

Relaciones suelo-planta en hábitats salino-costeros de la isla de Lanzarote

Soil-plant relationships in saline coastal habitats of Lanzarote island



KEVIN MESA VARGAS

Tutores: MARÍA LUISA TEJEDOR SALGUERO (Dpt. Edafología y Química Agrícola) y
FRANCISCO JAVIER DÍAZ PEÑA (Dpt. Edafología y Química Agrícola).

Índice

1. Resumen.....	1
2. Introducción.....	2
3. Objetivos.....	6
3.1 Objetivo general.....	6
3.2 Objetivos específicos.....	6
4. Material y métodos.....	6
4.1. Sitio de estudio.....	6
4.2. Muestreo de suelos.....	7
4.2.1. Breve descripción de las zonas de muestreo.....	7
4.2.2. Breve descripción de las especies halófitas identificadas.....	12
4.3. Análisis de suelos.....	12
4.4. Análisis estadísticos.....	15
5. Resultados.....	16
5.1. Propiedades físicas.....	16
5.2. Propiedades químicas.....	19
5.2.1. Solución del suelo.....	19
5.2.2. Materia orgánica, cationes cambiabes y nutrientes.....	21
6. Discusión.....	24
7. Conclusión.....	27
8. Referencias bibliográficas.....	28

ANEXO

Índice de tablas

Tabla 1. Características generales de las especies de halófitas estudiadas.

Tabla 2. Propiedades químicas del suelo.

Tabla 3. Composición de la solución del suelo.

Tabla 4. Contenidos de materia orgánica, cationes cambiabes y nutrientes de los suelos.

Índice de figuras

Figura 1. Mapa mundial de suelos afectados por salinidad-sodicidad (Zheng, 2014).

Figura 2. Saladar de La Santa, Lanzarote.

Figura 3. Zonas de muestreo (en rojo) en la isla de Lanzarote.

Figura 4. Aspecto general de las zonas de muestreo.

Figura 5. Aspecto general de las especies halófitas estudiadas.

Figura 6. Triángulos texturales para cada especie de halófitas

Figura 7. Ordenación de las especies de halófitas atendiendo a las características físicas de los suelos.

Figura 8. Dendrograma de clasificación de las especies atendiendo a los parámetros físicos del suelo. El corte se realizó a una distancia posterior a 10, obteniéndose 3 clusters. Método de enlace entre grupos y distancia euclídea.

Figura 9. Valores de CEe en los suelos asociados a las diferentes especies de halófitas estudiadas.

Figura 10. Ordenación de las especies de halófitas atendiendo a las características químicas de los suelos.

Figura 11. Dendrograma de clasificación de las especies atendiendo a los parámetros químicos del suelo. El corte se realizó a una distancia posterior a 15, obteniéndose 3 clusters. Método del enlace entre grupos y distancia euclídea.

1. Resumen

Las especies de plantas que crecen en hábitats salinos constituyen un importante banco genético para desarrollar cultivos viables desde un punto de vista económico y medioambiental. La selección de las especies halófitas más idóneas para producción agrícola requiere en primer lugar del estudio exhaustivo de la ecología de estas plantas en su medio natural. En este trabajo se ha realizado la caracterización físico-química de los suelos asociados a las 15 especies halófitas más representativas de los ambientes salino costeros de la isla de Lanzarote (Islas Canarias). Los resultados muestran que algunas de las especies estudiadas se desarrollan en suelos con características más o menos homogéneas, mientras otras presentan una mayor variabilidad edáfica. Así por ejemplo, a nivel de salinidad del suelo, especies como *Suaeda marítima* crecen en suelos con valores de conductividad eléctrica (CEe) muy poco variables (59,4-75,9 dS m⁻¹), mientras que especies como *Arthrocnemum macrostachyum* se desarrollan en suelos con un amplio rango de salinidades (14,4-145,10 dS m⁻¹). El análisis de los resultados ha permitido la clasificación de las especies estudiadas en diferentes grupos atendiendo a los parámetros edáficos analizados, así como la elaboración de un ranking de tolerancia a la salinidad que puede ser útil para la puesta en producción de estas especies.

Keywords: halófitas; relaciones suelo-planta; tolerancia a la salinidad; agricultura biosalina.

Plant species that grow in saline habits constitute an important genetic bank to develop viable crops in a sustainable economical and environmental way. The selection of the halophyte species for agricultural production requires primary an exhaustive study of the ecology of these plants in their natural environment. In this work it has been done a characterization of soils allied to the 15 halofites species more representative of saline coastal habitats on Lanzarote island (Canary Islands). Results show that some species grow in soils with similar characteristic, while others present higher edaphic variability. For example, at soil salinity level, species as *Suaeda marítima* grow in soils with low variability electric conductivity (ECe) values (59,4-75,9 dS m⁻¹), while species as *Arthrocnemum macrostachyum* grow on a wide range of salinity soils (14,4-145,10 dS m⁻¹). Analysis of the results has allowed the classification of species in different groups attend to edaphic parameters analysed, as well as the elaboration of salinity tolerance ranking that can be useful to the potential agricultural production of these plant.

2. Introducción

El continuo incremento de la población mundial hace que los requerimientos de alimentos, agua de calidad y energía sean mayores cada día (Laderiro, 2012). Se estima que la población mundial alcanzará en 2050 los 9.100 millones de habitantes, y la producción global de alimentos deberá incrementarse hasta en un 70%, lo que implica encontrar suficientes recursos de agua y suelo para sustentar este crecimiento (Khan and Duke, 2001). La disminución de tierras arables, como resultado de la urbanización y de la degradación del suelo, así como el impacto negativo del cambio climático en las reservas y calidad del agua dulce dificulta enormemente la consecución de esos objetivos (Panta et al., 2014). En este escenario se hace necesario desarrollar un nuevo tipo de agricultura, basado en tecnologías agrícolas no convencionales que puedan utilizar de forma efectiva y sostenible recursos marginales de suelos y aguas (Khan and Duke, 2001).

La salinización, proceso de incremento de la concentración de sales totales disueltas en suelos y aguas debido tanto a procesos naturales (salinización primaria) como a actividades antrópicas (salinización secundaria) (Ghassemi et al., 1995), constituye uno de los principales problemas para la producción agrícola a nivel global, particularmente en regiones áridas y semiáridas (Barrett-Lennard, 2002). Así, aproximadamente un 7% de la superficie del planeta presenta suelos afectados por sales (Flowers et al., 1986), y un 11% de la superficie agrícola de regadío está afectada por diferentes grados de salinización (FAO, 2012). La Figura 1 muestra la distribución de los suelos afectados por salinidad-sodicidad en el mundo. Se estima que anualmente entre 10 y 20 Mha de tierras de regadío se vuelven improductivas debido a procesos de salinización (Zhu et al., 2005). La salinización del suelo en regiones áridas es prácticamente irreversible debido a la baja o nula disponibilidad de agua de calidad que permita lavar las sales fuera de la zona radicular (Rozema and Flowers, 2008).

La mayoría de los cultivos utilizados en la agricultura moderna son sensibles a la salinidad (glicófitas) de manera que, una vez se superan ciertos niveles de sales en la solución del suelo, la productividad se ve reducida significativamente. Para la mayoría de las especies se observa una disminución del 10% de su productividad cuando la salinidad, medida como conductividad eléctrica de la solución del suelo (CEe), se incrementa por encima de los 4-8 dS m⁻¹ (Panta et al., 2014). La agrobiotecnología se ha propuesto como una solución viable a los problemas de salinización a través de la obtención de cultivos convencionales genéticamente modificados resistentes a altas concentraciones salinas

(Rozema and Flowers, 2008). Sin embargo, aunque se han logrado algunas mejoras de rendimiento en suelos salinos mediante la transferencia de un solo gen (Flowers and Yeo, 1995), debido a que probablemente la tolerancia a la salinidad es un rasgo muy complejo determinado por diferentes genes, la bioingeniería no ha sido capaz de obtener en los últimos 20 años cultivos resistentes a la salinidad que se hayan comercializado (Rozema and Flowers, 2008). Otra alternativa sería obtener nuevos cultivos resistentes a la salinidad entre las especies halófitas que pueden crecer y reproducirse de forma natural en condiciones salinas y que representan sólo el 1% de las especies de plantas terrestres (Rozema and Schats, 2013).

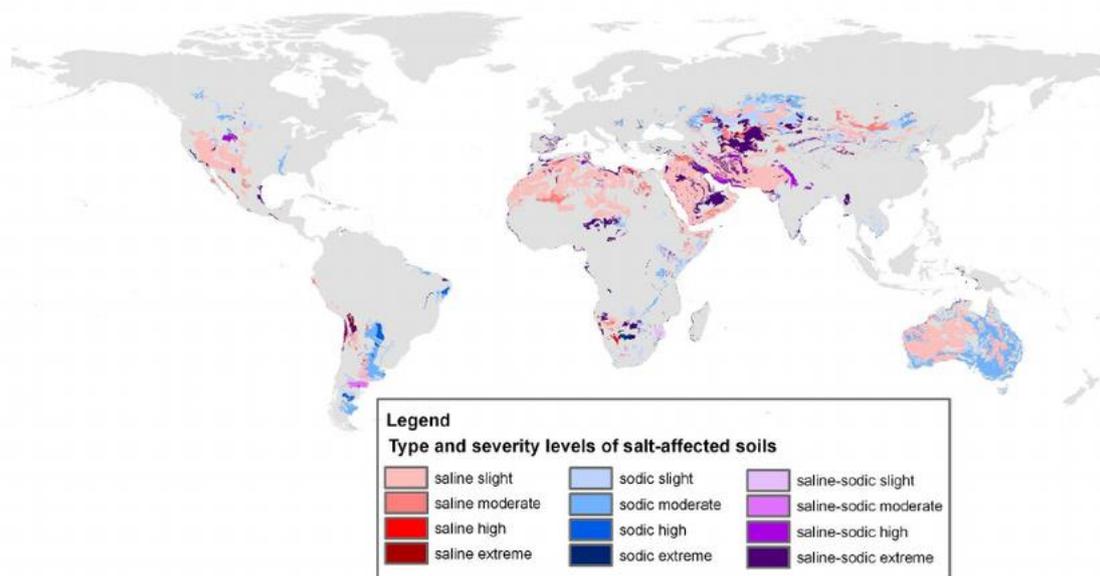


Figura 1. Mapa mundial de suelos afectados por salinidad-sodicidad (Zheng, 2014).

Las halófitas pueden definirse como “plantas que completan su ciclo de vida en una concentración salina de al menos 200 mM NaCl bajo condiciones similares a las que podrían encontrarse en el medio natural” (Flowers et al., 1986). Así, estas plantas pueden tolerar niveles de sales que serían letales para la mayoría de las especies no-halófitas (Flowers and Colmer, 2008). Mientras la mayoría de los cultivos carecen de mecanismos genéticos para la tolerancia a la salinidad, las halófitas prosperan en suelos salinos porque han desarrollado mecanismos biológicos especiales que minimizan la entrada de sal en los tejidos vegetales o minimizan la concentración de sal en el citoplasma (p.ej. excretando el exceso de sales a través de glándulas, acumulando iones tóxicos en vacuolas, excluyendo iones tóxicos en las raíces) (Munns, 2005; Song et al., 2009).

