

3. ANTECEDENTES

3.1 Introducción

La salinización de los suelos cultivados como consecuencia del riego es un problema ligado a la agricultura probablemente desde hace más de 6,000 años, y es un hecho histórico documentado que contribuyó decisivamente a la desaparición de la civilización Sumeria hace ahora 4,000 años. Actualmente, la salinización conduce a la pérdida de diez millones de hectáreas de regadío cada año, y la falta de agua con un bajo contenido en sales para regar los cultivos va a ser un obstáculo importante de cara a satisfacer la demanda mundial de alimentos en el siglo XXI. Todo esto ocurre porque las plantas cultivadas no crecen en un medio salino: el agua de mar (500 mM NaCl) las mata y una dilución decimal es poco tolerable para muchas de ellas.

La sal, en química y en la ciencia de los suelos, no significa NaCl si no más bien son los compuestos iónicos conformados de cationes y aniones. Los principales constituyentes catiónicos de las sales solubles en los suelos salinos son el sodio, calcio y magnesio, y los aniónicos más significativos son: el sulfato, cloruro y bicarbonato (1).

La salinidad es la consecuencia de la presencia en el suelo de sales más solubles que el yeso. Por sus propias características se encuentran tanto en la fase sólida como en la fase líquida, por lo que tienen una extraordinaria movilidad (1).

La salinidad de los suelos, en algunas de sus manifestaciones, ha sido la causante de la reducción en la capacidad productiva de los suelos de muchas regiones en el mundo.

Estudios de las Naciones Unidas indican que debido a la salinización (proceso de acumulación de sales en suelos con predominio del Ca y Mg) existe hoy 1.5 veces más tierras improductivas ya que la forma de riego no es la correcta. La salinidad es un fenómeno asociado a condiciones climáticas de aridez y semiáridéz en donde la evapotranspiración excede a la precipitación y es necesario recurrir a la irrigación para satisfacer las necesidades de agua de los cultivos. También se puede desarrollar en regiones húmedas bajo condiciones de alta demanda evaporativa, nivel freático superficial y actividad humana (13).

3.2 Causas de la salinidad en los suelos.

Las fuentes de sales en los suelos salinos son el agua subterránea, que se enriquece en sales de dos orígenes. Uno de ellos es por medio de la meteorización de rocas y el otro origen es por medio de las acumulaciones de sales depositadas en periodos geológicos previos en los estratos por los que se mueve el agua subterránea (2).

Por otra parte, también se puede adquirir por las sales disueltas en las aguas que descienden de las montañas ya que se acumulan en las depresiones y al evaporarse la solución se forman acumulaciones salinas. Otra forma por la cual los suelos adquieren las sales es a partir de los mantos freáticos ya que estos siempre contienen sales disueltas y en las regiones áridas estas sales ascienden a través del suelo por capilaridad.

Los suelos salinos también se han producido artificialmente por riego defectuoso, pues el riego aporta muy frecuentemente sales al suelo al mismo tiempo que el agua (2).

3.3 Salinidad en regiones áridas y semiáridas.

Las zonas áridas se presentan en todos los continentes del mundo (figura 1), cubren el 33 % de la superficie de la Tierra y representan porcentajes significativos de la superficie de algunos continentes (África – 57 %, Australia - 69 %, Oriente Medio - 84 %). Se caracterizan por una precipitación anual baja de entre 0 y 600 mm, temperaturas generalmente elevadas de hasta 47° C y una elevada evaporación de hasta 4,000 mm al año (14). Estos suelos presentan una concentración elevada en sales ya que el movimiento del agua a través de ellos es mínimo, además de que la evaporación es mayor a la precipitación.

