

# GUARRACUCO

REVISTA CIENTÍFICA SOSTENIBLE

EDICIÓN 1 - DICIEMBRE DE 2022 - VILLAVICENCIO, META - ISSN: 2981-3220 (En línea)



**Revista Guarracuco Sostenible**  
Publicación de Investigaciones  
**Corporación Universitaria del Meta - UNIMETA**



Presidenta Sala General  
**Nancy Espinel Riveros**

Rectora  
**Leonor Mojica Sánchez**

Vicerrector Académico, Investigaciones y Proyección  
Social / Vicerrectora de Postgrados, Educación conti-  
nuada y Proyección social  
**Luz Elena Malagón Castro**

**Corporación Universitaria del Meta - UNIMETA**  
Carrera 32 No. 34B-26, Campus San Fernando  
Villavicencio, Meta (- Colombia)  
Teléfono: (57-8) 662 1825 Ext. 130  
Fax: 662 1827

Jefe de Biblioteca “Juan Nepomuceno Mojica Angarita”  
**María Alejandra Peñaloza Sarmiento**

Editor  
**Juan Manuel Bernate Martínez**

Diseño y diagramación  
**Juan Manuel Bernate Martínez**  
**Fabián Andrés Daza Castro**

**Revista Guarracuco Sostenible**  
ISSN: 2981-3220 (En línea)  
Número 1  
Diciembre de 2022  
Villavicencio, Meta, Colombia

[www.unimeta.edu.co](http://www.unimeta.edu.co)

## **Editorial:**

### **Comité Editorial**

Linda Carolina Henao Rodríguez  
**Fundación Universitaria Konrad Lorenz**

Luz Elena Malagón Castro  
**Corporación Universitaria del Meta**

Doris Aguilera Hernández  
**Ejército Nacional**

Jenny Katherine Cubillos Díaz  
**Corporación Universitaria del Meta**

### **Comité Científico**

Jenny Paola Lis Gutiérrez  
**Fundación Universitaria Konrad Lorenz**

Andreina Moros Ochoa  
**Fundación Universitaria Konrad Lorenz**

Jesús Hernán Camacho Tamayo  
**Universidad Nacional de Colombia**

Carlos Bouza  
**Universidad de la Habana, Cuba**

Melissa Lis Gutiérrez  
**Corporación Universitaria del Meta**



Fotografía: Juan Manuel Bernate M.

# Perspectivas en Biorremediación para la recuperación de suelos salinos

Por: Rodríguez Aristizabal, Mónica Alejandra\*\*  
Hernández Hernández, Guisell Solangi\*; Busa Riaño,  
Paula Andrea\*

Profesores e Investigadores - UNIMETA

## Resumen

Los suelos salinos se encuentran ampliamente distribuidos en el mundo, ocasionando la degradación y pérdida de hectáreas con vocación agrícola, en algunos casos incluso derivan en la pérdida total o desertificación del suelo. Tradicionalmente el tratamiento de este tipo de degradación se ha hecho usando enmiendas químicas, riego y lixiviación de sales y tratamientos mecánicos como el volteo del suelo. En ese sentido surge la necesidad de desarrollar alternativas sostenibles que permitan contribuir a la disminución de la salinización del suelo con el fin de evitar que aumenten las áreas degradadas por esta condición. La Biorremediación se presenta como una opción que tiene un alto potencial, el uso de microorganismos como bacterias, algas, hongos, y el uso de plantas halófitas podría convertirse en un tratamiento complementario que permita dar un manejo más integral y sostenible a los suelos con problemas de salinización. Algunas investigaciones in vitro y en invernadero han evidenciado que las bacterias y hongos halófilos tienen la capacidad de

acumular y transportar sales, de igual manera se conoce el potencial de bioacumulación de las plantas. Esta revisión presenta los principales hallazgos relacionados con el uso de microorganismos y plantas en la biorremediación de ambientes contaminados, con el fin de consolidar información que permita tomar puntos de partida para desarrollar alternativas sostenibles frente a la problemática de la salinización del suelo.

**Palabras clave:** *Biorremediación, Suelos salinos, Bacterias Halófilas, Hongos Halófilos, Plantas Halófitas, Fitorremediación.*

## Abstract

Saline soils are widely distributed in the world, causing the degradation and loss of hectares with agricultural vocation, in some cases even resulting in the total loss or desertification of the soil. Traditionally the treatment of this type of degradation has been done using chemical amendments, irrigation and leaching of salts and mechanical treatments such as turning the soil. In this sense, the need arises to develop sustainable alternatives that allow contributing to the reduction of soil salinization in order to avoid increasing the areas degraded by this condition. Bioremediation is presented as an

\*\* Docente Investigadora grupo Ceparium, semillero Neonature, programa Bacteriología y Laboratorio Clínico, Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca.

\*Estudiantes pregrado Bacteriología y Laboratorio Clínico, integrantes semillero Neonature Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca

option that has a high potential, the use of microorganisms such as bacteria, algae, fungi, and the use of halophyte plants could become a complementary treatment that allows a more comprehensive and sustainable management of soils with problems of salinization. Some in vitro and greenhouse investigations have shown that halophilic bacteria and fungi have the ability to accumulate and transport salts, in the same way the bioaccumulation potential of plants is known. This review presents the main findings related to the use of microorganisms and plants in the bioremediation of contaminated environments, in order to consolidate information that allows starting points to be taken to develop sustainable alternatives to the problem of soil salinization.

**Keywords:** *Bioremediation, Saline soils, Halophilic Bacteria, Halophilic Fungi, Halophytic Plants, Phytoremediation.*

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad las prácticas de uso inadecuado de la tierra llevan a la degradación del suelo, el agua y los bosques, lo que afecta significativamente al sector agrícola, e incide en la pérdida de servicios ecosistémicos y biodiversidad, generando problemas sociales y de desarrollo (Zúñiga, et al., 2011; Fustamante, et al., 2019; Ramírez, et al. 2011). La degradación del suelo puede definirse como la reducción o pérdida de la productividad biológica o económica del mismo, las principales consecuencias se relacionan con la incapacidad de recuperación natural, incrementos de las inundaciones, infertilidad y disminución en la producción de alimentos; puede darse a nivel físico, químico o biológico y comúnmente se produce por el sellamiento de suelos, la contaminación, la pérdida de la materia orgánica, la

salinización, la erosión, la acidificación, la compactación ocasionando la desertificación como daño irreversible (Manzano, et al., 2014; Mata-Fernández, et al., 2014; MADS, 2015; Sentís, 2012).

En este contexto uno de los factores de degradación del suelo más importante, es la degradación química, donde la salinización es una de las problemáticas más relevantes. Los suelos salinos se caracterizan por tener una alta concentración de sales solubles, estas pueden tener efectos diversos, dependiendo del tipo de sales predominantes y de los factores ambientales como el tipo de suelo, clima y drenaje (Mata-Fernández, et al., 2014; Alava, et al., 2018). Según sus características pueden clasificarse en suelos salinos, aquellos que contienen en la zona radicular una concentración de sales disueltas en la solución del suelo, (CE: 4 ds/m, pH: 7 y 8.5); suelos sódicos, los que tienen suficiente sodio adsorbido en la zona radicular para presentar características fisicoquímicas desfavorables (CE < 4 ds/m y pH 8.5) suelos salino- sódicos, presentan un exceso de sales y como consecuencia se colapsa la estructura del suelo (CE >4 y pH < 8.5) (Roca, et al., 2007; Bander, 2013; O'Geen, 2018).

