

**EFECTO DEL COMPOST Y YESO AGRÍCOLA EN LA REMEDIACIÓN DE SUELOS
SALINOS EN LA ZONA 5 DE LA YARADA, TACNA**

**EFFECT OF COMPOST AND AGRICULTURAL GYPSUM ON THE REMEDIATION OF
SALINE SOILS IN ZONE 5 OF LA YARADA, TACNA**

Autor: R.J. Fred Bruce Capia Arenas.

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-5566-9769>

E-mail de contacto: rjfbcapiaa@unjbg.edu.pe

Artículo recibido: 5 de julio del 2025

Artículo revisado: 7 de julio del 2025

Artículo aprobado: 16 de julio del 2025

Afiliación: ¹*Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, (Perú).

¹Estudiante de la carrera profesional de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, (Perú).

Resumen

El objetivo de este estudio fue evaluar la eficiencia de la aplicación del compost y yeso agrícola en la recuperación de suelos salinos en una zona árida. Para ello, se realizaron ensayos experimentales en suelos previamente caracterizados por alta salinidad, a los que se aplicaron diferentes dosis de compost agrícola. La metodología incluyó el seguimiento de variables fisicoquímicas del suelo, como la conductividad eléctrica (CE) y el pH, durante un periodo de observación determinado. Los resultados mostraron que la incorporación de materia orgánica y el yeso agrícola permitió reducir significativamente la salinidad del suelo, evidenciada por la disminución de la conductividad eléctrica, así como mejorar la capacidad de retención de humedad y la estructura del suelo. En conclusión, la adición de materia orgánica representa una alternativa viable, de bajo costo y ambientalmente sostenible para mitigar los efectos negativos de la salinización en suelos agrícolas, especialmente en regiones áridas y semiáridas donde este problema limita el rendimiento y la calidad de los cultivos. Los hallazgos de este estudio resaltan la importancia de prácticas de manejo sostenible del suelo como estrategia clave para enfrentar la degradación y conservar la fertilidad de las tierras afectadas por salinidad.

Palabras clave: Suelos salinos, Materia orgánica, Remediación, Conductividad eléctrica, Agricultura sostenible.

Abstract

The objective of this study was to evaluate the efficiency of applying compost and agricultural gypsum in the recovery of saline soils in an arid area. To this end, experimental trials were conducted on soils previously characterized by high salinity, to which different doses of agricultural compost were applied. The methodology included monitoring physicochemical soil variables, such as electrical conductivity and pH, during a specific observation period. The results showed that the incorporation of organic matter and agricultural gypsum significantly reduced soil salinity, as evidenced by the decrease in electrical conductivity, and improved moisture retention capacity and soil structure. In conclusion, the addition of organic matter represents a viable, low-cost, and environmentally sustainable alternative to mitigate the negative effects of salinization in agricultural soils, especially in arid and semi-arid regions where this problem limits crop yield and quality. The findings of this study highlight the importance of sustainable soil management practices as a key strategy for addressing degradation and conserving the fertility of soils affected by salinity.

Keywords: Saline soils, Organic matter, Remediation, Electrical conductivity, Sustainable agriculture.

Sumário

O objetivo deste estudo foi avaliar a eficiência da aplicação de composto e gesso agrícola na recuperação de solos salinos numa zona árida. Para isso, foram realizados ensaios experimentais em solos previamente caracterizados por alta salinidade, aos quais foram aplicadas diferentes doses de composto agrícola. A metodologia incluiu o acompanhamento de variáveis físico-químicas do solo, como a condutividade elétrica e o pH, durante um período de observação determinado. Os resultados mostraram que a incorporação de matéria orgânica e gesso agrícola permitiu reduzir significativamente a salinidade do solo, evidenciada pela diminuição da condutividade elétrica, bem como melhorar a capacidade de retenção de humidade e a estrutura do solo. Em conclusão, a adição de matéria orgânica representa uma alternativa viável, de baixo custo e ambientalmente sustentável para mitigar os efeitos negativos da salinização em solos agrícolas, especialmente em regiões áridas e semiáridas onde este problema limita o rendimento e a qualidade das culturas. Os resultados deste estudo destacam a importância das práticas de manejo sustentável do solo como estratégia fundamental para enfrentar a degradação e conservar a fertilidade das terras afetadas pela salinidade.

Palavras-chave: Solos salinos, Matéria orgânica, Remediação, condutividade elétrica, Agricultura sustentável.

Introducción

El valle de Tacna se caracteriza por una precipitación pluvial sumamente escasa y esporádica. La disponibilidad de recursos hídricos superficiales, como los ríos, resulta muy limitada y de escasa viabilidad para el riego agrícola. Por esta razón, los agricultores de la Zona 5 de la Yarada han optado por suplir esta carencia mediante la explotación de aguas subterráneas, haciendo uso de pozos

debidamente autorizados para la extracción, con el fin de garantizar el abastecimiento hídrico necesario para sus cultivos (Servicio Nacional de Certificación Ambiental para las Inversiones Sostenibles, 2023). Los cultivos en la región se encuentran documentados como medida para monitorear el volumen de las aguas subterráneas, recurso vital en un territorio caracterizado por su marcada aridez. No obstante, entre las actividades económicas de mayor relevancia en Tacna destacan aquellas que dependen de manera preponderante de la explotación de acuíferos subterráneos, tales como el cultivo de alfalfa, maíz, olivos y frutales. A esta demanda agrícola se suman además los usos públicos y domésticos, que en su conjunto configuran una presión significativa sobre los limitados recursos hídricos subterráneos de la región (Corporación Departamental del Desarrollo de Tacna, 1983).