Las halófitas han sido reconocidas como potenciales cultivos para áreas salinas, presentando un amplio rango de productos que podrían ser obtenidos de las mismas, incluyendo alimento para el ganado (Masters et al., 2007; El Shaer, 2010), productos para alimentación humana (Weber et al., 2007; Ksouri et al., 2009; Agarie et al., 2009; Ventura et al., 2012), materiales industriales (Reddy and Delaune, 2008), energías renovables (Abideen et al., 2011), así como aplicaciones para la reutilización y reciclaje de aguas residuales, revegetación de tierras salinas y fitorremediación (Jordan et al., 2007; Rabhi et al., 2010; Manousaki and Kalogerakis, 2011). Sin embargo, la producción de este tipo de plantas usando suelos y aguas altamente contaminados por sales está todavía en un estado exploratorio (Rozema and Flowers, 2008). Mientras algunos autores concluyen que las halófitas tienen de forma inherente tasas moderadas de crecimiento y consumo de agua, y/o bajo valor nutritivo, lo cual limita su potencial como cultivo (Warren and Casson, 1994; Niu et al., 1995; Bathgate and O'Connell, 2001); otros sugieren que la domesticación de estas especies es un enfoque que debería abordarse a pesar de la limitada información que existe sobre su productividad a medio y largo plazo (Rozema and Flowers, 2008).

Se estima que unas 2500-3000 especies de plantas pueden desarrollarse en hábitats salinos, lo que representa un enorme potencial como recurso en sí mismo, pero también puede servir como un banco genético para desarrollar cultivos económicamente viables (Rozema and Schats, 2013). La obtención de nuevos cultivos pasa en primer lugar por el estudio exhaustivo de la ecología (particularmente los suelos) y fisiología de estas plantas en su medio natural lo que puede aportar información sobre los candidatos más idóneos para su domesticación (Khan and Duke, 2001; Zhao et al., 2011).

Las zonas costeras del archipiélago canario, particularmente las islas de Lanzarote y Fuerteventura, presentan una gran variedad de hábitat salinos en las que se desarrollan numerosas especies halófitas, algunas endémicas (Reyes et al., 2001; Del Arco et al., 2006; Arechavaleta et al., 2010), a las que tradicionalmente se les ha prestado muy poco interés en la literatura científica (Reyes, 2013). Incluidos en estos hábitats salinos se encuentran los saladares, ambientes psamófilos, y otros ambientes salinos generalmente con suelos rocosos poco desarrollados influenciados por el spray marino. La Figura 2 muestra un ejemplo de hábitat salino-costero en la isla de Lanzarote. Hasta el momento no hemos encontrado ningún trabajo que relacione la distribución de estas plantas con las características de los suelos de las zonas costeras de Lanzarote. Se trata pues de un recurso

importante en el que se debe profundizar como potencial herramienta para afrontar futuros cambios en la producción agrícola.



Figura 2. Saladar de La Santa, Lanzarote.

En este trabajo, se relacionan las características del suelo asociadas a las especies de halófitas más representativas de las comunidades vegetales costeras de la isla de Lanzarote. Los resultados pueden incrementar el conocimiento sobre las relaciones suelo-planta en estos ambientes, muy importantes para la conservación de la biodiversidad, y que se encuentran seriamente amenazados por las actividades humanas, particularmente el desarrollo urbanístico y el pastoreo. La obtención de datos cuantitativos sobre las relaciones “condiciones del suelo-comunidades vegetales” pueden servir también como bioindicadores de cambios medioambientales que permitan detectar potenciales impactos y contribuyan a mejorar las prácticas de manejo para la restauración y/o preservación de estos ecosistemas (González-Alcaraz et al., 2013).

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

- Profundizar en el conocimiento de las relaciones suelo-planta en ambientes salino-costeros de la isla de Lanzarote.

3.2 Objetivos específicos

- Establecer un ranking de las especies halófitas estudiadas atendiendo a su tolerancia a la salinidad del suelo.
- Clasificar las especies halófitas estudiadas en base a las condiciones físicas y nutricionales de los suelos.

4. Material y métodos

4.1. Sitio de estudio

Este estudio fue llevado a cabo en la isla de Lanzarote, la más oriental del Archipiélago Canario, España. Situada en el océano Atlántico, a unos 115 km de la costa oeste africana, entre los paralelos 29°17' y 28°02' de latitud norte y entre los meridianos 13°25' y 14°30' de longitud oeste. Presenta una superficie de 862 km², es de origen volcánico y naturaleza basáltica, y tiene un clima árido/semiárido. La mayor parte de la isla recibe una precipitación anual menor de 150 mm y ninguna zona recibe más de 300 mm año⁻¹. Las lluvias son estacionales, de octubre a marzo, y con una alta variabilidad interanual. Una elevada radiación solar (7.8 horas de sol por día), altas temperaturas (temperatura media anual de 18°C), y vientos moderados y fuertes, resultan en tasas de evaporación extremadamente elevadas (\approx 1800 mm año en tanque evaporimétrico) (Tejedor et al., 2003).

La mayor parte de la franja costera de Lanzarote (< 100 m s.n.m.), presenta suelos con problemas asociados a la acumulación de sales que los ha convertido en marginales para la producción agrícola, y que se han dedicado tradicionalmente al pastoreo extensivo. Se trata en general de suelos de textura franco-arcillosa o limosa, con concentraciones elevadas de sales en la solución del suelo, exceso de sodio en el complejo de cambio, alto grado de carbonatación, acumulación de carbonatos y yeso, estructura dispersa, baja capacidad de infiltración, muy bajo contenido de materia orgánica y/o elevada alcalinidad. La mayoría de estos suelos pertenecen a los órdenes de suelos Aridisol (Argids, Cambids, Calcids, Salids y Gypsid) y Vertisol (Torrerts) recogidos en la Soil Taxonomy (Tejedor et al., 2007). Las condiciones de aridez y el impacto de las

actividades humanas en el pasado reciente, principalmente pastoreo y actividad urbanística, hacen que estos suelos sean en la actualidad una de las zonas de nuestro Archipiélago donde los procesos de degradación y desertificación se manifiesten de manera más intensa.

4.2. Muestreo de suelos

Atendiendo a los estudios disponibles en la literatura sobre distribución de la vegetación en la Isla de Lanzarote hemos seleccionado 13 zonas de muestreo que pueden ser consideradas como hábitat salino-costeros y que presentan comunidades vegetales adaptadas a estas condiciones (Reyes et al., 2001; Del Arco et al., 2006). La Figura 3 muestra la distribución de las áreas seleccionadas. Dentro de las comunidades vegetales se han identificado las especies halófitas más representativas y se han tomado muestras de suelo de la zona radicular (0-30 cm de profundidad) asociada a estas especies. Las muestras de suelos se tomaron, mediante sonda manual marca Eijkelkamp, lo más cercano posible al tallo principal de las plantas, tratándose en general de zonas cubiertas por la parte aérea de las mismas. La toma de muestras se realizó en abril de 2016, que puede ser considerado como el comienzo del periodo seco. En cada una de las áreas de muestreo se tomó, en el caso de comunidades vegetales continuas, una sola muestra de suelo para cada una de las especies representativas, y varias muestras en el caso de comunidades fragmentadas en varios núcleos (una muestra por núcleo y por especie). En total se tomaron 100 muestras de suelos asociadas a 15 especies diferentes de halófitas (4 muestras asociadas a la especie *Arthrocnemum macrostachyum*; 5 muestras asociadas a *Atriplex portulacoides*; 4 muestras asociadas a *Atriplex portulacoides*; 9 muestras asociadas a *Bassia tomentosa*; 5 muestras asociadas a *Frankenia capitata*; 6 muestras asociadas a *Frankenia ericifolia*; 4 muestras asociadas a *Salsola divaricata*; 4 muestras asociadas a *Salsola tetrandra*; 11 muestras asociadas a *Salsola vermiculata*; 5 muestras asociadas a *Sarcocornia perennis*; 9 muestras asociadas a *Suaeda ifniensis*; 4 muestras asociadas a *Suaeda maritima*; 9 muestras asociadas a *Suaeda mollis*; 7 muestras asociadas a *Suaeda vera*; 10 muestras asociadas a *Zygophyllum fontanesii*).

4.2.1. Descripción de las zonas de muestreo

La Figura 4 muestra el aspecto general de las diferentes zonas de muestreo numeradas del 1 al 13. A continuación se realiza una breve descripción de las mismas.

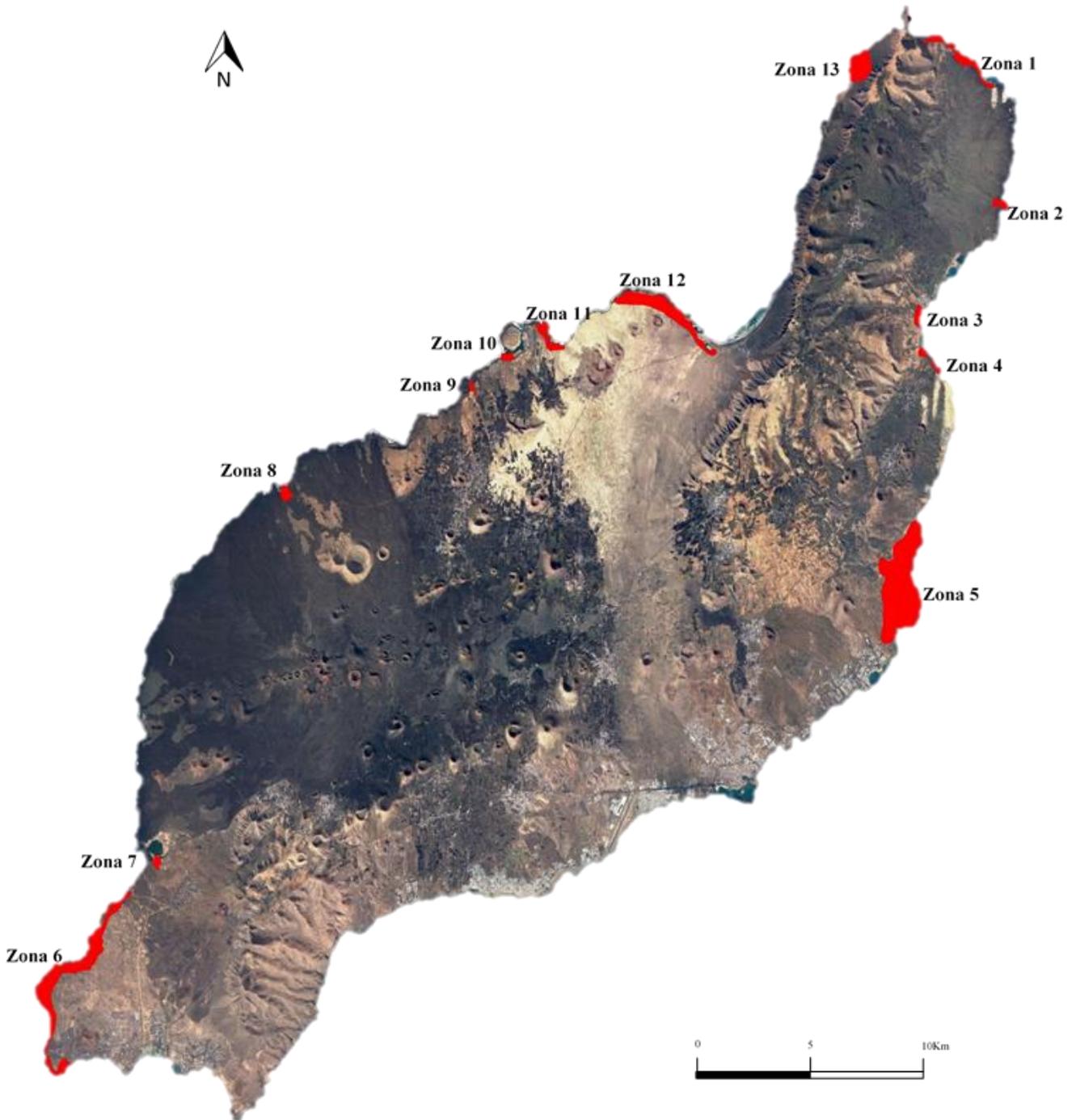


Figura 3. Zonas de muestreo (en rojo) en la isla de Lanzarote.

