UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES

FACULTAD DE INGENIERIA PESQUERA Y CIENCIAS DEL MAR

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA PESQUERA ACUÍCOLA

Eficiencia de la bioaumentación bacteriana gradual para la biorremediación de sedimentos efluentes del cultivo intensivo de *Penaeus vannamei*

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniera Pesquera Acuícola

Autora:

Bach. Yanela Stefany Campoverde Vera

Tumbes, 2026

UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES

FACULTAD DE INGENIERIA PESQUERA Y CIENCIAS DEL MAR

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA PESQUERA ACUÍCOLA

Eficiencia de la bioaumentación bacteriana gradual para la biorremediación de sedimentos efluentes del cultivo intensivo de *Penaeus vannamei*

Tesis aprobada en forma y estilo por:

Dr. Ing. Martín Amaya Ayala **ORCID N° 0000-0001-8870-2020**	**Presidente**	
Mtra. Ing. María Zoraida Ubillús Bravo **ORCID N° 0009-0009-8986-2080**	**Secretaria**	
Dr. Ing. David Edilberto Saldarriaga Yacila **ORCID N° 0000-0002-4919-8607**	**Vocal-Asesor**	

Tumbes, 2026

UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES

FACULTAD DE INGENIERIA PESQUERA Y CIENCIAS DEL MAR

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA PESQUERA ACUÍCOLA

Eficiencia de la bioaumentación bacteriana gradual para la biorremediación de sedimentos efluentes del cultivo intensivo de *Penaeus vannamei*

Los suscritos declaramos que la tesis es original en su contenido y forma:

Bach. Yanela Stefany Campoverde Vera — **Autora**

Dr. David Edilberto Saldarriaga Yacila — **Asesor**
ORCID N° 0000-0002-4919-8607

Ing. José Alberto Serna Cruz — **Coasesor**
ORCID N° 0000-0002-8508-0518

Tumbes, 2026

COPIA DEL ACTA DE SUSTENTACIÓN

UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES
VICERRECTORADO ACADEMICO
FACULTAD DE INGENIERIA PESQUERA Y CIENCIAS DEL MAR

"Año de la Recuperación y Consolidación de la Economía Peruana"

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En Puerto Pizarro, el día Treinta del mes de setiembre del dos mil veintiséis, siendo las once horas, en el aula A-3 de la Facultad de Ingeniería Pesquera y Ciencias del Mar de la UNTUMBES, se reunió el Jurado Calificador, designado con **Resolución N° 023-2026/UNTUMBES-FIPCM-D**, Dr. **MARTIN AMAYA AYALA (Presidente), Mg. MARIA ZORAIDA UBILLUS BRAVO (Secretaria) y Dr. DAVID EDILBERTO SALDARRIAGA YACILA (Vocal – asesor,** CODIGO ORCID N° 0000-0002-4919-8607) **y al Ing. JOSÉ ALBERTO SERNA CRUZ** (CODIGO ORCID N° 0000-0002-8508-0518) como Co asesor, luego de la presentación, se procedió a evaluar, calificar y deliberar la sustentación de la tesis, titulada: **"Eficiencia de la bioaumentación bacteriana gradual para la biorremediación de sedimentos efluentes del cultivo intensivo de *Penaeus vannamei*"**, para optar el Título Profesional de **INGENIERA PESQUERA ACUÍCOLA**, presentado por la:

Br. YANELA STEFANY CAMPOVERDE VERA.

Concluida la sustentación y absueltas las preguntas, por parte de la sustentante y después de la deliberación, el jurado, según el artículo N° 75 del Reglamento de Tesis de la Universidad Nacional de Tumbes, declara a la Bachiller:

YANELA STEFANY CAMPOVERDE VERA ....Aprobada....., con calificativo: .....Muy bueno..

Se hace conocer la sustentante, que deberá levantar las observaciones finales hechas al informe final de tesis, que el Jurado le indica.

En consecuencia, queda ...Apto..... para continuar con los trámites correspondientes a la obtención del título profesional de Ingeniera Pesquera Acuícola, de conformidad con lo estipulado en la Ley Universitaria N° 30220, el Estatuto, Reglamento General de la UNTUMBES, Reglamento General de Grados y Títulos y Reglamento de Tesis de la Universidad Nacional de Tumbes.

Siendo las .Once... horas y .Cincuenta minutos del mismo día, se dio por concluida la ceremonia académica, procediendo a firmar el acta de sustentación.

Puerto Pizarro, 30 de setiembre 2026

Dr. MARTIN AMAYA AYALA
CODIGO ORCID N° 0000-0001-8870-2020
DNI. N° 00320810
Presidente

Mg. MARIA Z. UBILLUS BRAVO
CODIGO DE ORCID N° 0009-0009-8986-2080
DNI. N° 45121172
Secretaria

Dr-. DAVID E. SALDARRIAGA YACILA
CODIGO ORCID N° 0000-0002-4919-8607
DNI. N° 00241901
Vocal y Asesor

C.C.:
- Jurado (03)
- Interesado
- Asesor Dr. DAVID SALDARRIAGA Y. Co asesor Ing. JOSÉ SERNA C.
- Archivo Decanato.

Los Ceibos S/N. Puerto Pizarro. Tumbes – Perú

INFORME DE ORIGINALIDAD

Yanela Stefany Campoverde Vera

Eficiencia de la bioaumentación bacteriana gradual para la biorremediación de sedimentos efluentes del cultivo intensivo ...

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid:::3117:633736311

Fecha de entrega
4 oct 2026, 0:32 GMT+0

Fecha de descarga
4 oct 2026, 0:35 GMT+0

Nombre del archivo
Eficiencia de la bioaumentación bacteriana gradual para la biorremediación de sedimentos eflu....docx

Tamaño del archivo
7.3 MB

54 páginas

12.897 palabras

70.443 caracteres

Dr. DAVID EDILBERTO SALDARRIAGA YACILA
ASESOR
ORCID N° 0000-0002-4919-8607

Número de la Clase: 52123652

turnitin Página 1 de 57 - Portada Identificador de la entrega trn:oid:::3117:633736311

1% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

Fuentes principales

1%	Fuentes de Internet
0%	Publicaciones
1%	Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.



Dr. DAVID EDILBERTO SALDARRIAGA YACILA
ASESOR
ORCID N° 0000-0002-4919-8607

turnitin Página 2 de 57 - Descripción general de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:633736311

Fuentes principales

1% Fuentes de Internet
0% Publicaciones
1% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)



Dr. DAVID EDILBERTO SALDARRIAGA YACILA
ASESOR
ORCID N° 0000-0002-4919-8607

Fuentes principales

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1 Trabajos del estudiante
Universidad Nacional de Tumbes on 2024-01-17 <1%

2 Internet
renati.sunedu.gob.pe <1%

3 Trabajos del estudiante
Universidad Nacional de Tumbes on 2023-09-10 <1%

4 Internet
1library.co <1%

5 Trabajos del estudiante
Universidad Nacional de Tumbes on 2025-09-01 <1%

6 Internet
docplayer.es <1%

7 Internet
repositorio.lamolina.edu.pe <1%

8 Publicación
María Emilia Bravo Zambrano, María Daniela Rivera Cantos, Laura Gema Mendoz... <1%

9 Internet
www.researchgate.net <1%

DEDICATORIA

A Dios, por ser mi guía, mi fortaleza y la luz en cada paso de mi camino.

A mis padres, por su amor incondicional, sus sacrificios y por ser el ejemplo de esfuerzo que impulsa cada uno de mis sueños.

Al nuevo ser que, con amor infinito, cariño y paciencia esperamos.

A mis hermanos, por su cariño, su apoyo incondicional y por estar siempre a mi lado en cada etapa.

A mis seres queridos, por confiar en mí y acompañarme en este gran logro.

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi más profundo agradecimiento a quienes hicieron posible la culminación de este trabajo de investigación:

A mi alma máter y a mis docentes, por transmitirme sus conocimientos, valores y pasión por la investigación, formándome no solo como profesional, sino también como persona.

A mi asesor de tesis, el Dr. David Edilberto Saldarriaga Yacila, por su valiosa orientación, paciencia y dedicación durante el desarrollo de este trabajo.

A mis amigos, por su sincera amistad, su apoyo constante y por compartir momentos inolvidables que hicieron de este proceso una experiencia enriquecedora y llena de aprendizaje.

A todos, ¡muchas gracias!

ÍNDICE

		Página
	RESUMEN	xviii
	ABSTRACT	xix
I.	**INTRODUCCIÓN**	20
II.	**REVISIÓN DE LITERATURA**	22
2.1.	**BASES TEÓRICO CIENTÍFICAS**	22
	2.1.1. Cultivo intensivo de *Penaeus vannamei*	22
	2.1.2. Contaminación de los ecosistemas por descargas de efluentes acuícolas	22
	2.1.3. Caracterización de los efluentes acuícolas	23
	2.1.4. Biorremediación de efluentes acuícolas	24
	2.1.5. Mecanismos de acción en la biorremediación de efluentes acuícolas	26
2.2.	**ANTECEDENTES**	27
	2.2.1. Parámetros de calidad de los efluentes del cultivo de *Penaeus vannamei*	27
	2.2.2. Eficiencia de remoción de nutrientes en efluentes del cultivo de *Penaeus vannamei*	27
III.	**MATERIALES Y MÉTODOS**	29
3.1.	**TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN**	29
3.2.	**LUGAR DE EJECUCIÓN**	29
3.3.	**POBLACIÓN, MUESTRA Y MUESTREO**	30
3.4.	**MÉTODOS, TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS**	30
	3.4.1. Obtención del sedimento efluente	30
	3.4.2. Obtención del consorcio bacteriano	31
	3.4.3. Bioaumentación bacteriana	32
	a) Densidad de bacterias nitrificantes	32
	b) Dosis y periodo gradual de aplicación del consorcio bacteriano	32
	3.4.4. Eficiencia de biorremediación	33
	a) Tasa de remoción específica de nutrientes	33
	b) Eficiencia de remoción de nutrientes	33
	3.4.5. Análisis de calidad del sedimento tratado	34
	3.4.6. Procesamiento y análisis de datos	35

		Página
IV.	**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**	36
4.1.	**MATERIA ORGÁNICA**	36
4.2.	**DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO**	38
4.3.	**AMONIO**	39
4.4.	**NITRITO**	41
4.5.	**FOSFATO**	43
4.6.	**MICROORGANISMOS HETERÓTROFOS TOTALES**	45
4.7.	**COLIFORMES TERMOTOLERANTES**	46
V.	**CONCLUSIONES**	49
VI.	**RECOMENDACIONES**	50
VII.	**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**	52
	ANEXOS	63
	CERTIFICADO DE ORIGINALIDAD	83