Una de las principales causas que explican el fenómeno de intrusión salina y, por ende, la progresiva degradación de los acuíferos del valle de Tacna, radica en la sobreexplotación del recurso hídrico subterráneo, destinada fundamentalmente a actividades agrícolas. Esta extracción alcanza un volumen anual estimado de 111 Hm³, cifra que prácticamente duplica la reserva renovable calculada en torno a 54 Hm³/año, configurando así un déficit anual de aproximadamente 57 Hm³. A esta presión excesiva se suma la existencia de pozos clandestinos o sin licencia de funcionamiento, cuya explotación escapa a cualquier tipo de control técnico. Asimismo, la escasa recarga natural consecuencia directa del clima árido y de la limitada precipitación en la región agrava esta situación crítica. Como efecto tangible de esta sobreexplotación sostenida, diversos informes técnicos documentan el avance de la

intrusión marina, que se manifiesta a través de un incremento significativo en las concentraciones de cloruros, especialmente en sectores como La Esperanza, Los Palos y Las Palmeras. Complementariamente, los estudios geoelectrónicos revelan la presencia de capas con resistividades muy bajas (5.2–6.6 Ohm), lo que corrobora un alto grado de mineralización en la zona costera y confirma la notable vulnerabilidad del acuífero frente a los procesos de salinización (Pino et al., 2019).

La salinidad y el elevado contenido de sodio intercambiable son factores limitantes decisivos para la productividad de cultivos estratégicos como el nogal en pecanero en el Valle del Yaqui. La acumulación progresiva de sales, especialmente intensificada por el empleo de aguas de riego de menor calidad durante los periodos de estiaje, induce una degradación significativa de las propiedades químicas y físicas del suelo: se eleva la conductividad eléctrica, se incrementa la relación de adsorción de sodio y el porcentaje de sodio intercambiable, y se produce una dispersión de las partículas de arcilla que reduce la permeabilidad y dificulta el movimiento de agua y nutrientes. Este deterioro repercute de manera directa en la absorción de nutrientes y en el desarrollo radicular, limitando el crecimiento del cultivo, disminuyendo el rendimiento por árbol y comprometiendo la sostenibilidad agrícola del sistema productivo (Trasviña et al., 2018).

El auge agroexportador en el valle de Ica impulsó una fuerte expansión agrícola sustentada en la sobreexplotación de acuíferos subterráneos, cuya agua —de mejor calidad que la superficial— resultaba clave para cultivos de alta rentabilidad y demanda internacional. Sin

embargo, la extracción intensiva y el descenso progresivo del nivel freático generaron un proceso crítico de salinización de los suelos y acumulación de sodio intercambiable, fenómeno agravado por el uso de aguas de menor calidad durante periodos de estiaje. Esta creciente salinidad degrada las propiedades químicas del suelo, limita la absorción de nutrientes, reduce el crecimiento radicular y compromete directamente la sostenibilidad de cultivos estratégicos como la vid, el espárrago y el nogal pecanero. A pesar de la adopción de tecnologías de riego más eficientes, el desequilibrio entre la presión productiva y la recarga natural del acuífero ha exacerbado la salinización. Frente a ello, la ausencia de regulaciones eficaces y la concentración del control del agua y la tierra por parte de grandes agroexportadores dificultan la implementación de estrategias de manejo sostenible que permitan mitigar la salinidad y conservar la calidad edáfica necesaria para mantener la competitividad agrícola de la región (Muñoz, 2016).

En un estudio realizado por Silva et al. (2024) en la zona de La Yarada Baja, Tacna, se evaluó la eficacia del humus y del carbón activado como alternativas de biorremediación para reducir la salinidad del suelo, un problema que afecta negativamente la productividad agrícola debido al uso excesivo de plaguicidas y prácticas de riego inadecuadas. Mediante un diseño experimental, se analizaron propiedades fisicoquímicas como la conductividad eléctrica (CE), pH, porosidad, humedad y contenido de materia orgánica antes y después de los tratamientos. Los resultados demostraron que la combinación de humus y carbón activado redujo significativamente la CE a un promedio de 2.5 mS/cm y mejoró la porosidad y el

contenido de materia orgánica del suelo. Sin embargo, no se observaron mejoras significativas en la germinación de semillas, lo que indica que persisten otros factores limitantes que requieren mayor investigación. Este estudio constituye una base importante para el desarrollo de tecnologías de remediación sostenible aplicables a suelos salinos. Los suelos salinos aparecen principalmente en regiones de clima árido o semiárido. En regiones húmedas, las sales solubles presentes en el suelo o formadas por meteorización suelen ser arrastradas por el agua de lluvia hacia aguas subterráneas y finalmente hasta el mar, por lo que la salinización es muy rara. La salinidad del suelo causa una mala estructura del suelo, reduciendo su permeabilidad, disminuye disponibilidad de agua para las plantas por efecto osmótico, el equilibrio químico es alterado por lo tanto se reduce la disponibilidad de nutrientes esenciales y provocando toxicidad por exceso de sodio u otros iones (United States Department of Agriculture, 1954).

El agua de mar, caracterizada por una elevada conductividad eléctrica que ronda los 52 dS/m y una considerable relación de adsorción de sodio (RAS superior a 50), representa una fuente significativa de sales que pueden incorporarse a los suelos costeros y adyacentes, intensificando así su salinidad. Según señalan Pérez et al. (2024), a ellos se suman la influencia marina sobre la salinización de los suelos se manifiesta a través de diversos mecanismos naturales, entre los que destacan la incursión periódica de mareas altas que inundan terrenos bajos, el ingreso de aguas salobres en los cursos fluviales y estuarios, así como la filtración o afluencia hacia los acuíferos costeros que puede derivar en procesos de intrusión salina. A ello se suma la deposición atmosférica de sales transportadas

por aerosoles marinos, fenómeno que cobra particular relevancia en zonas áridas y semiáridas con limitada precipitación, donde el lavado natural de sales es insuficiente para contrarrestar la acumulación progresiva en el perfil edáfico. Este conjunto de procesos convierte a la cercanía al litoral en un factor determinante que agrava la salinización de los suelos, comprometiendo sus propiedades fisicoquímicas, su fertilidad y, por ende, la productividad agrícola de los sistemas cultivados en regiones costeras (Muñoz, 2016).

