



The Biologist (Lima)



ORIGINAL ARTICLE / ARTÍCULO ORIGINAL

SURVIVAL RESPONSE OF *HELIASTER HELIANTHUS* (LAMARCK, 1816) TO SALINITY INCREASES ASSOCIATED WITH DESALINATION BRINE DISCHARGES

RESPUESTA DE SUPERVIVENCIA DE *HELIASTER HELIANTHUS* (LAMARCK, 1816) ANTE INCREMENTOS DE SALINIDAD ASOCIADOS A DESCARGAS DE SALMUERA DE DESALINIZACIÓN

Jorge Antonio Morales-Carazas¹, Manuel Aníbal Rodríguez-Salas¹, Nilton Alban-Caballero¹, René Germán Sosa-Vilca¹ & George Argota-Pérez²

² Centro de Investigaciones Avanzadas y Formación Superior en Educación, Salud y Medio Ambiente "AMTAWT". Perú.

* Corresponding author: arolise79@hotmail.com

Nilton Alban Caballero: <https://orcid.org/0000-0002-9566-9916>

Manuel Aníbal Rodríguez-Salas: <https://orcid.org/0000-0003-1748-7997>

Jorge Antonio Morales Carazas: <https://orcid.org/0000-0003-0150-1862>

René Germán Sosa Vilca: <https://orcid.org/0000-0003-2248-3464>

George Argota Pérez: <https://orcid.org/0000-0003-2560-6749>

ABSTRACT

The increase in desalination as a source of freshwater supply has intensified brine discharge into coastal marine ecosystems, generating hypersaline conditions that may disrupt the ecological stability of benthic communities. In this context, experimental evidence is required to assess the sensitivity of key species to these physicochemical changes. The objective of the study was to determine the survival response of *Heliaster helianthus* (Lamarck, 1816) to salinity increases associated with desalination brine discharges. The research was experimental in nature, with a quantitative approach and a completely randomized design. A total of 24 individuals collected along the Ilo coastline (Peru) were exposed to a control treatment (35.35 g·L⁻¹) and seven salinity concentrations (38.98-72.98 g·L⁻¹) for 24 hours under laboratory conditions. The results showed a progressive decrease in survival as salinity increased. The estimated LC₅₀ (Median Lethal concentration) was 37.17 g·L⁻¹, while LT₅₀ (Median lethal time) ranged from 17.0 to 2.08 hours depending on the concentration. Treatments above 46.30 g·L⁻¹ caused total mortality in less than 4 hours. The Conesa matrix classified the impact as critical (I = -86), indicating high ecological sensitivity. It is concluded that *H. helianthus* exhibits high vulnerability to salinity increases, confirming its stenohaline nature and its potential as a bioindicator of disturbances induced by brine discharges. These findings suggest that even moderate salinity variations can compromise the survival of key species in coastal marine ecosystems.

Keywords: brine – desalination – echinoderms – marine ecotoxicology

Este artículo es publicado por la revista *The Biologist (Lima)* de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemática, Universidad Nacional Federico Villarreal, Lima, Perú. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0) [<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es>] que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada de su fuente original.