Zona 1: Situada en el extremo norte de la isla, incluye las áreas conocidas como Playa de la Cantería, Charca de la Novia y Caletón Blanco. Se observan en superficie espesores variables de arenas eólicas que se asientan sobre coladas basálticas provenientes de las erupciones del complejo volcánico Corona-Los Helechos (53-72 mil años) (Troll and Carracedo, 2016). Se citan aquí las comunidades *Frankenio capitatae-Suaedetum verae*,

Frankenio ericifoliae-Zygophylletum fontanesii, *Sarcocornietum perennis* y *Zygophyllo fontanesii-Arthrocnemetum macrostachyi* (Del Arco et al., 2006); Zona 2: Situada en el extremo noreste de Lanzarote, incluye el área denominada Punta de Las Escamas. Presenta suelos pobres de escaso espesor y alta pedregosidad desarrollados también sobre materiales del complejo volcánico Corona-Los Helechos (53-72 mil años) (Troll and Carracedo, 2016). Para esta zona se cita la comunidad vegetal *Frankenio capitatae-Suaedetum verae* (Del Arco et al., 2006); Zona 3: Situada en el noreste de la isla, incluye el área denominada Playa de la Garita. Se trata de un ambiente de depósitos aluviales de barrancos y de fondos de valle (conglomerados, gravas, arenas y arcillas) (Barrera and García, 2011), sobre materiales provenientes de emisiones del complejo central de la isla (< 1 m.a.) (Troll and Carracedo, 2016). En esta zona se citan las comunidades *Frankenio ericifoliae-Zygophylletum fontanesii* y *Chenoleoideo tomentosae-Salsoletum vermiculatae* (Del Arco et al., 2006); Zona 4: Incluye las áreas de acantilados situadas al norte de la población de Mala. Se trata de un área de suelos calizos y arcillosos (Barrera and García, 2011), sobre coladas del complejo central de la isla (< 1 m.a.) (Troll and Carracedo, 2016). En esta zona se citan las comunidades: *Chenoleoideo tomentosae-Salsoletum vermiculatae* y *Frankenio ericifoliae-Zygophylletum fontanesii* (Del Arco et al., 2006); Zona 5: Situada en la costa centro-este de la isla, entre las poblaciones de Los Cocoteros y Los Ancones. Presenta suelos arcillo-limosos desarrollados sobre coladas basálticas del complejo central de la isla (<1 m.a.) (Troll and Carracedo, 2016). En esta zona se cita la comunidad *Chenoleoideo tomentosae-Suaedetum mollis* (Del Arco et al., 2006); Zona 6: Extremo sur-occidental de la isla, al oeste de la población de Playa Blanca. Se observan suelos arcillosos de espesor variable asentados sobre coladas basálticas provenientes de volcanes periféricos del complejo volcánico de los Ajaches (0,8-1,8 m.a.) (Troll and Carracedo, 2016). Se cita la comunidad *Chenoleoideo tomentosae-Suaedetum mollis* (Del Arco et al., 2006); Zona 7: Situada en el suroeste de la isla, al sur de las Salinas de Janubio. Zona con arenas eólicas en superficie sobre coladas basálticas provenientes de las primeras etapas de formación de la isla (5,7-10,2 m.a.) (Troll and Carracedo, 2016). En esta zona se cita una comunidad de *Zygophyllum fontanesii* y *Suaeda mollis*; Zona 8: Situada en el noroeste de la isla en el área denominada Playa de las Malvas. Se trata de una zona de coladas basálticas antiguas rodeadas por coladas históricas provenientes de las erupciones de Timanfaya (1730-1736) (Troll and Carracedo, 2016). En esta zona se cita la comunidad *Frankenio ericifoliae-Zygophylletum fontanesii* (Del Arco et al., 2006); Zona 9: Oeste de la población de La Santa. Se observan depósitos aluvio-coluviales

formando suelos areno-arcillosos (Barrera and García, 2011), desarrollados sobre coladas basálticas del complejo central de la isla (<1 m.a.) (Troll and Carracedo, 2016). Se cita para esta zona la comunidad *Chenoleoideo tomentosae-Salsoletum vermiculatae* (Del Arco, 2016); Zona 10: Área situada entre el complejo deportivo de La Santa Sport y la población de La Santa. Saladar con sustrato de arenas eólicas desarrollado sobre coladas basálticas del complejo central (<1 m.a.) (Troll and Carracedo, 2016). En esta zona se citan las comunidades *Frankenio ericifoliae-Zygophylletum fontanesii* y *Zygophyllo fontanesii-Arthrocnemetum macrostachyi* (Del Arco et al., 2006); Zona 11: Situada en el norte de la isla incluye el área denominada Mejias. Suelos coluviales, a veces con presencia de arenas eólicas en superficie, desarrollados sobre coladas basálticas del complejo central (<1 m.a.) (Troll and Carracedo, 2016). En esta zona se citan las comunidades *Chenoleoideo tomentosae-Salsoletum vermiculatae* y *Frankenio ericifoliae-Zygophylletum fontanesii* (Del Arco et al., 2006); Zona 12: Cercanías de la población de Caleta de Famara. Presenta suelos coluviales cubiertos por espesores variables de arenas organógenas de origen eólico (Barrera and García, 2011), que se asientan sobre coladas basálticas del complejo central (<1 m.a.) (Troll and Carracedo, 2016). Se citan las mismas comunidades vegetales que para la Zona 11; Zona 13: Base norte de los acantilados de Famara. Área formada por depósitos de ladera y coluviones (arenas y gravas) (Barrera and García, 2011), sobre coladas antiguas del proceso de formación del macizo de Famara (5,7-10,2 m.a.) (Troll and Carracedo, 2016). En esta zona se citan las comunidades *Zygophyllo fontanesii-Arthrocnemetum macrostachyi* y *Chenoleoideo tomentosae-Salsoletum vermiculatae* (Del Arco et al., 2006).

De las observaciones y datos obtenidos en este trabajo y de los disponibles del Grupo de Investigación Consolidado de Recursos de Suelos y Aguas de la ULL, relativo a medidas de conductividad eléctrica en periodo seco y húmedo en las trece zonas de muestreo se puede concluir lo siguiente. Todos los suelos se incluyen en el orden Aridisol de la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999), los suelos de las zonas 10 y 13 son considerados Aquisalids y los restantes Haplosalids. En la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo son definidos como Solonchaks (IUSS Working Group WRB, 2015). Hay que señalar que algunos de los suelos corresponden a núcleos muy particulares dentro de un contexto más general, por lo que en una cartografía de poco detalle no estarían representados.



Zona 1



Zona 2



Zona 3



Zona 4



Zona 5



Zona 6



Zona 7



Zona 8



Zona 9



Zona 10



Zona 11



Zona 12



Zona 13

Figura 4. Aspecto general de las zonas de muestreo.

4.2.2. Descripción de las especies halófitas identificadas

La Figura 5 y la Tabla 1 muestran el aspecto general e información general, respectivamente, de las especies estudiadas. De las 15 especies identificadas la mayoría son nativas de las Islas Canarias, con la excepción de *Salsola divaricata*, considerada especie endémica, y *Atriplex portulacoides*, considerada especie introducida. En general se trata de especies arbustivas o subarbustivas de tamaño pequeño a medio (con la excepción de *Suaeda maritima*, la cual presenta un porte herbáceo). Las especies que pueden alcanzar un mayor porte son las *Atriplex* y *Arthrocnemum macrostachyum* llegando hasta los 1,5 m de altura y 2,5 m de diámetro, mientras que las más pequeñas son las del género *Frankenia* con tamaños de no más de 15cm de altura y 50 cm de diámetro. La mayoría presentan también cierto grado de succulencia en hojas y tallos, destacando los géneros *Suaeda* y *Zygophyllum*. En la literatura botánica se establece para muchas de ellas algún tipo de uso tradicional (forrajero, comestible, obtención de jabón, etc.).

4.3. Análisis de suelos

Todas las muestras de suelo fueron secadas al aire y tamizadas a 2 mm previamente a su análisis, calculando el contenido de humedad con el fin de expresar los resultados sobre base seca (105°C). Los siguientes parámetros fueron analizados en las muestras de suelos: pH (pHe), conductividad eléctrica (CEe), cationes solubles (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , y K^+), aniones solubles (Cl^- , NO_3^- , NO_2^- , Br^- , F^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , HCO_3^-) y boro (Be) en extracto de pasta saturada. Las medidas de pHe y CEe se realizaron en un pHmetro Crison (pH y ION Meter GLP 22+) y un conductivímetro Radiometer mod. CDM210, respectivamente. Los carbonatos y bicarbonatos se analizaron según el método SM-2320B (APHA-AWWA-WEF, 1992), utilizando un valorador automático marca Mettler, mod. DL25, con electrodo combinado de pH (DM111), con HCl 0.05N. El resto de aniones y cationes solubles se determinaron por cromatografía iónica (Metrohm 883 Basic IC plus). El boro se determinó por colorimetría con azometina-H (Porta, 1986); la relación de sodio absorbido (SAR) fue calculada a partir de los valores de cationes solubles (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+); el porcentaje de sodio cambiante (ESP) fue calculado indirectamente a partir del SAR (U.S.Salinity Laboratory Staff, 1954); los cationes cambiables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , y K^+) fueron extraídos con acetato amónico 1 N a pH=7 (Na^+ y K^+), y con acetato sódico 1 N a pH=8.2 (Ca^{2+} y Mg^{2+}). El Na^+ y K^+ se determinaron por fotometría de llama, y el Ca^{2+} y Mg^{2+} por espectrometría de absorción atómica



Arthrocnemum macrostachyum



Atriplex halimus



Atriplex portulacoides



Bassia tomentosa



Frankenia capitata



Frankenia ericifolia



Salsola divaricata



Salsola tetrandra



Salsola vermiculata



Sarcocornia perennis



Suaeda ifniensis



Suaeda maritima



Suaeda mollis



Suaeda vera



Zygophyllum fontanesii

Figura 5. Aspecto general de las especies halófitas estudiadas.