La salinidad del suelo se cuantifica habitualmente a través de la medición de su conductividad eléctrica (CE), parámetro que refleja la aptitud del suelo para transmitir corriente eléctrica como consecuencia de la presencia y concentración de sales solubles en la solución del suelo. En términos generales, los suelos clasificados como salinos presentan valores elevados de conductividad eléctrica, en contraste con suelos sódicos o aquellos considerados saludables, cuyos niveles de sales solubles son sensiblemente inferiores. Esta distinción permite establecer comparativas técnicas entre suelos salinos, sódicos y no salinos, fundamentales para la caracterización, manejo y recuperación de suelos afectados por procesos de salinización (Corwin y Yemoto, 2020). Por otro lado, el pH del suelo condiciona la solubilidad y asimilación de nutrientes, los fosfatos se inmovilizan en suelos muy ácidos o muy básicos, mientras que elementos como Fe, Mn y Zn son más solubles a pH bajo. Un pH ácido también reduce la actividad microbiana, limitando procesos clave como la nitrificación, mientras que valores cercanos a la neutralidad favorecen la mineralización de materia orgánica. Sin embargo, un pH excesivamente alto puede bloquear nutrientes y provocar

clorosis. La Figura 1 ilustra cómo la disponibilidad de nutrientes depende del pH, cuyo equilibrio resulta de factores como el material parental, lluvias, residuos orgánicos y la saturación del complejo adsorbente (Soto, 2018).

Los valores de solubilidad de algunas sales comúnmente presentes en los suelos, expresados en gramos por litro a 20 °C, Tabla 1. Así como sus respectivos productos de solubilidad (Log K). Entre ellas destacan la halita (NaCl), que muestra una solubilidad relativamente alta (360 g/L) y un Log K de +1.55, y el nitrato de sodio (NaNO₃), con una solubilidad aún mayor (880 g/L). Otras sales como el sulfato de sodio (Na₂SO₄) y el sulfato de potasio (K₂SO₄) presentan menores valores de solubilidad, lo que puede influir en la dinámica de acumulación de sales en el perfil del suelo. La información resumida en esta tabla permite comprender la facilidad con que estas sales pueden disolverse y contribuir a la salinidad del suelo, afectando la conductividad eléctrica y, por ende, la disponibilidad de agua y nutrientes para las plantas.

Tabla 1. Solubilidad de algunas sales comúnmente presentes en el suelo. (K = producto de solubilidad)

Sal	Mineral	Gramos/L a 20°C	Log K
NaCl	halita	360	+1.55
Na ₂ SO ₄	thenardita	209	-0.86
Na ₂ CO ₃ , H ₂ O		215	+0.1
NaNO ₃		880	
KCl	silvinita	350	+0.8
K ₂ SO ₄	arcante	109	
MgCl ₂	cloromagnesita	543	+22
CaCl ₂		427	+11.5

Fuente: elaboración propia

Según los factores que influyen en la solubilidad de cada sal está la presencia de otras sales como el yeso (Bazán, 2017). El yeso está presente en los suelos de regiones áridas y

puede tener un origen sedimentario o generarse por la precipitación de calcio y sulfatos durante los procesos de salinización estos pueden encontrarse hasta en simples trazas. Este mismo yeso, aplicado como enmienda agrícola, constituye una estrategia para la recuperación de suelos salinos, pues aporta calcio soluble capaz de desplazar el sodio adsorbido en el complejo de intercambio catiónico; dicho sodio, una vez sustituido, debe ser posteriormente lixiviado para restablecer la estructura y funcionalidad del suelo. (United States Department of Agriculture, 1954). Por otro lado, también se consideran estrategias de remediación del suelo a la aplicación de diversos materiales inorgánicos y orgánicos, tales como el yeso agrícola, los ácidos o sustancias acidificantes, y minerales como la piedra caliza molida. Estos productos se emplean especialmente en el tratamiento de suelos sódicos, ya que actúan desplazando gran parte del sodio intercambiable presente en el complejo de intercambio catiónico. Este sodio es sustituido gracias a la solubilidad de estas sustancias, que liberan iones de calcio (Ca²⁺), los cuales mejoran la estructura, la permeabilidad del suelo y la zona radicular de las plantas (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1988).

Las enmiendas orgánicas constituyen un recurso natural valioso, derivado de materiales de origen vegetal, animal o incluso mixto, que se incorpora al suelo con el propósito fundamental de optimizar sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Este tipo de insumo no solo enriquece la estructura edáfica, favoreciendo la aireación y la capacidad de retención de agua, sino que también incrementa la capacidad de intercambio catiónico, regula el pH y potencia notablemente la actividad

microbiológica y enzimática del suelo. Entre las enmiendas orgánicas más empleadas destacan el abono verde, el compost, el humus de lombriz, los lodos estabilizados y el vermicompost, cada uno con características singulares que contribuyen a la restitución de nutrientes, la mejora de la materia orgánica y la rehabilitación de suelos degradados. Gracias a su compleja composición de compuestos húmicos, macro y micronutrientes, estas enmiendas constituyen un pilar esencial para contrarrestar problemas como la salinidad, fomentar la sostenibilidad de los agroecosistemas y elevar de manera perdurable la fertilidad y productividad agrícola (Pérez et al., 2024).

El compost es el resultado de la descomposición controlada de materia orgánica mediante la actividad de microorganismos en condiciones óptimas de humedad, temperatura y aireación, que transforma residuos vegetales y animales en un material estable y rico en humus. En el contexto de suelos salinos, el compost desempeña un papel esencial en su remediación, pues mejora las propiedades fisicoquímicas del suelo al aumentar su capacidad de retención de agua, disminuir la densidad aparente y favorecer el intercambio catiónico, lo que facilita el desplazamiento y lixiviación de sales acumuladas. Además, aporta nutrientes esenciales y estimula la actividad microbiana, contribuyendo así a restaurar la fertilidad y estructura del suelo afectado por la salinidad, favoreciendo un ambiente más adecuado para el desarrollo de los cultivos (Dalzell et al., 1987).