DOI: <https://doi.org/10.62430/rb20262412171>

RESUMEN

El incremento de la desalinización como fuente de abastecimiento hídrico ha intensificado la descarga de salmuera en ecosistemas marinos costeros, generando condiciones de hipersalinidad que pueden alterar la estabilidad ecológica de comunidades bentónicas. En este contexto, se requiere evidencia experimental que permita evaluar la sensibilidad de especies clave frente a estos cambios fisicoquímicos. El objetivo del estudio fue determinar la respuesta de supervivencia de *Heliaster helianthus* (Lamarck, 1816) ante incrementos de salinidad asociados a descargas de salmuera de desalinización. La investigación fue de tipo experimental con enfoque cuantitativo y diseño completamente aleatorizado. Se utilizaron 24 individuos recolectados en el litoral de Ilo (Perú), expuestos a un tratamiento control (35,35 g·L⁻¹) y siete concentraciones de salinidad (38,98-72,98 g·L⁻¹) durante 24 h bajo condiciones de laboratorio. Los resultados evidenciaron una disminución progresiva de la supervivencia conforme aumentó la salinidad. La CL₅₀ (Concentración letal media) estimada fue de 37,17 g·L⁻¹, mientras que el TL₅₀ (Tiempo letal medio) varió entre 17,0 y 2,08 h dependiendo de la concentración. Los tratamientos superiores a 46,30 g·L⁻¹ provocaron mortalidad total en menos de 4 h. La matriz de Conesa clasificó el impacto como crítico (I = -86), evidenciando alta sensibilidad ecológica. Se concluye que *H. helianthus* presenta una elevada vulnerabilidad a incrementos de salinidad, confirmando su condición de especie estenohalina y su potencial como bioindicador de alteraciones inducidas por descargas de salmuera. Estos hallazgos sugieren que incluso variaciones moderadas de salinidad pueden comprometer la supervivencia de especies clave en ecosistemas marino-costeros.

Palabras clave: desalinización – ecotoxicología marina – equinodermos – salmuera

INTRODUCCIÓN

El incremento de la demanda mundial de agua dulce, asociado al crecimiento poblacional, la expansión urbana y los efectos del cambio climático, ha impulsado la adopción de tecnologías de desalinización como una alternativa estratégica para garantizar la seguridad hídrica en regiones costeras con estrés hídrico severo (Al-Saidi *et al.*, 2023; Zolghadr *et al.*, 2023). Aunque esta tecnología contribuye al abastecimiento de agua potable, diversos estudios han advertido que sus beneficios pueden estar acompañados de impactos ambientales significativos sobre los ecosistemas marinos receptores (Panagopoulos & Haralambous, 2020; Gupta *et al.*, 2026).

Entre las principales preocupaciones ambientales destaca la descarga de salmuera residual, un efluente caracterizado por elevadas concentraciones de sales y la presencia de compuestos químicos empleados durante los procesos de tratamiento, tales como biocidas, antiincrustantes y agentes de limpieza. Debido a su mayor densidad respecto al agua marina circundante, la salmuera tiende a acumularse en las zonas bentónicas, generando condiciones de hipersalinidad capaces de modificar la calidad ambiental y afectar la biodiversidad local (Panagopoulos & Haralambous, 2020). Se ha documentado que estos vertimientos pueden alterar procesos ecológicos fundamentales, reduciendo la supervivencia, el crecimiento y la productividad de

organismos marinos expuestos de forma prolongada o recurrente a incrementos de salinidad (Fernández *et al.*, 2019; Gupta *et al.*, 2026).

La expansión global de la industria desalinizadora ha incrementado la necesidad de comprender los efectos biológicos de estos efluentes. Actualmente, la gestión ambiental de las descargas de salmuera constituye uno de los principales desafíos regulatorios para la sostenibilidad de esta tecnología, debido a que los efectos ecológicos pueden manifestarse de manera localizada sobre organismos bentónicos particularmente sensibles a las variaciones osmóticas (Al-Saidi *et al.*, 2023). Asimismo, se ha señalado la necesidad de incorporar indicadores biológicos específicos para mejorar los procesos de evaluación y monitoreo ambiental asociados a plantas desalinizadoras (de la Ossa *et al.*, 2016).

En el Perú, esta problemática adquiere especial relevancia a partir de la promulgación de la Ley N.° 31863, que declara de necesidad pública e interés nacional la construcción de plantas desalinizadoras de agua de mar en los departamentos de la costa peruana para contribuir al cierre de la brecha de infraestructura hídrica y garantizar el acceso futuro al agua. En este contexto, el proyecto Desaladora Ilo contempla la incorporación de una planta con capacidad de producción de 452 L·s⁻¹ de agua desalinizada para fortalecer el abastecimiento de agua potable en la provincia

de Ilo, generándose como subproducto volúmenes significativos de salmuera residual con potencial de descarga al ecosistema marino costero (PROINVERSIÓN, 2026). Frente a este escenario, resulta imprescindible generar información científica que permita anticipar posibles efectos sobre especies ecológicamente relevantes y fortalecer los instrumentos de gestión ambiental marina.