En los terrenos de uso agrícola extensivo la salinización de los suelos es uno de los principales inconvenientes (Girón, 2019), debido a que restringe las actividades agrícolas, sin importar si son grandes o pequeñas extensiones de tierra, provocando la disminución de rendimiento de los cultivos y su capacidad productiva, por lo que la calidad ecológica del medio ambiente se ve afectada principalmente en las zonas donde la absorción de agua por las plantas y la evaporación superficial excedan el nivel de las precipitaciones, ocasionando el movimiento ascendente de las sales que se encuentran disueltas en las aguas subterráneas lo que provoca

el desplazamiento hacia la superficie, generando la degradación de las condiciones químicas y estructurales del suelo (Mata-Fernández, 2014; Guida-Johnson, et al., 2017; Lope, 2021).

Las consecuencias de la salinidad en las plantas se evidencian por medio de la afectación en la retención de agua y de los efectos iónicos que esto genera, lo cual se evidencia en el citoplasma y las membranas celulares. El estrés salino ocasiona una ruptura de la homeostasis iónica produciendo un exceso tóxico de sodio ( $\text{Na}^+$ ) en el citoplasma el cual genera la inhibición de diferentes enzimas, y por consiguiente, presenta una deficiencia de iones como el potasio ( $\text{K}^+$ ). Las altas concentraciones de sales se acumulan en la zona radical ocasionando disminución en el crecimiento de la planta, debido a la reducción del potencial hídrico de la solución del suelo, trayendo como consecuencia un desequilibrio nutricional a través de la elevada concentración de elementos ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ) que generan interferencia en la nutrición mineral y el metabolismo celular (Alcaraz, 2012; Mata-Fernández, et al., 2014; Lavado, 2017; Rueda, 2019).

La principal causa de la salinización excesiva de los suelos es la agricultura y las prácticas antrópicas asociadas, como el riego con agua de pozo o naceros que contienen magnesio y sodio, el uso excesivo de fertilizantes y las precipitaciones causadas como reacción secundaria a emisiones atmosféricas de combustión que contienen altas concentraciones de sulfatos (Hernández, et al., 2013; Girón, 2019). Las plantas son unas de las principales afectadas puesto que su crecimiento y desarrollo se ve disminuido al estar expuestas a este tipo de estrés, entre los que se encuentra el estrés hídrico debido a que el exceso de solutos en el suelo genera una disminución del potencial osmótico y del potencial hídrico, afectando el balance hídrico de la planta, por lo

que se disminuye la fotosíntesis y la producción de hormonas vegetales como el ácido abscísico; Por lo que los cultivos también se pueden ver afectados debido a la toxicidad por iones, que ocurre cuando las plantas captan y acumulan iones tóxicos como el sodio, el cloruro y el sulfato, los cuales se pueden encontrar en el agua de riego; principalmente se ve afectada la actividad enzimática y ocurre una inhibición de la fotosíntesis, lo que puede llevar al fracaso total del cultivo (Martínez, et al., 2011; Lamz Piedra, et al., 2013; Herbert, et al., 2015; Académico G, et al., 2017).

Los suelos salinos están ampliamente extendidos y afectan millones de hectáreas en el mundo (Payen, et al., 2016). Según la FAO (2010), cerca de 150 millones de hectáreas de suelo a nivel mundial están salinizados, de las cuales 59,4 millones de hectáreas están en Latinoamérica. Además de las extensas áreas de suelo con salinidad primaria, se ha incrementado considerablemente la secundaria en extensos territorios, principalmente como efecto del regadío. Una de las principales consecuencias de la salinización en el mundo, es la pérdida de al menos, tres hectáreas de tierras cultivables cada minuto, por lo cual se constituye como un gran problema para la producción agrícola (Mesa, 2003; Pasache, 2021). La salinización del suelo, la degradación de la tierra y la sequía son desafíos a nivel mundial que limitan el desarrollo sostenible en todos los países siendo las poblaciones rurales pobres de los países en desarrollo las más vulnerables (UNCCD, 2013, 2014).

Debido a las consecuencias generadas por la salinización es necesario desarrollar técnicas que logren restaurar el suelo, con el fin de disminuir el contenido de sales y su potencial daño a los cultivos agrícolas. Con el propósito de cumplir este objetivo se han desarrollado diferentes técnicas que buscan

mejorar la condición de los suelos y así mismo la producción agrícola, entre estos se encuentran los métodos químicos como la aplicación de azufre, yeso agrícola o sulfato de calcio dihidratado; No obstante en amplias extensiones pueden resultar muy costosos, debido a la cantidad de material y en algunos casos la necesidad de equipo especializado (Mata- Fernández, 2014; Sun, et al., 2018; Almeida, et al., 2019). Por esta razón se deben buscar alternativas que sean económicas y respetuosas con el ambiente.

## MATERIALES Y METODOS

Para realizar esta revisión se proponen dos preguntas orientadoras: ¿Cuáles han sido los retos del manejo de suelos salinos para la agricultura? y ¿Cuál ha sido el papel de la biorremediación en la disminución de la salinización de los suelos?, responder estas preguntas a través de la búsqueda de información permitirá conocer las perspectivas y nuevas alternativas propuestas para dar solución a la problemática de la salinización del suelo. La metodología usada incluyó la búsqueda de fuentes bibliográficas en bases de datos como scopus, ISI, pubindex, redalyc, science, scielo, CABI, proquest, ebsco, Doaj y google académico, para garantizaran la calidad de la información y además la indización de las revistas donde fueron publicados los artículos seleccionados, estableciendo una línea de tiempo de 15 años y contextualizando la salinización como un problema para la agricultura.

## TRATAMIENTOS CONVENCIONALES PARA RECUPERAR SUELOS DEGRADADOS POR SALINIZACIÓN

Uno de los tratamientos más comunes para disminuir la concentración de sales en el suelo es la

adición de sustancias que aportan nutrientes que mejoran las características orgánicas y fisicoquímicas del suelo. Enmiendas orgánicas como el humus y el compost mesófilo, mejoran la capacidad de intercambio catiónico, favorecen la retención de agua, incrementan la disponibilidad de nutrientes y favorecen la estructura del suelo. El compost de residuos orgánicos aplicado al suelo contrarresta el agotamiento de la materia orgánica al ser un proceso bioxidativo (Bernal, et al., 2009) y en los suelos salinos mejora el entorno químico aumentando la capacidad de intercambio catiónico (Walker, et al., 2008; Bernal, et al., 2009; Girón, 2019), el compost mesofílico, también facilita la lixiviación de sales de sodio presentes, estimula la microbiota bacteriana del suelo, esto incide en la producción de CO<sub>2</sub> facilitando la solución de cationes como magnesio y calcio, que sustituyen el sodio y previenen el exceso de sales (Jalali, et al., 2009; Hernández, 2011; Girón, 2019).