Especie	Familia	Nombre común	Biotipo	Distribución	Distribución en Canarias ¹	Habitat	Fitosociología ²	Protección	Etnobotánica
<i>Arthrocnemum macrostachyum</i>	Chenopodiaceae	Mato o salado	Caméfito	Mediterránea	Ns: T, C, F y L	Psamófilo-Saladar	Z-A	Sí	Comestible
<i>Atriplex halimus</i>	Chenopodiaceae	Salado o matogota	Nanofanerófito	Mediterránea	Np: T, C, F y L	Psamófilo	C-Sa	No	Forrajera
<i>Atriplex portulacoides</i>	Chenopodiaceae	Salobreña	Nanofanerófito	Atlántica	Is: C y L	Saladar	Z-A	No	Forrajera
<i>Bassia tomentosa</i>	Chenopodiaceae	Algahuera	Caméfito	Macaronésica	Ns: H, P, T, C, F, L	Pedregoso	C-Sa	No	Forrajera
<i>Frankenia capitata</i>	Frankeniaceae	Tomillo de mar	Caméfito	Macaronésica	Ns: Todas	Costero	F-Z, F-S y C-Su	No	Desconocida
<i>Frankenia ericifolia</i>	Frankeniaceae	Tomillo de mar	Caméfito	Macaronésica	Ns: Todas	Costero	F-S	No	Desconocida
<i>Salsola divaricata</i>	Chenopodiaceae	Matabrusca negra	Nanofanerófito	Canarias	E: P, G, T, C, F, L	Psamófilo	C-Sa	No	Barrillera
<i>Salsola tetrandra</i>	Chenopodiaceae	Matabrusca	Nanofanerófito	Norte de África	Ns: F y L	Psamófilo	C-Sa	No	Barrillera
<i>Salsola vermiculata</i>	Chenopodiaceae	Caramilla	Caméfito	Mediterránea	Ns: T, C, F y L	Pedregoso	C-Sa y C-Su	No	Barrillera
<i>Sarcocornia perennis</i>	Chenopodiaceae	Salado de marisma	Caméfito	Mediterránea	Ns: F y L	Saladar	S	Sí	Comestible
<i>Suaeda ifniensis</i>	Chenopodiaceae	Matomoro moruno	Caméfito	Norte de África	Np: T, F y L	Psamófilo	C-Sa y C-Su	No	Barrillera
<i>Suaeda maritima</i>	Chenopodiaceae	Matomoro baboso	Terófito	Atlántico europeo	Ns: T, C, F y L	Saladar	S y Z-A	No	Desconocida
<i>Suaeda mollis</i>	Chenopodiaceae	Matomoro	Caméfito	Macaronésica	Ns; T, C, F y L	Costero	C-Su	No	Barrillera
<i>Suaeda vera</i>	Chenopodiaceae	Matomoro	Caméfito	Mediterránea	Ns: T, C, F y L	Costero	F-S y F-Z	No	Barrillera
<i>Zygophyllum fontanesii</i>	Zygophyllaceae	Uva de mar	Caméfito	Macaronésica	Ns: H, G, T, C, F, L	Costero	F-Z, F-Su y Z-A	No	Comestible

Tabla 1. Características generales de las especies de halófitas estudiadas.

¹ Ns: Nativa segura; Np: Nativa probable; Is: Introducida segura; E: Endémica; H: El Hierro; P: La Palma; G: La Gomera; T: Tenerife; C: Gran Canaria; F: Fuerteventura; L: Lanzarote. ² Z-A: *Zygophyllum fontanesii*-*Arthrocnemum macrostachyi*; C-Sa: *Chenoleoideum tomentosae*-*Salsola vermiculata*; F-Z: *Frankenia ericifolia*-*Zygophyllum fontanesii*; F-S: *Frankenia capitata*-*Suaeda vera*; C-Su: *Chenoleoideum tomentosae*-*Suaeda mollis*; S: *Sarcocornium perennis*.

(Perkin Elmer mod.3100), añadiendo 1000 ppm de lantano para evitar interferencias en las lecturas; el carbonato cálcico equivalente (CaCO_3) se determinó utilizando el calcímetro de Bernard en presencia de HCl 1:1 (Ministerio de Agricultura, 1994); la materia orgánica total (MO) se determinó por oxidación con dicromato potásico (Walkley and Black, 1934), utilizando ferroína como indicador; el carbono orgánico lábil se determinó por oxidación con dicromato potásico diluido (Ray et al., 2003); el fósforo disponible (P-Olsen) se extrajo con NaHCO_3 , 0.5 N a pH 8.5 y se determinó posteriormente por colorimetría (Olsen et al., 1954); el nitrógeno total (NT) se determinó por digestión Kjeldahl en Tecator mod.1026; los micronutrientes (Fe, Mn, Cu y Zn) se extrajeron con EDTA-Na y fueron determinados por espectrofotometría; la granulometría (porcentaje de arena, limo y arcillas), se determinó mediante dispersión con hexametáfosfato sódico, utilizando el método densimétrico de Boyoucos. La fracción arena se calculó por tamizado a 0.2 y 0.05 mm (Gee and Bauder, 1986); la retención de agua a diferentes presiones (33 y 1500 kPa) se calculó utilizando placas porosas mediante el método de Richards (mod. Soil Moisture Equipment Corporation). La humedad de los suelos en condiciones de campo se determinó por triplicado tomando muestras en cilindros metálicos de 96.6 cm³ y llevándolos a pesada constante a 105°C; los elementos gruesos (fracción > 2mm) se obtuvieron por tamizado y pesada en las muestras originales.

4.4. Análisis estadísticos

La ordenación y distribución de las especies de halófitas atendiendo a las propiedades estudiadas de los suelos se llevó a cabo mediante un Análisis de Componentes Principales usando el programa CANOCO, versión 4.5 (ter Braak and Smilauer, 1998). También se realizó un Análisis de Cluster Jerárquico y No Jerárquico con los valores medios de las variables estandarizados. Las diferencias entre especies con respecto a las condiciones edáficas fueron evaluadas usando un análisis de varianza (ANOVA) y un post-hoc test de Tukey cuando los requisitos de normalidad (test de Kolmogorov-Smirnov) y homogeneidad de varianzas (test de Levene) fueron cumplidos, en caso contrario se realizó un test no paramétrico (Kruskal-Wallis) y un post-hoc de múltiple comparación no paramétrico. Los métodos estadísticos fueron implementados usando el programa SPSS (versión 21.0). El nivel de significancia para todos los test fue establecido a $P \leq 0.05$.

5. Resultados

5.1. Propiedades físicas

La Tabla 2 muestra los valores medios, máximos y mínimos de las propiedades físicas de los suelos asociados a las distintas especies identificadas. En general el contenido de agua en el suelo varió ampliamente (entre 2.1 y 153,1 %), con valores medios máximos encontrados en la especie *Suaeda maritima* (~ 95 %) y valores medios mínimos asociados a la especie *Bassia tomentosa* (~ 8 %). La presencia de elementos gruesos en los suelos (fracción > 2 mm) fue también muy variable, encontrándose suelos con porcentajes no superiores al 1% y otros con contenidos cercanos al 60 %. Los valores medios variaron entre 4.0 y 21.2 %, asociados a las especies *Suaeda vera* y *Salsola divaricata*, respectivamente. Los contenidos de arcilla, limo y arena presentaron mínimos y máximos de 1 y 52 %, 0 y 68 % y, 1 y 99 %, respectivamente. La Figura 6 muestra los diagramas texturales con los suelos asociados a cada especie de halófito. Puede observarse que mientras algunas especies, como en el caso de *Arthrocnemum macrostachyum* y *Suaeda ifniensis*, presentan un amplio rango de texturas asociadas, otras como por ejemplo *Zygophyllum fontanesii* se encuentran en suelos fundamentalmente de texturas arenosas (Figura 6). En consonancia con la amplia variedad de texturas presentes en los suelos, los contenidos de humedad a capacidad de campo y en el punto de marchitez permanente fluctuaron ampliamente (entre 7 y 61 % de humedad a capacidad de campo; y entre 2 y 57% de humedad en el punto de marchitamiento). En general los suelos asociados a las especies *Atriplex portulacoides* y *Suaeda maritima* mostraron los valores más altos de contenidos de humedad a las diferentes presiones y también los contenidos de agua útil más elevados.

Parámetro/Descriptivo	Media ± Desviación	Máximo absoluto	Mínimo Absoluto
Humedad (%)	21.7 ± 26.9	153.1	2.1
Elementos gruesos (%)	11.9 ± 13.1	58.6	0.0
Arcilla (%)	21.9 ± 12.0	52.2	1.3
Limo (%)	27.2 ± 16.0	67.6	0.0
Arena (%)	50.9 ± 23.8	98.7	1.4
Humedad CC (%)	21.3 ± 11.0	60.5	7.3
Humedad PM (%)	14.5 ± 8.6	57.4	1.8
Agua útil (%)	6.8 ± 5.4	28.5	0.9

Tabla 2. Propiedades físicas de los suelos.

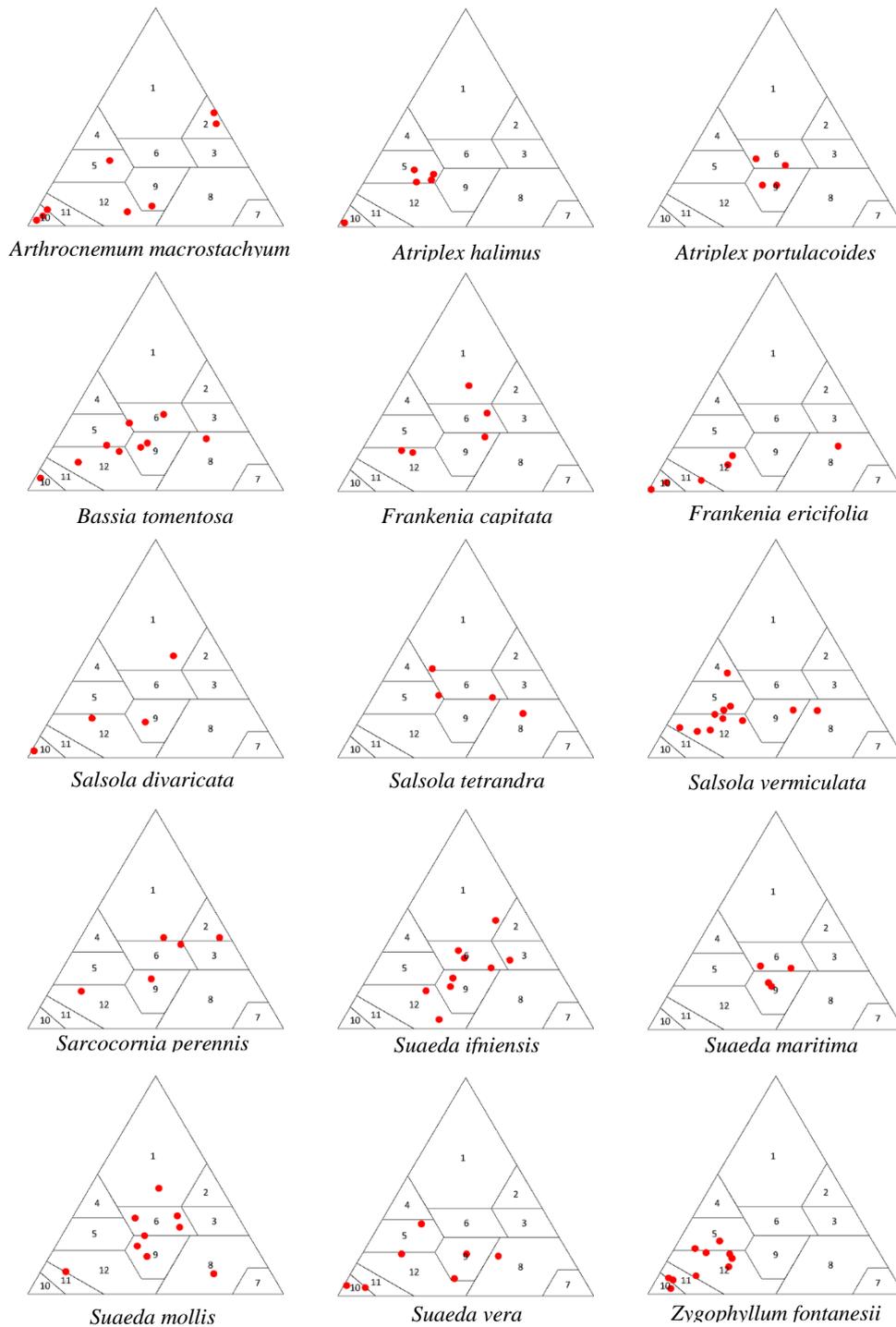


Figura 6. Triángulos texturales para cada especie de halófito.

Texturas. 1, Arcillosa; 2, Arcillo limosa; 3, Franco arcillo limosa; 4, Arcillo arenosa; 5, Franco arcillo arenosa; 6, Franco arcillosa; 7, Limosa; 8, Franco limosa; 9, Franca; 10, Arenosa; 11, Areno franca; 12, Franco arenosa.