ÍNDICE DE TABLAS

Página

Tabla 1.
Denominación de los tratamientos de bioaumentación bacteriana 32

Tabla 2.
Métodos y equipos utilizados para el análisis de calidad del sedimento efluente 34

Tabla 3.
Concentración promedio final, tasa de remoción específica total y eficiencia de remoción total de la materia orgánica en el sedimento efluente (3 réplicas, promedio ± desviación estándar) 36

Tabla 4.
Concentración promedio final, tasa de remoción específica total y eficiencia de remoción total de la demanda bioquímica de oxígeno en el sedimento efluente (3 réplicas, promedio ± desviación estándar) 38

Tabla 5.
Concentración promedio final, tasa de remoción específica total y eficiencia de remoción total de la demanda bioquímica de oxígeno en el sedimento efluente (3 réplicas, promedio ± desviación estándar) 40

Tabla 6.
Concentración promedio final, tasa de remoción específica total y eficiencia de remoción total del nitrito en el sedimento efluente (3 réplicas, promedio ± desviación estándar) 41

Tabla 7.
Concentración promedio final, tasa de remoción específica total y eficiencia de remoción total del fosfato en el sedimento efluente (3 réplicas, promedio ± desviación estándar) 43

Tabla 8.
Concentración promedio final, tasa de remoción específica total y eficiencia de remoción total de los microorganismos heterótrofos totales en el sedimento efluente (3 réplicas, promedio ± desviación estándar) 45

Tabla 9.
Concentración promedio final, tasa de remoción específica total y eficiencia de remoción total de los microorganismos heterótrofos totales en el sedimento efluente (3 réplicas, promedio ± desviación estándar) 47

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Ubicación del lugar de ejecución de la investigación (Imagen de Google Earth, 2025)	30
Figura 2. Flujo de los métodos desarrollados en la bioaumentación bacteriana gradual	31
Figura 3. Modelo experimental: Representación de la distribución de los tratamientos en las unidades experimentales	33

ÍNDICE DE ANEXOS

Página

Tabla 10.
Concentración de la materia orgánica (%) durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para la biorremediación del sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei 63

Tabla 11.
Concentración de la demanda bioquímica de oxígeno (mg/kg) durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para la biorremediación del sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei 64

Tabla 12.
Concentración del amonio (mg/kg) durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para la biorremediación del sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei 65

Tabla 13.
Concentración del nitrito (mg/kg) durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para la biorremediación del sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei 66

Tabla 14.
Concentración del fosfato (mg/kg) durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para la biorremediación del sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei 67

Tabla 15.
Concentración de los microorganismos heterótrofos (U.F.C./g) durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para la biorremediación del sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei 68

Tabla 16.
Concentración de los coliformes termotolerantes (NMP/100 g) durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para la biorremediación del sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei 69

Tabla 17.
ANOVA (α = 0,05) de un factor, de las concentraciones finales de los parámetros de calidad del sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para su biorremediación 70

Tabla 18.
Agrupación por la prueba de Tuckey (α = 0,05) de las concentraciones finales de la materia orgánica en el sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para su biorremediación 71

Tabla 19.
Agrupación por la prueba de Tuckey (α = 0,05) de las concentraciones finales de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) (mg/kg) en el sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para su biorremediación 71

Página

Tabla 20.
Agrupación por la prueba de Tuckey (α = 0,05) de las concentraciones finales del amonio en el sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para su biorremediación 71
Tabla 21.
Agrupación por la prueba de Tuckey (α = 0,05) de las concentraciones finales del amonio en el sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para su biorremediación 72
Tabla 22.
Agrupación por la prueba de Tuckey (α = 0,05) de las concentraciones finales del fosfato en el sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para su biorremediación 72
Tabla 23.
Agrupación por la prueba de Tuckey (α = 0,05) de las concentraciones finales de los microorganismos heterótrofos totales en el sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para su biorremediación 72
Tabla 24.
Agrupación por la prueba de Tuckey (α = 0,05) de las concentraciones finales de los coliformes termotolerantes en el sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para su biorremediación 73
Tabla 25.
ANOVA (α = 0,05) de un factor, de las tasas de remoción específicas totales de los parámetros de calidad del sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para su biorremediación 74
Tabla 26.
Agrupación por la prueba de Tuckey (α = 0,05) de las tasas de remoción específicas totales de la materia orgánica (%/día) en el sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para su biorremediación 75
Tabla 27.
Agrupación por la prueba de Tuckey (α = 0,05) de las tasas de remoción específicas totales de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) (mg/kg-día) en el sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para su biorremediación 75
Tabla 28.
Agrupación por la prueba de Tuckey (α = 0,05) de las tasas de remoción específicas totales del amonio (mg/kg-día) en el sedimento efluente del cultivo intensivo de *Penaeus vannamei* durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para su biorremediación 75
Tabla 29.
Agrupación por la prueba de Tuckey (α = 0,05) de las tasas de remoción específicas totales del nitrito (mg/kg-día) en el sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para su biorremediación 76

Página

Tabla 30.
Agrupación por la prueba de Tuckey (α = 0,05) de las tasas de remoción específicas totales del fosfato (mg/kg-día) en el sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para su biorremediación 76
Tabla 31.
Agrupación por la prueba de Tuckey (α = 0,05) de las tasas de remoción específicas totales de los microorganismos heterótrofos totales en el sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para su biorremediación 76
Tabla 32.
Agrupación por la prueba de Tuckey (α = 0,05) de las tasas de remoción específicas totales de los coliformes termotolerantes en el sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para su biorremediación 77
Tabla 33.
ANOVA (α = 0,05) de un factor, de las eficiencias de remoción totales (%) de los parámetros de calidad del sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para su biorremediación 78
Tabla 34.
Agrupación por la prueba de Tuckey (α = 0,05) de las eficiencias de remoción totales (%) de la materia orgánica en el sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para su biorremediación 79
Tabla 35.
Agrupación por la prueba de Tuckey (α = 0,05) de las eficiencias de remoción totales (%) de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) (mg/kg) en el sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para su biorremediación 79
Tabla 36.
Agrupación por la prueba de Tuckey (α = 0,05) de las eficiencias de remoción totales (%) del amonio en el sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para su biorremediación 79
Tabla 37.
Agrupación por la prueba de Tuckey (α = 0,05) de las eficiencias de remoción totales (%) del nitrito en el sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para su biorremediación 80
Tabla 38.
Agrupación por la prueba de Tuckey (α = 0,05) de las eficiencias de remoción totales (%) del fosfato en el sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para su biorremediación 80
Tabla 39.
Agrupación por la prueba de Tuckey (α = 0,05) de las eficiencias de remoción totales (%) de los microorganismos heterótrofos totales en el sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para su biorremediación 80

Página

Figura 4. Fotografías sobre el análisis de calidad del sedimento fluente: A) Muestras, B) Uso del fotómetro y C) Tubos para determinación de la concentración del parámetro 81

Figura 5. Fotografías sobre el análisis de calidad del sedimento fluente: A) Inóculo, B) recuento microbiológico y C) Cultivo de microorganismos 82

CERTIFICADO DE ORIGINALIDAD 83

RESUMEN

Se evaluó la eficiencia de la bioaumentación bacteriana gradual para la biorremediación de sedimentos efluentes del cultivo intensivo de *Penaeus vannamei*. Se utilizaron 9 kg de sedimento distribuidos homogéneamente en cajas plásticas de 30 x 20 x 10 cm. Se aplicaron 15 mL/kg de sedimento cada tres días del medio de cultivo Caldo Soya Tripticaseína (TSB), conteniendo 10^8 y 10^9 U.F.C./mL de bacterias *Bacillus subtilis*, *Bacillus* sp., *Bacillus amyloliquefaciens*, *Lactobacillus* sp. y *Lactobacillus plantarum* frente a un tratamiento control sin aplicación del consorcio bacteriano. Para los análisis de calidad se tomaron muestras de 25 g por cada unidad experimental y se utilizó el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23 nd Ed. (2017) y por fotometría (Fotómetro YSI, modelo 9300). Los análisis de datos se realizaron con el Diseño Completamente al Azar ($p = 0,05$) con una prueba de Tuckey para la categorización de los efectos de cada tratamiento. La mayor eficiencia ($p < 0,05$) en la transformación de materia orgánica fue 57,95% con la concentración bacteriana de 10^9 U.F.C./mL, las mayores ($p < 0,05$) eficiencias de disminución en la demanda bioquímica de oxígeno variaron entre 47,39% (10^8 U.F.C./mL) y 48,96% (10^9 U.F.C./mL). Las eficiencias de biorremediación para amonio y fosfato variaron entre 77,62% y el 82,94% con 10^8 y 10^9 U.F.C./mL ($p > 0,05$); el menor incremento de nitrito ($p > 0,05$) se registró en el tratamiento Control (21,88%). La reducción de las poblaciones de microorganismos heterótrofos totales varió entre el 66,63% (10^8 U.F.C./mL) y 77,31% (Control) ($p > 0,05$). En cuanto a los coliformes termotolerantes, se evidenció una disminución de 99,98% en los tratamientos evaluados ($p > 0,05$). El consorcio bacteriano de 10^8 U.F.C./mL, demostró ser la mejor estrategia tecnológicamente viable y eficiente para la biorremediación de sedimentos procedentes de efluentes del cultivo intensivo de *Penaeus vannamei* en un periodo de 18 días de tratamiento.

Palabras clave: bioaumentación, biorremediación, eutrofización, efluentes acuícolas, probióticos en acuicultura, microbiología ambiental, *Litopenaeus vannamei*

ABSTRACT

The efficiency of gradual bacterial bioaugmentation for the bioremediation of effluent sediments from intensive *Penaeus vannamei* culture was evaluated. Nine kilograms of sediment were distributed homogeneously into 30 x 20 x 10 cm plastic boxes. Trypticase Soy Broth (TSB) culture medium—containing 10^8 to 10^9 CFU/mL of a bacterial consortium composed of *Bacillus subtilis, Bacillus* sp.*, Bacillus amyloliquefaciens, Lactobacillus* sp.*,* and *Lactobacillus plantarum*—was applied at a rate of 15 mL/kg of sediment every three days, alongside a control treatment involving no application of the bacterial consortium. For quality analyses, 25 g samples were taken from each experimental unit, and the Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd Ed., (2017) and photometry (YSI photometer, model 9300) were used. Data analysis was performed using a Completely Randomized Design ($p = 0.05$) with a Tukey test to categorize the effects of each treatment. The highest ($p < 0.05$) efficiency in organic matter degradation reached 57.95% at a bacterial concentration of 10^9 CFU/mL; the highest ($p < 0.05$) efficiencies for reducing biochemical oxygen demand ranged from 47.39% (10^8 CFU/mL) to 48.96% (10^9 CFU/mL). Bioremediation efficiencies for mineralized nitrogen, ammonium, and phosphate ranged from 77.62% to 82.94% at 10^8 and 10^9 CFU/mL ($p > 0.05$); the lowest increase in nitrite ($p > 0.05$) was recorded in the Control treatment (21.88%). The reduction in total heterotrophic microorganism populations ranged ($p > 0.05$) from 66.63% (10^8 CFU/mL) to 77.31% (Control). Regarding thermotolerant coliforms, a 99.98% reduction was observed across the evaluated treatments ($p > 0.05$). The bacterial consortium at 10^8 CFU/mL proved to be the technologically viable and efficient strategy for the bioremediation of sediments derived from intensive *Penaeus vannamei* culture effluents over an 18-day treatment period.