Algunas enmiendas químicas como la cal, el azufre y el yeso, también mejoran la calidad del suelo al reducir la acidez y el porcentaje de sodio intercambiable que genera salinidad (Hernández, 2011; Girón, 2019). Una opción económica que se encuentra en el mercado es el yeso, que es una fuente de calcio muy utilizada, debido a su fácil manejo y mayor disponibilidad; para lograr corregir la salinidad del suelo es necesario conocer la cantidad de yeso que debe ser utilizado y esto se puede hacer en función al porcentaje de sodio intercambiable (ESP) reemplazado, la capacidad de intercambio catiónico del suelo (CIC) y la profundidad del suelo a recuperar, o puede ser determinado por una prueba de laboratorio que involucra el equilibrio entre el suelo y un saturado de solución de yeso (Cerdeira, et al. 2007; Lopes, et al; 2014; O'Geen, 2018); En algunos casos se utiliza una mezcla de yeso y azufre con el fin de aumentar la permeabilidad de los suelos flo-

culando las partículas de arcilla, para disminuir el porcentaje de microporos y aumentar el de poros medianos para finalmente con riegos abundantes lavar las sales, que son liberadas gracias la disminución de pH causado por el azufre (Cerda, et al., 2007, Zuñiga, et al., 2011;)

El lavado de sales también es una manera efectiva de eliminar las elevadas concentraciones de estos compuestos orgánicos del suelo; en primer lugar es necesario nivelar el terreno con el fin de poder inundarlo para que el agua se infiltre en profundidad, sin embargo esto se realiza de forma diferente si el nivel freático se encuentra cerca de la superficie, por lo tanto se construyen sistemas de drenaje para que los excedentes de agua puedan evacuar. Este lavado crea un flujo descendente de agua luego de conocer la composición y concentración de sales presentes, construyéndose sistemas de drenaje para que los excedentes de agua puedan evacuar. Las sales son más solubles en épocas de verano por lo que se encuentra una mayor efectividad para los lavados en esta época (Perla, et al., 2004; Babelis, et al; 2011; Sánchez, et al., 2012).

### **LA BIORREMEDIACIÓN COMO ALTERNATIVA PARA AMBIENTES CONTAMINADOS CON SALES**

La biorremediación es un proceso que incluye el uso de microorganismos o parte de ellos, bien sea de forma naturalmente o por modificaciones biotecnológicas; tiene como propósito degradar sustancias que se acumulan en cantidades no recomendables en diferentes espacios como resultado de un proceso productivo mal manejado o de un incidente natural (Suarez, et al., 2013; Brutti, et al., 2018; Galindo, et al., 2020)

En ese sentido los microorganismos presentes en

el suelo cumplen una función fundamental para la regulación de los ecosistemas terrestres, debido a que influye en la estructura, diversidad y productividad de las comunidades vegetales; por esta razón la adición de microorganismos en el suelo y/o la biorremediación son alternativas que se han consolidado como una opción sostenible para acondicionar suelos. Los microorganismos como las bacterias y hongos han sido los encargados de la descomposición de la materia orgánica en el suelo, una actividad por la que liberan nutrientes que quedan disponibles para ser absorbidos nuevamente por la planta, de forma directa a través de las raíces o indirecta por medio de microorganismos que forman simbiosis con las raíces como las micorrizas; esta función es importante teniendo en cuenta que muchos compuestos contaminantes en el suelo bien sean orgánicos o inorgánicos que pueden ser transformados por dichos microorganismos, que también intervienen en la absorción de micro y macroelementos que relacionados con el aumento de tolerancia a estrés abiótico, mejoramiento de la calidad del suelo, fijación de nitrógeno y aumento en la diversidad y productividad de las plantas en ecosistemas determinados (Berdugo, 2009; Pérez, 2011).

Por otra parte los hongos formadores de micorrizas arbusculares también se han relacionado con una mayor resistencia al estrés salino en el suelo, algunas esporas viables de especies conocidas como *Glomus*, *Entrophospora*, *Acaulospora* y *Sclerocystis*, en plantas como *Citrus aurantium* “naranja” y *C. volkameriana* “limón” se han encontrado en suelos con altas concentraciones de sal (Cotrina, 2019). Asimismo, microorganismos halófilos, comúnmente encontrados en suelos y aguas con altas concentraciones de sal se han estudiado para determinar su potencial en la Biorremediación de ecosistemas contaminados con compuestos orgánicos, las diver-



sidad de funciones metabólicas que presentan, los bajos requerimientos nutricionales y sus características genéticas les permiten adaptarse a condiciones desfavorables, como la falta de nutrientes, la desecación, la alta fuerza iónica y la radiación solar, condiciones características de ambientes extremos, como los hipersalinos, debido a esto, este tipo de microorganismos tienen un alto potencial biotecnológico (Oren, 2009; Ventosa, et al., 2015; Arora, Singh, & Singh, 2017; Arora & Vanza, 2017) se ha evidenciado que producen pigmentos carotenoides, proteínas retinianas, enzimas hidrolíticas y solutos compatibles como estabilizadores de macromoléculas, biopolímeros y biofertilizantes (Bano, et al., 2018; Corral, Amoozegar, & Ventosa, 2019; Liu, et al., 2019; Can-Herrera, et al; 2021).

### BACTERIAS HALÓFILAS

Las bacterias halófilas son un grupo amplio de microorganismos conformado por cocos, bacilos, entre otros capaces de vivir en ambientes hipersalinos, debido a esto se pueden clasificar en halotolerantes si toleran entre 1-5% p/v (Marinobacter, Marinomonas, Pseudomonas, Pseudoalteromonas), moderadamente halófilas, si toleran un amplio rango de concentraciones de sal 5-10% p/v (Halomonadacea, Marinococcus, Halobacillus, Salinicoccus, Tetragenococcus, Salibacillus, Halobacteroides, Acetohalobium, Haloanaerobacter, Sporohalobacter, Orenia, Clostridium, Desulfohalobium y Desulfovibrio.) y halófilas extremas, que no son fáciles de identificar debido a los requerimientos nutricionales para su crecimiento >20% p/v, sin embargo, distintas investigaciones han reportado el aislamiento de especies como Halomonas elongata, Halobacterium salinarum, Acetohalobium, Halorhodospira y Salinibacter ruber (Sánchez & Arguello, 2006; Garzón, 2016, Corral, Amoozegar, &

Ventosa, 2019; Rodríguez, Higuera & Sanjuanelo, 2019)

Poseen dos tipos de mecanismos de adaptación frente a las concentraciones de salinidad: sistema de sal en el citoplasma, que consiste en el almacenamiento de sal dentro de la célula, debido a esto, las enzimas y los diferentes componentes estructurales de la célula generan una adaptación a una elevada salinidad, por lo tanto, presentan modificaciones que comprenden un exceso de aminoácidos y menores concentraciones de aminoácidos hidrofóbicos; con relación a este mecanismo también se ha encontrado que ocurre una modificación de la morfología celular, debido a que se presentan alteraciones estructurales en la pared y membranas celulares, evidenciándose modificaciones en la síntesis de proteínas, lípidos y ácidos grasos dándose mayores alteraciones morfológicas a concentraciones mayores a 2 M de NaCl (Garzón, 2016; Rodríguez, Higuera & Sanjuanelo, 2019). Por otra parte, el mecanismo de solutos orgánicos (dependiente de concentraciones de NaCl), que incluye la acumulación de compuestos orgánicos, como polioles, azúcares, aminoácidos y/o derivados, que no afectan el metabolismo celular (Garzón, 2016, Rodríguez, Higuera & Sanjuanelo, 2019; Can-Herrera, et al., 2021)

