por sales, como veremos seguidamente,

7.3. ENMIENDAS ORGANICAS

La aplicación de materia orgánica al suelo mejora diversas propiedades físicas, químicas y biológicas (PARR *et al.*, 1989; STOTT *et al.*, 1989), lo cual es extensivo para suelos salinos. Algunas de las prácticas tendentes a incrementar el humus de los suelos pueden ser:

a) Aportar residuos vegetales, animales o *compost* que provoque un aumento de la concentración de dióxido de carbono y cierta disminución del pH. De esta forma, la caliza ve aumentar su solubilidad (tabla 5), al transformarse en bicarbonato cálcico. La liberación de calcio desde el bicarbonato puede mejorar así los suelos alcalinos.

Tabla 5. Variación de la solubilidad de la caliza con el pH y la concentración de CO₂ (% en volumen).

CO ₂ aire	pH	Solubilidad caliza
0,00	10,23	13,1
0,03	8,48	63,4
0,30	7,81	133,4
1,00	7,47	202,9
10,0	6,80	470,0
100	6,13	1.098,6

b) No excederse en la aplicación de residuos animales, como la gallinaza y los purines, que, con la alta concentración de sales que poseen, no pueden considerarse óptimos para suelos salinos. Según Moiné (1986), no deberían aplicarse en dosis superiores a los 15 Mg *per* ha y año de purines ni a los 5 Mg *per* ha y año de gallinaza.

c) Añadir al suelo residuos con alto porcentaje en lignina, como la paja, o bien con grandes cantidades de raíces de lenta descomposición. Si se siembra inmediatamente al enterrado de estos residuos, es conveniente aportar unas diez unidades fertilizantes de nitrógeno por Mg de paja para evitar la competencia entre el cultivo y los microorganismos por ese nutriente.

d) Reducir el número de labores, dado que tienden a incrementar la tasa de descomposición de la materia orgánica del suelo.

e) Seleccionar cultivos de cobertura total antes que los sembrados a surcos, dado que protegen el suelo de la acción de la lluvia, evitándose así el encostramiento superficial.

f) En los períodos en los que el suelo permanece sin cultivo, es útil la deposición de cubiertas de paja u otros residuos de cosechas a modo de acolchado. De esta forma se evita la destrucción de la estructura del suelo, a la vez que se comifica el balance hídrico del mismo, pudiéndose limitar la ascensión de sales desde el subsuelo. Esta última finalidad es asumible en períodos de lluvias o riegos intermitentes, pero no en períodos secos, donde el agua almacenada es más fácilmente perdida al mantenerse más tiempo la humedad superficial.

7.4. PRACTICAS CULTURALES

El agricultor, con el manejo de sus tierras, puede prevenir, en cierta medida, el efecto de las sales sobre los cultivos. Así, en el período germinativo pueden optar por un riego que permita el lavado de las sales en los primeros centímetros del suelo donde se localizan las semillas. También pueden adoptarse mayor número de semillas del habitual contrarrestando la reducción del porcentaje de germinación por efecto de las sales.

En suelos afectados por sales, con baja estabilidad estructural, no es conveniente dejar el suelo fino y liso tras la siembra puesto que, con la formación de una lámina de agua, la lluvia ejerce su máxima capacidad destructiva. Es más beneficioso disponer de una superficie irregular, gruesa que no permita esa acción dispersante con el consiguiente encostramiento superficial. La preparación del terreno y la disposición de las semillas en el mismo son factores a considerar para mejorar la productividad en suelos salinos (figura 6).