Keywords: bioaugmentation, bioremediation, eutrophication, aquaculture effluents, probiotics in aquaculture, environmental microbiology, *Litopenaeus vannamei*

I. INTRODUCCIÓN

La intensificación del cultivo de *Penaeus vannamei* en el mundo lleva consigo impactos positivos como el crecimiento económico y puestos de empleo, utilización de pequeños espacios y alta producción de biomasa, mejora nutricional y riqueza en proteínas, además, la implementación de nuevas tecnologías con el uso de inteligencia artificial para la bioseguridad y el tratamiento de aguas con tendencia a la sostenibilidad y resiliencia a las enfermedades.

No obstante, los impactos negativos como la contaminación del agua y suelo del entorno a los sistemas de cultivo que vierten sus efluentes, en algunos casos, sin tratamiento previo, la propagación de enfermedades bacterianas, virales y parasitarias, que afectan la sostenibilidad de ecológica y económica de la industria.

Entre las tecnologías, se han propuesto varias alternativas para el tratamiento de los efluentes y mitigar los problemas de contaminación y proliferación de enfermedades.

La soluciones propuestas, son posibles y en parte se realizan para el tratamiento del agua efluente, pero muy poco para los sedimentos, lo que deja un vacío de conocimiento sobre la eficiencia de la utilización en el suelo, que está compuesto por desechos metabólicos, orgánicos e inorgánicos, por lo que, una solución mayor sería la de dar un adecuado manejo a este tipo de efluentes, utilizando microorganismos bacterianos para acelerar la degradación de la materia orgánica excedente mediante un método de biorremediación, denominado bioaumentación con bacterias nitrificantes, a fin de disminuir el potencial de contaminación antes de ser evacuados al ambiente donde operan las langostineras (Saldarriaga, 2013).

En este contexto, para la degradación de la materia orgánica del sedimento presente en el fondo de estanques acuícolas, la utilización de bacterias seleccionadas que han dado resultados efectivos en el tratamiento del agua de

cultivo y en la fase líquida de los efluentes, constituye una forma de intervención controlada para disminuir la concentración de compuestos nitrogenados y fosfatados que no se logra solo con las comunidades bacterianas autóctonas del sistema suelo.

Se planteó la hipótesis de que, esa eficiencia varía entre 80 a 90% respecto de los siguientes parámetros de calidad: materia orgánica, compuestos nitrogenados (amonio, nitrito y nitrato), fosfato, demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), bacterias totales y bacterias coliformes termotolerantes.

La investigación se orientó a alcanzar el siguiente objetivo general: Evaluar la eficiencia de la bioaumentación bacteriana gradual para la biorremediación de sedimentos efluentes del cultivo intensivo de *Penaeus vannamei*.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. BASES TEÓRICO-CIENTÍFICAS

2.1.1. Cultivo intensivo de *Penaeus vannamei*

En los sistemas de cultivos de langostino intensivos semicerrados y cerrados, la propagación de las enfermedades bacterianas y virales renovó el interés de la utilización de medidas de bioseguridad en las instalaciones de producción, para lo cual se incluyen estanques de sedimentación de sólidos, sistemas de filtración, estanques de engorde, estanque de tratamiento de efluentes. En los últimos años se ha incorporado el recubrimiento del fondo de los estanques con geomembrana de alta densidad y un cubrimiento superior con plástico transparente para propiciar un ambiente de invernadero, de tal manera que se pueda ejercer un mayor control y manejo de los parámetros físicos y químicos del agua como amonio, nitrito y temperatura (Saldarriaga, 2009).

2.1.2. Contaminación de los ecosistemas por descargas de efluentes acuícolas

Los sistemas de cultivo acuático, en algunos casos, pueden considerarse serias fuentes de contaminación del ambiente, debido a que, la mayoría de las empresas descargan sus efluentes sin tratamiento alguno, lo que ocasiona un gran impacto ambiental sobre los ecosistemas acuáticos con los cuales se encuentran relacionados (Vinatea, 2001).

En los sedimentos acuícolas, la concentración de materia orgánica varía entre 3 a 16% lo cual ocasiona estratificación, bajos niveles de oxígeno y disminución de la biodiversidad de microorganismos asociados a los fondos de las unidades de producción (Burbano-Gallardo et al., 2021), la mayor carga orgánica, nutrientes y sedimentos se encuentran la parte final, aproximadamente 10 a 15% del efluente descargado (Colette et al., 2023; Hasibuan et al., 2023; Navarrete et al., 2022), es claro entonces, que se deben aplicar buenas prácticas de

manejo para disminuir estos niveles de materia orgánica y que no excedan el 3 a 4% (Guerrero, 2023).

La intensificación del cultivo de *P. vannamei*, en el mundo, ocasionan impactos ambientales negativos en los ecosistemas acuáticos ocasionados por el aumento de material orgánico y compuestos inorgánicos, no obstante, de las reglamentaciones ambientales existentes, la contaminación sigue siendo un problema ambiental (Kim et al., 2021; Drózdz et al., 2020). Esta acumulación de material orgánico proveniente de los desechos metabólicos de los langostinos, debido a la alimentación balanceada excesiva, abonos, fertilizantes incorporados en los estanques en el proceso de cultivo, siguen siendo problemáticos para la actividad (Sandifer y Hopkings, 1995).

Los residuos de nitrógeno y fósforo en el alimento balanceado para los camarones sobrecargan la capacidad natural de autodepuración de los suelos, contaminando el agua y el sedimento con amonio, nitritos, nitratos y fosfatos, lo cual es tóxico para la vida acuática, altera el pH y el oxígeno disuelto, y favorece el crecimiento de microorganismos dañinos, degradando el ecosistema (Hong et al., 2020; Kathyayani et al., 2019).

Las descargas de estos efluentes generan contaminación en los cuerpos receptores como canales de marea, ríos o lagos y esa mala calidad de agua promueve la aparición de enfermedades en los cultivos, condicionando la aplicación de antibióticos en el control de enfermedades. Utilización indiscriminada de estos medicamentos crea condiciones de resistencia bacteriana patógena que también afecta la salud humana, esto ha motivado la investigación de tecnologías para reducir las pérdidas económicas de los productores, el riesgo en el consumo humano y el impacto negativo sobre el ambiente (Brunton et al*.,* 2019).

2.1.3. Caracterización de los efluentes acuícolas

Los efluentes de residuos de los cultivos acuáticos se caracterizan por ser ricos en amoníaco, nitrito y nitrato, fósforo y carbono orgánico en altas concentraciones que pueden causar contaminación del ambiente (Saldarriaga, 2013). El amoníaco (NH_3) surge de la descomposición de desechos orgánicos y la respiración de los organismos acuáticos; bacterias como *Nitrosomonas* y *Nitrobacter* lo convierten en

nitritos (NO_2^-) y luego en nitratos (NO_3^-), que plantas y algas usan como nutrientes, pero si hay exceso, causa eutrofización, desequilibrando el ecosistema, consecuentemente deteriorando la vida acuática (Lananan et al., 2014).

Además, en una bioprospección de bacterias que habitan el sedimento de un estanque de cultivo de *P. vannamei*, en una granja de Ecuador, a fin de identificar la biodiversidad bacteriana en cinco puntos del estanque, Bravo et al. (2024), encontraron que, el nitrógeno total fue 0,37%, pH 8,64, fósforo 3,40 mg/g, la concentración de materia orgánica fue alta de 15-21%, así como el carbono orgánico 3,25%, lo que evidencia la acumulación de materiales orgánicos que en condiciones de anaerobiosis se descomponen lentamente.

2.1.4. Biorremediación de efluentes acuícolas

Se han propuesto métodos físicos (como sedimentación, aunque costosos y con exceso de fitoplancton) y biológicos (cultivo de moluscos para filtrar sólidos y macroalgas para absorber nutrientes) para limpiar efluentes de cultivo, aprovechando su riqueza en nutrientes y microorganismos para depuración y producción.

Sin embargo, para la descontaminación de efluentes de acuícolas se están utilizando biorremediadores, que son diversos organismos animales o vegetales, empleados en forma individual o combinada, para minimizar la carga contaminante. La biorremediación, es un proceso en el cual se hace uso de las capacidades naturales o modificadas de los organismos para transformar y reducir ambientes impactados, y desechos potencialmente nocivos transformándolos en productos más inocuos (Martínez, 2009). En la biorremediación, la conversión bacteriológica de compuestos orgánicos nitrogenados a nitrato, se llama ciclo del nitrógeno.

Es necesario tener en cuenta que la legislación regula las condiciones ambientales de los efluentes, no obstante, se precisa desarrollar y aplicar biotecnologías para el tratamiento y mejoramiento su calidad durante el proceso productivo. Se han planteado muchas soluciones al problema, pero los desechos metabólicos y sedimentos orgánicos e inorgánicos siempre van a existir y si la tendencia es intensificar cada vez más los sistemas de cultivo, se deduce que esta carga excede y excederá en algún momento la capacidad asimiladora y depuradora de los

ecosistemas naturales utilizados hasta hoy como sumideros, por lo que una solución mayor sería la de disponer y dar un adecuado tratamiento a la carga excedente de material particulado de los efluentes, que ineludiblemente conllevaría a la utilización de estanques de sedimentación y la utilización de microorganismos bacterianos para aumentar la transformación de la materia orgánica excedente (biofiltración), a fin de disminuir el potencial de contaminación cuando los efluentes sean evacuados al ambiente donde operan las langostineras (Saldarriaga, 2013).

El uso de microorganismos como las bacterias y hongos, se han convertido en herramientas para mitigar la contaminación, en razón de que descomponen la materia orgánica y contaminantes en moléculas menos contaminantes y hasta inofensivas la el amiente, esto se denomina biorremediación, método que aplica microorganismos para biorremediar o descontaminar ambientes con altas cargas de materia orgánica y compuestos químicos tóxicos (Rodríguez-Gonzáles et al., 2022; Morillo et al., 2020; Barman, 2020).