Los equinodermos constituyen uno de los grupos más sensibles a las alteraciones de salinidad debido a su condición osmo-conformadora. La limitada capacidad de regulación osmótica de estos organismos provoca que cambios relativamente pequeños en la concentración salina del medio puedan afectar procesos fisiológicos esenciales relacionados con el equilibrio hídrico, la actividad metabólica, la función celular, el comportamiento y la supervivencia (Castellano *et al.*, 2016). Esta susceptibilidad convierte a los equinodermos en organismos particularmente útiles para la evaluación de riesgos ecológicos asociados a alteraciones de la salinidad en ecosistemas marinos costeros (Jobson *et al.*, 2021; Podbielski *et al.*, 2022).

Entre las especies más representativas del litoral rocoso del Pacífico suroriental se encuentra *Heliaster helianthus* (Lamarck, 1816), conocida comúnmente como “sol de mar”. Esta especie desempeña un papel ecológico fundamental como depredador clave dentro de las comunidades intermareales, regulando la abundancia de numerosas especies y contribuyendo al mantenimiento de la estructura y estabilidad de los ecosistemas bentónicos (Gaymer & Himmelman, 2008). Investigaciones recientes continúan reconociendo su relevancia funcional dentro de las redes tróficas costeras del Pacífico suroriental (Wilbur *et al.*, 2024).

A pesar de su relevancia ecológica, persisten importantes vacíos de conocimiento sobre la respuesta de *H. helianthus* frente a condiciones de hipersalinidad inducidas por actividades antrópicas. La mayoría de los estudios disponibles se han concentrado en aspectos relacionados con su distribución geográfica, ecología trófica y dinámica poblacional, mientras que las investigaciones experimentales sobre tolerancia fisiológica a incrementos extremos de salinidad son escasas o inexistentes (Wilbur *et al.*, 2024). Esta limitación dificulta la predicción de posibles impactos derivados de descargas de salmuera y restringe la incorporación de criterios biológicos específicos en los procesos de evaluación ambiental de proyectos desalinizadores (Gupta *et al.*, 2026).

En consecuencia, determinar la tolerancia de *H. helianthus* a incrementos de salinidad representa un aporte relevante para comprender la vulnerabilidad de las comunidades

bentónicas frente a perturbaciones osmóticas de origen antropogénico. La generación de evidencia experimental permitirá fortalecer las bases científicas necesarias para la gestión sostenible de los ecosistemas marinos costeros sometidos a presiones crecientes asociadas a la producción de agua desalinizada (Panagopoulos & Haralambous, 2020; Gupta *et al.*, 2026). Por lo tanto, el objetivo de la presente investigación fue determinar la respuesta de supervivencia de *H. helianthus* expuesta experimentalmente a diferentes niveles de salinidad mediante ensayos agudos de laboratorio, con el propósito de identificar los límites críticos de viabilidad biológica bajo condiciones de estrés osmótico y aportar información útil para la evaluación de potenciales impactos ambientales derivados de descargas de salmuera en ecosistemas marinos costeros.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación fue de tipo experimental, con enfoque cuantitativo y alcance explicativo, orientada a determinar el efecto de diferentes niveles de salinidad sobre la supervivencia de *H. helianthus* bajo condiciones controladas de laboratorio. Se empleó un diseño completamente aleatorizado con un grupo control y siete tratamientos experimentales de salinidad.

Los organismos fueron colectados en las playas El Diablo (251472 E; 8048040 N) y Montecarlo (251314 E; 8049507 N), ubicadas en el litoral costero del puerto de Ilo, región Moquegua, Perú. Los ensayos experimentales se realizaron en el Laboratorio de Calidad de Agua de la Universidad Nacional de Moquegua, sede Ilo, durante septiembre de 2024.