Las bacterias halófilas han sido ampliamente estudiadas, desde su aislamiento, caracterización y taxonomía (Müller & Saum, 2005; Shivanand, & Mugeraya, 2011; Akpolat, et al., 2015; Banciu, et al., 2019; Corral, Amoozegar, & Ventosa, 2019; Banciu, et al., 2019; Didari, et al., 2020) hasta su alto potencial biotecnológico; Bacillus megaterium NCT-2 por ejemplo, es una bacteria halófila que absorbe nitratos y que muestra una alta capacidad de biorremediación en suelos de salinización se-

cundaria, incluyendo la capacidad de reducción de nitratos, solubilización de fosfatos y adaptación a la salinidad (Ramírez, Sandoval & Serrano, 2004; Guevara, 2020; Wang, et al., 2020; Guevara, 2021). *Bacillus subtilis*, que es considerada una bacteria halófila desnitrificante, tiene una alta tasa de crecimiento y por lo tanto, una mayor capacidad de eliminación de nitratos (Ramírez, Sandoval & Serrano, 2004, Can-Herrera, et al., 2021; Zhang, et al., 2021). Microorganismos como *Pseudoalteromonas phenolica*, *Micrococcus luteus*, *Pseudoalteromonas peptidolytica*, *Halomonas socia*, *Marinobacter maritimus* y *Exiguobacterium aurantiacum* poseen enzimas hidrolíticas que pueden convertir la biomasa en moléculas más simples y aumentan sus actividades al aumentar la concentración de NaCl; con relación a lo anterior, es importante resaltar que las bacterias halófilas han demostrado ser una fuente potencial de enzimas con alta estabilidad, esto puede considerarse de gran interés a nivel industrial y para la biorremediación (Ramírez, Sandoval & Serrano, 2004; Guida-Johnson, et al., 2017; Ramírez, et al., 2018; Can-Herrera, et al., 2021).

## HONGOS HALÓFILOS

Los hongos se caracterizan por tener versatilidad fisiológica, lo que les permite realizar cambios en los ambientes que colonizan según la disponibilidad y características del sustrato, además de las condiciones ambientales. Entre estos encontramos los hongos halófilos, que han sido aislados de diversos ambientes hipersalinos y son capaces de alcanzar su crecimiento óptimo en presencia de concentraciones de sal mayores a 0.5 M (Gunde-Cimerman, Ramos, & Plemenitaš, 2009, Naranjo-Briceño, et al., 2013; Abradelo, 2019), las adaptaciones en la pared celular y en la composición lipídica de sus membranas citoplasmáticas son responsables de

la haloadaptación y favorecen la acumulación de compuestos iónicos o no iónicos u orgánicos como: K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, aminoácidos y azúcares, entre otros (Plemenitaš, 2014; Neifar, et al., 2015; Abradelo, 2019, Ali, et al., 2019).

Es relevante mencionar que, las comunidades de hongos halotolerantes y halófilos que habitan los ambientes hipersalinos naturales no requieren estrictamente sal, ya que pueden crecer y adaptarse a todo el rango de salinidad, desde agua dulce hasta soluciones de NaCl casi saturadas, a pesar de esta versatilidad, la gran mayoría de moléculas antimicrobianas de hongos halófilos se producen en condiciones de salinidad baja o moderada (Gunde-Cimerman, Ramos, & Plemenitaš, 2009; Corral, Amoozegar, & Ventosa, 2019) Se han descrito dentro de los hongos asociados a ambientes hipersalinos, *Aspergillus*, *Penicillium*, *Alternaria*, *Cladoporium*, *Fusarium*, *Debaryomyces*, *Scopulariopsis*, *Chaetomium*, *Wallemia* y *Hortaea*, que están bien representados en estudios ecológicos y de biodiversidad (Plemenitaš et al., 2008, Gunde-Cimerman, Ramos, & Plemenitaš, 2009; Plemenitaš, 2014; Corral, Amoozegar, & Ventosa, 2019) Particularmente las especies de *Gymnoascus halophilus*, *Aspergillus penicillioides*, *Hortaea werneckii*, *Phaeotheca triangularis*, *Aureobasidium pullulans*, *Trimmatostroma salinum* y algunas especies del género *Wallemia*, como *W. ichthyophaga*, se reconocen como obligatoriamente halófilas o requieren niveles elevados de sal por encima de la del agua de mar (Plemenitaš, 2014; Corral, Amoozegar, Ventosa, 2019).

Con relación a la estrategia de osmoregulación y osmoadaptación, para algunos hongos, se ha descrito la acumulación de una mezcla de polioles que actúan como solutos compatibles, mecanismo que puede ser comparado con la estrategia de solutos

compatibles usada por las bacterias halotolerantes y moderadamente halófilas; adicionalmente se ha demostrado que los niveles intracelulares de  $K^+$  y  $Na^+$  permanecen bajos a salinidades constantes, con lo cual no se ocasiona toxicidad en el microorganismo (Zajc et al., 2013; Plemenitaš, 2014). Otras estrategias usadas por los hongos para sobrevivir en ambientes hipersalinos se relacionan con la capacidad de las células para mantener una menor cantidad de agua, esto está relacionado con la homeostasis iónica, asociada a genes específicos dentro de los microorganismos, por ejemplo para *D. hansenii* los genes DhENA1 y DhENA2 codifican  $Na^+$ -ATPasas, responsables de la extrusión de sal; por otra parte la fluidez de la membrana plasmática es una de las propiedades importantes que pueden cambiar según una situación para adaptarse al entorno y la capacidad de detectar los cambios en las concentraciones de  $Na^+$  circundantes, que es de vital importancia para la supervivencia celular (Jain, Choudhary & Varma 2021). Particularmente la vía de señalización de glicerol de alta osmolaridad (HOG), que es una vía de proteína quinasa activada por mitógenos (MAPK), juega un papel central en la supervivencia de *S. cerevisiae* a bajo potencial hídrico ambiental, esto está relacionado con la exposición a alta osmolaridad en las áreas circundantes (Ali, et al., 2019, Jain, Choudhary & Varma 2021). En ese sentido el estudio de los hongos para biorremediar ambientes contaminados con diferentes compuestos ha sido ampliamente estudiado (Frisvad, 2005; Gonzalez, et al., 2019; Jain R. et al., 2021)