Según Milena et al. (2023) y Castro (2021), el método de biorremediación se basa en las siguientes técnicas: la bioestimulación, aquí se utilizan nutrientes para promover el aumento de la población microbiana; y la bioaumentación, en la que aumentan poblaciones microbianas específicas. Sin embrago, su eficiencia y eficacia están condicionados por los niveles de los parámetros de la calidad del agua o suelo, tales como temperatura, oxígeno disuelto y pH (Alori et al., 2022; Mishra et al., 2021; Martínez, 2009). Las ventajas más importantes es la remediación en el lugar a bajo costo y la ausencia de contaminación secundaria, cualidades importantes para su aplicación en sistemas de cultivo (Dong et al. 2021; Shah & Shah, 2020).

Los procesos de biorremediación implican la utilización de cepas bacterianas, siendo las más comunes las de los géneros *Bacillus*, que están ampliamente distribuidos en el orbe (Bravo et al., 2024), son de fácil cultivo en laboratorio e importantes por la biosíntesis de metabolitos (González et al, 2024). Se considera que, los *Bacillus*, son eficientes al 98 % en la oxidación de compuestos nitrogenados como nitratos y nitritos en otros compuestos menos tóxicos o inocuos (Rodríguez-Gonzáles et al., 2022), también, reducen las concentraciones de dióxido de carbono (CO_2) y materia orgánica (Pérez et al., 2020), reincorporan

nutrientes disponibles, consumen sedimentos y reducen las concentraciones de carbono orgánico, sólidos suspendidos, amonio y fosfatos (Hlordzi, et al., 2020).

Las bacterias del género *Bacillus* como *Bacillus subtilis* y *B. licheniformis* (Mendes, 2021) han demostrado excelencia para la biorremediación de ecosistemas acuícolas, por su capacidad metabólica (Chhetri et al., 2022), ya que mejoran la calidad de agua y sedimentos al degradar desechos orgánicos (Zhou et al., 2021; Hlordzi et al., 2020), en el ciclo del nitrógeno, equilibrando el crecimiento de la microfauna, disminuyendo las concentraciones de los compuestos nitrogenados y fosforados, lo que confirma su eficacia para descomponer contaminantes y mantener la salud de los ambientes acuáticos como en la acuicultura (Chaverra-Garcés, 2022; Pedraza et al., 2020; Lopes, 2021; Soltani et al., 2019: Galicia-Jiménez et al., 2011) y mejoran la calidad de los suelos para acuicultura (Colette et al., 2023; Husain et al., 2022; Pal et al., 2020).

2.1.5. Mecanismos de acción en la biorremediación de efluentes acuícolas

La oxidación anaeróbica del amonio o anammox es otra vía de desnitrificación del proceso biológico, importante en el ciclo del nitrógeno, eficiente para la descontaminación de aguas residuales, donde bacterias especializadas convierten el amonio (NH_4^+) y el nitrito (NO_2^-) en gas nitrógeno (N_2) y agua (H_2O) en ausencia de oxígeno, ahorrando energía y costos al no necesitar materia orgánica externa para la desnitrificación (Chávez-Crooker & Obreque-Contreras, 2010¸ Rodicio y Mendoza, 2004¸ Mostafa et al., 2021). Aunque inicialmente se consideró una rareza, posteriormente se descubrió que el anammox era responsable del 24 a 67 % de la pérdida de nitrógeno en sedimentos marinos (Caudel et al., 2023). Actualmente, la actividad del anammox parece explicar entre el 20 y el 40 % de toda la pérdida de nitrógeno en el océano (Noles et al., 2017). También está presente en sedimentos costeros y estuarinos (Mostafa et al., 2021; Caudel et al., 2023; Zavaleta et al., 2021), cuencas anóxicas (Medina et al., 2019), zonas de mínimo oxígeno, manglares, hielo marino (Lujan, 2022) y lagos de agua dulce (Rivera y Doumet, 2020). Parece probable que la actividad de anammox contribuya significativamente a la desnitrificación de sedimentos anóxicos derivados de la acuicultura.

2.2. ANTECEDENTES

2.2.1. Parámetros de calidad de los efluentes del cultivo de *Penaeus vannamei*

En una bioprospección de bacterias que habitan el sedimento de un estanque de cultivo de *P. vannamei*, en Ecuador, a fin de identificar la biodiversidad bacteriana en cinco puntos del estanque, Bravo et al. (2024), realizó un estudio taxonómico mediante secuenciación de alto rendimiento de la región 16S e identificó 13 grupos bacterianos, donde predominaron las bacterias no cultivadas (73,24%), seguidas por *Terrabacteria* (7%) y *Pseudomonadota* (7%). Esto sugiere una gran diversidad microbiana, con una porción significativa de especies aún no caracterizadas o difíciles de cultivar en laboratorio. La alta abundancia de bacterias no cultivadas resalta la necesidad de nuevas técnicas para su estudio y comprensión.

Al respecto, González y Rosado (2022), afirman que, aproximadamente 66% del fósforo presente en el alimento balanceado utilizado por los organismos en cultivo depositan en el sedimento de los estanques de cultivo de camarones de la cual una ínfima parte puede ser soluble en el agua.

Bravo et al. (2024), consideran que, es importante la identificación de los géneros bacterianos en el sedimento, para la determinar el rol de la biodiversidad poblacional en el hábitat, porque dependiendo de sus interacciones los sedimentos son degradados a nutrientes o contaminantes del medio.

2.2.2. Eficiencia de remoción de nutrientes en efluentes del cultivo de *Penaeus vannamei*

En un sistema de cultivo con recirculación de agua a 60 y 120 ind./m^2 de *Litopenaeus vannamei* utilizando tapetes microbianos para disminuir la contaminación y biorremediar los efluentes, Lezama-Cervantes et al., (2010), determinaron que, la composición microbiana natural fue: bacterias (55,6%), cianofitas (18,4%), diatomeas (9%), nemátodos (5,6%) y clorofitas (1,4%), que contribuyeron significativamente ($p < 0,05$) a la remoción diaria de sólidos suspendidos totales (62%), TAN (71%) y la DBO_5 (68%). Se concluyó que, los tapetes microbianos, retienen la materia orgánica, condicionando el incremento del

nitrógeno inorgánico por nitrificación a más de 10 mg $N\text{-}NO_5$/L debido a esto el nitrato aumentó hasta 750% más que en los sistemas de control.

En un estudio sobre caracterización molecular de bacterias nitrificantes heterotróficas en sedimentos del cultivo súper intensivo de *L. vannamei* a baja salinidad, Borja (2024), aisló de *Acinetobacter harbinensis*, *Pseudomonas baleárica*, *P. stutzeri*, *P. taiwanensis*, *Enterobacter cloacae*, *P. nitroreducens*, *P. putida* y *Bacillus amyloliquefaciens*, con las cuales conformó un consorcio y obtuvo tasas de nitrificación de amonio y nitrito de 3,3 y 2,5 mg/L-h, respectivamente, concluyendo que esta composición bacteriana podría utilizarse para biorremediación del nitrógeno en sistemas de acuicultura.

Shu et al. (2022), utilizaron bacterias heterótrofas nitrificantes y aeróbicas-desnitrificantes (*Pseudomonas mendocina* S16 y *Enterobacter cloacae* DS'5) aisladas de cultivos en agua. Lograron eficiencias de remoción de nitrógeno de 66,59 a 97,97% y 72,27 a 96,44%, respectivamente. El estudio concluyó que las bacterias nitrificantes heterotróficas tienen un gran potencial para la descontaminación de aguas efluentes acuícolas (Shu et al., 2022).

Saldarriaga (2013), en una investigación para el tratamiento de efluentes del cultivo intensivo de *Penaeus vannamei* por sedimentación y biofiltración, determinó que las eficiencias de remoción de un consorcio bacteriano de los géneros *Streptobacillus*, *Bacillus*, *Diplobacillus* y *Coccobacillus* a las concentraciones de 10^8 y 10^9 U.F.C./mL determinó que el mejor tratamiento fue la concentración de 10^9 U.F.C./mL en 24 h de TRH, con eficiencias de remoción para sólidos suspendidos totales (SST) 97,30 %; nitrógeno amoniacal total (TAN) 29,76 %; nitrato, 79,41 %; bacterias heterotróficas 99,83 %; coliformes termotolerantes 90,34 %; en fosfato, sulfuro, demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) y clorofila α, no hubo remoción. Concluyó que, en la descontaminación de efluentes del cultivo intensivo de *P. vannamei*, es necesario la incorporación de aireación mecánica para abastecer de oxígeno al medio y todos los procesos fisicoquímicos y biológicos de descomposición de la materia orgánica se realicen por la vía de oxidación y en menor escala por la vía de la reducción.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

De acuerdo con el fin que se persigue, la investigación fue del tipo aplicada (Tresierra, 2000), porque consistió en la aplicación de conocimientos básicos sobre biorremediación para la descontaminación del sedimento efluente del cultivo intensivo de *P. vannamei*, con la finalidad de recomendar su aplicación posterior.

De acuerdo con el diseño de contrastación, fue experimental verdadera (Tresierra, 2000), aquí se manipuló la variable concentración del consorcio bacteriano (10^8 y 10^9 U.F.C./mL), se utilizó un grupo control (sin aplicación del consorcio bacteriano) y la asignación de cada tratamiento al sedimento problema fue aleatoria.

Se utilizó un diseño experimental de estímulo creciente con preprueba, posprueba y grupo control (Alvitres, 2000).

3.2. LUGAR DE EJECUCIÓN

La etapa de ejecución de la tesis se realizó en el Taller del Centro de Producción Acuícola de la Facultad de Ingeniería Pesquera y Ciencias del Mar (FIPCM) de la Universidad Nacional de Tumbes, ubicada en la localidad de Puerto Pizarro, distrito de Tumbes y provincia de Tumbes, bajo las coordenadas 567 322 m E y -9 612 587 m N, Zona geográfica 17 (Figura 1).



Figura 1. Foto satelital del lugar de ejecución de la tesis

(Imagen de Google Earth, 2025)

3.3. POBLACIÓN, MUESTRA Y MUESTREO

La población del experimento fue de 9 kg de sedimento de un cultivo intensivo de *P. vannamei*, obtenida de una langostinera de Tumbes.

El tamaño de la muestra fue de 25 g de sedimento (25%) por cada unidad experimental (1 kg).

Para los análisis de calidad inicial del sedimento efluente se tomó una muestra de 25 g por cada unidad experimental. Los análisis fisicoquímicos y microbiológicos se realizaron en el laboratorio de la Empresa AGROACUANÁLISIS S.R.L., sito Mz. T, lote 14, urb. José Lishner Tudela, segunda etapa en la ciudad de Tumbes, distrito, provincia y departamento de Tumbes.