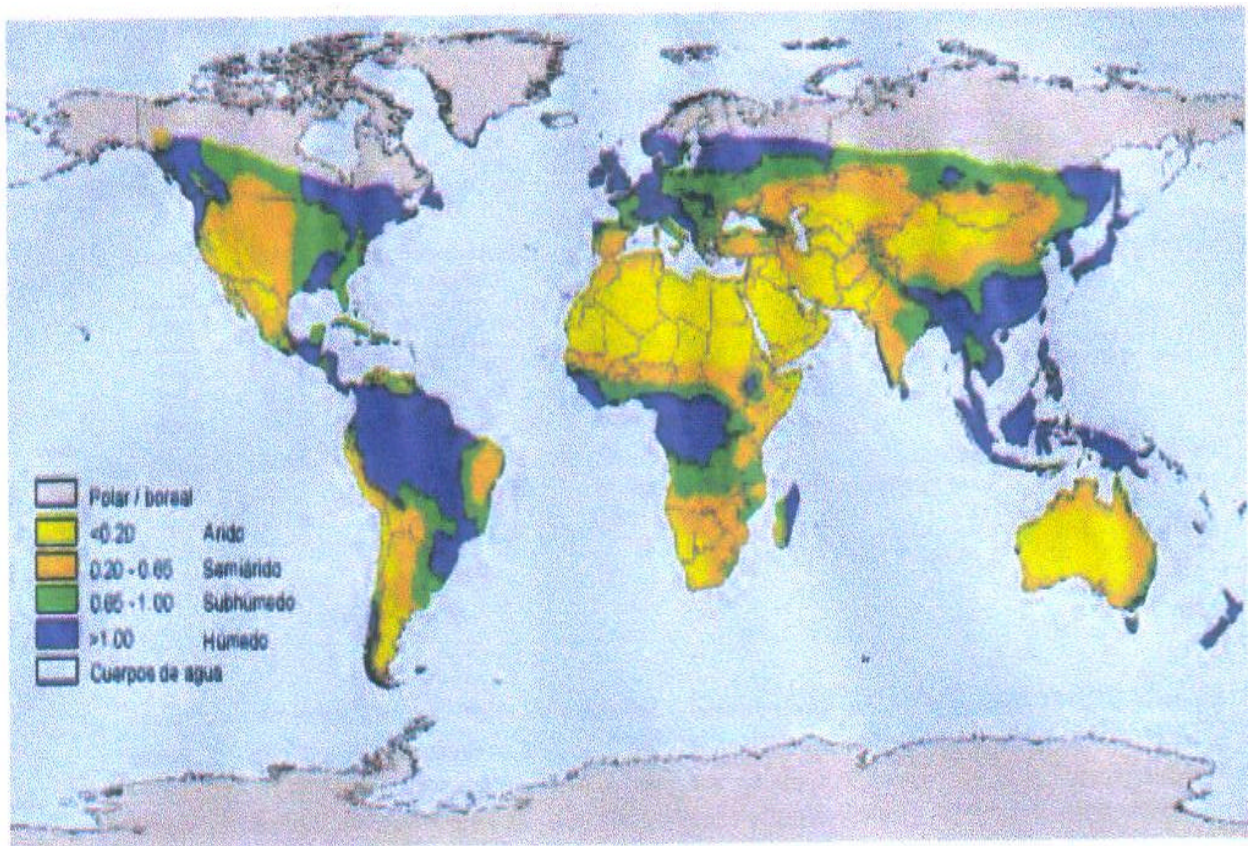


Fig. 1 Mapa de zonas semiáridas y áridas del mundo (15)