La Figura 7 muestra la ordenación y distribución de las especies estudiadas en base a las propiedades físicas de los suelos por medio de un PCA (análisis de componentes principales), mientras que la Figura 8 muestra la agrupación de las especies usando un análisis cluster. En el PCA el porcentaje de varianza explicado con dos componentes (eje

I y II) fue de 85.2 %, valor alto que indica que las conclusiones derivadas de la figura bidimensional son representativas de la ordenación real de las muestras. El parámetro con mayor peso positivo en el componente I fue el contenido de limos (score = 0.7962), mientras que el de mayor peso negativo fue el contenido de arenas (score = -0.8612). Para el componente II el parámetro con mayor peso positivo fue el contenido de agua en el suelo (score = 0.6499), y el de mayor peso negativo el contenido de limos (score = -0.4383).

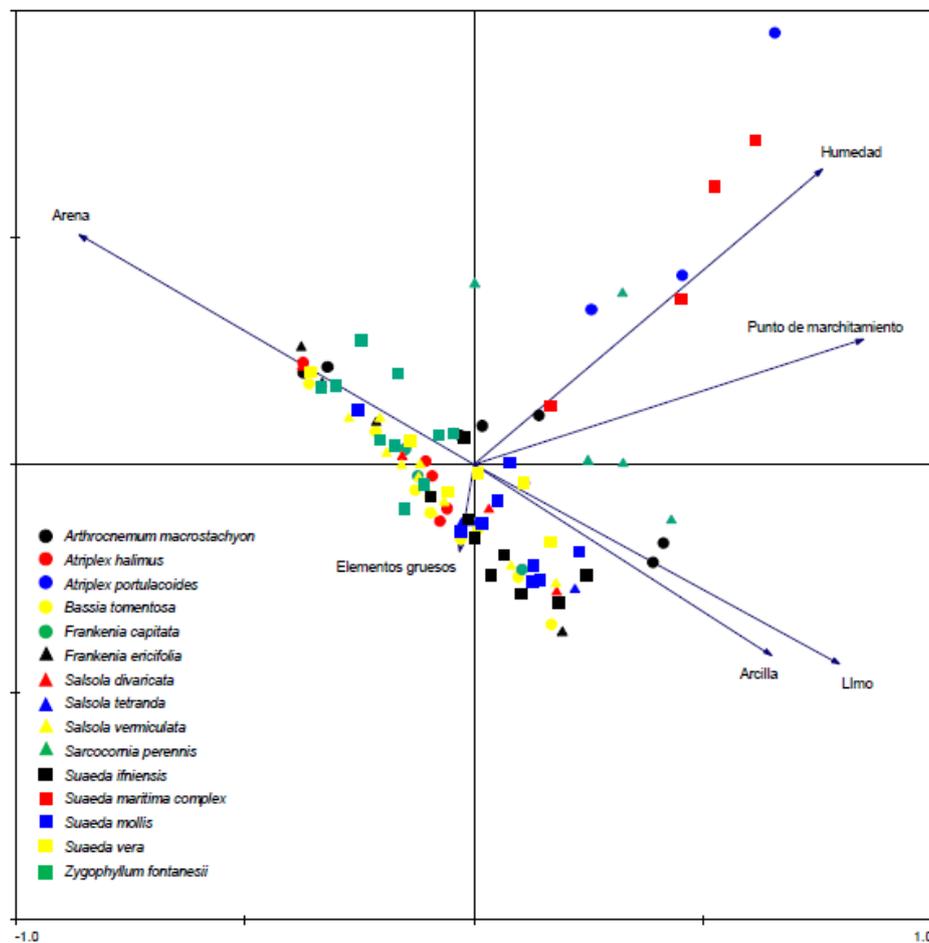


Figura 7. Ordenación de las especies de halófitas atendiendo a las características físicas de los suelos.

El análisis clúster por su parte permite diferenciar 3 grupos de especies atendiendo a las propiedades físicas de los suelos (Figura 8). Realiza una primera diferenciación atendiendo fundamentalmente al contenido de humedad que presentan los suelos, separando a las especies *Atriplex portulacoides* y *Suaeda maritima* que se desarrollan en suelos con un elevado porcentaje de humedad (> 80%). Los otros dos grupos se separan

fundamentalmente por el contenido de arena de los suelos. Así tenemos un grupo formado por las especies *Frankenia ericifolia*, *Zygophyllum fontanesii*, *Atriplex halimus*, *Salsola divaricata*, *Bassia tomentosa*, *Salsola vermiculata*, *Suaeda vera* y *Arthrocnemum macrostachyum*, que se desarrollan en suelos generalmente de textura arenosa (porcentaje de arena > 50%); y un segundo grupo formado por las especies *Frankenia capitata*, *Suaeda mollis*, *Suaeda ifniensis*, *Salsola tetrandra* y *Sarcocornia perennis* presentes generalmente en suelos de texturas más pesadas (porcentaje de arenas < 40%).

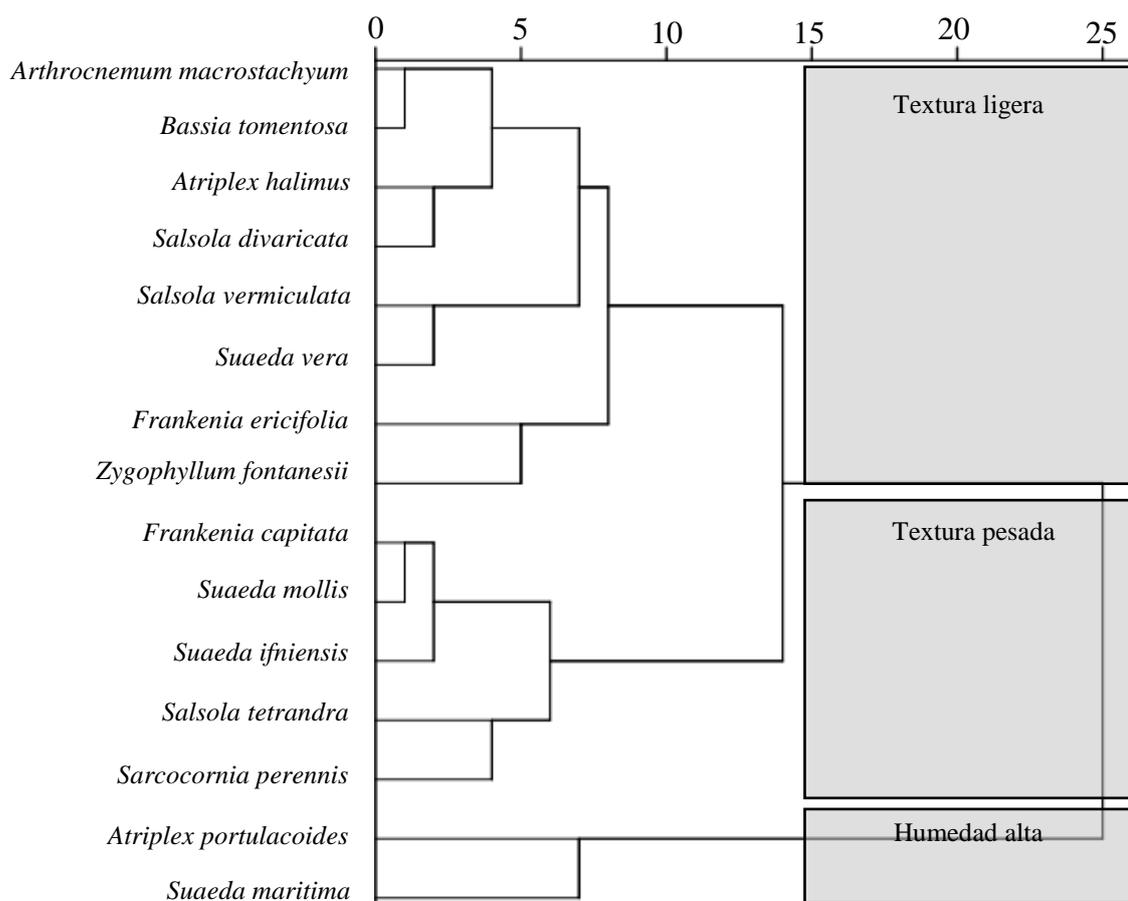


Figura 8. Dendrograma de clasificación de las especies atendiendo a los parámetros físicos del suelo. El corte se realizó a una distancia posterior a 10, obteniéndose 3 clusters. Método de enlace entre grupos y distancia euclídea.

5.2. Propiedades químicas

5.2.1. Solución del suelo

La Tabla 3 muestra los valores medios, máximos y mínimos de los componentes de la solución de los suelos asociados a las distintas especies identificadas. La CEE de los suelos presentó un valor mínimo de 2.2 dS m⁻¹ y un máximo de 145.1 dS m⁻¹. Del total de muestras analizadas solamente un 3 % tuvo CEE inferiores a 10 dS m⁻¹, un 17 % entre

10 y 20 dS m⁻¹, un 32 % entre 20 y 50 dS m⁻¹, y un 38% presentó niveles superiores a 50 dS m⁻¹. La Figura 9 muestra la variabilidad de los valores de CEe.

Parámetro/Descriptivo	Media ± Desviación	Máximo absoluto	Mínimo Absoluto
CE (dS/m)	44.42 ± 24.40	145.10	2.19
Na ⁺ (mmol _e /l)	440.83 ± 278.42	1861.37	17.98
K ⁺ (mmol _e /l)	11.83 ± 7.06	42.53	1.29
Mg ²⁺ (mmol _e /l)	78.13 ± 52.27	328.64	1.46
Ca ²⁺ (mmol _e /l)	36.49 ± 27.03	291.17	2.19
SAR	56.79 ± 25.64	347.31	12.27
Cl ⁻ (mmol _e /l)	518.96 ± 333.72	2188.29	15.33
NO ₃ ⁻ (mmol _e /l)	0.08 ± 0.11	1.09	0.00
SO ₄ ²⁻ (mmol _e /l)	58.26 ± 38.44	218.24	1.77
HCO ₃ ⁻ (mmol _e /l)	8.32 ± 3.71	40.11	2.58
Be (mg/l)	2.80 ± 2.46	15.70	0.08
pH	7.8 ± 0.2	9.1	7.0

Tabla 3. Composición de la solución del suelo.

Las especies *Atriplex portulacoides*, *Suaeda marítima* y *Sarcocornia perennis* son las que presentaron los valores medios de CEe más altos, generalmente superiores a 60 dS m⁻¹, siendo significativamente diferentes ($p < 0.05$) de las especies *Atriplex halimus*, *Frankenia ericifolia* y *Bassia tomentosa*, que presentaron los valores medios más bajos (< 25 dS m⁻¹), pero no significativamente diferentes ($p < 0.05$) del resto de especies. Las especies *Suaeda vera* y *Arthrocnemum macrostachyum* son en las que se observa un mayor rango de valores de CEe, pudiendo desarrollarse en suelos con salinidades que van desde los 11 dS m⁻¹ hasta los 145 dS m⁻¹. Por el contrario, especies como *Sarcocornia perennis* y *Bassia tomentosa*, presentan una variabilidad muy baja en sus valores de salinidad (Figura 9).