3.4. MÉTODOS, TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

3.4.1. Obtención del sedimento efluente

Al inicio de la experimentación, el sedimento fresco obtenido inmediatamente después de la cosecha fue expuesto al aire libre por seis días para lograr un ligero secado con el objetivo de disminuir la alta humedad y evitar la muerte del consorcio

bacteriano al aplicarlas en esas condiciones anaerobias del sedimento efluente (Figura 2).

3.4.2. Obtención del consorcio bacteriano

Se utilizó un consorcio bacteriano conformado por las cepas de bacterias: *Bacillus subtilis*, *Bacillus sp.*, *Bacillus amyloliquefaciens*, *Lactobacillus sp.* y *Lactobacillus plantarum* a las densidades requeridas que fueron donadas por el laboratorio de la Empresa AGROACUANÁLISIS S.R.L. cultivadas en el medio nutritivo (caldo Soya Tripticaseína: TSB) a base del digerido de caseína, peptona de soya y el cloruro de sodio en agua purificada por tres días de incubación y posteriormente bioaumentados con solución de melaza al 0,2%.

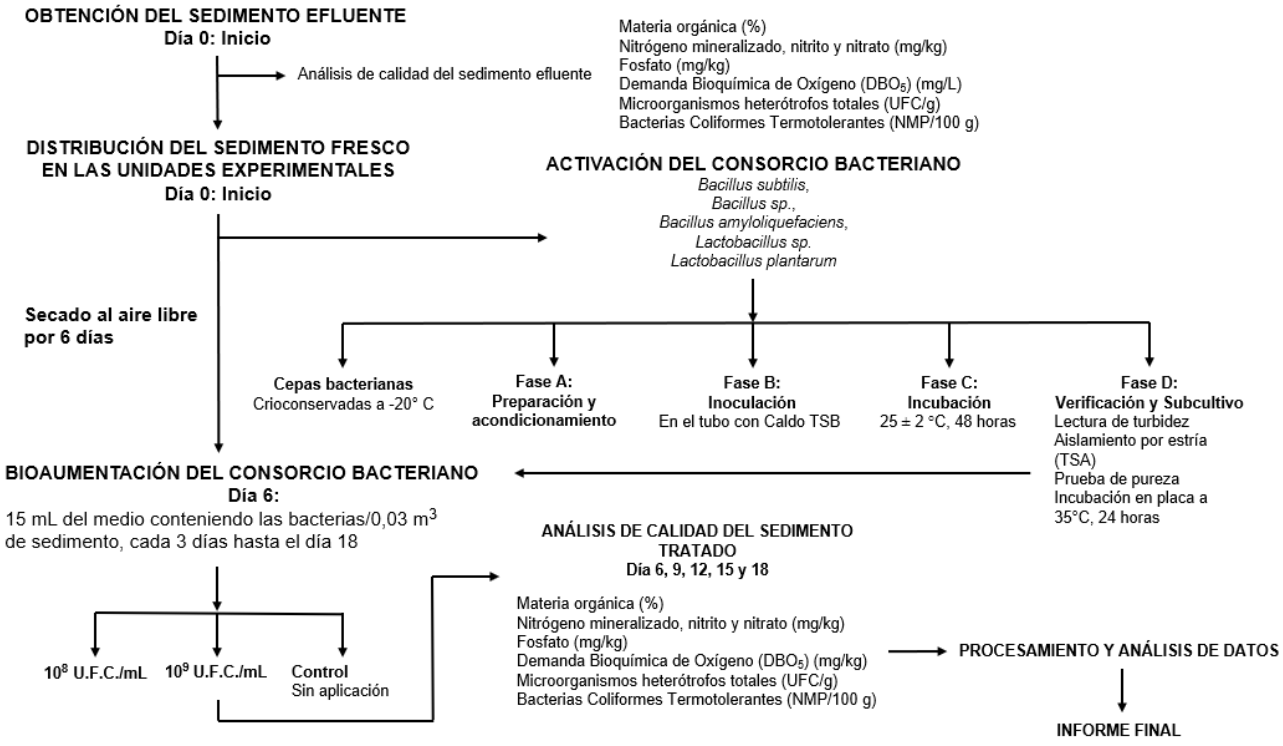


Figura 2. Flujo de los métodos desarrollados en la bioaumentación bacteriana gradual

3.4.3. Bioaumentación bacteriana

a) Densidad de bacterias nitrificantes

Se utilizaron tres grupos experimentales definidos por dos concentraciones del consorcio bacteriano: 10^8 U.F.C./mL, 10^9 U.F.C./mL, con su medio de cultivo y un control con bacterias naturales sin cultivar, presentes en el sedimento efluente (Tabla 1).

Tabla 1.

Denominación de los tratamientos de bioaumentación bacteriana

Tiempo de Bioaumentación Bacteriana (días)	Densidad de Bacterias (U.F.C./mL)		
	Naturales B 0	**Nitrificantes B 10^8**	**Nitrificantes B 10^9**
TB 3	TB_3B_0	TB_3B_8	TB_3B_9
TB 6	TB_6B_0	TB_6B_8	TB_6B_9
TB 9	TB_9B_0	TB_9B_8	TB_9B_9
TB 12	$TB_{12}B_0$	$TB_{12}B_8$	$TB_{12}B_9$
TB 15	$TB_{15}B_0$	$TB_{15}B_8$	$TB_{15}B_9$
Repeticiones	3	3	3

b) Dosis y periodo gradual de aplicación del consorcio bacteriano

Se aplicaron 15 mL del consorcio bacteriano (10^8 U.F.C./mL y 10^9 U.F.C./mL) por cada 0,03 m^3 de sedimento (unidad experimental de 0,3 x 0,2 x 0,05 m), con bioaumentación cada tres días en el periodo de 12 días, expuestos al aire libre. Cada grupo experimental tuvo tres repeticiones.

Se utilizarán nueve unidades experimentales de 0,45 x 0,20 x 0,30 m. En cada uno se depositarán 2 kg de sedimento efluente húmedo los cuales permanecerán estáticos, al aire libre, durante 12 días. El modelo experimental se presenta en la Figura 3.

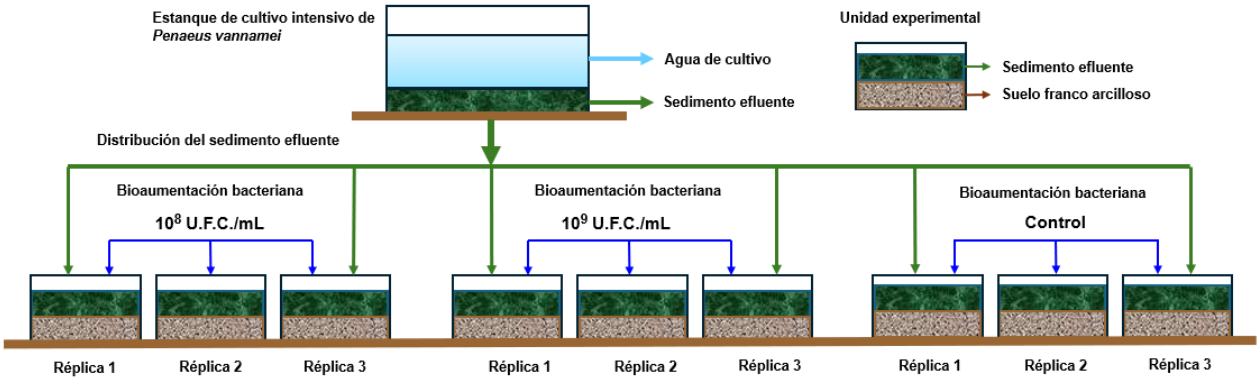


Figura 3. Modelo experimental: Representación de la distribución de los tratamientos en las unidades experimentales

3.4.4. Eficiencia de biorremediación

a) Tasa de remoción específica de nutrientes

Es la disminución diaria de la concentración del nutriente. Se determinó en la siguiente fórmula:

$$\mathbf{TRE} = \frac{\mathbf{C_F} - \mathbf{C_0}}{\mathbf{T}}$$

Donde:

TRE = Tasa de Remoción Específica (mg/L-día)

C_f = Concentración final del nutriente (mg/L)

C_0 = Concentración inicial del nutriente (mg/L)

T = Periodo de evaluación (día)

b) Eficiencia de remoción de nutrientes

Es la disminución de la concentración del nutriente inicial con respecto a la concentración inicial, expresado en porcentaje. Se determinó en la siguiente fórmula:

$$\mathbf{ER} = \frac{\mathbf{C_F} - \mathbf{C_0}}{\mathbf{C_0}} \mathbf{\ x\ 100\%}$$

Donde:

ER = Eficiencia de remoción (%)

C_f = Concentración final del nutriente (después del tratamiento, mg/L)

C_0 = Concentración inicial del nutriente (antes del tratamiento, mg/L)

3.4.5. Análisis de calidad del sedimento tratado

Los análisis fisicoquímicos y microbiológicos del sedimento efluente, se siguieron los métodos indicados en la Tabla 2.

Tabla 2.

Métodos y equipos utilizados para el análisis de calidad del sedimento efluente

Parámetro	Método	Equipo
Materia Orgánica (%)	Fotometría. Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods, 5.3. 1996.Chapter 34. Total Carbon, Organic Carbon, and Organic Matter. Walkley-Black Method. Colorimetric Methods.	Fotómetro YSI, Modelo 9300
Nitrógeno mineralizado, nitrito y nitrato (mg/kg)	Fotometría. Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods, 5.3. 1996.Chapter 38. Nitrogen—Inorganic Forms. Extraction of exchangeable ammonium, Nitrate, Nitrite. (Keeney y Nelson Method) and Colorimetric Methods	Fotómetro YSI, Modelo 9300
Fosfato (mg/kg)	Fotometría. Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods, 5.3. 1996.Chapter 32. Available phosphorus in soil. Extraction with Alkaline Solution (Olsen Method) and Colorimetric Methods	Fotómetro YSI, Modelo 9300
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) (mg/L)	Extracto acuoso: Incubación por cinco días. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (SMEWW-APHA-AWWA-WEF, Part 5210 B, 23.ª ed., 2017).	Oxímetro, Incubadora refrigerante
Microorganismos heterótrofos totales (UFC/g)	Recuento en Placa Petri por vertido (*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (SMEWW-APHA-AWWA-WEF, Part 9215 B y C, 23.ª ed., 2017).	Cocina Incubadora, Balanza Autoclave
Bacterias Coliformes Termotolerantes (NMP/100 g)	Número Más Probable (NMP) (*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (SMEWW-APHA-AWWA-WEF, Part 9215 B y C, 23.ª ed., 2017).	Cocina Incubadora, Balanza Autoclave
Temperatura (°C)	Lectura directa	Fotómetro YSI, Modelo 9300

3.4.6. Procesamiento y análisis de datos

Los datos de las variables en estudio obtenidos fueron consignados, sistematizados y procesados con el software Excel de Microsoft Office con el que se calcularon las medidas de tendencia. Las pruebas estadísticas se realizaron con el programa estadístico Statistical Package for the Social Sciences (SPSS, versión 2022).