## PLANTAS HALÓFITAS

Otra alternativa para mejorar la receptividad de los suelos salinos es el uso de la fitorremediación, que consiste en incorporar especies de plantas que

posean un elevado potencial de producción de biomasa, acompañado por la capacidad de tolerar ambientes extremos (Vera, 2016; Bernabé et al. 2020; Rahim et al. 2019). El costo de los tratamientos físico-químicos sumado a su poca acción remediadora, han impulsado la investigación de alternativas sustentables, que ofrezcan una solución al problema de la salinidad del suelo (Girón, 2019; González et al. 2019; Guevara et al. 2020). En ese sentido la fitorremediación, también conocida como biorremediación vegetativa, es un enfoque para la remediación de suelos salinos mediante el cultivo de plantas que acumulan o son tolerantes a la sal, esta opción se percibe como una técnica sostenible y rentable; el uso de plantas halófitas en zonas afectadas por altas concentraciones de sal y los diversos mecanismos de remediación que emplean estas especies se ha descrito ampliamente en estudios anteriores, donde se ha evidenciado que las especies más utilizadas para la fitorremediación son principalmente plantas halófitas, hiperacumuladoras, tolerantes a la sal o transgénicas (Hasanuzzaman, 2014; Mamani, 2020; Wang Xiaogai et al., 2020; Xu, et al., 2021). Con relación a los principales mecanismos implicados en la exclusión de la sal por parte de las plantas, se ha encontrado que las raíces tienen un papel importante en el control de la concentración y la distribución de la sal (Rabhi, et al., 2015; Gutiérrez 2018; Jesús et al. 2018; Wang Xiaogai et al. 2020). De igual manera, las interacciones presentadas entre plantas y microorganismos tienen una importante influencia en la tolerancia presentada por las plantas frente al estrés salino. Las comunidades microbianas asociadas a las raíces vegetales son cruciales para el crecimiento y la salud de las plantas y, por lo tanto, se denominan el “segundo genoma” de la planta. Diferentes estudios han demostrado que las bacterias promotoras del crecimiento de las plantas (PGPB) promueven el aumento de la resis-

tencia de dichas plantas a los efectos desfavorables de la salinidad, y que por otro lado, las bacterias halotolerantes fomentan el crecimiento de las plantas en suelos salinos a través de mecanismos directos o indirectos. Así mismo los hongos micorrízicos arbusculares (FMA) pueden mejorar la resistencia de las plantas por medio de la fomentación de absorción de nutrientes, la capacidad de absorción de agua y la acumulación de osmolitos. Dado que las comunidades microbianas de los compartimentos de la zona radicular adquieren nutrientes en gran medida a partir de exudados radiculares y desechos vegetales, las especies vegetales tolerantes a la sal pueden influir en gran medida en la composición y la función de la comunidad microbiana (Nagaraju et al. 2020; Wang Xiaogai et al., 2020; Shrikumar, 2020; Tarroum et al. 2021).

Las plantas halófitas pueden adaptarse a diferentes situaciones para poder sobrevivir y reproducirse en ambientes salinos, uno de los mecanismo que emplean es concentrar en sus hojas la sal, algunas especies por ejemplo pueden llevar a cabo su ciclo de vida a diversas concentraciones de sal, excediendo los 200 mm de NaCl, de hecho este tipo de plantas son aproximadamente el 1% de la flora del planeta; dichas especies adaptadas a crecer en suelos salinos pueden ser regadas con aguas salinas y su cultivo extensivo podría contribuir a la disminución de los niveles de salinidad, mejorando la disponibilidad de nutrientes, la fertilidad, aumentando la materia orgánica, adicionalmente se favorece el almacenamiento de carbono en el suelo, lo cual contribuye con la disminución de gases de efecto invernadero (Hasanuzzaman, 2014; Vera, 2016; Bernabé, 2018; Marco et al., 2019; Wang Xiaogai et al., 2020; Agudelo et al. 2021; Ghanem et al. 2021).

Varios estudios evidencian que el uso de plantas disminuye significativamente la conductividad eléctrica del suelo, absorbiendo sales solubles, prin-

cialmente sodio. lo cual se ha relacionado con la secreción de sustancias en las raíces de las plantas (ácido cítrico y alico) que disminuye también el pH (Hasanuzzaman, 2014; Arora & Gururaja, 2017; Ebadi, et al., 2018; Wang Xiaogai et al., 2020; Xu, et al., 2021), Además, un mejor desarrollo de los sistemas radiculares podría aumentar la porosidad del suelo, lo que también podría contribuir a la desalinización del suelo a través de la lixiviación (Kayama, 2001; Rabhi et al., 2008; Hanco, 2017).

## CONCLUSIONES

El interés por desarrollar estrategias más sostenibles frente a diferentes problemáticas del suelo, ha ido aumento en los últimos años; prueba de ello es la información que se ha generado sobre la biorremediación de ambientes contaminados; particularmente con relación a la degradación química del suelo por altas concentraciones salinas, en los últimos 20 años se ha venido demostrando el alto potencial que tienen bacterias, hongos y plantas, como alternativa para el manejo de los suelos salinos. Aunque aún no se han desarrollado muchos estudios en campo, es importante resaltar que las investigaciones in vitro y en invernadero dan cuenta del interés y potencial biotecnológico de estos organismos halófilos.

Bacterias y hongos, se han aislado de ambientes hipersalinos, y junto con plantas halófitas han demostrado tener alta eficiencia en procesos de bioacumulación y movilización de sales, esta revisión pone en evidencia investigaciones que podrían promover el desarrollo de una estrategia de biorremediación, alternativa más sostenible que el tratamiento convencional, que contemple el uso de los microorganismos y las plantas para disminuir las concentraciones de sales de áreas degradadas por esta condición.

La degradación del suelo como resultado de diferentes procesos como la contaminación, sobreexplotación y mal uso, puede ocasionar la desertificación, que en la actualidad es una de las problemáticas socioambientales más compleja, la desertificación es la pérdida total de la estructura y capacidad del suelo de producir alimentos y sostén, en ese sentido contribuir con el conocimiento y el desarrollo de nuevas alternativas para el manejo de estos suelos podría incidir en la seguridad alimentaria de las comunidades.

### AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca y a los docentes pertenecientes al semillero de investigación Neonature por el acompañamiento durante este proceso de escritura. A cada uno de nuestros familiares y amigos.

### BIBLIOGRAFÍA

1. Abradelo, D. G. 2018. Degradación en condiciones hipersalinas de hidrocarburos policíclicos aromáticos y compuestos farmacéuticos mediante las cepas halófilas *Aspergillus sydowii*-like H1 y *Aspergillus destruens* EXF10411. Tesis de Maestría México. Universidad Autónoma del Estado de Morelos.
2. Agudelo, A., Carvajal, M. y Martínez-Ballesta, M., 2021. Halophytes of the Mediterranean Basin—Underutilized Species with the Potential to Be Nutritious Crops in the Scenario of the Climate Change. *Foods*, 10(1), p.119.
3. Akpolat, C; Ventosa, A; Birbir, M; Sanchez-Porro, C y Caglayan, P. 2015. Molecular Identification of Moderately Halophilic Bacteria and Extremely Halophilic Archaea Isolated from Salted Sheep Skins Containing Red and Yellow Discolorations. *Journal of the American Leather Chemists Association* Vol. 110 No. 07
4. Álava Chumo, D. G., & Haz Villamar, E. G. 2017. Aplicación de cócteles microbiano y bovinaza-cascarilla de arroz para la recuperación de muestras de suelos salinos del sitio Correagua, Manabí (Bachelor's thesis, Calceta: ESPAM). Tesis pregrado. Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López de Ecuador.
5. Alcaraz Ariza, F., 2012. Geobotánica Tema 18: Salinidad y vegetación. [Internet] Um.es. Disponible en: <<https://www.um.es/docencia/geobotanica/ficheros/tema18.pdf>> [Consulta 26 Octubre 2021].
6. Ali, I., Khaliq, S., Sajid, S. and Akbar, A., 2019. Biotechnological Applications of Halophilic Fungi: Past, Present, and Future. *Fungi in Extreme Environments: Ecological Role and Biotechnological Significance*, pp.291-306.
7. Arora, S. and Vanza, M., 2017. Microbial Approach for Bioremediation of Saline and Sodic Soils. *Bioremediation of Salt Affected Soils: An Indian Perspective*, pp.87-100.
8. Arora, S., Singh, A. and Singh, Y., 2017. Bioremediation of Salt Affected Soils: An Indian Perspective.
9. Arora, S. and Gururaja Rao, G., 2017. Bioremediation of Salt Affected Soils: An Indian Perspective.
10. Babelis, G. C., & Liotta, M. A. 2011. Re-