Materiales y Métodos

La muestra de suelo objeto de este estudio fue recolectada en el distrito de La Yarada-Los Palos, una zona agrícola ubicada en la provincia

de Tacna, al sur del Perú, precisamente se realizó en el sector “Zona 5”, localizada en la franja costera que caracteriza a esta región. Las coordenadas geográficas exactas corresponden a 18.153993° de latitud sur y 70.453271° de longitud oeste. La técnica empleada para la recolección fue el muestreo superficial que corresponde a una profundidad de 0-30 cm, esta fue seleccionada por su idoneidad para el tipo de suelo objeto de estudio, que corresponde a suelos destinados a uso agrícola. Este método resulta especialmente apropiado para caracterizar las propiedades físicas y químicas de la capa arable, que es la más relevante para el desarrollo de los cultivos. Además, su aplicación presenta ventajas operativas importantes, pues es un procedimiento manual, ágil y de bajo costo, lo que facilita la obtención de datos representativos de manera eficiente (Ministerio del Ambiente, 2014).

La muestra de suelo se obtuvo mediante varios sondeos, aplicando un muestreo aleatorio por conveniencia, con el objetivo de recolectar un volumen considerable de material representativo. Este procedimiento busca asegurar que las muestras recolectadas reflejen de manera adecuada las características y propiedades del suelo en el área de estudio. Posteriormente, para homogeneizar y reducir el volumen a analizar, se empleó la técnica de partición, que permite obtener una submuestra compuesta y representativa del conjunto inicial. La muestra de suelo extraída fue sometida a un proceso de secado al ambiente para eliminar la humedad residual. Posteriormente, se procedió a su molido y tamizado mediante una malla de 2 mm, con el propósito de retirar partículas gruesas y fragmentos de piedra presentes. Estas etapas de preparación tienen como objetivo obtener una muestra homogénea y

representativa, adecuada para su posterior análisis en laboratorio, donde se evaluaron parámetros clave como la conductividad eléctrica y el pH del suelo (Ministerio del Ambiente, 2014). Se empleó un diseño experimental factorial, considerando como variables dependientes el pH y la conductividad eléctrica, y como variables independientes la aplicación de compost y yeso agrícola con dos niveles (mínimo y máximo), como se muestra en la Tabla 2, incorporando además tres puntos centrales para aumentar la precisión de los datos.

Para la caracterización fisicoquímica del suelo, se analizaron parámetros clave como la conductividad eléctrica (CE) y el pH. Las mediciones se realizaron en el Laboratorio de Aguas de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, empleando un equipo multiparámetro marca HACH. Previamente, el instrumento fue calibrado siguiendo las instrucciones del fabricante, y configurado para realizar las lecturas de conductividad expresadas en microsiemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$) y decisiemens por metro (dS/m), unidades comúnmente utilizadas para la evaluación de suelos salinos. La determinación de estos parámetros se llevó a cabo a partir de una suspensión de suelo en agua destilada, elaborada siguiendo una relación suelo: agua de 1:2,5. Este procedimiento permite obtener una muestra representativa de la salinidad y del pH del suelo bajo condiciones controladas de laboratorio, garantizando así la fiabilidad de los resultados obtenidos. Cabe destacar que la conductividad eléctrica (CE) es una magnitud sensible a la temperatura, presentando un incremento proporcional conforme ésta se eleva. Por tal motivo, es fundamental corregir las lecturas cuando no se realizan exactamente

a 25 °C, que es la temperatura de referencia estandarizada. De manera práctica, puede aplicarse un factor de corrección aproximado del 2 % por cada grado Celsius que la temperatura de medición se desvíe respecto de dicho valor, a fin de expresar las lecturas ajustadas a las condiciones normales (Pérez et al., 2024).

Tabla 2: Matriz de diseño experimental de 2² con 3 puntos centrales

N° de tratamiento	Factores	
	Compost (g)	Yeso agrícola (g)
1	-1	-1
2	+1	-1
3	-1	+1
4	+1	+1
5	0	0
6	0	0
7	0	0

Fuente. elaboración propia

Para la determinación de humedad del suelo se calculó la diferencia entre la masa inicial húmeda y la masa seca tras el secado en estufa a 100°C, expresando el resultado en porcentaje respecto de la masa seca. Para estimar el porcentaje de porosidad del suelo, se determinó previamente la densidad real y la densidad aparente del material en estado seco. La densidad aparente se obtuvo pesando una probeta vacía y, posteriormente, tras llenarla con suelo seco de 50 ml, lo que permitió calcular la relación entre masa y volumen del sólido suelto. Para establecer la densidad real, se aplicó el método del picnómetro, que consistió en registrar la masa del picnómetro vacío, luego lleno con agua destilada y, finalmente, con la muestra de suelo seco, de modo que, a partir del desplazamiento de volumen, se obtuvo la densidad de las partículas. Con ambos valores, se empleó la fórmula de porosidad.

$$\% \text{Porosidad} = \left(1 - \frac{\text{densidad aparente}}{\text{densidad real}} \right) \times 100$$

Estos resultados se contrastaron con las condiciones de salinidad reportadas en el estudio agrológico del valle de Tacna y Yarada, las cuales se presentan en la Tabla 3, donde se categorizaron los distintos niveles de salinidad y grado de solidificación del suelo (Ministerio de Agricultura, 1972).

Tabla 3. Características fisicoquímicas de las diferentes condiciones de suelo

Condición	CE (dS/m)	pH	% Na intercambiable
Suelos normales	< 4	6.5-7.5	< 15
Suelos Salinos	> 4	< 8.5	< 15
Suelos salino-sódicos	> 4	> 8.5	> 15
Suelos Sódicos	< 4	> 8.5	> 15

Fuente: elaboración propia

Se prepararon los recipientes conteniendo 250 gramos de suelo salino cada uno, los cuales contienen un sistema de drenaje para facilitar el proceso de lixiviación y aireación. Posteriormente, se aplicaron dosis controladas de compost, correspondientes a 25 gramos y 75 gramos, junto con dosis de yeso agrícola de 5 gramos y 15 gramos, respectivamente, a los 3 últimos tratamientos se aplicó el promedio de los factores dándonos una dosis de 50 gramos de compost y 10 gramos de yeso agrícola. Estas fueron mezcladas cuidadosamente con el suelo con el propósito de lograr una adecuada homogeneización. Finalmente, las muestras fueron humedecidas hasta alcanzar un nivel próximo a su saturación, tras lo cual se mantuvieron expuestas a la luz ambiental durante un periodo experimental de un mes la cual se regaba esporádicamente cada 3 días. Este procedimiento permitió evaluar los efectos de las enmiendas aplicadas sobre las propiedades físicas y químicas del suelo, favoreciendo además los procesos de lixiviación y estabilización.