3.4 Características de un suelo salino

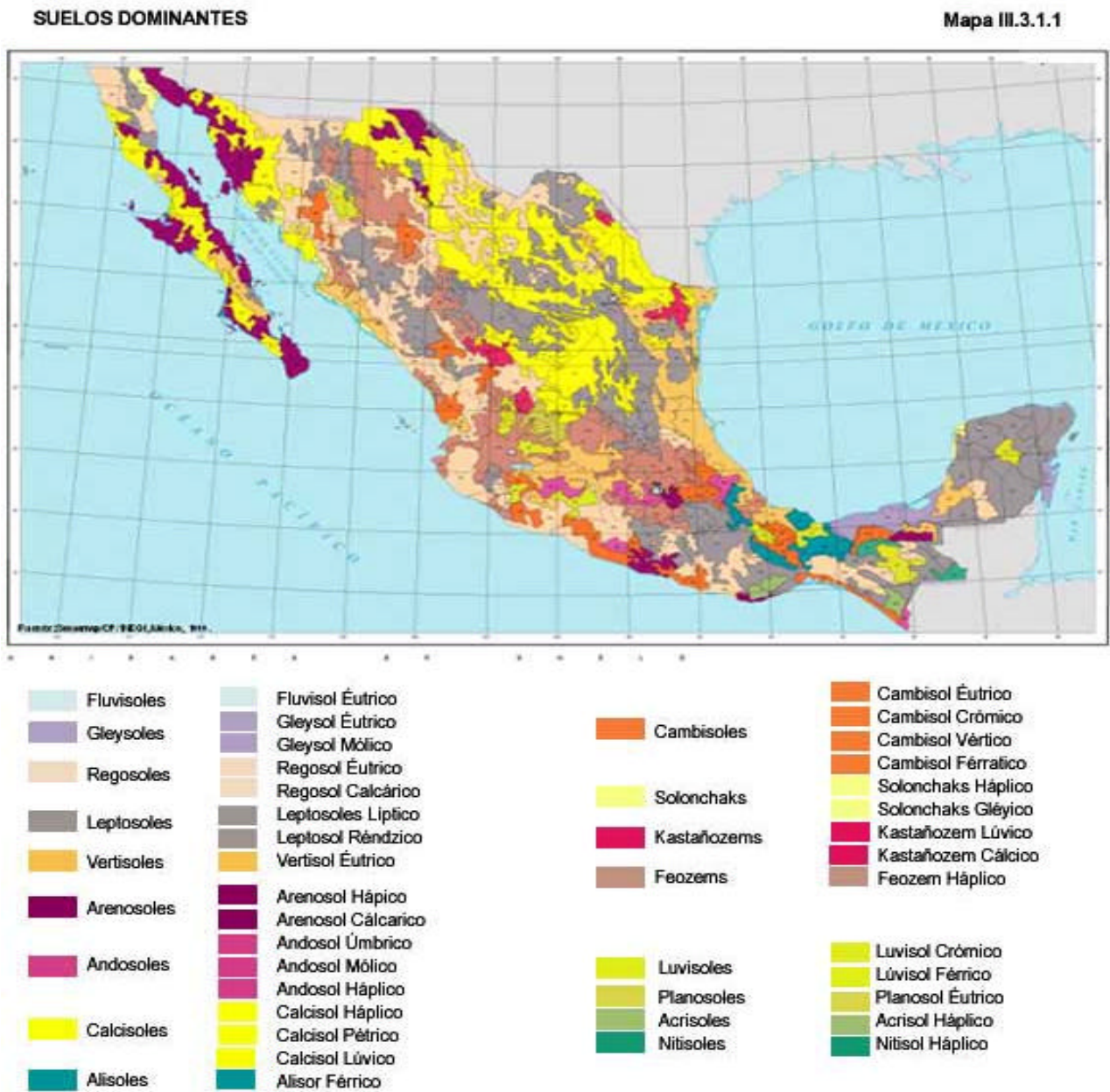
Los suelos salinos, como ya se dijo se dan bajo condiciones de alta temperatura y aridez, este tipo de suelo no muestra cambio de estructura a lo largo del perfil, lo que implica que el suelo es escasamente afectado por los procesos de meteorización. Generalmente presentan bajo contenido en humus. Las sales que se encuentran normalmente en estos suelos son los sulfatos, cloruros de sodio y calcio, en algunas ocasiones también pueden aparecer nitratos y magnesio. Las sales presentes en estos suelos pueden constituir más del 1% en peso del suelo, aunque muchos suelos salinos contienen menor cantidad. El pH que presenta este tipo de suelos es inferior a 8.5 y el color de la superficie es claro (2).

3.5 Salinidad en México y a nivel mundial

La salinización es considerada como una de las causas principales de la degradación de los suelos. Se estima que aproximadamente 40 millones de un total de 200 millones de hectáreas regadas están anegadas, afectadas por la sal, o ambas cosas a la vez. La superficie de las tierras que se abandonan cada año por estas razones es aproximadamente igual a la superficie de la tierra que se les agrega abono y riega. México es uno de los países donde alrededor del 60% de su extensión territorial corresponden a zonas áridas y semiáridas, concentrándose la mayor parte en el norte y noroeste, en las que habita el 30% de la población total (16).