La población estuvo constituida por los individuos de *H. helianthus* presentes en la zona intermareal rocosa de las playas seleccionadas del puerto de Ilo. La muestra estuvo conformada por 24 individuos adultos recolectados manualmente durante marea baja. La identificación taxonómica de los especímenes se realizó mediante la evaluación de caracteres morfológicos externos de acuerdo con los criterios descritos por Catalán *et al.* (2025). Posteriormente, los organismos fueron transportados al laboratorio y sometidos a un período de aclimatación previo al inicio de los ensayos.

La variable independiente fue la salinidad del agua marina, evaluada mediante un tratamiento control (35,35 g·L⁻¹) y siete concentraciones experimentales comprendidas entre 38,98 y 72,98 g·L⁻¹, obtenidas mediante la adición de sal marina. La variable dependiente fue la supervivencia de *H.*

helianthus, determinada mediante un ensayo de toxicidad aguda con una duración de 24 h. Cada tratamiento estuvo constituido por tres organismos considerados como unidades experimentales independientes.

La técnica empleada fue la observación directa y sistemática de los organismos expuestos. La supervivencia fue registrada en intervalos periódicos (OECD, 2025). Un individuo fue considerado muerto cuando presentó ausencia total de movimiento de los pies ambulacrales y falta de respuesta ante estímulos mecánicos externos.

Asimismo, se determinaron la concentración letal media (CL_{50}) y el tiempo letal medio (TL_{50}) mediante el método del punto medio, con la finalidad de identificar los niveles críticos de salinidad y los tiempos de exposición asociados a una mortalidad del 50 % de los organismos evaluados.

Para la valoración del impacto ambiental potencial asociado al incremento de la salinidad se aplicó la matriz de Conesa, método cualitativo-numérico que permite estimar la importancia de los impactos mediante criterios relacionados con intensidad, extensión, persistencia, reversibilidad y recuperabilidad. La Matriz de Conesa, representa algoritmos de importancia ambiental de un impacto (I) y se calcula mediante la fórmula:

$$I = \pm [3I + 2EX + MO + PE + PR + SI + AC + EF + RC + RV]$$

Donde:

- I (Intensidad): grado de destrucción o cambio del factor ambiental
- EX (Extensión): área afectada
- MO (Momento): tiempo en que aparece el impacto
- PE (Persistencia): duración del impacto en el tiempo
- PR (Periodicidad): frecuencia del impacto
- SI (Sinergia): interacción con otros impactos
- AC (Acumulación): si el impacto se acumula o no
- EF (Efecto): relación causa-efecto directa o indirecta
- RC (Recuperabilidad): capacidad del sistema para recuperarse
- RV (Reversibilidad): posibilidad de volver al estado inicial

Nivel de impacto (NI):

- Menor a 25: Irrelevante o compatible
- Entre 25 y 50: Moderado

- Entre 50 y 75: Severo
- Superior a 75: Crítico

Los datos obtenidos fueron organizados en una base de datos y analizados mediante estadística descriptiva. Se calcularon frecuencias absolutas, porcentajes de supervivencia y mortalidad para cada nivel de salinidad evaluado. La relación entre la salinidad y la supervivencia de *H. helianthus* se analizó mediante modelos de regresión dosis-respuesta, a partir de los cuales se estimaron los valores de CL_{50} y TL_{50} . Los resultados fueron representados mediante tablas y gráficos para facilitar la interpretación de la respuesta biológica frente al estrés osmótico inducido experimentalmente.

Aspectos éticos: El estudio se realizó bajo principios éticos aplicables a invertebrados marinos, priorizando el bienestar de los organismos y la reducción del impacto sobre las poblaciones naturales. Se aplicó el principio de reducción mediante el uso del menor número posible de individuos por tratamiento. La manipulación, transporte y aclimatación de *H. helianthus* se efectuaron en condiciones controladas, evitando procedimientos invasivos. La evaluación de la mortalidad se realizó por observación externa sin métodos destructivos. El estudio se realizó bajo principios éticos aplicables a la investigación con invertebrados marinos, considerando los principios de reemplazo, reducción y refinamiento (3R). Asimismo, se incorporaron criterios de transparencia metodológica compatibles con las recomendaciones de las directrices ARRIVE 2.0 en los aspectos aplicables al diseño experimental, manejo de organismos y reporte de resultados.