La variabilidad de los niveles de los parámetros de calidad del sedimento efluente (variables independientes), fisicoquímicos y microbiológicos, se analizaron según el Diseño Completamente al Azar, por medio de un Análisis de Varianza (ANVA) y la prueba de Tuckey ($\alpha = 5\%$) para determinar la categorización de los efectos por cada densidad bacteriana en estudio (Calzada 1982).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. MATERIA ORGÁNICA

El efecto de la concentración (dosis-respuesta) por la bioaumentación con el consorcio de *Bacillus* spp. y *Lactobacillus* spp. incrementó la degradación de la materia orgánica biodegradable en comparación con la microbiota nativa del Control.

Al día 18, final del experimento, el grupo Control registró la concentración más alta de materia orgánica con 12,13% ± 0,26% y conforme se realizó la bioaumentación bacteriana las concentraciones disminuyeron significativamente, siendo que, en el tratamiento de 10^8 U.F.C./mL se obtuvo 10,13% ± 0,17%, mientras que en el tratamiento de 10^9 U.F.C./mL la concentración fue más baja con 9,25% ± 0,28% evidenciando diferencias ($p < 0,05$) entre todos los grupos experimentales (Tabla 3, 10, 17 y 18).

Tabla 3.
Concentración promedio final, tasa de remoción específica total y eficiencia de remoción total de la materia orgánica en el sedimento efluente (3 réplicas, promedio ± desviación estándar)

Tratamiento	Materia orgánica (%)	Tasa de remoción específica total (%/día)	Eficiencia de remoción total (%)
Control	12,13 ± 0,26 a	0,55 ± 0,01 a	44,83 ± 1,14 a
10^8 U.F.C./mL	10,13 ± 0,17 b	0,66 ± 0,01 b	53,95 ± 0,87 b
10^9 U.F.C./mL	9,25 ± 0,28 c	0,71 ± 0,02 c	57,95 ± 1,42 c

Nota: Las letras significan que existe diferencia estadística ($p < 0,05$) entre los promedios

La menor tasa de remoción específica total (final de la experimentación) como producto de la actividad microbiana natural del sedimento en el Control fue de 0,55%/día, en el tratamiento de 10^8 U.F.C/mL fue de 0,66%/día y 0,71%/día con 10^9

U.F.C./mL (Tabla 3), siendo diferentes estadísticamente ($p < 0,05$) (Tabla 3, 25, 26).

La eficiencia de remoción siguió la misma tendencia de comportamiento negativo, reportando 44,83% para el Control, 53,95% para el tratamiento con 10^8 U.F.C./mL y 57,95 % para 10^9 U.F.C./mL, con diferencias ($p < 0,05$) entre cada uno de los tratamientos evaluados. Se observó que, la bioaumentación incrementó el rendimiento global de biorremediación en un 9,12% adicional con 10^8 U.F.C./mL y un 13,12% adicional con 10^9 U.F.C./mL respecto al Control sin inoculación microbiana (Tabla 3, 33 y 34).

El rendimiento superior del tratamiento con 10^9 U.F.C./mL en la tasa de remoción específica total y eficiencia de remoción total en comparación con el Control se atribuye a la complementariedad metabólica del consorcio utilizado. Especies de *Bacillus* (*B. subtilis*, *Bacillus* sp., *B. amyloliquefaciens*), son reconocidos productores de exoenzimas hidrolíticas de alta eficiencia, como proteasas, lipasas y amilasas (Borja, 2024). Estas bacterias degradan macromoléculas orgánicas complejas e inician la mineralización directa del carbono heterótrofo a CO_2, agua y biomasa. Este comportamiento sinérgico entre las especies del género *Bacillus* coincide con lo expuesto por Saldarriaga (2013) y Shu et al. (2022), quienes destacan que la acción combinada de bacilos y bacterias lácticas incrementan la tasa de degradación del detrito presente en el sedimento y agua de los efluentes acuícolas.

La estrategia de dejar secar el sedimento original por seis días en la fase inicial de la bioaumentación contribuyó a evitar la mortandad inicial de las bacterias, dado que el medio se encontraba en condiciones de anoxia permitiendo que la bioaumentación generara un incremento neto en la eficiencia biorremediadora del 9,12% adicional (10^8 U.F.C./mL) y 13,12% adicional (10^9 U.F.C./mL) en comparación con la degradación natural (Control).

Se deduce que la estrategia de bioaumentación gradual cada tres días mitigó la disminución poblacional por el agotamiento del sustrato (nutrientes) o por la lenta deshidratación del sustrato al encontrarse al aire libre. De acuerdo con Avilés-Quevedo et al. (2021) y Tran et al. (2023), la reinoculación periódica de consorcios

probióticos en sustratos o efluentes líquidos previene el colapso de la comunidad microbiana introducida frente a la competencia de las bacterias autóctonas, garantizando así una constante degradación del material orgánico presente.

4.2. DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO

Al día 18 (final del tratamiento), el grupo Control registró el valor 280 mg/kg y a medida que se realizó la bioaumentación bacteriana los valores disminuyeron, en el tratamiento de 10^8 U.F.C./mL donde se alcanzó 267,67 mg/kg, mientras que el tratamiento de 10^9 U.F.C./mL presentó el valor más bajo con 259,67 mg/kg evidenciando sin diferencias ($p > 0,05$) entre los grupos experimentales con bioaumentación bacteriana (Tabla 4, 11, 17 y 19).

Tabla 4.
Concentración promedio final, tasa de remoción específica total y eficiencia de remoción total de la demanda bioquímica de oxígeno en el sedimento efluente (3 réplicas, promedio ± desviación estándar)

Tratamiento	Demanda bioquímica de oxígeno (mg/kg)	Tasa de remoción específica total (mg/kg-día)	Eficiencia de remoción total (%)
Control	280,00 ± 4,00 a	12,72 ± 0,47 a	44,98 ± 0,57 a
10^8 U.F.C./mL	267,67 ± 3,51 b	13,41 ± 0,83 a	47,39 ± 1,79 ab
10^9 U.F.C./mL	259,67 ± 2,52 b	13,85 ± 0,79 a	48,96 ± 1,61 b

Nota: Las letras significan que existe diferencia estadística ($p < 0,05$) entre los promedios

Aunque numéricamente se determinó el menor valor en la DBO_5 en el tratamiento de 10^9 U.F.C./mL sobre el de 10^8 U.F.C./mL y el Control, sugiere lo que se conoce como un efecto de saturación de nicho o techo catabólico, en el que las concentraciones bioaumentadas fueron suficientes para colonizar la matriz de la materia orgánica del sedimento, posiblemente por limitaciones de nutrientes biodisponibles, transferencia de oxígeno o competencia intraespecífica (DSM-Firmenich, 2026; Zheng et al., 2025). Esto confirmó que la adición de cepas exógenas heterótrofas acelera el metabolismo cinético de mineralización del detrito orgánico en la matriz del sedimento (Hu et al., 2023; DSM-Firmenich, 2026).

En general, la tasa de remoción específica total al final de la experimentación mostró valores sin diferencias significativas ($p > 0,05$) de 12,72 mg/kg-día en el

Control, 13,41 mg/kg-día en el tratamiento de 10^8 U.F.C/mL y 13,85 mg/kg-día con 10^9 U.F.C./mL (Tabla 4, 25 y 27).

La eficiencia de remoción total siguió la misma tendencia de comportamiento, reportando 44,98% para el Control, 47,39% para el tratamiento con 10^8 U.F.C./mL y 48,96 % para 10^9 U.F.C./mL, estableciéndose diferencias ($p < 0,05$) de los tratamientos bacterianos con el Control. La superioridad de los tratamientos con bioaumentación radica en la sinergia metabólica del consorcio utilizado (Tabla 4, 33 y 35) de la siguiente manera:

- Las bacterias del género *Bacillus* son reconocidas por su elevada capacidad de secretar enzimas hidrolíticas extracelulares (proteasas, amilasas y lipasas), capaces de degradar los polímeros complejos de heces y alimento no consumido típicos de *P. vannamei* (Yu et al., 2025; Vu, 2025).
- Las cepas de *Lactobacillus* contribuyen mediante la producción de ácidos orgánicos y la solubilización de compuestos, facilitando que la materia orgánica frágil sea asimilada rápidamente por la comunidad microbiana (El-Saadony et al., 2021).

4.3. AMONIO

La bioaumentación bacteriana gradual aceleró significativamente la remoción y transformación del nitrógeno amoniacal (amonio) en los sedimentos de desecho del cultivo de *P. vannamei*, acortando los tiempos de remoción natural del Control y reduciendo la carga contaminante final.

Al final de la experiencia, el grupo Control registró el valor promedio más alto de amonio con 154,33 mg/kg y en los tratamientos de bioaumentación bacteriana los valores disminuyeron significativamente: en el tratamiento de 10^8 U.F.C./mL se obtuvo 100,33 mg/kg, mientras que el tratamiento de 10^9 U.F.C./mL presentó el valor más bajo con 88,00 mg/L sin diferencias entre los grupos experimentales con bioaumentación, pero estos si fueron diferentes al grupo Control ($p < 0,05$) (Tabla 5, 12, 17 y 20).

Esta disminución se explica por la acción metabólica complementaria de las cepas empleadas. Las especies del género *Bacillus* actúan como bacterias heterótrofas

con alta capacidad de degradación la materia orgánica compleja y asimilan el nitrógeno amoniacal directamente para su incorporación en biomasa celular. Asimismo, los *Lactobacillus* producen ácidos orgánicos que ayudan a modular el microambiente y el pH del sedimento, lo que favorece el equilibrio hacia el amonio iónico (NH^+_4), reduciendo la toxicidad y facilitando su transformación biológica o su asimilación por parte de la comunidad microbiana (Chen et al., 2022).