Resultados y Discusión

Los resultados expuestos en la Tabla 4 muestra que la humedad (H) osciló entre un máximo de 17.9 % (25 g de compost y 15 g de yeso) y un mínimo de 14.5 % (75 g de compost y 15 g de yeso), mientras que la porosidad (P) varió desde 49.6 % hasta 45.8 %.

Tabla 4. Resultados de la porosidad y humedad de los tratamientos del suelo salino

Compost (g)	Yeso agrícola (g)	Replica 1		Replica 2	
		H (%)	P (%)	H (%)	P (%)
25	5	16.9	48.7	16.4	48.3
75	5	16.1	46.2	15.2	46.5
25	15	17.9	49.6	17.0	49.1
75	15	14.5	45.8	14.5	45.8
50	10	16.8	47.8	16.0	47.5
50	10	16.4	47.3	15.8	47.3
50	10	15.5	47.4	15.9	47.4

Nota. elaboración propia

Los tratamientos con menor dosis de yeso agrícola y mayor compost lograron mayor retención de agua y mayor porosidad, en contraste con los tratamientos de mayor dosis de yeso, que redujeron estos valores. El tratamiento intermedio (50 g de compost y 10 g de yeso) presentó valores estables, con humedad entre 15.5 % y 16.8 % y porosidad cercana a 47 %, reflejando un efecto moderado y más uniforme sobre la estructura del suelo salino cuyas propiedades de porcentaje de humedad y porosidad fueron 34.4% y 7.6% respectivamente. Los resultados de los tratamientos se expresan detalladamente en la Tabla 6 y la Tabla 7, organizados según un diseño factorial de dos factores con tres puntos centrales, lo que permitió obtener un total de siete tratamientos experimentales. Por otro lado, se evaluaron las propiedades iniciales de la muestra de suelo salino, registrándose un pH de 8.3 y una conductividad eléctrica (CE) de 14 dS/m, parámetros que se encuentran claramente dentro del rango característico de los suelos salinos según la clasificación técnica.

Estos valores iniciales no sólo constituyen un referente cuantitativo indispensable para la posterior interpretación de los resultados experimentales, sino que además ofrecen una visión preliminar del grado de afectación del suelo a la fecha

Tabla 5. Resultados de los tratamientos con dosis de compost y yeso agrícola sobre el suelo salino

N°	Compost (g)	Yeso agrícola (g)	pH	CE (dS/m)
1	25	5	8.2	12.5
2	75	5	8	8.2
3	25	15	8.1	9
4	75	15	7.8	5.6
5	50	10	8.1	8.7
6	50	10	8.2	8.8
7	50	10	8	8.9

Fuente: elaboración propia

A continuación, se realiza el análisis de varianza (ANOVA), en la Tabla 7 se puede observar que tanto el factor compost ($p=0.0000$) como el factor yeso agrícola ($p=0.0000$), así como su interacción ($p=0.0001$), presentan un p valor menor a 0.05, lo que indicaría que tienen una influencia significativa sobre la variable de respuesta, pudiéndose afirmar con un 95% de

Tabla 7. Análisis de varianza aplicado al nivel de pH del suelo salino tratada

Factor de variabilidad (FV)	Suma de cuadrados (SC)	Grados de Libertad (GL)	Cuadrado medio (CM)	F calculado (FC)	F tablas (FT)
a: Compost	300.313	1	300.313	3416.65	0.0000
b: Yeso agrícola	189.112	1	189.112	2151.53	0.0000
ab	0.36125	1	0.36125	41.10	0.0001
Bloques	0.000714286	1	0.000714286	0.08	0.7820
Error total	0.0791071	9	0.00878968		
Total (corr.)	493.836	13			

Fuente: elaboración propia

Los valores de la ecuación de la Tabla 9 muestra que, al aumentar las dosis de compost y yeso agrícola, el pH del suelo tiende a disminuir; además, existe una ligera interacción positiva entre ambos insumos que modera ese efecto como se aprecia en el modelo de la ecuación: $pH = 16.6214 - 0.0945(Compost) - 0.3925(Yeso agrícola) + 0.0017(Compost)(Yeso agrícola)$.

confianza que estos factores afectan de manera estadísticamente significativa el resultado del presente experimento.

Tabla 6. Resultados de la primera réplica de los tratamientos con dosis de compost y yeso agrícola sobre el suelo salino

N°	Compost (g)	Yeso agrícola (g)	pH	CE (dS/m)
1	25	5	8.3	12.5
2	75	5	8	8.2
3	25	15	8.1	9
4	75	15	7.8	5.5
5	50	10	8.2	9
6	50	10	8.1	8.7
7	50	10	8.1	8.9

Fuente: elaboración propia

Por otro lado, el efecto de los bloques ($p=0.7820$) no resultó significativo, evidenciando que no existen diferencias relevantes entre las repeticiones, y que la variación experimental no es atribuible a los bloques. Finalmente, se pudo establecer que, el coeficiente de determinación ($R^2 = 99.8398\%$) confirma que el modelo explica casi la totalidad de la variabilidad observada en las tablas.

El valor máximo de pH, Tabla 9 que se busca alcanzar dependerá de la tolerancia específica de los cultivos y del objetivo productivo establecido. Según United States Department of Agriculture (1954), el pH óptimo para suelos agrícolas se sitúa generalmente entre 6 y 7, rango que favorece la disponibilidad de

nutrientes y el desarrollo adecuado de la mayoría de las especies cultivadas.