El sistema de clasificación de los suelos, propuesto por la FAO/UNESCO/ISRIC: (1998), denomina a los suelos salinos como SOLONCHAKS que presentan un alto contenido en sales en alguna parte o en todo el perfil y son abundantes en las regiones áridas y semiáridas. En la Figura 2 se muestra los tipos de suelos que se presentan en México y se

puede observar que los estados con suelos salinos son Baja California Norte, Sonora, Baja California Sur, Sinaloa, Chihuahua, Coahuila, Tamaulipas, Nuevo León, San Luis Potosí, Nayarit, Colima, Guerrero, Oaxaca, Campeche, Chiapas, Yucatán, Quintana Roo, Tlaxcala y Puebla.



Fuente: Semamap/CP/INEGI, México, 1999.

Fig. 2 Mapa de suelos de México INEGI

3.6 Medición de la salinidad

La concentración de la sal del suelo es estimada por los métodos basados en la capacidad de la sal en la solución del suelo de conducir la electricidad y es lo que se conoce como Conductividad Eléctrica del extracto de saturación.

Las medidas de la conductividad eléctrica de la solución del suelo, brindan la información de la cantidad de sales que presenta el mismo. A una muestra seca y tamizada de suelo se mezcla con agua desmineralizada, hasta conseguir que se forme una pasta, con suficiente agua para poder considerar que está saturada y sin que aparezcan dos fases por exceso de agua, después se filtra al vacío. La conductividad eléctrica es proporcional a la concentración de sales en la solución y es función de la temperatura (25° C) y estas lecturas se obtienen por medio del conductímetro. Las unidades actuales son el dS/m el cual equivale a mmho/cm (7).

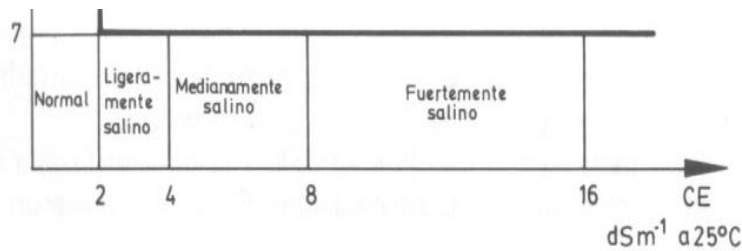


Fig.3 Escala de salinidad de acuerdo a la conductividad eléctrica de pasta saturada a 25° C (7)

Un suelo es considerado salino si la conductividad eléctrica de un extracto de saturación excede a los 4 dS/m a 25° C. (7)

Al tratar de evaluar la relación vegetación suelo, resulta importante tener una medida de las sales solubles presentes. Las sales son necesarias para el crecimiento de las plantas, aunque se traduce en un factor limitante a menos que se trate de vegetación halófila (plantas adaptadas para vivir en medios salinos). Se ha convenido que los suelos respecto de la conductividad del extracto acuoso sean clasificados en cinco clases (17).

- **A** - Suelos no salinos los que tengan menos de 2 mmhos/cm de conductividad y ningún efecto sobre el crecimiento de las plantas. Grado de salinidad bajo.
- **B** - Suelos no salinos que tienen entre 2 y 4 mmhos/cm de conductividad y leve efecto sobre el crecimiento de las plantas. Grado de salinidad leve.
- **C** - Suelos salinos cuando tienen entre 4 y 8 mmhos/cm de conductividad, con disminución en el rendimiento de cultivos. Grado de salinidad alto.
- **D** - Suelos salinos que tienen entre 8 y 16 mmhos/cm de conductividad, en este caso son pocos los cultivos que soportan estas condiciones. Grado de salinidad muy alto.
- **E** - Suelos que tienen más de 16 mmhos/cm de salinidad, las restricciones para cultivos es más grande que para el anterior. Grado de salinidad extremadamente alto.

3.7 Efectos de la salinidad en el suelo y plantas

Los efectos que producen las elevadas concentraciones de sales en el suelo es la degradación del mismo, así como también disminuye la porosidad y la permeabilidad del agua (8).

La salinidad puede tener varios efectos en las plantas, como son los físicos y fisiológicos.

Los efectos físicos son: el retardo o ausencia de la germinación, menor área foliar y talla de la planta (el crecimiento va a ser más lento o no se completa), menor producción de materia seca, necrosis en las hojas, disminución de los rendimientos de los cultivos y la muerte de la planta antes de completar su desarrollo si las condiciones en las que vive son extremas (7). Otro síntoma puede ser la quema de ápices y partes marginales o interiores de las hojas y clorosis incipiente (6).