- cuperación de suelos salinos. Artículo de Divulgación. Editorial EEA San Juan. Disponible en: <https://repositorio.inta.gob.ar/xmlui/handle/20.500.12123/6284> (Consulta 5 septiembre 2021)
11. Banciu, H., Enache, M., Rodriguez, R., Oren, A. and Ventosa, A., 2019. Ecology and physiology of halophilic microorganisms – Thematic issue based on papers presented at Halophiles 2019 – 12th International Conference on Halophilic Microorganisms, Cluj-Napoca, Romania, 24–28 June, 2019. *FEMS Microbiology Letters*, 366(23).
  12. Bandera, R. 2013. Rehabilitación de suelos salino-sódicos: evaluación de enmiendas y de especies forrajeras. Doctoral dissertation, Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires.
  13. Bano, A., Hussain, J., Akbar, A., Mehmood, K., Anwar, M., Hasni, M., Ullah, S., Sajid, S. y Ali, I., 2018. Biosorption of heavy metals by obligate halophilic fungi. *Chemosphere*, 199, pp.218-222.
  14. Berdugo, S. E. B. 2009. El uso de hongos micorrízicos arbusculares como una alternativa para la agricultura. *Biotecnología en el sector agropecuario y agroindustrial*, 7(1), pp.123-132.
  15. Bernabé Quintana, C. M., y Tesen Rojas, P. D. P. 2020. Eficiencia de fitorremediación del almajo salado “*Salicornia fruticosa*” para recuperar suelos salinos del sector baldera–distrito de san José, Lambayeque, 2018. Tesis pregrado. Universidad de Lambayeque, Perú.
  16. Bernal, M. P., Albuquerque, J. A., & Moral, R. 2009. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. *Bioresource technology*, 100(22), pp.5444-5453.
  17. Brutti, L. N., Beltran, M. J., y García de Salamone, I. 2018. Biorremediación de los recursos naturales. Ediciones INTA.
  18. Can-Herrera, L., Gutierrez-Canul, C., Dzul-Cervantes, M., Pacheco-Salazar, O., Chi-Cortez, J. and Carbonell, L., 2021. Identification by molecular techniques of halophilic bacteria producing important enzymes from pristine area in Campeche, Mexico. *Brazilian Journal of Biology*, 83.
  19. Cerda, E. R., Nuncio, R. A. A., Trejo, J. A. M., Hernández, M. F., Ramírez, J. O., & Gamboa, J. C. V. 2007. Aprovechamiento y mejoramiento de un suelo salino mediante el cultivo de pastos forrajeros. *Técnica Pecuaria en México*, 45(1), pp.19-24.
  20. Corral, P., Amoozegar, M. and Ventosa, A., 2019. Halophiles and Their Biomolecules: Recent Advances and Future Applications in Biomedicine. *Marine Drugs*, 18(1), p.33.
  21. Cotrina Chuquimango, Y. A. 2019. Hongos micorrízicos arbusculares aislados de suelo radicular de *Portulaca oleracea* L. como potenciales promotores del crecimiento de plantas en suelos salinos. Tesis Licenciatura. Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Perú.
  22. Didari, M., Bagheri, M., Amoozegar, M., Bouzari, S., Babavalian, H., Tebyanian, H., Hossainshahian, M. y Ventosa, A., 2020. Diversity of halophilic and halotolerant bacteria in the largest seasonal hypersaline lake (Aran-Bidgol-Iran). *Journal of Environmental Health Science and Engineer-*

ring, 18(2), pp.961-971.

23. Djedidi, Z., Drogui, P., Ben Cheikh, R., Mercier, G. and Blais, J., 2005. Laboratory Study of Successive Soil Saline Leaching and Electrochemical Lead Recovery. *Journal of Environmental Engineering*, 131(2), pp.305-314.

24. Ebadi, A., Khoshkholgh Sima, N., Olamaee, M., Hashemi, M. y Ghorbani Nasrabadi, R., 2018. Remediation of saline soils contaminated with crude oil using the halophyte *Salicornia persica* in conjunction with hydrocarbon-degrading bacteria. *Journal of Environmental Management*, 219, pp.260-268.

25. Frisvad, J., 2005. Halotolerant and Halophilic Fungi and Their Extracellular Production. *Cellular Origin, Life in Extreme Habitats and Astrobiology*, pp.425-439.

26. Fustamante, N., & Rivas, A. 2019. Eficiencia de las enmiendas orgánicas en la recuperación de suelos salinos en el distrito de San Vicente De Cañete – Lima. Tesis Licenciatura. Universidad Peruana Unión, Lima, Perú.

27. Galindo, L. A. G., Rivas, A. C., Melendez, J. P., y Mayorquín, N. 2020. Alternativas microbiológicas para la remediación de suelos y aguas contaminados con fertilizantes nitrogenados. *Scientia et Technica*, 25(1), pp. 172-183.

28. Ghanem, A., Mohamed, E., Kasem, A. y El-Ghamery, A., 2021. Differential Salt Tolerance Strategies in Three Halophytes from the Same Ecological Habitat: Augmentation of Antioxidant Enzymes and Compounds. *Plants*, 10(6), p.1100.

29. Giron Pinto, J., 2019. Evaluación documental de los métodos de restauración de suelos salinos, con influencia en el distrito de riego Usochicamocha, departamento de Boyacá. [internet] *Ciencia Unisalle*. Disponible en: <[https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_ambiental\\_sanitaria/1170/](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/1170/)> [Consulta 28 Octubre 2021].

30. González, N. T., Méndez, J. P., García, F. P., Sandoval, O. A. A., y Santillán, Y. M. 2019. Tecnologías de remediación para suelos salinos.: Un caso de estudio: México. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 10(1), pp.13-26.

31. González-Abradelo, D., Pérez-Llano, Y., Peidro-Guzmán, H., Sánchez-Carbente, M., Folch-Mallol, J., Aranda, E., Vaidyanathan, V., Cabana, H., Gunde-Cimerman, N. and Batista-García, R., 2019. First demonstration that ascomycetous halophilic fungi (*Aspergillus sydowii* and *Aspergillus destruens*) are useful in xenobiotic mycoremediation under high salinity conditions. *Bioresource Technology*, 279, pp.287-296.

32. Guevara Ordoñez, I.A. 2021 Aislamiento e Identificación de Bacterias Halófilas Para la Bioremediación de Suelos Salinos. Tesis pregrado ingeniería ambiental. Universidad César Vallejo, Chiclayo, Perú.

33. Guevara Luna, J., Arroyo-Herrera, I., Baehna Osorio, Y., Román-Ponce, B., y Vásquez-Murrieta, M. S. 2020. Suelos salinos: fuente de microorganismos halófilos asociados a plantas y resistentes a metales. *Alianzas y Tendencias - BUAP*, Vol. 5, No. 17

34. Guida-Johnson, B., Abraham, E. M., & Cony, M. A. 2017. Salinización del suelo en tie-

rras secas irrigadas: perspectivas de restauración en Cuyo, Argentina. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 49(1), pp. 205-215.