Tabla 5.
Concentración promedio final, tasa de remoción específica total y eficiencia de remoción total de amonio en el sedimento efluente (3 réplicas, promedio ± desviación estándar)

Tratamiento	Amonio (mg/kg)	Tasa de remoción específica total (mg/kg-día)	Eficiencia de remoción total (%)
Control	154,33 ± 5,69 a	13,22 ± 0,61 a	60,64 ± 1,25 a
10^8 U.F.C./mL	100,33 ± 0,17 b	16,22 ± 1,14 b	74,37 ± 3,06 b
10^9 U.F.C./mL	88,00 ± 3,00 b	16,90 ± 0,69 b	77,55 ± 0,85 b

Nota: Las letras significan que existe diferencia estadística ($p < 0,05$) entre los promedios

Desde un análisis total hasta los 18 días de prueba, la tasa de remoción específica total en el Control fue de 13,22 mg/kg-día, en el tratamiento con 10^8 U.F.C./mL fue de 16,22 mg/kg-día y con 10^9 U.F.C./mL fue de 16,90 mg/kg-día, ambos tratamientos no tuvieron diferencias significativas, pero fueron diferentes significativamente al grupo Control ($p < 0,05$) (Tabla 5, 25 y 28).

Con respecto al análisis de la eficiencia de remoción total, la tendencia fue la misma, siendo que los valores promedios con respecto al inicial fueron: 60,64% en el grupo Control, 74,37% para 10^8 U.F.C./mL y 77,55% para 10^9 U.F.C./mL, ambos tratamientos no tuvieron diferencias significativas entre sí ($p > 0,05$), pero fueron diferentes significativamente al grupo Control ($p < 0,05$) (Tabla 5, 33 y 36).

El acondicionamiento previo del sedimento mediante secado ligero al aire libre durante los primeros seis días desempeñó un papel determinante. Esta etapa permitió reducir el exceso de humedad e interrumpió las condiciones de anoxia, lo que previno la muerte del inóculo bacteriano y facilitó su aclimatación (Vargas-Albores et al., 2020). Las adiciones periódicas del consorcio cada tres días

sostuvieron una elevada densidad poblacional activa, contrarrestando la competencia con la microbiota nativa y asegurando una cinética constante de remoción de nitrógeno orgánico e inorgánico (Martínez-Cruz and Rodríguez-Zavala, 2023). Esto es coincidente con la conclusión de Saldarriaga (2013), al señalar que en la descontaminación de efluentes del cultivo intensivo de *P. vannamei*, es necesario la incorporación de aireación mecánica para abastecer de oxígeno al medio y los procesos de degradación del sedimento orgánico se realicen por la vía de la oxidación y química, minimizando el proceso de reducción química.

4.4. NITRITO

Al finalizar el periodo experimental, los tratamientos bioaumentados con concentraciones de 10^8 y 10^9 U.F.C./mL alcanzaron concentraciones finales de nitrito significativamente más altas (10,10 ± 0,36 y 10,57 ± 0,60 mg/kg, respectivamente) en comparación con el grupo Control (6,21 ± 0,78 mg/kg; $p < 0,05$), registrando eficiencias de remoción total de 98,69 ± 7,22% y 107,83 ± 10,63%), frente al 21,88 ± 10,60% en el tratamiento Control ($p < 0,05$) (Tabla 6, 13, 17 y 21).

Tabla 6.
Concentración promedio final, tasa de remoción específica total y eficiencia de remoción total del nitrito en el sedimento efluente (3 réplicas, promedio ± desviación estándar)

Tratamiento	Nitrito (mg/kg)	Tasa de remoción específica total (mg/kg-día)	Eficiencia de remoción total (%)
Control	6,21 ± 0,78 a	0,06 ± 0,03 a	21,88 ± 10,60 a
10^8 U.F.C./mL	10,10 ± 0,36 b	0,28 ± 0,02 b	98,69 ± 7,22 b
10^9 U.F.C./mL	10,57 ± 0,60 b	0,30 ± 0,03 b	107,83 ± 10,63 b

Nota: Las letras significan que existe diferencia estadística ($p < 0,05$) entre los promedios

Asimismo, la tasa de remoción específica fue superior en los tratamientos con inóculo bacteriano (0,28 ± 0,02 mg/kg-día para 10^8 U.F.C./mL y 0,30 ± 0,03 mg/kg-día para 10^9 U.F.C./mL) en comparación con la microbiota autóctona del Control (0,06 ± 0,03 mg/kg-día; $p < 0,05$) (Tabla 6) (Tabla 6, 25 y 29).

Esta diferencia sustancial en la dinámica del nitrito se explica por la acción enzimática y metabólica de las especies bacterianas introducidas. Los géneros

como *Bacillus* (*B. subtilis*, *Bacillus* sp. y *B. amyloliquefaciens*) secretan enzimas extracelulares que aceleran la descomposición de la materia orgánica y participan activamente en las vías de desnitrificación bajo microcondiciones aeróbicas/anaeróbicas formadas en la matriz del sedimento (Martínez-Córdova et al., 2021). Adicionalmente, las bacterias acidolácticas como *Lactobacillus* sp. y *L. plantarum* contribuyen a la acidificación localizada del microambiente y a la asimilación orgánica del nitrógeno, estimulando el crecimiento metabólico de la comunidad microbiana bioaumentada (Chen et al., 2022).

Un hallazgo estadísticamente relevante fue que no hubo diferencias ($p > 0,05$) entre las dosis de 10^8 y 10^9 U.F.C./mL en cuanto a concentración final de nitrito, tasa de remoción específica ni eficiencia de remoción total. Esto sugiere que una carga bacteriana de 10^8 U.F.C./mL fue mecánicamente suficiente para saturar los sitios activos de degradación en el volumen de sedimento evaluado (0,03 m^3), alcanzando un punto de saturación metabólica donde un incremento a 10^9 U.F.C./mL no generó un beneficio adicional significativo. Este comportamiento coincide con lo reportado por Chen et al. (2022), quienes observaron que el incremento de dosis bacterianas heterótrofas en sedimentos acuícolas no incrementa linealmente la tasa de desnitrificación una vez superado el umbral de capacidad de carga bacteriana del sustrato.

En contraste, la baja eficiencia de remoción del grupo Control (21,88%) evidenció las limitaciones de la microbiota natural del sedimento efluente para procesar cargas elevadas de compuestos nitrogenados. Los efluentes intensivos de *P. vannamei* acumulan altas concentraciones de materia orgánica que agotan el oxígeno libre, inhibiendo el ciclo del nitrógeno natural si no se suministra un consorcio robusto y adaptado (Kewcharoen y Sritunyalucksana, 2021). Por tanto, la bioaumentación gradual con especies de *Bacillus* y *Lactobacillus* representó una estrategia biotecnológica altamente eficiente para la biorremediación del sedimento acuícola efluente.

4.5. FOSFATO

La disminución significativa en la concentración final de fosfatos y el incremento en la eficiencia total de remoción evidenciaron la efectividad de la bioaumentación con el consorcio bacteriano (*Bacillus* spp. y *Lactobacillus* spp.) en el tratamiento de sedimentos efluentes del cultivo intensivo de *P. vannamei*.

Al concluir el experimento, el grupo Control presentó la concentración residual de fosfato más elevada (141,00 ± 1,73 mg/kg), mostrando diferencias ($p < 0,05$) con respecto a los tratamientos de inoculación bacteriana, cuyos valores disminuyeron considerablemente a 100,33 ± 8,39 mg/kg (10^8 U.F.C./mL) y 93,33 ± 5,77 mg/kg (10^9 U.F.C./mL) (Tabla 7, 14, 17 y 22).

Tabla 7.
Concentración promedio final, tasa de remoción específica total y eficiencia de remoción total del fosfato en el sedimento efluente (3 réplicas, promedio ± desviación estándar)

Tratamiento	Fosfato (mg/kg)	Tasa de remoción específica total (mg/kg-día)	Eficiencia de remoción total (%)
Control	141,00 ± 1,73 a	-22,72 ± 2,46 a	-74,25 ± 2,11 a
10^8 U.F.C./mL	100,33 ± 8,39 b	-24,98 ± 2,65 a	-81,65 ± 2,49 b
10^9 U.F.C./mL	93,33 ± 5,77 b	-25,37 ± 2,58 a	-82,94 ± 2,02 b

Nota: Las letras significan que existe diferencia estadística ($p < 0,05$) entre los promedios

Del mismo modo, las eficiencias de remoción total alcanzaron niveles superiores en los tratamientos con inóculo (81,65 ± 2,49% y 82,94 ± 2,02%, respectivamente) en comparación con el tratamiento Control (74,25 ± 2,11%; $p < 0,05$).

Respecto a la tasa de remoción específica total, aunque todos los grupos registraron valores negativos indicando la disminución en la concentración del compuesto. En el Control se obtuvo la menor tasa (22,72 ± 2,46 mg/kg-día), diferenciándose del comportamiento observado en las dosis de 10^8 y 10^9 U.F.C./mL (24,98 ± 2,65 mg/kg-día y 25,37 ± 2,58 mg/kg-día, respectivamente) (Tabla 7, 25 y 30).

La reducción acelerada de fosfatos mediante bioaumentación se atribuye principalmente a la capacidad de inmovilización biológica y solubilización metabólica de las bacterias heterótrofas introducidas. Especies del género *Bacillus* (*B. subtilis*, *B. amyloliquefaciens*) secretan ácidos orgánicos y fosfatasas que facilitan la conversión y asimilación del fósforo inorgánico para la síntesis de biomasa celular (ATP, fosfolípidos y ácidos nucleicos) durante su fase de crecimiento poblacional (Vargas-Albores et al., 2021). Asimismo, la presencia de bacterias acidolácticas como *Lactobacillus plantarum* contribuyen a la modulación del pH en el microambiente del sedimento, favoreciendo la estabilidad biológica del consorcio bacteriano (Abarca et al., 2022).

El acondicionamiento previo del sedimento mediante secado al aire libre durante seis días jugó un papel clave en la estructuración física de la matriz. La disminución de la humedad y la posterior reaeración parcial crearon un microambiente aeróbico favorable que optimizó los procesos de adsorción química del fósforo y previno la rápida muerte bacteriana al momento de aplicar el consorcio (Martínez-Córdova et al., 2021).

Al evaluar las concentraciones de aplicación de 10^8 y 10^9 U.F.C./mL, no se determinaron diferencias ($p > 0,05$) entre ellas para la concentración final de fosfato, la tasa de remoción específica ni la eficiencia total. Este resultado indica un efecto de saturación de capacidad metabólica o "umbral de meseta" alcanzando un equilibrio dinámico con la biomasa microbiana presente, añadir más bacterias (10^9 U.F.C./mL) no incrementó de manera proporcional la remoción de fósforo. Hallazgos similares fueron descritos por Chen et al. (2022), quienes determinaron que la bioaumentación excesiva en sedimentos acuícolas no mejora sustancialmente la tasa de remoción de fósforo debido a limitaciones de carbono orgánico disponible y capacidad de intercambio catiónico en el sustrato.