Las concentraciones de cationes soluble siguieron el orden Na⁺ > Mg²⁺ > Ca²⁺ > K⁺, lo que dió como resultado valores de SAR muy elevados (media ~ 58 (mmol L⁻¹)^{0.5}). Por su parte las concentraciones de aniones en la solución del suelo siguieron el orden Cl⁻ > SO₄²⁻ > HCO₃⁻ > NO₃⁻ (Tabla 3). Los elevados niveles de Na⁺ y Cl⁻ (media ~ 434 y 509 mmol_e L⁻¹, respectivamente) ponen de manifiesto que se trata de una salinización natural cuyo origen se encuentra en el agua de mar y/o spray marino (Díaz et al., 2011). Los niveles de Be presentaron un valor medio de 2.8 mg L⁻¹, alcanzando valores máximos de hasta 15.7 mg L⁻¹. La especie que presentó un mayor valor medio de Be en los suelos fue *Salsola divaricata* seguida de *Suaeda vera* y *Salsola tetrandia*. La especie con menor

contenido de B en los suelos asociados fue *Bassia tomentosa*. El pH de la solución del suelo varió entre 7.0 y 9.0, con un valor medio de 7.8. Las especies *Salsola divaricata* y *Suaeda vera* son las que se desarrollan en suelos con los valores medios de pH más elevados (~8.1), mientras que *Atriplex portulacoides*, *Suaeda maritima* y *Sarcocornia perennis* presentan los valores medios de pH más bajos (~7.5). En general se observa una disminución del pH conforme aumenta la salinidad del suelo, lo que puede explicarse por la fuerte competencia que existe en los suelos de elevada salinidad entre los H⁺ y otros cationes por ocupar posiciones del complejo de cambio, así muchos H⁺ pasan a la solución del suelo y provocan una bajada del pH (McLean, 1982).

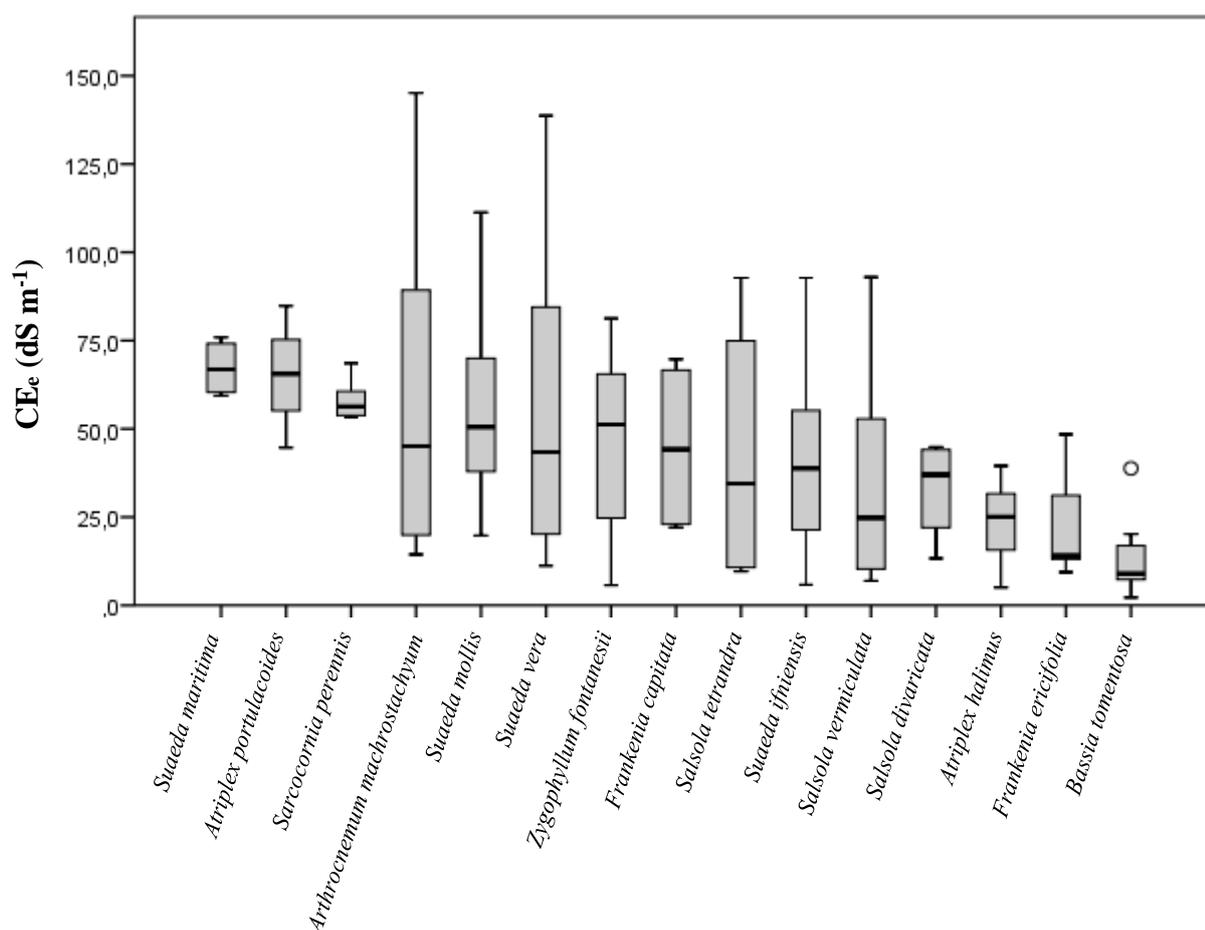


Figura 9. Valores de CEE en los suelos asociados a las diferentes especies de halófitas estudiadas.

5.2.2. Materia orgánica, cationes cambiables y nutrientes

La Tabla 4 muestra los contenidos de materia orgánica, cationes cambiables, macro y micronutrientes, y carbonatos de los suelos estudiados.

Parámetro/Descriptivo	Media ± Desviación	Máximo absoluto	Mínimo Absoluto
C total (g/kg)	13.34 ± 5.92	47.96	5.41
C activo (mg/kg)	192.99 ± 92.06	560.40	47.96
N (g/kg)	1.44 ± 0.84	6.94	0.54
P Olsen (mg/kg)	22.35 ± 10.27	33.52	12.63
Ca ²⁺ (cmol _c /kg)	10.13 ± 4.36	15.18	6.07
Mg ²⁺ (cmol _c /kg)	4.62 ± 2.16	10.01	2.23
K ⁺ (cmol _c /kg)	3.82 ± 2.40	6.76	1.59
Na ⁺ (cmol _c /kg)	8.52 ± 5.58	17.33	2.54
CaCO ₃ (cmol _c /kg)	41.31 ± 35.15	62.03	15.63
Fe (mg/kg)	54.74 ± 37.09	112.46	29.65
Zn (mg/kg)	1.17 ± 0.77	2.29	0.50
Cu (mg/kg)	1.32 ± 0.53	1.71	1.01
Mn (mg/kg)	14.60 ± 13.28	21.87	6.40

Tabla 4. Contenidos de materia orgánica, cationes cambiabiles y nutrientes de los suelos.

De forma general todos los suelos presentan, independientemente de la especie a la que se asocien, niveles muy bajos de carbono orgánico y de nitrógeno total, en general menores de 2 % y 0.1 % respectivamente (Metson (1961), con la excepción de los suelos asociados a las especies *Atriplex portulacoides* y *Suaeda maritima* (significativamente diferentes del resto de especies $p < 0.05$) en el que los niveles fueron superiores a 3 y 0.5 % respectivamente. Se trata de niveles normales para suelos de regiones áridas, que presentan una escasa cobertura vegetal y baja actividad biológica (Díaz, 2004). Aunque la relación C:N gira en torno a un valor de 10, lo cual se considera adecuado para la fertilidad del suelo, el nitrógeno se confirma como el principal elemento limitante para el desarrollo de la vegetación en estas zonas. El carbono orgánico lábil representó de media sólo un 1.6% del carbono total, variando entre 3 y 632 mg kg⁻¹. De igual forma las especies que presentaron niveles más altos de C activo en los suelos asociados fueron *Atriplex portulacoides* y *Suaeda marítima*. Los niveles de P Olsen fluctuaron entre 4.4 y 70.6 mg kg⁻¹. Atendiendo a las referencias aportadas por Olsen y Dean (1965), contenidos superiores a 15 ppm representan niveles altos de fósforo. Con la excepción de las especies *Arthrocnemum macrostachyum* y *Salsola divaricata*, los suelos asociados al resto de especies estudiadas presentaron niveles medios superiores a ese valor. Los cationes cambiabiles siguieron el orden en la mayoría de las especies de Ca²⁺ > Na⁺ > Mg²⁺ > K⁺, con la excepción de las especies *Atriplex portulacoides* y *Suaeda marítima* donde el Na⁺ dominó el complejo de cambio seguido del Ca²⁺, Mg²⁺ y K⁺. Los niveles de carbonatos

presentaron un valor medio para todos los suelos estudiados de 400 g kg^{-1} , con un mínimo de 8 y un máximo de 1540 g kg^{-1} . Si consideramos que un porcentaje de carbonatos superior al 15 % afecta a las propiedades físico-químicas de un suelo, pudiendo considerarse suelos carbonatados (Landon, 1991), todos los suelos en estudio presentan esta característica, siendo los suelos asociados a la especie *Suaeda mollis* los que presenta un nivel más bajo (~15%), y los de la especie *Arthrocnemum macrostachyum* que presentan un nivel más alto (~60%). Los niveles de micronutrientes estuvieron en general por encima de los niveles que pueden considerarse deficientes con la excepción del Fe (niveles deficientes de $\text{Fe} < 60 \text{ mg kg}^{-1}$; $\text{Mn} < 6 \text{ mg kg}^{-1}$; $\text{Cu} < 1 \text{ mg kg}^{-1}$; $\text{Zn} < 0.4 \text{ mg kg}^{-1}$) (FAO, 1982). Diez de las especies estudiadas se desarrollaron en suelos con un valor medio de Fe inferior a los 60 mg kg^{-1} lo que puede considerarse como niveles bajos.

La Figura 10 muestra la ordenación y distribución de las especies estudiadas en base a las propiedades químicas de los suelos por medio de un PCA, mientras que la Figura 11 muestra la agrupación de las especies usando un análisis cluster. En el PCA el porcentaje de varianza explicado con dos componentes (eje I y II) fue de 96.9 %. El parámetro con mayor peso positivo en el componente I fue el contenido de carbono orgánico tanto total como lábil (score = 0.8147 y 0.9999, respectivamente), mientras que el de mayor peso negativo fue la reacción del suelo (score = -0.2766). Para el componente II el parámetro con mayor peso positivo fue la CE (score = 0.8980), y el de mayor peso negativo el pH y el contenido en carbonatos (score = -0.4285 y -0.1844, respectivamente). Atendiendo también a las propiedades químicas de los suelos el análisis cluster permite diferenciar 3 grupos de especies (Figura 11): un primer grupo formado por las especies *Atriplex portulacoides* y *Suaeda marítima* caracterizados por presentar altos contenidos en materia orgánica y nutrientes, los pH más bajos, y como ya se ha visto altos valores de CEe; el segundo grupo formado por *Bassia tomentosa*, *Frankenia ericifolia*, *Atriplex halimus* y *Salsola divaricata*, se caracteriza por presentar las concentraciones más bajas de nutrientes en los suelos, valores más altos de pH, y niveles más bajos de salinidad; un tercer grupo incluiría al resto de las especies que se desarrollan en suelos con niveles intermedios de nutrientes y salinidad.