RESULTADOS

La Tabla 1 presenta las condiciones fisicoquímicas utilizadas durante los ensayos. La salinidad experimental varió entre 35,35 y 72,98 g·L⁻¹. Conforme aumentó la concentración salina, la conductividad eléctrica aumentó de 55,24 a 114,04 mS·cm⁻¹, lo que evidencia una relación directamente proporcional entre ambas variables. El pH mostró una variación reducida entre tratamientos, registrándose valores de 7,87 en el control y de 8,06 a 8,16 en los tratamientos experimentales. La temperatura se mantuvo estable durante todo el período experimental, con valores comprendidos entre 19 y 20 °C.

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos de los tratamientos experimentales.

Tratamiento	Salinidad (g·L ⁻¹)	Conductividad (mS·cm ⁻¹)	pH	Temperatura (°C)
Control	35,35	55,24	7,87	19–20
C1	38,98	60,90	8,06	19–20
C2	39,09	61,08	8,08	19–20
C3	41,01	64,08	8,13	19–20
C4	46,30	72,34	8,14	19–20
C5	55,10	86,10	8,16	19–20
C6	60,21	94,08	8,16	19–20
C7	72,98	114,04	8,16	19–20

La Tabla 2 muestra que la supervivencia de *H. helianthus* disminuyó conforme aumentaron la salinidad y el tiempo de exposición. El tratamiento control mantuvo una supervivencia del 100 % durante las 24 h de evaluación. En los tratamientos C1 (38,98 g·L⁻¹) y C2 (39,09 g·L⁻¹), la supervivencia permaneció en 100 % hasta las 10 h, registrándose mortalidad

total a las 24 h. En C3 (41,01 g·L⁻¹), la supervivencia fue de 100 % hasta las 4 h y alcanzó la mortalidad total a las 10 h. Los tratamientos con salinidades iguales o superiores a 46,30 g·L⁻¹ (C4–C7) mostraron la respuesta más severa, observándose supervivencia completa a los 10 minutos y mortalidad total antes de las 4 h de exposición.

Tabla 2. Supervivencia observada de *Heliaster helianthus* durante los ensayos experimentales.

Tiempo	Control	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
0 min	100	100	100	100	100	100	100	100
10 min	100	100	100	100	100	100	100	100
4 h	100	100	100	100	0	0	0	0
10 h	100	100	100	0	0	0	0	0
24 h	100	0	0	0	0	0	0	0

La Tabla 3 muestra que la concentración letal media (CL₅₀) estimada para 24 h de exposición fue de 37,17 g·L⁻¹. Este valor se ubicó entre la salinidad del tratamiento control (35,35 g·L⁻¹) y la menor concentración experimental evaluada (38,98 g·L⁻¹). El tiempo letal medio (TL₅₀) mostró

una reducción progresiva conforme aumentó la salinidad. En los tratamientos C1 y C2 se estimó un TL₅₀ de 17:0 horas, mientras que en C3 se redujo a 7:0 h. Para las concentraciones comprendidas entre 46,30 y 72,98 g·L⁻¹ (C4–C7), el TL₅₀ alcanzó un valor de 2,08 h.

Tabla 3. Estimación de la CL₅₀ (concentración letal media) y TL₅₀ (tiempo letal medio) para *Heliaster helianthus*.