Entre los efectos fisiológicos se encuentran los desórdenes en la nutrición mineral, debido a una alteración en la absorción de potasio, calcio y fósforo (3,7), se puede presentar plasmólisis que es cuando el agua de la planta pasa al suelo.

3.8 Estrés de salinidad por efectos osmóticos y efectos de ión específico en la planta

El efecto osmótico se refiere cuando las sales hacen disminuir el potencial osmótico del agua del suelo (7). En la mayoría de los suelos, el potencial osmótico no es lo suficientemente bajo como para inhibir la absorción de agua por las raíces, desencadenando un déficit hídrico en la planta. En algunos casos la concentración de sales en el suelo llega a ser tan elevado que impide o disminuye la absorción del agua en la planta provocando una sequía osmótica (3). La mayoría de las plantas pueden ajustar su potencial osmótico al crecer en suelos salinos y de esta manera prevenir la pérdida de turgencia. (8)

El efecto de ión específico provoca aumento de la concentración de algunos iones que afectan a la fisiología de la planta, por resultar tóxicos o provocar desequilibrios en el metabolismo de los nutrientes. El efecto tóxico de determinados iones puede condicionar la germinación. Se ha visto que los cloruros son más tóxicos para la germinación que los sulfatos (7).

3.9 Importancia del agua en la planta

El agua juega un papel importante en la vida de la planta ya que por cada gramo de materia orgánica producida por la misma, se absorben 500 g de agua de la raíz (8). El agua es el componente mayoritario de la planta ya que constituye del 80 al 95% de tejido vegetal y las semillas llegan a contener de 5 - 15% ya que se consideran tejidos secos, sin embargo requieren una cantidad de agua suficiente para poder germinar.

El agua es una molécula polar que forma puentes de hidrógeno entre si y esto ocasiona un aumento en la temperatura de fusión y de ebullición. También es un disolvente para muchas sustancias tales como las sales inorgánicas, azúcares y aniones orgánicos y constituye un medio en el cual tiene lugar todas las reacciones bioquímicas.

El agua en su forma líquida permite la difusión y el flujo masivo de solutos y por esta razón, es esencial para el transporte y distribución de nutrientes y metabolitos en toda la planta; también es importante el agua en las vacuolas de las células vegetales ya que ejercen presión sobre el protoplasma y la pared celular, manteniendo así la turgencia en hojas, raíces y otros órganos.

3.10 Transporte de agua en la planta

El transporte del agua a través de la planta se puede dar de diferentes formas. El agua entra con mayor rapidez por la región de la raíz por la menor resistencia. La máxima absorción se presenta en la zona radical próxima a la región meristemática (3). La raíz presenta pelos radicales, que son extensiones microscópicas de células de la epidermis que incrementan la superficie de absorción de la raíz, los cuales hacen contacto del suelo, agua, solutos

disueltos u espacios de aire. Una vez que el agua ha penetrado a la raíz por la epidermis, hay tres vías por las cuales el agua puede moverse: vía del apoplasto, camino transmembranal, y la vía del simplasto. En la vía del apoplasto el movimiento del agua es exclusivamente a través de la pared celular sin cruzar ninguna membrana. Sin embargo es importante mencionar que el movimiento por esta vía puede ser obstruido por la banda de Caspari, ya que esta impregnada de lignina y suberina (3). El agua en la ruta transmembranal atraviesa las membranas plasmáticas y las paredes celulares. La vía del simplasto, el agua atraviesa la pared celular y el plasmalema, para que entre al citoplasma y posteriormente se mueva a lo largo del continuo citoplasmático a través de los plasmodesmos. Actualmente se han descubierto los canales para el agua denominados acuaporinas, son proteínas integrales que facilitan el movimiento del agua a través de la membrana. (8)

3.11 Nutrición mineral de la planta

La mayoría de las plantas requieren un número determinado de elementos minerales para completar satisfactoriamente su ciclo de vida. Los elementos que son requeridos para el crecimiento y desarrollo de las plantas son denominados esenciales. Un elemento esencial aquel que tiene un papel fisiológico claro y que su ausencia evite que una planta termine su ciclo vital (8).