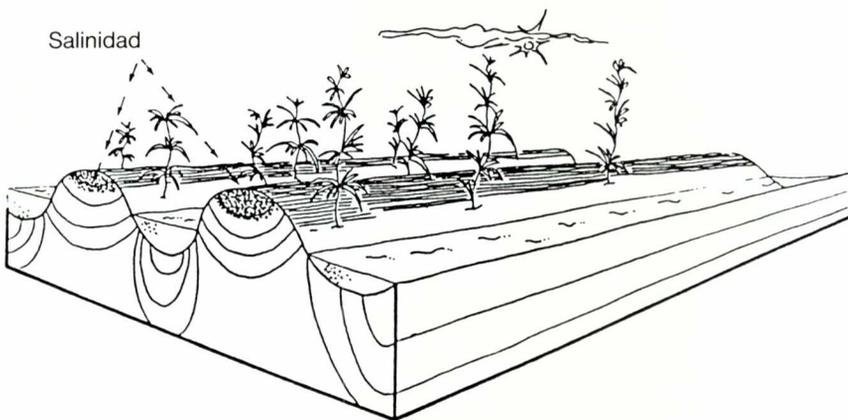


Figura 6. Distribución de las sales en los caballones después del riego. La localización de la planta o semilla en el lomo del caballón permitirá su óptimo crecimiento.

Cada cultivo manifiesta una sensibilidad diferente a una misma concentración de sales en el suelo. Por ello a lo largo del proceso de recuperación de un suelo salino puede comenzarse cultivando especies tolerantes o semitolerantes, para después introducir otras especies más sensibles.

7.5. REHABILITACION DE SUELOS CON ENCOSTRAMIENTO SUPERFICIAL

La formación de una costra superficial es un hecho común en regiones áridas y semiáridas. Su presencia condiciona una baja infiltración hídrica, lo que provoca escorrentía, erosión, ineficacia en el uso del agua y daños al cultivo por encharcamiento temporal. Una vez seca la costra puede ser lo suficientemente dura como para no poder ser atravesada por la plántula recién germinada. Según varios autores, esta costra suele estar formada por dos capas.

- Una delgada lámina que provoca el sellado superficial del suelo, carente de poros y de un grosor de 0,1 mm.

- Una capa subyacente, de baja porosidad y elevada densidad, de unos 2 mm de grosor, que únicamente se forma en suelos muy desestructurados.

La costra superficial posee una conductividad hidráulica o permeabilidad mucho menor que el suelo sobre el que se forma. Según Agassi *et al.* (1981), este parámetro puede ser de 2.000 a 800 veces mayor en el suelo que en las capas respectivamente citadas de la costra. Esta amplia diferencia de conductividad hidráulica entre suelo y costra ejerce una fuerza de succión que mantiene las partículas de arcilla juntas, fuerza a la que se atribuye la eficiencia del sellado (MORIN *et al.*, 1981).

¿Cómo se forma la costra superficial?

Son dos mecanismos de acción complementaria, los que conducen a la formación del sellado de la superficie de suelos agrícolas en zonas áridas:

- Desintegración física, con dispersión de los agregados del suelo por el impacto de las gotas de lluvia y con reordenación de las arcillas.

- Dispersión química, función del PSI del suelo y la CE del agua. Cuando la relación $PSI_{\text{suelo}}/CE_{\text{agua}}$ es suficientemente alta como para superar la capacidad de estabilidad de las arcillas, se produce una dispersión y movimiento de éstas, colapsándose los poros conductores en los primeros centímetros de suelo.

Resumiendo, podemos indicar que los factores que van a conducir la formación de la costra pueden dividirse en:

- a) Factores externos, del medio físico. Entre éstos se encuentran el volumen e intensidad de la precipitación, el número y duración de los riegos y la calidad (CE) del agua.

b) Factores internos o del suelo, como el contenido de humedad, de materia orgánica, las características mineralógicas del suelo, la CE de la solución del suelo, el porcentaje de sodio de cambio y la textura (en general, suelos arenosos no forman costra pero sí la forman los arcillosos o limosos).

Entre las prácticas agronómicas que pueden reducir la formación de la costra superficial se encuentran:

- La adición regular de materia orgánica, para fortalecer la estabilidad de los agregados del suelo.

- La implantación de cultivos de cobertura total o la deposición de residuos vegetales en superficie para evitar que las gotas de lluvia impacten directamente sobre el suelo.

- No dejar el suelo fino y liso tras la siembra, para evitar la formación de una lámina superficial de agua que incrementaría la acción destructiva de las gotas de lluvia sobre los agregados del suelo.