35. Gunde-Cimerman, N., Ramos, J. and Plemenitaš, A., 2009. Halotolerant and halophilic fungi. *Mycological Research*, 113(11), pp.1231-1241.

36. Gutiérrez Segura, J. (2018). Halófitas como alternativa en la fitorremediación, producción agrícola y otros usos. Tesis Pregrado Biología. Universidad de Jaén, Andalucía, España.

37. Hasanuzzaman, M., Nahar, K., Alam, M., Bhowmik, P. C., Hossain, M., Rahman, M. M., y Fujita, M. 2014. Potential use of halophytes to remediate saline soils. *BioMed research international*, 2014.

38. Hernandez Araujo, J. A; Gascó Guerrero, G; Mármol, L; Bárcenas, J y Polo, V 2011. Biorrecuperación de suelos salinos con el uso de materiales orgánicos. *Rev. Fac. Agron. (LUZ)*. 2013, 30: pp.481-503

39. Jain, R., Nigam, H., Kalia, S., Chauhan, N., Gola, D., Tyagi, P., Gola, S. and Arya, A., 2021. Halophilic Fungal Communities: Current Research and Future Challenges. *Fungal Biology*, pp.203-218.

40. Jain, S., Choudhary, D. and Varma, A., 2021. Ecological Perspectives of Halophilic Fungi and their Role in Bioremediation. *Soil Bioremediation*, pp.175-192.

41. Jalali, M., & Ranjbar, F. 2009. Effects of sodic water on soil sodicity and nutrient leaching in poultry and sheep manure amended soils. *Geoder-*

*ma*, 153(1-2), pp.194-204.

42. Jesus, J., Danko, A., Fiúza, A. y Borges, M., 2018. Comparison of Vegetative Bioremediation and Chemical Amendments for Non-calcareous Highly Saline-Sodic Soil Remediation. *Water, Air, & Soil Pollution*, 229(8), pp. 1-10.

43. Kayama, M. 2001. Comparison of the aluminum tolerance of *Miscanthus sinensis* Anders. and *Miscanthus sacchariflorus* Benth. in hydroculture. *International Journal of Plant Sciences*, 162(5), pp.1025-1031.

44. Lamz Piedra, A., y González Cepero, M. C. 2013. La salinidad como problema en la agricultura: la mejora vegetal una solución inmediata. *Cultivos tropicales*, 34(4), pp.31-42.

45. Lavado, R. S. 2017. Avances en manejo y recuperación de suelos salinos-sódicos. Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes e INBA (CONICET/UBA). Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Av. San Martín 4453, C1417DSE Buenos Aires, Argentina.

46. Liu, C., Baffoe, D., Zhan, Y., Zhang, M., Li, Y. and Zhang, G., 2019. Halophile, an essential platform for bioproduction. *Journal of Microbiological Methods*, 166, p.105704.

47. Lope Lope, G. J. 2021. Rehabilitación de suelos salinos-sódicos con enmiendas orgánica, inorgánica y práctica hidrotécnica para el cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) en invernadero. Tesis pregrado. Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.

48. Lopes da Silva, Núbia Meirelly, Fatima Ca-



- valcanti Barros, Maria de, Pereira Brito Fontenele, Angela Jessyka, Andrade de Vasconcelos, Ricardo Rafael, Quirino de Oliveira, Bruno Leonardo y dos Santos, P.M. 2014, "Application of gypsum requirement levels and water depth for correction the sodicity and salinity of saline-sodic soils", *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, vol. 8, no. 2, pp. 147-153.
49. Mamani, Florez, J.L 2020. Capacidad fitodesalinizadora de especies halófitas para suelos salinos – sódicos, en condiciones de invernadero. Tesis Maestría. Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.
50. Manzano Banda, J. I., Rivera Ortiz, P., Briones Encinia, F., & Zamora Tovar, C. 2014. Rehabilitación de suelos salino-sódicos: estudio de caso en el distrito de riego 086, Jiménez, Tamaulipas, México. *Terra Latinoamericana*, 32(3), pp. 211-219.
51. Marco, P., Carvajal, M. y del Carmen Martínez-Ballesta, M. 2019. El reparto eficiente de solutos foliares en *Salicornia fruticosa* permite el crecimiento en condiciones de salinidad. *Botánica ambiental y experimental*, 157, pp.177-186.
52. Martínez-Villavicencio, N., López-Alonzo, C. V., Pérez-Leal, R., & Basurto-Sotelo, M. 2011. Efectos por salinidad en el desarrollo vegetativo. *Tecnociencia Chihuahua*, 5(3), pp.156-161.
53. Mata-Fernández, I., Rodríguez-Gamiño, M. L., López-Blanco, J., & Vela-Correa, G. 2014. Dinámica de la salinidad en los suelos. *Revista Digital del Departamento El Hombre y su Ambiente*, 1(5), pp.26-35.
54. Müller, V., & Saum, S. H. 2005. The chloride regulon of *Halobacillus halophilus*: a novel regulatory network for salt perception and signal transduction in bacteria. En N. Gunde-Cimerman, A. Oren, & A. Plemenitas (Eds.), *Adaptation to Life at High Salt Concentrations in Archaea, Bacteria, and Eukarya*. New York, USA: Springer, pp. 301-310.
55. Nagaraju, Y., Gundappagol, R. y Mahadevaswamy, 2020. Mining Saline Soils to Manifest Plant Stress-Alleviating Halophilic Bacteria. *Current Microbiology*, 77(9), pp.2265-2278.
56. Naranjo-Briceño, L., Pernía, B., Guerra, M., Demey, J. R., De Sisto, Á., Inojosa, Y., ... & Yegres, F. 2013. Potential role of oxidative exoenzymes of the extremophilic fungus *Pestalotiopsis palmarum* BM-04 in biotransformation of extra-heavy crude oil. *Microbial biotechnology*, 6(6), pp.720-730.
57. Neifar, M., Maktouf, S., Ghorbel, R. E., Jaouani, A., & Cherif, A. 2015. Extremophiles as source of novel bioactive compounds with industrial potential. *Biotechnology of bioactive compounds: sources and applications*. Wiley, Hoboken, pp.245-268.
58. O'Geen, A., 2018. Consejos sobre la sequía: Recuperar los suelos salinos, sódicos y salino-sódicos.
59. Oren A, Gunde-Cimerman, N., Ramos, J. and Plemenitaš, A., 2009. Halotolerant and halophilic fungi. *Mycological Research*, 113(11), pp.1231-1241.
60. Pasache Chapoñán, R. P. 2021. Rehabilitación de suelos salinos-sódicos con dos mejoradores químicos en la parte baja del Valle Chancay-Lam-

bayeque, 2018. Tesis Maestría. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.

61. Pérez, A., Rojas, J., & Montes, D. 2011. Hongos formadores de micorrizas arbusculares: una alternativa biológica para la sostenibilidad de los agroecosistemas de praderas en el caribe colombiano. *Revista Colombiana de Ciencia Animal-RE-CIA*, 3(2), pp.366-385.