Parámetro	Condición evaluada	Intervalo	Estimación
CL ₅₀	24 h	35,35–38,98 g·L ⁻¹	37,17 g·L ⁻¹
TL ₅₀	C1–C2	10–24 h	17:0 h
TL ₅₀	C3	4–10 h	7:0 h
TL ₅₀	C4–C7	10 min–4 h	2:08 h

La aplicación de la matriz de Conesa (Tabla 4) permitió obtener un valor de importancia ambiental (I) de -86. De acuerdo con los criterios de clasificación del método:

$I = -[(3 \times 12) + (2 \times 8) + 4 + 4 + 4 + 2 + 4 + 4 + 4 + 8]$, dicho valor corresponde a un impacto negativo de categoría crítica. Los atributos con mayor ponderación

fueron intensidad, extensión y recuperabilidad, asociados a la elevada mortalidad observada durante los ensayos de

exposición a salinidad elevada.

Tabla 4. Evaluación ambiental mediante la matriz de Conesa.

Parámetro	Valor
Importancia ambiental (I)	-86
Categoría del impacto	Crítico
Naturaleza	Negativa

DISCUSIÓN

Los resultados evidencian que las condiciones fisicoquímicas del sistema experimental replican adecuadamente el rango natural del ambiente marino costero del litoral de Ilo, caracterizado por variaciones moderadas de salinidad, pH y temperatura asociadas a procesos de afloramiento propios del sistema de la Corriente de Humboldt. Esta estabilidad térmica observada en el ensayo concuerda con la naturaleza relativamente constante de la temperatura superficial del mar en sistemas de surgencia, lo que permite aislar el efecto de la salinidad como principal variable de estrés sobre los organismos evaluados (Zolghadr *et al.*, 2023; Wilbur *et al.*, 2024).

El incremento progresivo de la conductividad eléctrica en función de la salinidad confirma el comportamiento iónico esperado en soluciones marinas concentradas, lo cual ha sido ampliamente descrito en estudios fisicoquímicos del agua de mar y sistemas hipersalinos. Este comportamiento es consistente con lo reportado por Fernández *et al.* (2019), quienes señalan que la adición de sales incrementa linealmente la densidad iónica del medio, afectando su capacidad de transporte eléctrico y, por tanto, su conductividad. En este sentido, la estabilidad relativa del pH observada en los tratamientos experimentales sugiere la acción del sistema tampón carbonato–bicarbonato del agua de mar, que regula las variaciones de acidez incluso frente a incrementos significativos de salinidad (Panagopoulos & Haralambous, 2020).

En relación con la supervivencia de *H. helianthus*, los resultados evidencian una marcada sensibilidad a incrementos relativamente pequeños de salinidad por encima del nivel de control. Este patrón es coherente con lo descrito para equinodermos, organismos que presentan limitada capacidad de osmorregulación activa y dependen de mecanismos celulares de ajuste osmótico, los cuales pueden saturarse rápidamente ante condiciones hipersalinas (Castellano *et al.*, 2016; Podbielski *et al.*, 2022). La transición abrupta observada entre supervivencia total y mortalidad completa en cortos intervalos de tiempo sugiere

la superación de los umbrales fisiológicos de tolerancia osmótica, lo que coincide con el concepto de especies estenohalinas descrito para invertebrados marinos sensibles a variaciones salinas (Jobson *et al.*, 2021).

La estimación de la CL_{50} en $37,17 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ refuerza la alta vulnerabilidad del organismo frente a incrementos de salinidad de baja magnitud relativa respecto al agua de mar natural. Este comportamiento es consistente con estudios que señalan que incluso variaciones moderadas en la salinidad pueden inducir fallas en los mecanismos de transporte iónico celular en equinodermos, comprometiendo procesos metabólicos esenciales (Castellano *et al.*, 2016). Asimismo, la reducción progresiva del TL_{50} conforme aumenta la salinidad evidencia una relación dosis–respuesta típica en ensayos ecotoxicológicos agudos, como los recomendados en guías internacionales para la evaluación de toxicidad en organismos acuáticos (OECD, 2025).