Tabla 8. Coeficiente de regresión para el pH del suelo salino tratado

Coefficiente	Estimado
constante	166.214
a: Compost	-0.0945
b: Yeso agrícola	-0.3925
ab	0.0017

Fuente: elaboración propia

Tabla 9. Camino de máximo ascenso para pH en los tratamientos de suelo salino

Tolerancia de los cultivos a valores de pH próximos a 7			Tolerancia de los cultivos a valores de pH próximos a 6		
Compost (g)	Yeso agrícola (g)	pH	Compost (g)	Yeso agrícola (g)	pH
64.7	122.961	703.352	73.5	136.321	602.841
64.9	123.268	701.014	73.7	136.621	600.613

Fuente: elaboración propia

El análisis de superficie de respuesta Figura 2 realizado evidenció que la menor variación del pH, alcanzando un valor levemente ácido-neutro de aproximadamente 5.5, se registró al aplicar la dosis máxima de yeso agrícola 15 g combinada con una concentración elevada de compost 75 g. Este comportamiento sugiere una notable capacidad de las enmiendas para acidificar el medio. Por el contrario, se observó una variación del pH hacia valores marcadamente alcalinos, alcanzando aproximadamente 12.7, cuando se empleó la dosis mínima de yeso agrícola 5 g junto con una baja concentración de compost 25 g. Esto indica que la reducida incorporación de enmiendas limita la neutralización de la alcalinidad intrínseca del suelo salino, manteniendo así valores de pH poco favorables para la mayoría de cultivos agrícolas.

De acuerdo con los resultados mostrados en la Tabla 10 y Figura 3, la prueba de rangos múltiples de Tukey revela que, aunque las medias de pH variaron entre un mínimo de 5.55 (correspondiente al tratamiento con mayor dosis

de compost y yeso agrícola, C75-Y15) y un máximo de 12.5 (en el tratamiento con menores dosis, C25-Y5), todos los tratamientos quedaron incluidos dentro de un único grupo homogéneo (X). Este hallazgo indica que las diferencias observadas en los valores medios de pH no alcanzaron significancia estadística al nivel de confianza considerado, lo que sugiere que las distintas combinaciones de compost y yeso agrícola aplicadas no produjeron variaciones significativamente distintas en la reacción del suelo salino estudiado.

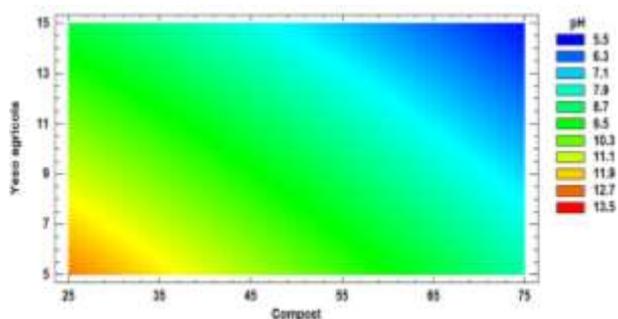


Figura 2. Contorno de superficie de respuesta para el pH

Tabla 10. Prueba de rango múltiple Tukey para el pH con un $p < 0.05$ en los tratamientos del suelo salino

Tratamiento	Casos	Media	Grupos Homogéneos
C75-Y15	2	5.55	X
C75-Y5	2	8.2	X
Centro	6	883.333	X
C25-Y15	2	9.0	X
C25-Y5	2	12.5	X

Fuente: elaboración propia

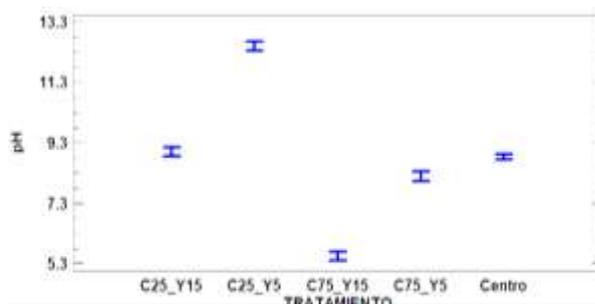


Figura 3. Intervalos de Tukey en las diferentes mezclas de tratamientos con respecto al pH

De acuerdo con el análisis de varianza Tabla 12 (ANOVA), tanto el compost ($p = 0.0006$) como el yeso agrícola ($p = 0.0099$) presentan p valores menores a 0.05, lo que demuestra que ejercen una influencia significativa sobre la variable de respuesta, permitiendo afirmar con un 95% de confianza que ambos factores afectan de manera estadísticamente relevante los resultados obtenidos. Por el contrario, ni la interacción entre ambos factores ($p = 0.6528$) ni

el efecto de los bloques ($p = 0.4996$) mostraron significancia estadística, indicando que no existen diferencias significativas entre las repeticiones y que la variabilidad residual no se debe a estas fuentes. Finalmente, el coeficiente de determinación ($R^2 = 80.6516\%$) revela que el modelo explica un porcentaje considerable de la variación total observada, aunque menor en comparación con el modelo anterior.

Tabla 11. Análisis de varianza aplicado al nivel de CE del suelo salino tratado

Tolerancia de los cultivos a valores de pH próximos a 7			Tolerancia de los cultivos a valores de pH próximos a 6		
Compost (g)	Yeso agrícola (g)	pH	Compost (g)	Yeso agrícola (g)	pH
64.7	122.961	703.352	73.5	136.321	602.841
64.9	123.268	701.014	73.7	136.621	600.613

Fuente: elaboración propia

Los valores de la ecuación de la Tabla 12 muestran que, al incrementar las dosis de compost y yeso agrícola, la conductividad eléctrica (CE) del suelo tiende a disminuir; además, la interacción entre ambos insumos

ejerce un leve efecto adicional de reducción sobre la CE, como se aprecia en el modelo de la ecuación. $CE = 8.47143 - 0.0045(Compost) - 0.0125(Yeso\ agrícola) - 0.0001(Compost)(Yeso\ agrícola)$