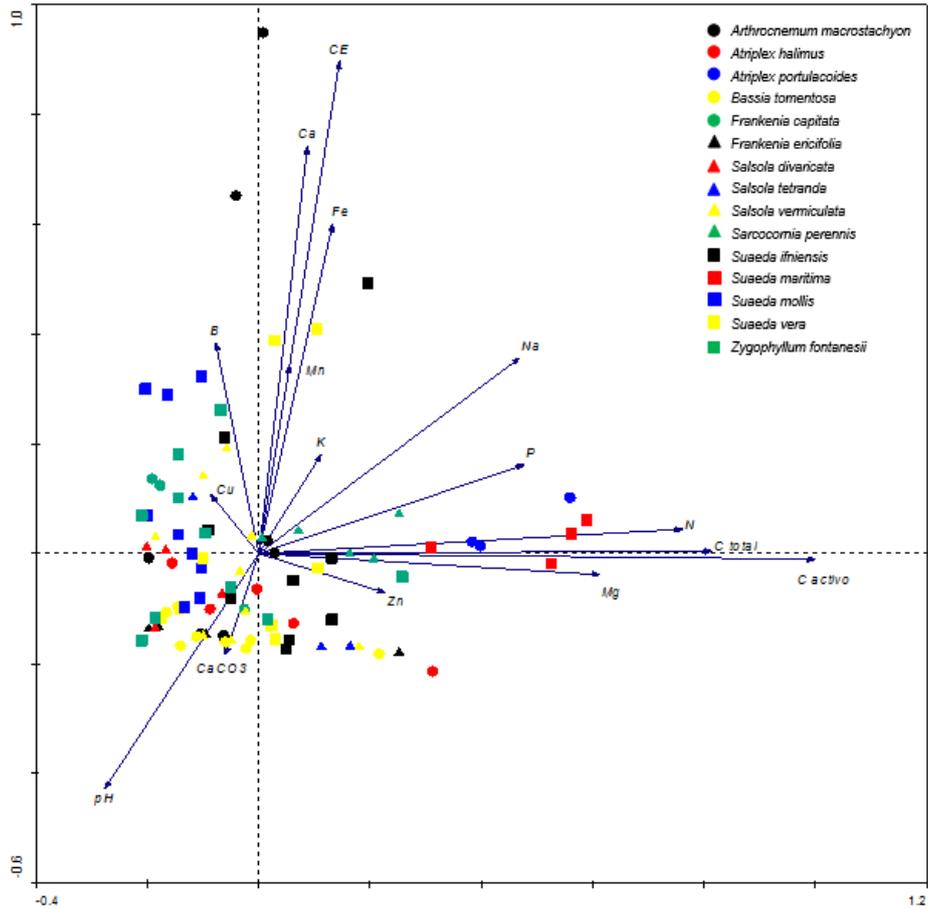


Figura 10. Ordenación de las especies de halófitas atendiendo a las características químicas de los suelos.

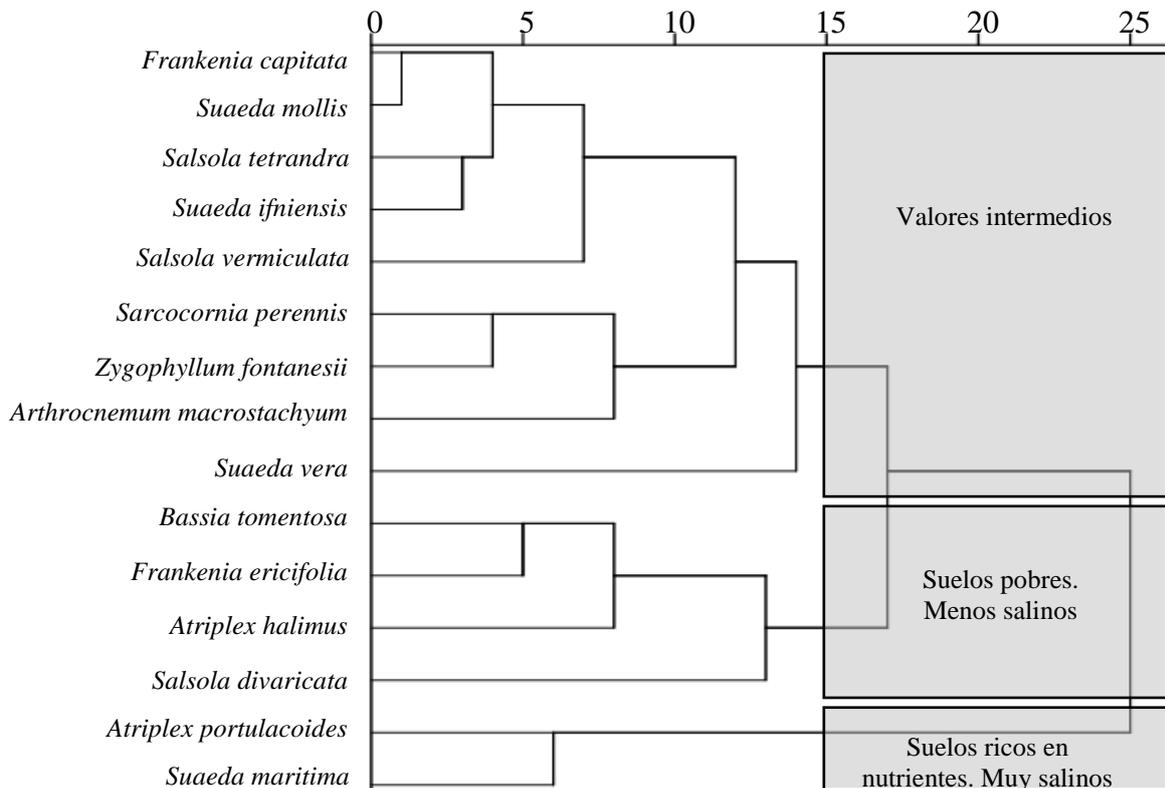


Figura 11. Dendrograma de clasificación de las especies atendiendo a los parámetros químicos del suelo. El corte se realizó a una distancia posterior a 15, obteniéndose 3 clusters. Método del enlace entre grupos y distancia euclídea.

6. Discusión

La tolerancia a la salinidad puede ser considerado como el factor más determinante para la potencial producción agrícola de especies halófitas utilizando recursos de aguas y suelos altamente afectados por sales (Zörb et al., 2013). Por lo tanto, es muy importante realizar un ranking de las especies halófitas atendiendo a los valores de salinidad que soportan en su medio natural, lo que permitirá determinar a priori que niveles de salinidad se les puede aplicar en un hipotético cultivo. Atendiendo a las salinidades medias encontradas en los suelos el ranking de tolerancia a la salinidad de las 15 especies analizadas sería: *Suaeda marítima* > *Atriplex portulacoides* > *Sarcocornia perennis* > *Arthrocnemum macrostachyum* > *Suaeda mollis* > *Suaeda vera* > *Zygophyllum fontanesii* > *Frankenia capitata* > *Salsola tetrandra* > *Suaeda ifniensis* > *Salsola vermiculata* > *Salsola divaricata* > *Atriplex halimus* > *Frankenia ericifolia* > *Bassia tomentosa*.

Las dos primeras especies del ranking *Suaeda marítima* y *Atriplex portulacoides*, y en una menor extensión *Sarcocornia perennis*, se desarrollan de manera exclusiva en ambientes de saladares, zonas sometidas a inundaciones periódicas de agua de mar. Por lo tanto, son especies adaptadas a condiciones de elevada salinidad ($CE_e < 60 \text{ dS m}^{-1}$) y a encharcamientos (contenido de agua en suelos > 50%). Constituirían así las especies que tendrían un mayor potencial para el riego con agua de mar mediante sistemas de riego en surco o por inundación. En este sentido el potencial agronómico de *Sarcocornia perennis* ha sido evaluado por diversos autores, obteniéndose excelentes resultados de producción de biomasa, así como de calidad nutritiva del material vegetal obtenido (Ventura et al., 2012). Aunque en nuestro estudio el rango de salinidades en suelos de estas especies es muy limitado, otros autores han señalado una mayor variabilidad. Así por ejemplo, *Sueda marítima* puede crecer en niveles de salinidad desde 100 mM hasta 1000 mM de NaCl; mientras que *Atriplex portulacoides* puede crecer desde 100 mM hasta niveles de 850 mM de NaCl (Zhang et al., 2012; Benzarti et al., 2013). De estos datos se puede inferir que en la isla de Lanzarote, otros factores, más que la salinidad de los suelos, tales como la disponibilidad de semillas, o factores climáticos limitan la distribución de estas especies. Los altos valores de materia orgánica y nutrientes observados en los suelos asociados a estas especies pueden ser una consecuencia de las condiciones de encharcamiento y elevada salinidad, que limitan la actividad microbiana y la degradación de los restos orgánicos aportados por la vegetación (Rao and Pathak, 1996).

En el otro extremo del ranking, las especies *Atriplex halimus*, *Frankenia ericifolia* y *Bassia tomentosa* aparecen como las que presentan una menor tolerancia a la salinidad (generalmente $CEe < 25 \text{ dS m}^{-1}$), desarrollándose también en los suelos más pobres a nivel nutritivo. No parecen por tanto buenos candidatos para el riego con aguas altamente salinas. En cultivos experimentales Bendaly et al. (2016) determinan que *Atriplex halimus* crece de manera óptima hasta concentraciones de 150 mM de NaCl donde empieza a disminuir su rendimiento, lo que concuerda con nuestros resultados.

Las restantes 9 especies (*Arthrocnemum macrostachyum*, *Suaeda mollis*, *Suaeda vera*, *Zygophyllum fontanesii*, *Frankenia capitata*, *Salsola tetrandra*, *Suaeda ifniensis*, *Salsola vermiculata* y *Salsola divaricata*), se desarrollan en suelos con niveles intermedios de salinidad y nutrientes (con la excepción de *Salsola divaricata* que crece en suelos pobres en nutrientes). La mayor variabilidad en cuanto a salinidad del suelo la presenta *Arthrocnemum macrostachyum*, coincidiendo así con Redondo-Gómez et al. (2008) quienes establecen que esta especie crece de manera óptima en concentraciones de NaCl entre 171 y 510 mM. Para algunas especies como por ejemplo *Salsola vermiculata* los niveles de salinidad encontrados ($CEe \text{ media} \sim 35 \text{ dS m}^{-1}$) son mayores que los señalados por Guma et al. (2009), como óptimos para su crecimiento (0-200 mM de NaCl). Estas 9 especies podrían representar candidatos potenciales para el cultivo bajo riego localizado con aguas salinas de salinidad alta pero no extrema, como podrían ser aguas subterráneas salinas, aguas de drenaje agrícola, o aguas provenientes de procesos de limpieza industrial. Los suelos a utilizar no requerirían elevados niveles nutritivos y se atendería fundamentalmente a las preferencias en texturas de suelos observadas en el apartado de propiedades físicas. Así por ejemplo, la especie *Zygophyllum fontanesii* presenta una clara tendencia a desarrollarse en suelos arenosos (> 67% de arenas). Zeng et al. (2005) concluyen que la especie *Zygophyllum xanthoxylum* (afín a *Zygophyllum fontanesii*) se desarrolla de manera óptima en sustratos con capas de arenas, coincidiendo con nuestros resultados.

Para algunas especies del mismo género, como por ejemplo *Frankenia*, se puede inferir a partir de las características de los suelos un fenómeno de radiación adaptativa, proceso descrito para otras especies (p.ej. géneros *Aeonium* y *Echium*) en las Islas Canarias. Así *Frankenia ericifolia* y *Frankenia capitata* ocupan nichos ecológicos a nivel edáfico completamente diferentes, mientras la primera se desarrolla en suelos de baja salinidad y

arenosos, la segunda lo hace en suelos de salinidad mucho más alta y de textura franco-arcillosa.