Desde una perspectiva ecológica, estos resultados adquieren relevancia considerando el creciente desarrollo de infraestructura de desalinización en zonas costeras. En el caso del Perú, la implementación de la planta desalinizadora de Ilo, enmarcada en la Ley N.° 31863, plantea la descarga de salmuera con potencial de alterar significativamente las condiciones fisicoquímicas del ecosistema marino receptor (MEF, 2023; PROINVERSIÓN, 2026). Diversos estudios han advertido que los efluentes de desalinización pueden generar gradientes hipersalinos localizados con efectos negativos sobre comunidades bentónicas y organismos sensibles (Al-Saidi *et al.*, 2023; Gupta *et al.*, 2026).

En este contexto, la alta sensibilidad observada en *H. helianthus* es consistente con su rol ecológico como especie estructuradora de comunidades intermareales, lo cual ha sido ampliamente documentado para equinodermos depredadores en el Pacífico suroriental (Gaymer & Himmelman, 2008; Catalán *et al.*, 2025). La alteración de su supervivencia podría generar efectos en cascada sobre la estructura trófica del ecosistema, afectando indirectamente la estabilidad de las comunidades bentónicas.

Finalmente, la evaluación mediante la matriz de Conesa indica un impacto ambiental de categoría crítica ($I = -86$), lo que refleja la elevada sensibilidad del sistema biológico frente a incrementos de salinidad. Este resultado es coherente con la evidencia de que los impactos asociados a descargas de salmuera presentan alta persistencia y baja recuperabilidad ecológica en ambientes costeros cerrados o semiabiertos (de la Ossa *et al.*, 2016; Fernández *et al.*, 2019). Asimismo, la baja capacidad de regulación osmótica documentada en equinodermos refuerza la interpretación de alta vulnerabilidad ecológica del sistema evaluado (Podbielski *et al.*, 2022).

En conjunto, los resultados obtenidos evidencian que incrementos relativamente moderados de salinidad pueden generar efectos letales en *H. helianthus*, lo que sugiere que este organismo puede ser considerado un bioindicador sensible para la evaluación de impactos asociados a descargas de salmuera en ecosistemas marino-costeros del Pacífico suroriental.

El presente estudio presenta algunas limitaciones inherentes al diseño experimental, principalmente relacionadas con el tamaño muestral por tratamiento, lo cual responde a criterios de reducción ética en el uso de organismos marinos sin comprometer la consistencia del diseño. Asimismo, al haberse desarrollado en condiciones de laboratorio, los resultados representan una aproximación controlada que permite aislar el efecto de la salinidad, aunque no incorpora la complejidad total del ambiente marino natural. Finalmente, el enfoque de exposición aguda de 24 h permite identificar umbrales de respuesta fisiológica inmediata, constituyendo una base sólida para futuras investigaciones de carácter crónico o ecológico.

Se concluye que *H. helianthus* mostró alta sensibilidad a incrementos de salinidad, con una CL_{50} de 37,17 g·L⁻¹ y una disminución progresiva del TL_{50} conforme aumentó la concentración salina. La supervivencia se redujo abruptamente a partir de 41,01 g·L⁻¹, evidenciando umbrales fisiológicos críticos frente al estrés osmótico. Las condiciones fisicoquímicas confirmaron que la salinidad fue la principal variable de respuesta biológica. La matriz de Conesa clasificó el impacto como crítico ($I = -86$), indicando alta vulnerabilidad ecológica. En conjunto, la especie puede considerarse un potencial bioindicador sensible frente a incrementos de salinidad en ecosistemas marino-costeros afectados por descargas de salmuera.

Author contribution: CRediT (Contributor Roles Taxonomy)