- Aplicación de sustancias químicas como el yeso, el fosfoyeso (FY), la poliacrilamida aniónica (PAM) o diversos polímeros catiónicos (PC). El yeso tiene el doble efecto de incrementar la concentración electrolítica de la solución del suelo (CE) y sustituir el sodio intercambiado en las arcillas (PSI), de acción dispersante, por el calcio, de acción floculante (SHAINBERG *et al.*, 1982). Por su mayor solubilidad, se está experimentando con el FY, subproducto pulverulento de la industria de fertilizantes fosfatados. Su acción es similar a la del yeso. La deposición superficial de estas sustancias ejerce, además, un efecto de acolchado (AGASSI *et al.*, 1986; SHAINBERG *et al.*, 1982).

La PAM es una sustancia de alto peso molecular que actúa como agente cementante de los agregados del suelo. La aplicación en seco de la poliacrilamida es más eficaz, puesto que sus grupos aniónicos se asocian, en condiciones de deshidratación, a cationes intercambiados en las arcillas. En medio acuoso, la unión es más inestable, al establecerse a través de una molécula de agua.

Si se riega con agua de buena calidad o nos encontramos en el período de lluvias, se obtendrán mejores resultados con la aplicación conjunta de FY y PAM (SHAINBERG *et al.*, 1989).

Algunos polímeros catiónicos (PC), de bajo peso molecular y solubles en agua, parecen interferir en la formación de costras superficiales. Estos PC, aplicados con la misma agua de riego, son adsorbidos sobre las partículas de la superficie del suelo cementándolas; se sugiere que la adsorción electrostática del polímero entre la superficie de la arcilla, negativamente cargada es el factor que condiciona la estabilidad de los agregados. Se obtienen reducciones del sellado superficial manteniéndose óptimas tasas de infiltración hídrica (BEN HUR y LETEY, 1989). Todas estas sustan-

cias aunque de efectividad probada, suelen ser costosas económicamente, en especial para aplicar en cultivos extensivos.

BIBLIOGRAFÍA

- AGASSI, M.; SHAINBERG, I., & MORIN, J. (1981). "Effect of electrolyte and soil sodicity on infiltration rate and cost formation". *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45: 848-851.
- AGASSI, M.; SHAINBERG, I., & MORIN, J. (1986). "Effect of powdered phosphogypsum on the infiltration rate of sodic soils". *Irrig. Sci.*, 7: 53-61.
- ARINGHERI, R., y PARDINI, G. (1987). "Effect of soluble salts on the surface properties of a non-saline soil". En *Current Perspectives in Environmental Biogeochemistry*. Giovannozzi & Nannipieri Eds. CNR. Roma.
- BADIA, D., y MULLOR, R. (1987). "Evaluación de los factores limitantes del uso agrícola en Fraga. Un estudio para la ordenación territorial". Com. II Congr. Mundial Vasco. Biología Ambiental. [Bilbao]
- BADIA, D.; ALCANIZ, J. M. (1989). "Nitrificación potencial en agro-ecosistemas del Ebro Medio". *Options Méditerranéenes*, 3: 195-198.
- BADIA, D. (1989). *Los suelos en Fraga. Cartografía y Evaluación*. IEA Huesca.
- BEN-HUR, M., & LETEY, J. (1989). "Effect of polysaccharides, clay dispersion and impact energy on water infiltration". *Soil Sci. Soc. of Am. J.*, 53: 233-238.
- BOLÒS, O. de (1973). "La vegetación de la Serreta Negra de Fraga". *Mem. R. Acad. Cien. y Art.* [Barcelona].
- BRAUN-BLANQUET, J., & BOLÒS, O. de (1957). "Les groupements végétaux du Bassin Moyen de l'Ebre et leur dynamisme". *Ann. Est. Exp. Aula Dei* 5: 1-266. [Zaragoza].
- COMSA (1975). *Métodos oficiales de análisis*. Mº de Agricultura, Madrid.
- DURRIEU, G., y VASSAL, J. (1972). *Compte Rendu 100e. Session extraordinaire*. Soc. Botanique de France. París.
- DUVIGNEAUD, P., & DENAEYER DE SMET, S. (1968). "Essai de classification chimique (éléments minéraux) des plantes gypsiques de Bassin de l'Ebre". *Bull. Soc. Roy. Bot. Belgique* 101: 279-291.
- DUVIGNEAUD, P., & DENAEYER DE SMET, S. (1973). "Consideration sur l'écologie de la nutrition minérale des tapis végétaux naturels". *Ecologie Plant.* 8(3): 219-246.
- D'YAKONOVA (1970). "Soil as a source of carbon dioxide for plants on irrigated and non irrigated Ciscausian chernozems" (in: *Kononova*, 1970, *op. cit.*).
- HERRERO, J. I. (1980). *Salinidad del suelo en salobres de Monegros y Somontano Oscense como condicionante de la vegetación*. Dip. Prov. Zaragoza.
- HERRERO, J. I. (1980). *Salinidad en los suelos: aspectos de su incidencia en regadíos de Huesca*. DGA. Huesca.
- KAFKAFI, U. (1987). "Nutrition des plantes dans des conditions de salinité". *Fertilisants et Agriculture*, 95: 3-18.