7. Conclusiones

La caracterización de los suelos donde se desarrollan las especies halófitas en su medio natural, constituye una herramienta que aporta información relevante para el potencial proceso de producción agrícola de las mismas. Así, se puede comprobar como para aquellas especies de las que existen ensayos agronómicos experimentales recogidos en la literatura, los rangos óptimos de crecimiento (p.ej. a nivel de salinidad del suelo) coinciden en gran medida con los observados en el medio natural. Del estudio realizado se pueden extraer las siguientes conclusiones:

1. Las especies *Suaeda marítima*, *Atriplex portulacoides* y *Sarcocornia perennis*, por su adaptación a condiciones de extrema salinidad y encharcamientos periódicos, constituyen los mejores candidatos para el riego en surco o por inundación con agua de mar.
2. El resto de especies estudiadas, con la excepción de *Atriplex halimus*, *Frankenia ericifolia* y *Bassia tomentosa*, que presentan menor tolerancia a la salinidad, representan candidatos potenciales para el cultivo bajo riego localizado con aguas de salinidad alta pero no extrema.
3. Las especies estudiadas no parecen requerir para su crecimiento un elevado nivel de nutrientes en el suelo. No obstante, se debe valorar si la producción de biomasa se vería afectada positivamente por un incremento de esos niveles.
4. Las preferencias de textura de suelos observadas en las especies evaluadas es una de las características más importantes a tener en cuenta a la hora de seleccionar los suelos más adecuados para su potencial cultivo.

Finalmente, señalar que la caracterización ecológica debe complementarse con estudios diversos, como por ejemplo de la calidad nutritiva y composición mineral de las especies halófitas, que permitirán en su conjunto la selección de las especies más idóneas para llevar a cabo ensayos agronómicos.

8. Referencias bibliográficas

- Abideen, Z., Ansari, R., Khan, M., 2011. Halophytes: potential source of ligno-cellulosic biomass for ethanol production. *Biomass Bioenergy* 35: 1818–1822.
- Agarie S., Kawaguchi A., Kodera A., Sunagawa H., Kojima H., et al., 2009. Potential of the common ice plant, *Mesembryanthemum crystallinum* as a new high-functional food as evaluated by polyol accumulation. *Plant Prod. Sci.* 12: 37–46.
- Barrett-Lennard, E., 2002. Restoration of saline land through revegetation. *Agricultural Water Management* 53: 213-226.
- Bathgate, A., O'Connell, M., 2001. The case for animal production from saline land: Economics of saltland pastures. In: *Conference Proceedings from the 7th National PUR&L Conference, Launceston, Tasmania (Australia)*, 20-23.
- Bendaly, A., Messendi, D., Smaoui, A., Ksouri, R., Bouchereau, A., et al., 2016. Physiological and leaf metabolome changes in the xerohalophyte species *Atriplex halimus* induced by salinity.
- Benzarti, M., Rejeb, K., Messedi, D., Mna, A., Hessini, K., et al., 2014. Effect of high salinity on *Atriplex portulacoides*: Growth, leaf water relations and solute accumulation in relation with osmotic adjustment. *South African Journal of Botany* 95: 70-77.
- Del Arco, M., Wildpret, W., Pérez, P., Rodríguez, O., Acebes J. et al., 2006. Mapa de Vegetación de Canarias. GRAFCAN. Santa Cruz de Tenerife.
- El Shaer, H., 2010. Halophytes and salt-tolerant plants as potential forage for ruminants in the Near East region. *Small Ruminant Research* 91(1): 3-12.
- FAO, 1982. *El estado mundial de la agricultura y la alimentación*. Roma, Italia.
- FAO, 2012. *El estado mundial de la agricultura y la alimentación*. Roma, Italia.
- Flowers, T., Hajibagheri, M., Clipson, N., 1986. Halophytes. *The Quarterly Review of Biology* 61: 313–337.
- Flowers, T., Yeo, A., 1995. Breeding for salinity resistance in crop plants—where next? *Journal of Plant Physiology* 22: 875–884.
- Flowers, T., Colmer, T., 2008. Salinity tolerance in halophytes. *New Phytologist* 179: 945-963.
- Gee, G., Bauder, J., 1986. Particle-size analysis. In A. Klute (ed.) *Methods of soil analysis*. Part 1. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI. p. 383–411.
- Ghassemi, F., Jakerman, A., Nix, H., 1995. *Salinization of land water resources: Human causes, Extent, Management and Case Studies*. UNSW Press, Sydney, Australia, and CAB International, Wallingford, UK.
- González-Alcaraz, M., Jiménez, F., Álvarez, Y., Álvarez, J., 2013. Gradients of soil salinity and moisture, and plant distribution, in a Mediterranean semiarid saline watershed: a model of soil-plant relationships for contributing to the management. *Catena* 115: 150-158.
- Guma, I., Padrón-Mederos, M., Santos-Guerra, A., Reyes-Betancort, J., 2009. Effect of temperature and salinity on germination of *Salsola vermiculata* L. (Chenopodiaceae) from Canary Islands. *Journal of Arid Environments* 74: 708-711.
- IUSS Working Group WRB, 2015. Base referencial mundial del recurso suelo 2014, Actualización 2015. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. *Informes sobre recursos mundiales de suelos* 106.FAO, Roma.

- Jordan, F., Waugh, J., Glenn, E., Sam, L., Thompson, T., et al., 2007. Natural bioremediation of nitrate-contaminated soil-and.aquifer system in a desert environment. *Journal of Arid Environment* 72: 748-763.
- Khan, M. y Duke, N., 2001. Halophytes – A resource for the future. *Wetlands Ecology and Management* 6: 455-456.
- Ksouri, R., Falleh, H., Megdiche, W., Trabelsi, N., Chaieb, K., et al., 2009. Antioxidant and antimicrobial activities of the edible medicinal halophyte *Tamarix gallica* L. and related polyphenolic constituents. *Food Chem Toxicol.* 47(8): 2083-91.
- Ladeiro, B., 2012. Saline Agriculture in the 21st Century: Using salt contaminated resources to cope food requirements. *Journal of Botany*, vol. 2012: 7 pages.
- Landon, R., 1991. *Booker Tropical Soil Manual*. Longman Scientific and Technical Essex, UK. pp. 474.
- Liangpeng, Y., Jia,n M., Yan, L., 2007. Soil salt and nutrient concentration in the rhizosphere of desert halophytes. *Acta Ecol Sin* 27: 3565–3571.
- Manousaki, E., Kalogerakis, N., 2011. Halophytes: an emerging trend in phytoremediation. *Int J Phytoremediation* 13(10): 959-69.
- Masters, D., Benes, S., Norman, H., 2007. Biosaline agriculture for forage and livestock production. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 119: 234–248.
- McLean, O., 1982. Soil pH and lime requirement. pp 199-224.
- Metson, A, 1961. *Methods of chemical analysis for soil survey samples*. Department of scientific and industrial research, New Zealand. *Soil Bureau Bulletin* 12.
- Munns, R., 2005. Genes and salt tolerance: bringing them together. *New Phytologist* 167: 645-663.
- Niu, X., Bressan, R., Hasegawa, P., Pardo, J., 1995. Ion homeostasis in NaCl stress environments. *Plant Physiology* 109: 735–742.
- Olsen, R., Cole, V., Watanabe, S., Dean, D., 1954. Estimation of Available Phosphorus in Soils by Extraction with Sodium Bicarbonate. U. S. Department of Agriculture Circular No. 939. Banderis, A. D., D. H. Barter and K. Anderson. *Agricultural and Advisor*.
- Olsen, R., Dean, D., 1965. Phosforus. *Methods of soil analysis*, american society of agronomy, Madison, Wisconsin. 9: 920-926.
- Panta, S., Flowers, T., Lane, P., Doyle, R., Haros, G., 2014. Halophyte agriculture: Success stories. *Environmental and Experimental Botany* 107: 71-83.
- Rabhi, M., Ferchichi, S., Jouini, J., Hamrouni, M., Koyro, H., et al., 2010. Phytodesalination of a salt-affectedsoil with the halophyte *Sesuvium portulacastrum* L. to arrange inadavance the requirements for the successful growth of a glycophytic crop. *Biores Technol* 101: 6822–6828.
- Rao, D., Pathak, H., 1996. Ameliorative influence of organic matter on biological activity of salt-affected soils. *Arid Land Research and Management* 10(4): 311-319.
- Ray, S., Chandran, P., Bhattacharyya, T., Durg, L., Pal, K., 2003. Layer charge of two benchmark vertisol clays by alkylammonium method. *Clay Research* 22: 13–27.
- Reddy, K., Delaune, R., 2008. *Biogeochemistry of Wetlands: Science and Applications*. CRC Press., Boca Raton, Florida, pp. 774.

- Redondo-Gómez, S., Mateos-Naranjo, E., Davy, J., Fernández-Muñoz, F., Castellanos E., et al., 2007. Growth and photosynthetic responses to salinity of the salt-marsh shrub *Atriplex portulacoides*. *Ann. Bot.* 100:555-563.
- Reyes, A., Wildpret, W., León, C., 2001. The vegetation of Lanzarote (Canary Islands). *Phytocoenologia* 31(2): 185-247.
- Rozema, J., Flowers, T., 2008. Crops for a salinized World. *Science* 322: 1478-1479.
- Rozema, J., Schat, H., 2013. Salt tolerance of halophytes, research questions reviewed in the perspective of saline agriculture. *Environmental and Experimental Botany* 92: 83-95.
- Song, M., Ouyang, Z. y Liu, Z., 2009. Discrete dynamical system modelling for gene regulatory networks of 5-hydroxymethylfurfural tolerance for ethanologenic yeast. *IET Syst Biol.* 3(3): 203.
- Soil Survey Staff, 1999. *Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*. 2nd edition. Natural Resources Conservation Service. U.S. Department of Agriculture Handbook 436.
- Tejedor, M., Jiménez, C., Díaz, F., 2003. Use of volcanic mulch to rehabilitate saline-sodic soils. *Soil Science Society of America Journal* 67(6).
- Tejedor, M., Jiménez, C., Díaz, F., 2007. Rehabilitation of saline soils by means of volcanic material coverings. *European Journal of Soil Science* 58(2): 490-495.
- ter Braak, C., Šmilauer, P., 1998. *CANOCO Reference Manual and User's Guide to Canoco for Windows: Software for Canonical Community Ordination (version 4)*. Microcomputer Power, Ithaca, NY, USA.
- Troll, V., Carracedo, J., 2016. *The Geology of the Canary Islands*. Elsevier pp. 636.
- Ventura, Y., Sagi, M., 2012. Halophyte crop cultivation: The case for *Salicornia* and *Sarcocornia*. *Environmental and Experimental Botany* 92: 144-153.
- Walkley, A., Black, I., 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37: 29-37.
- Warren, B., Casson, T., 1994. *Proceedings of the 3rd National Workshop on Productive Use of Saline Land*. Echuca, Vie., pp. 125-9.
- Weber, D., Ansari, R., Gul, B., Khan, A., 2007. Potential of halophytes as source of edible oil. *Journal of Arid Environments* 68: 315-321.
- Zeng, Y., Wang, Y., Bao, P., 2005. Study on the effects of soil temperature, soil moisture content, sowing depth, and sand cover on seed germination and seedling growth of *Reaumuria soongorica* and *Zygophyllum xanthoxylum*. *Acta prataculturae Sinica* 14(5): 24-31.
- Zhao, K., Song, J., Zhao, M., 2011. Species, types, distribution and economic potential of halophytes in China. *Plant soil* 342: 495-509.
- Zhu, Y., Fraering, P., Vionnet, C., Conzelmann, A., 2005. Gpi17p does not stably interact with other subunit of glycosylphosphatidylinositol transamidase in *Saccharomyces cerevisiae*. *Biochimica et Biophysica Acta* 1735(1): 79-88.
- Zörb, C., Sümer, A., Sungur, A., Flowers, T., Özcan, H., 2013. Ranking of 11 coastal halophytes from salt marshes in northwest Turkey according their salt tolerance. *Turkish Journal of Botany* 37: 1125-1133.