Los elementos esenciales minerales se clasifican generalmente como macronutrientes o micronutrientes, según su concentración relativa en tejido fino de planta. Los macronutrientes son elementos constituyentes de biomoléculas estructurales, tales como proteínas, lípidos o carbohidratos. Los micronutrientes corresponden a constituyentes enzimáticos por lo tanto sólo son necesarios en cantidades pequeñas. Ambos grupos de

nutrientes son incorporados desde la solución salina del suelo hasta el interior de las células, donde son almacenados, metabolizados o transportados a otras células, tejidos y órganos (3).

3.12 Tolerancia a la salinidad de las plantas

El término tolerancia se aplica para describir la adaptación de una especie frente a la salinidad. En términos de agricultura se entiende por tolerancia a la capacidad de las plantas para resistir los efectos adversos no específicos de un exceso de sales solubles en la zona radicular (7). La tolerancia a la salinidad varía a lo largo de las distintas fases de desarrollo de la planta.

La respuesta de los cultivos a la salinidad está condicionada por diferentes mecanismos como son:

- La exclusión de sales
- La excreción de sales
- Suculencia
- Ajuste osmótico

En el primer mecanismo, las sales son excluidas de la planta a través de su sistema radical. Si las sales ya están dentro de la planta, hay mecanismos que impiden que alcancen órganos sensibles a ellas. Los mecanismos de exclusión pueden involucrar procesos como el

secuestro de sales en tejidos especializados para que éstas no puedan transportarse a toda la planta. Este es un tipo de tolerancia natural y genética (6).

Hay plantas que tienen mecanismos para excretar las sales de nuevo al ambiente a través de sus raíces, hojas y brotes. La planta absorbe la sal, pero la reexporta a las raíces por el flujo de savia descendente, de forma que se excrete de nuevo al suelo, este tipo de mecanismo se estudio en ***Arabidopsis thaliana*** que se muestra en la figura 4 (11).

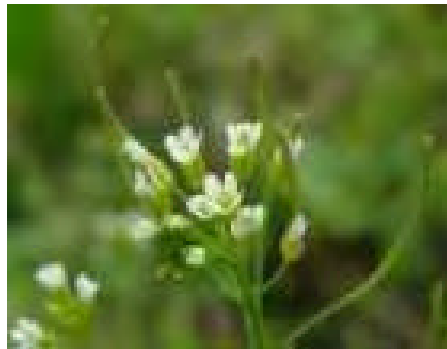


Fig. 4 Arabidopsis thaliana

Otras plantas, poseen estructuras especializadas para la excreción con células que acumulan las sales en sus vacuolas y eventualmente mueren y caen de la planta.

Otra forma de defensa que tienen las plantas contra la salinidad es simplemente diluir los iones. Esto sucede en plantas que incrementan su volumen de almacenamiento al desarrollar estructuras suculentas que presentan vacuolas grandes llenas de agua.

Se ha observado que existen otras maneras que las plantas reaccionen ante al estrés salino incrementando la producción intracelular de sustancias solubles como betaína, prolina, sacarosa, sorbitol, etc. que disminuyen el potencial hídrico intracelular y facilitan la

entrada de agua, de lo contrario no sólo no entraría agua del exterior, sino que ésta tendría que salir de las células radiculares secándose la planta (3).

La tolerancia indirecta es la que se puede inducir los agricultores a través de fertilizantes, ya que en cuanto más nitrógeno sea aplicado, mayor va a ser el crecimiento vegetativo y esto es lo que permite que las sales se acumulen en estos tejidos y de esta manera toleran más las elevadas concentraciones de sales.

Las plantas, dependiendo de su adaptación a los medios salinos se agrupan de la siguiente manera (7):

- No halófilas: son aquellas que no han desarrollado mecanismos de adaptación.
- Halófilas: están adaptadas para vivir en medios salinos. Estas a su vez se clasifican en:
 - Euhalófilas; son las más tolerantes a las sales y acumulan las sales en sus tejidos.
 - Crinohalófilas; estas presentan glándulas excretoras que les permiten eliminar las soluciones altamente salinas, por lo general en el envés de las hojas.
 - Glicohalófilas; realizan una absorción selectiva frente a las sales.
 - Localhalófilas; localizan las sales en estructuras especiales, con lo que controlan su distribución en los tejidos.