- MASCLANS, F. (1966). *Flora del Segrià i l'Urgell, a la plana occidental catalana*. IEC. (Barcelona).
- MCCORMICK, R. W.; WOLF, D. C. (1980). Effect of sodium chloride on CO₂ evolution, ammonification and nitrification in a Sassafras sandy loam.
- PARR, J. F., & PAPENDICK, R. I. (1978). "Factors affecting the decomposition of crop residues by micro-organisms". In: *Crop residue Management System*. ASA. Madison.
- PARR, J. F.; PAPENDICK, R. I., HORNICK, S. B., & COLACICCO, D. (1989). "Use of organic amendments for increasing the productivity of arid lands". *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 3: 149-170.
- POLJAKOFF-MAYBER & GALE, Eds (1975). *Plant in saline environments*. Ecological Studies, 15. New York.
- PORTA, J. (1986). *Técnicas y experimentos en Edafología*. Col. Of. d'Eng. Agrònoms de Catalunya. Barcelona.
- PORTA, J. (1982). *Suelos afectados por salinidad*. Monografía ETSIA n° 49, Universidad Politécnica. Madrid.
- PORTA, J.; CASTROVIEJO, S., y LÓPEZ ACEVEDO, M. (1980). *Diagnosis of salinization and alkalization levels in Spanish salt-affected soils by means of halophytic community studies*. Int. Symp. Salt-Affected soils. (Karnal, India).
- RICHARDS, L. A. Ed. (1982). *Diagnóstico y rehabilitación de los suelos salinos y sódicos*. US Salinity Laboratory. Ed. Limusa. México.
- SAPPA, F. (1953). *Contributo all'interpretazione della vegetazione dei Monegros*. Torino.
- SHAINBERG, I.; WARRINGTON, D., & RENGASANY, P. (1989). *Effect of PAM and gypsum application on rain infiltration and runoff ARO*. Series n° 2640-E Volcani Center Bet. Dagan.
- SHARMA, S. K., & GUPTA, I. C. (1986). *Saline environment and plant growth*. Agro-Botanical Publishers. India.
- SILBERBUSH, M., y BEN-ASHER, J. (1987). "The effect of salinity on parameters of potassium and nitrate uptake of cotton". Comm. in *Soil Sci. Plant Anal.* 18(1): 65-81.
- SINDHU, M. A., y CORNFIELD, A. M. (1976). "Comparative effects of varying levels of chlorides and sulphates of sodium, potassium, calcium and magnesium on ammonification and nitrification during incubation of soil". *Plant & Soil*, 27: 468-472.
- SZABOLCS, S. (1979). "Review of research on salt affected soils". *Natural Resources Research*, XV. UNESCO. París. P. 137.
- SZABOLCS, I. (1986). "Agronomical and ecological impact of irrigation on soil and water salinity". *Advances in Soil Science*, 4: 189-218.
- TERRADAS, J. (1986). "El paisatge vegetal dels Monegros: assaig d'interpretació". *Orsis*, 2: 71-95.
- TORRENTÓ, J. R. (1987). *Relació edafo-fitosociològica en medis halomorfs del Baix Segre*. Tesina. Universidad de Barcelona.
- WAYSSEL, Y. (1972). *Biology of halophytes*. Academic Press. New York.