Tabla 12. Coeficiente de regresión para la CE del suelo salino tratado

Tolerancia de los cultivos a valores de pH próximos a 7			Tolerancia de los cultivos a valores de pH próximos a 6		
Compost (g)	Yeso agrícola (g)	pH	Compost (g)	Yeso agrícola (g)	pH
64.7	122.961	703.352	73.5	136.321	602.841
64.9	123.268	701.014	73.7	136.621	600.613

Fuente: elaboración propia

El valor máximo de CE, Tabla 13 la cual se busca alcanzar dependerá de la tolerancia específica de los cultivos y del objetivo productivo establecido. Según (United States Department of Agriculture (1954), La CE óptima para suelos agrícolas son valores menores a 4 dS/m la cual favorece el buen desarrollo adecuado de la mayoría de las especies cultivadas. El análisis de superficie de respuesta realizado, Figura 4 evidenció que la variación del CE, alcanzando concentración baja de 7.8 dS/m en la mezcla de 75 g de compost y 15 g de yeso agrícola, Por el

contrario, se observó una variación del CE alto aproximadamente 8.3 dS/m cuando se empleó la dosis mínima de yeso agrícola 5 g junto con una baja concentración de compost 25 g.

Tabla 13. Camino de máximo ascenso para la CE en los tratamientos de suelo salino

Coefficiente	Estimado
constante	847.143
a: Compost	-0.0045
b: Yeso agrícola	-0.0125
ab	-0.0001

Fuente: elaboración propia

Según la prueba de rangos múltiples de Tukey Tabla 15 y Figura 5, donde compost (C) y yeso agrícola (Y) el tratamiento C75-Y15 presentó la menor media de conductividad eléctrica (7.8 dS/m) formando un grupo homogéneo distinto, evidenciando mayor efecto reductor de salinidad. En cambio, C25-Y5 mostró la media más alta (8.25 dS/m), también en grupo diferente. Los demás tratamientos (C75-Y5, C25-Y15 y Centro) no difirieron significativamente entre sí, ubicándose en un mismo grupo homogéneo, lo que indica efectos intermedios sobre la reducción de la CE.

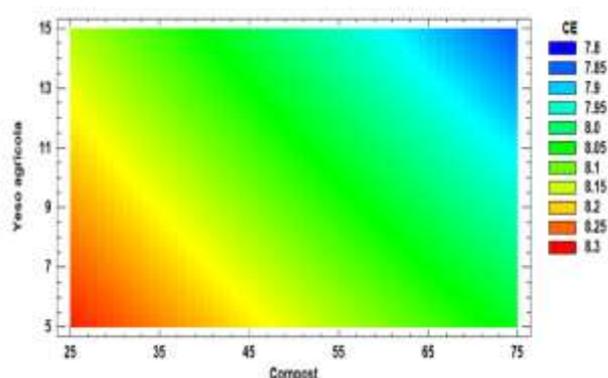


Figura 4. Contorno de superficie de respuesta para el CE

Tabla 14. Prueba de rango múltiple Tukey para la CE con un $p < 0.05$ en los tratamientos del suelo salino.

Tratamiento	Casos	Media	Grupos Homogéneos
C75-Y15	2	5.55	X
C75-Y5	2	8.2	X
Centro	6	883.333	X
C25-Y15	2	9.0	X
C25-Y5	2	12.5	X

Fuente: elaboración propia

La Tabla 14 presenta los resultados de la prueba de rango múltiple Tukey para la Conductividad Eléctrica (CE) en tratamientos de suelo salino, con un nivel de significancia de $p < 0.05$. Todos los tratamientos (C75-Y15, C75-Y5, Centro, C25-Y15 y C25-Y5) se agrupan en un solo

grupo homogéneo, lo que indica que no existen diferencias estadísticamente significativas entre ellos en términos de CE. Los valores medios varían de 5.55 a 12.5, pero debido a la variabilidad y la agrupación homogénea, no se puede afirmar que un tratamiento tenga un efecto diferencial en la conductividad. Esto sugiere que, bajo las condiciones evaluadas, todos los tratamientos de suelo salino presentan niveles similares de CE, sin diferencias estadísticamente relevantes.

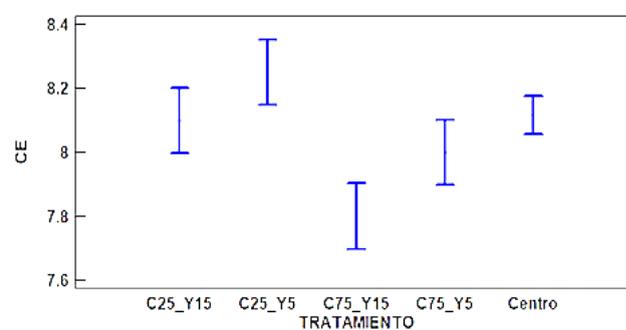


Figura 5. Intervalos de Tukey en las diferentes mezclas de tratamientos con respecto a la CE

Conclusiones

Los resultados del estudio confirman que la aplicación conjunta de compost y yeso agrícola constituye una estrategia eficaz para mitigar la salinidad de los suelos agrícolas en la Zona 5 de la Yarada, Tacna la aplicación de diferentes mezclas generó un efecto positivo sobre las propiedades físicas del suelo salino, manifestándose en un incremento significativo tanto de la porosidad como del contenido de humedad. Este efecto sugiere una mejora sustancial en la estructura del suelo, favoreciendo la aireación y la retención de agua, factores determinantes para optimizar el desarrollo de los cultivos. El efecto sinérgico entre ambos insumos permitió reducir significativamente la conductividad eléctrica (CE) del suelo, pasando de valores iniciales propios de suelos altamente salinos (≈ 14 dS/m)