62. Perla, G. S., Marando, I. G., Irisarri, E. J., & Sagardoy, R. M. 2004. Efecto de las técnicas de lavado y fertilización sobre la salinidad en suelos del Alto Valle de Río Negro y Neuquén, Argentina. *Agricultura Técnica*, 64(3), pp.295-304.

63. Plemenitaš, A., Vaupotič, T., Lenassi, M., Kogej, T. and Gunde-Cimerman, N., 2008. Adaptation of extremely halotolerant black yeast *Horvathia werneckii* to increased osmolarity: a molecular perspective at a glance. *Studies in Mycology*, 61, pp.67-75.

64. Plemenitaš, A., Lenassi, M., Konte, T., Kežar, A., Zajc, J., Gostinčar, C. y Gunde-Cimerman, N., 2014. Adaptation to high salt concentrations in halotolerant/halophilic fungi: a molecular perspective. *Frontiers in Microbiology*, 5.

65. Rabhi, M., Talbi, O., Atia, A., Abdelly, C. and Smaoui, A., 2008. Selection of a halophyte that could be used in the bioreclamation of salt-affected soils in arid and semi-arid regions. *Biosaline Agriculture and High Salinity Tolerance*, pp.241-246.

66. Rabhi, M., Atia, A., Abdelly, C. and Smaoui, A., 2015. New parameters for a better evaluation of vegetative bioremediation, leaching, and phytodesalination. *Journal of Theoretical Biology*, 383,

pp.7-11.

67. Rahim, F., Hamid, T. and Zainuddin, Z., 2019. *Jatropha curcas* as a potential plant for bauxite phytoremediation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 308, p.012006.

68. Ramírez, M. E., Limas, E. A., Ortiz, P. R., & Díaz, A. R. 2011. Degradación de suelos por actividades antrópicas en el norte de Tamaulipas, México. *Papeles de geografía*, (53-54), pp.77-88.

69. Ramírez, M.E., Vélez, Y.H., Rendón, I. & Alzate, E. 2018. Potential of microalgae in the bioremediation of water with chloride content. *Brazilian Journal of Biology Revista Brasileira de Biologia*, vol. 78, no. 3, pp. 472-476.

70. Ramírez, N., Sandoval, N. H., & Serrano, J. A. 2004. Las bacterias halófilas y sus aplicaciones biotecnológicas. *Revista de la Sociedad Venezolana de Microbiología*, 24, pp.12-23.

71. Roca, N., & Pazos, M. S. 2007. Clasificación comparada de los suelos salino-sódicos de Fray Mamerto Esquiú (Argentina) con la WRB y la taxonomía de suelos. *Terra Latinoamericana*, 25(3), pp.231-238.

72. Rodríguez Aristizábal, M.A., Higuera Mora, N. C., Sanjuanelo Corredor, D. W., 2019. "Bacterias halófilas con potencial para la recuperación de suelos salinizados en Sáchica-Boyacá, Colombia", *Revista de Biología Tropical* 67(3), pp. 621-632.

73. Rueda, J. M. T. 2019. Aprovechamiento del suelo salino: agricultura salina y recuperación de suelos. *Apthapi*, 5(1), pp.1539-1563

74. Sánchez Bernal, E. I, Ortega Escobar, H.M, Sandoval Orozco, G. T, Hernández Vriuel, R.A & Estrada Vázquez, C. 2012. Lavado de sales en suelos aluviales costeros de Oaxaca, México, con aguas residuales municipales tratadas. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 28(4), pp.343-360.
75. Sánchez Leal, L., & Arguello, A. H. 2006. Capacidad de bacterias halófilas para capturar sodio in vitro y su posible aplicación en biorremediación en suelos salinos-sódicos. *Revista Nova*, 4, pp.19-32.
76. Sentis, I., 2012. Problemas de degradación de suelos en América Latina: Evaluación de causas y efectos. Quito, Ecuador. [Internet] Secsuelo.org. Disponible en: <<http://www.secsuelo.org/wp-content/uploads/2015/06/1.-Problemas-de-Degradacion1.pdf>> [Consulta 28 Octubre 2021].
77. Shivanand, P., & Mugeraya, G. 2011. Halophilic bacteria and their compatible solutes-osmoregulation and potential applications. *Current Science*, 100(10), pp.1516-1521.
78. Shrikumar Vijaykumar Mahamuni 2020, "ATTRIBUTES OF PROSPECTIVE PLANT GROWTH PROMOTING HALOPHILIC BACTERIA (PGPHB) SCREENED FROM SALINE SOILS OF BARAMATI TEHSIL OF MAHARASHTRA STATE (INDIA)", *The Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, vol. 10, no. 1, pp. 117-121.
79. Suarez Beltrán, R. M. 2013. Guía de métodos de biorremediación para la recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos. Tesis Especialización Gerencia Ambiental. Universidad Libre, Bogotá, Colombia.
80. Tarroum, M., Walid Ben Romdhane, Mohamed Ali, A. A., Al-Qurainy, F., Al-Doss, A., Fki, L., et al. 2021. Harnessing the rhizosphere of the halophyte grass *aeluopus littoralis* for halophilic plant-growth-promoting fungi and evaluation of their biostimulant activities. *Plants*, 10(4),p.784.
81. Ventosa, A., de la Haba, Rafael R., Sánchez-Porro, C., & Papke, R. T. 2015. Microbial diversity of hypersaline environments: A metagenomic approach. *Current Opinion in Microbiology*, 25, pp.80-87.
82. Vera, J. T., Fernández, M. M., Nicosia, M. G., Plasencia, A. M., Olea, L. E., Coletti, A. G., & Agüero, S. N. 2016. Recuperación de suelos salinos mediante la implantación de Grama Rhodes (*Chloris gayana* Kunth.) cv. Callide, en la Llanura Deprimida del límite Tucumán-Santiago del Estero: Recovery of saline soils by sowing of Grama Rhodes (*Chloris gayana* Kunth.) cv. Callide, on the Plain Depressed of the limit Tucuman-Santiago del Estero. *Revista agronómica del noroeste argentino*, 36(1), pp.65-70.
83. Walker, D. J., & Bernal, M. P. 2008. The effects of olive mill waste compost and poultry manure on the availability and plant uptake of nutrients in a highly saline soil. *Bioresource technology*, 99(2), pp.396-403.
84. Xu, Y., Zheng, C., Liang, L., Yi, Z., & Xue, S. 2021. Quantitative assessment of the potential for soil improvement by planting miscanthus on saline-alkaline soil and the underlying microbial mechanism. *GCB Bioenergy*, 13(7), pp.1191-1205.
85. Zajc, J., Liu, Y., Dai, W., Yang, Z., Hu, J.,

Gostinčar, C. and Gunde-Cimerman, N., 2013. Genome and transcriptome sequencing of the halophilic fungus *Wallemia ichthyophaga*: haloadaptations present and absent. *BMC Genomics*, 14(1).

86. Zúñiga Escobar, O., Osorio Saravia, J. C., Cuero Guependo, R., & Peña Ospina, J. A. 2011. Evaluación de Tecnologías para la Recuperación de Suelos degradados por Salinidad. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 64(1), pp.5769-5779.

87. Hanco Olivera, C. C. 2017. Desalinización con *Beterraga* (*Beta vulgaris* L.) asociada al vermicompost y cal agrícola para el mejoramiento de la calidad del suelo, Cañete, 2017.