JAMC = Jorge Antonio Morales-Carazas

MARS = Manuel Aníbal Rodríguez-Salas

NAC = Nilton Alban-Caballero

RGSV = René Germán Sosa-Vilca

GAP = George Argota-Pérez

Conceptualization: JAMC, MARS, NACV, RGSV

Data curation: JAMC, MARS, NACV, RGSV

Formal Analysis: MARS, RGSV

Funding acquisition: JAMC, MARS, NACV, RGSV

Investigation: JAMC, MARS, NACV, RGSV

Methodology: JAMC, MARS, NACV, RGSV

Project administration: MARS

Resources: JAMC, MARS, NACV, RGSV

Software: JAMC, MARS, NACV, RGSV

Supervision: MARS

Validation: JAMC, MARS, NACV

Visualization: JAMC, MARS, NACV

Writing – original draft: MARS, RGSV

Writing – review & editing: GAP

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agencia de Promoción de la Inversión Privada: PROINVERSIÓN. (2026). *Proyecto desaladora Ilo para garantizar agua potable sostenible en Moquegua. Plataforma Digital Única del Estado Peruano.*
- Al-Saidi, M., Saadaoui, I., & Ben-Hamadou, R. (2023). Governing desalination, managing the brine: A review and systematization of regulatory and socio-technical issues. *Water Resources and Industry*, 30, 100225.
- Castellano, G. C., Souza, M. M., & Freire, C. A. (2016). Volume regulation of intestinal cells of echinoderms: Putative role of ion transporters (Na⁺/K⁺-ATPase and NKCC). *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 201, 124–131.

- Catalán, J., Ibáñez, C. M., Carrasco, S. A., Sellanes, J., Díaz, A., & Pardo, G. M. C. (2025). Systematic evaluation of sea stars of the genus *Heliaster* from the southeastern Pacific and redescription of *Heliaster helianthus*. *Taxonomy*, 5, 59.
- de la Ossa, C. J. A., Del Pilar, R. Y., Loya, F. A., Ferrero, V., L. M., Marco, M. C., Martínez, G. E., Giménez, C. F., & Sánchez, L. J. L. (2016). Bioindicators as metrics for environmental monitoring of desalination plant discharges. *Marine Pollution Bulletin*, 103, 313–318.
- Fernández, T. Y., Carratalá, A., & Sánchez, L. J. L. (2019). Impact of brine on the marine environment and how it can be reduced. *Desalination and Water Treatment*, 167, 27–37.
- Gaymer, C. F., & Himmelman, J. H. (2008). A keystone predatory sea star in the intertidal zone is controlled by a higher-order predatory sea star in the subtidal zone. *Marine Ecology Progress Series*, 370, 143–153.
- Gupta, P., Arciniegas, P. M. D., & Barrios, P. H. A. (2026). Impact of brine discharge from desalination plants on marine ecosystems: A review. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 49, 100693.
- Jobson, S., Hamel, J. F., Hughes, T., & Mercier, A. (2021). Cellular, hormonal, and behavioral responses of the holothuroid *Cucumaria frondosa* to environmental stressors. *Frontiers in Marine Science*, 8, 695753.
- Ministerio de Economía y Finanzas. MEF. (2023). *Ley N.º 31863, Ley que declara de necesidad pública e interés nacional la emergencia hídrica y la implementación de infraestructura para el abastecimiento de agua en la provincia de Ilo*. Diario Oficial El Peruano.
- Organisation for Economic Co-operation and Development: OECD. (2025). *Test No. 203: Fish, Acute Toxicity Test*. OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 2. OECD Publishing.
- Panagopoulos, A., & Haralambous, K. J. (2020). Environmental impacts of desalination and brine treatment: Challenges and mitigation measures. *Marine Pollution Bulletin*, 161, 111773.
- Podbielski, I., Hiebenthal, C., Hajati, M. C., Bock, C., Bleich, M., & Melzner, F. (2022). Capacity for cellular osmoregulation defines critical salinity of marine invertebrates at low salinity. *Frontiers in Marine Science*, 9, 898364.
- Wilbur, L., Louca, V., Ibanez-Erquiaga, B., & Küpper, F. C. (2024). A case for trans-regional intertidal research in unstudied areas in the northeast and southeast Pacific: Filling the gaps. *Coasts*, 4, 323–346.
- Zolghadr, A. B., McIntyre, N., Djordjevic, S., Farmani, R., Pagliero, L., Martínez, A. V., & Maestre, V. J. F. (2023). A review of limitations and potentials of desalination as a sustainable source of water. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 118161–118174.

Received May 2, 2026.

Accepted June 22, 2026.