a valores considerablemente menores (≈ 5.5 dS/m) en los tratamientos con dosis máximas. Este hallazgo resalta la potencialidad de las enmiendas orgánicas e inorgánicas como herramientas clave para restaurar suelos degradados por intrusión salina. Asimismo, el análisis estadístico evidenció que tanto el compost como el yeso agrícola ejercen un efecto significativo sobre el pH del suelo, contribuyendo a desplazar desde rangos alcalinos hacia valores más próximos a la neutralidad. Este ajuste del pH favorece la disponibilidad de nutrientes esenciales y estimula la actividad microbiana, generando condiciones edáficas más propicias para el crecimiento y desarrollo de los cultivos. De este modo, se constata que las enmiendas no sólo reducen la salinidad, sino que también optimizan otros parámetros fisicoquímicos determinantes para la fertilidad del suelo. Por otra parte, la metodología experimental, basada en un diseño factorial 2^2 con puntos centrales, permitió establecer de manera rigurosa la influencia individual y combinada de los factores evaluados. Los elevados coeficientes de determinación (R^2 superiores al 80% para CE y casi 100% para pH) confirman la fiabilidad de los modelos obtenidos y la relevancia estadística de los efectos observados. Finalmente, se destaca que el empleo de compost y yeso agrícola representa una alternativa ambientalmente sostenible, de bajo costo y técnicamente viable para afrontar la problemática de la salinización en suelos agrícolas, especialmente en regiones áridas y semiáridas como la costa sur del Perú como la zona 5 de la Yarada.

Agradecimientos

Deseo expresar mi más profundo y sincero agradecimiento, en primer lugar, a mis queridos

padres, cuyo apoyo incondicional, especialmente en ofrecerme lo mejor posible y con mucho cariño en mi formación profesional, lo cual su apoyo ha constituido un pilar fundamental para la culminación de este trabajo. Extiendo también mi gratitud a los docentes de mi escuela profesional, quienes, con generosa paciencia y solvencia académica, disiparon mis dudas y enriquecieron mi formación intelectual. Asimismo, agradezco de corazón a mi fiel, confidente y apoyo, por su constante compañía y por sostenerme emocionalmente en los momentos de mayor exigencia y estrés académico, brindándome aliento cuando más lo necesité. Finalmente, me reconozco a mí mismo el mérito de no haber claudicado ante las adversidades, y manifiesto mi legítimo orgullo por los logros alcanzados, fruto de la perseverancia, la disciplina y la fe en mis capacidades.

Referencias Bibliográficas

- Bazán, R. (2017). *Manual de procedimientos de los análisis de suelos y agua con fines de riego*.
<https://repositorio.inia.gob.pe/handle/20.500.12955/504>
- Corporación Departamental del Desarrollo de Tacna CORDETACNA. (1983). *Control del acuífero: Funcionamiento y comportamiento del acuífero La Yarada 1972-1982*.
<https://hdl.handle.net/20.500.12543/1697>
- Dalzell, H., Gray, A., Thurairajan, K., & Riddlestone. (1987). *Soil management: Compost production and use in tropical and subtropical environments*.
<https://openknowledge.fao.org/items/1a5cac8f-d158-418c-9b65-5fa3c62a299c>
- Dennis L. Corwin & Kevin Yemoto. (2020). *Salinidad: Conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales*. *Revista de la Sociedad Americana de Ciencias del Suelo*.
<https://doi.org/10.1002/saj2.20154>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (1988). *Suelos afectados por*

la sal y su manejo.
<https://www.fao.org/4/x5871e/x5871e00.htm>

Ministerio de Agricultura Dirección General de Aguas e Irrigación Dirección de Aguas y Distritos de Riego & Sub-Proyecto Estudios Agrológicos Básicos. (1972). *Estudio agrológico detallado del valle de Tacna y Pampas de La Yarada: Departamento de Tacna*. MINAG.
<https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/1477>

Ministerio del Ambiente. (2014). *Guía para Muestreo de Suelos*.
<https://www.gob.pe/institucion/minam/informes-publicaciones/2702-guia-para-muestreo-de-suelos>

Muñoz, I. (2016). Agro-exportación y sobreexplotación del acuífero de Ica en Perú. *Anthropologica*, 34(37), Article 37.
<https://doi.org/10.18800/anthropologica.2016.02.005>

Pérez, W., Flores Marquez, R., Calero E. N., Arévalo, Y., & Solórzano, R. (2024). *Manual de aplicación de enmiendas para suelos salinos y sódicos*. Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA).
<https://hdl.handle.net/20.500.12955/2595>

Pino, E., Ramos, L., Avalos, O., Tacora, P., Chávarri, E., Angulo, O., Ascencios, D., & Mejía, J. (2019). Factores que inciden en el agotamiento y la contaminación por intrusión marina en el acuífero costero de La Yarada, Tacna, Perú. *Tecnología y ciencias del agua*, 10(5), 177-213.
<https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-05-07>

Servicio Nacional de Certificación Ambiental

para las Inversiones Sostenibles SENACE. (2023). *Resolución Directoral N.º 00084-2023-SENACE-PE/DEIN*.

<https://www.gob.pe/institucion/senace/normas-legales/4267367-00084-2023-senace-pe-dein>

Silva, Y., Salamanca, A., Paz, P., Maquera, A. R., & Galdos, F. (2024). Tratamiento de la salinidad del suelo de la Yarada baja-Tacna mediante humus y carbón activado. *Ciencia y Educación*, 5(8),
<https://doi.org/10.5281/zenodo.13281651>

Soto, S. (2018). *pH del suelo*.
<https://riunet.upv.es/handle/10251/102382>

Trasviña, A., Bórquez, R., Leal, J., Castro, L., Gutiérrez, M., Trasviña, A., Bórquez, R., Leal, J., Castro, L., Gutiérrez, M. (2018). Rehabilitación de un suelo salino con yeso agrícola en un cultivo de nogal en el Valle del Yaqui.
<https://doi.org/10.28940/terra.v36i1.30>

United States Department of Agriculture. (1954). *Diagnóstico y mejora de Suelos salinos alcalinos Manual n.º 60*
<https://www.ars.usda.gov/pacific-west-area/riverside-ca/agricultural-water-efficiency-and-salinity-research-unit/docs/publications/handbook-no-60/>



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional. Copyright © R.J. Fred Bruce Capia Arenas.