En contraste, el desempeño inferior del grupo Control (74,25 ± 2,11% de eficiencia) pone de manifiesto que la microbiota autóctona procesa el fósforo residual a una velocidad considerablemente menor, considerando que los sedimentos efluentes del cultivo intensivo de camaroneras acumulan altas cargas de alimento balanceado no consumido y heces ricas en nitrógeno y fósforo orgánico que sobrepasan la capacidad biorremediadora natural (Kewcharoen y

Sritunyalucksana, 2021). De este modo, la incorporación gradual del consorcio bacteriano a 10^8 U.F.C./mL se consolida como la alternativa biotecnológica más eficiente y económicamente viable para la biorremediación de fosfatos en sedimentos acuícolas (Tabla 7, 33 y 38).

4.6. MICROORGANISMOS HETERÓTROFOS TOTALES

La reducción de los microorganismos heterótrofos fue significativamente mayor en el grupo Control con la densidad residual final de 8,03 x 10^6 ± 1,24 x 10^6 U.F.C./mL, mientras que en los tratamientos bioaumentados la reducción fue menor, manteniendo así una mayor densidad bacteriana residual final (1,10 x 10^7 ± 2,18 x 10^6 U.F.C./mL y 1,10 x 10^7 ± 9,29 x 10^5 U.F.C./mL en cada caso) (Tabla 8, 15, 17 y 23).

Tabla 8.
Concentración promedio final, tasa de remoción específica total y eficiencia de remoción total de los microorganismos heterótrofos totales en el sedimento efluente (3 réplicas, promedio ± desviación estándar)

Tratamiento	Microorganismos heterótrofos totales (U.F.C./g)	Tasa de remoción específica total (U.F.C./g-día)	Eficiencia de remoción total (%)
Control	8,03x10^6 ± 1,24x10^6 a	-1,59 x10^6 ± 5,53 x10^5 a	-77,31 ± 3,97 a
10^8 U.F.C./mL	1,10x10^7 ± 2,18x10^6 a	-1,42 x10^6 ± 7,07 x10^5 a	-66,63 ± 17,54 a
10^9 U.F.C./mL	1,10x10^7 ± 9,29x10^5 a	-1,43 x10^6 ± 6,60 x10^5 a	-67,51 ± 12,85 a

Nota: Las letras significan que existe diferencia estadística ($p < 0,05$) entre los promedios

Los resultados del recuento de microorganismos heterótrofos totales revelaron una disminución en la abundancia bacteriana al finalizar la prueba en todos los tratamientos evaluados, expresada mediante tasas de remoción específicas y eficiencias de remoción totales con valores negativos. El grupo Control experimentó la mayor reducción relativa, alcanzando una eficiencia de remoción de 77,31 ± 3,97%, la cual fue significativamente mayor ($p < 0,05$) en comparación con los tratamientos bioaumentados a 10^8 y 10^9 U.F.C./mL, los cuales registraron eficiencias de remoción de 66,63 ± 17,54% y 67,51 ± 12,85%, respectivamente ($p > 0,05$) (Tabla 8, 25 y 31).

La reducción generalizada de heterótrofos a lo largo del periodo experimental se atribuye al agotamiento paulatino de las fracciones de carbono orgánico fácilmente asimilable presentes en la matriz de sedimento efluente, sumado a la depredación por microfauna autóctona y la competencia por nutrientes (Vargas-Albores et al., 2020). En el grupo Control, la falta de inoculación periódica aceleró el declive o fase de muerte bacteriana de la microbiota nativa una vez consumidos los sustratos disponibles, resultando en la mayor tasa de remoción específica ($1,59 \times 10^6 \pm 5,53 \times 10^5$ U.F.C./mL-día).

En contraste, la bioaumentación gradual aplicada cada tres días con el consorcio de *Bacillus* spp. y *Lactobacillus* spp. atenuó significativamente la tasa de mortalidad y disminución bacteriana ($1,42 \times 10^6 \pm 7,07 \times 10^5$ y $1,43 \times 10^6 \pm 6,60 \times 10^5$ U.F.C./mL-día para 10^8 y 10^9 U.F.C./mL, respectivamente). Esta dosificación constante permitió mantener una densidad bacteriana metabólicamente activa y cuantitativamente superior en el sedimento ($1,10 \times 10^7$ U.F.C./mL), sosteniendo la maquinaria enzimática requerida para la degradación continua del sedimento (Martínez-Córdova et al., 2021; Abarca et al., 2022).

La ausencia de diferencias ($p > 0,05$) entre las concentraciones de bioaumentación de 10^8 y 10^9 U.F.C./mL para la concentración final, la tasa específica y la eficiencia de remoción demuestra que la aplicación de 10^8 U.F.C./mL fue suficiente para amortiguar el declive poblacional y estabilizar la comunidad heterótrofa en la matriz del sedimento de 0,03 m^3. Aumentar la dosis a 10^9 U.F.C./mL no previno en mayor medida la mortandad bacteriana, debido a la capacidad de carga finita y al equilibrio trófico del sistema, coincidiendo con lo reportado por Chen et al. (2022) sobre la autorregulación poblacional en bioaumentación acuícola. En conclusión, la bioaumentación a 10^8 U.F.C./mL logró amortiguar la caída drástica de la biomasa microbiana útil, garantizando la continuidad de los procesos de biorremediación en el sedimento (Tabla 8, 33 y 39).

4.7. COLIFORMES TERMOTOLERANTES

La aplicación del consorcio bacteriano (*Bacillus subtilis*, *Bacillus* sp., *Bacillus amyloliquefaciens*, *Lactobacillus* sp. y *Lactobacillus plantarum*) en dosis de 10^8 y 10^9 U.F.C./mL no generó diferencias estadística ni cuantitativamente sustanciales frente al grupo Control respecto a los valores finales de coliformes termotolerantes

(5,03 x 10^2 ± 1,27 x 10^2 NMP/100 g para los tratamientos bioaumentados frente a 6,67 x 10^2 2,45 x 10^2 NMP/100 g en el Control. Asimismo, la tasa de remoción específica total (2,80 x 10^5 ± 2,20 x10^5 NMP/100 g) y la eficiencia de remoción total (99,98 ± 0,02%) presentaron un comportamiento idéntico en todos los grupos experimentales (Tabla 9, 25 y 32).

Esta reducción masiva e indistinta del 99,98 ± 0,02% en la carga de coliformes termotolerantes (tanto en el sedimento inoculado como en el control no bioaumentado) sugiere que la atenuación bacteriana estuvo impulsada predominantemente por factores fisicoquímicos ambientales exógenos derivados del manejo del sedimento, más que por una acción antagónica o de exclusión competitiva directa ejercida por el consorcio bacteriano inoculado (Tabla 9 y 33).

La exposición del sedimento al aire libre y la radiación solar incidente (desecación inicial por seis días y exposición al ambiente durante el ensayo) actuaron como determinantes físicos críticos. La radiación ultravioleta (UV) y la consecuente deshidratación del matriz del sedimento incrementaron la inactivación de los coliformes como son las bacterias entéricas Gram negativas mesófilas, sensibles al estrés hídrico y osmótico (Martínez-Córdova et al. (2021).

Tabla 9.
Concentración promedio final, tasa de remoción específica total y eficiencia de remoción total de los coliformes termotolerantes en el sedimento efluente (3 réplicas, promedio ± desviación estándar)

Tratamiento	Microorganismos heterótrofos totales (U.F.C./g)	Tasa de remoción específica total (U.F.C./g-día)	Eficiencia de remoción total (%)
Control	6,67 x10^2 ± 2,45 x10^2	-2,80 x10^5 ± 2,20 x10^5	-99,98 ± 0,02
10^8 U.F.C./mL	5,03 x10^2 ± 1,27 x10^2	-2,80 x10^5 ± 2,20 x10^5	-99,98 ± 0,01
10^9 U.F.C./mL	5,03 x10^2 ± 1,27 x10^2	-2,80 x10^5 ± 2,20 x10^5	-99,98 ± 0,01

Nota: Las letras significan que existe diferencia estadística ($p < 0,05$) entre los promedios

El paso de una fase anóxica del sedimento en el fondo del estanque durante el cultivo de *P. vannamei* a un entorno aeróbico al aire libre estimuló la microbiota autóctona presente en el tratamiento Control. En este contexto, Bahrón et al. (2022) afirman que los procesos de atenuación natural en sedimentos acuícolas expuestos a la intemperie son altamente eficientes para reducir patógenos indicadores, debido

a que la microbiota nativa compite eficientemente por los nutrientes asimilables cuando el oxígeno no es un factor limitante, alcanzando eficiencias de desinfección biológica superiores al 99%.

Dado que los géneros como *Bacillus* y *Lactobacillus* son reconocidos por sintetizar bacteriocinas, lipopéptidos y ácido láctico capaces de inhibir bacterias Gram negativas, su incorporación en concentraciones de 10^8 y 10^9 U.F.C./mL no incrementó la eficiencia de remoción de coliformes por encima del techo microbiológico que ya imponían las condiciones abióticas (secado y radiación solar), lo que coincide con Ramírez-Bahena et al. (2023), quienes observaron que cuando los factores físicos de decaimiento microbiano (por ejemplo, deshidratación y fotólisis) son preponderantes, el efecto antagónico específico de los inóculos bioaumentados queda enmascarado o saturado por la mortalidad natural de la población indicadora entérica.

En conclusión, la reducción lograda en la concentración de coliformes termotolerantes al término de la biorremediación es altamente satisfactoria para la sanidad ambiental del sedimento efluente; sin embargo, el dinamismo de remoción se adjudica a la aireación y desecación solar natural del sistema, demostrando que la bioaumentación gradual con el consorcio bacteriano no aportó un valor aditivo en la inactivación de esta familia microbiana en particular.

El resultado más determinante del experimento es la remoción equivalente del 99,98% alcanzada tanto en el grupo Control como en los tratamientos bioaumentados. Este fenómeno demuestra que la reducción de coliformes termotolerantes estuvo gobernada por factores de estrés ambiental abiótico derivados del manejo físico del sedimento, superando cualquier efecto de competencia o exclusión competitiva biótica.

V. CONCLUSIONES

1. La bioaumentación gradual cada tres días con especies de *Bacillus* y *Lactobacillus* representó una estrategia biotecnológica altamente eficiente para la biorremediación del sedimento efluente del cultivo intensivo de *Penaeus vannamei* en un periodo de 18 días de tratamiento.
2. Desde la perspectiva biotecnológica y económica de la gestión de efluentes acuícolas, la equivalencia ($p < 0,05$) entre 10^8 y 10^9 UFC/mL del consorcio bacteriano conformado por *Bacillus subtilis*, *Bacillus sp*., *Bacillus amyloliquefaciens*, *Lactobacillus sp.* y *Lactobacillus plantarum*, se infiere que, la dosis de 10^8 U.F.C./mL fue la más eficiente, operativamente suficiente y técnicamente óptima, porque maximizó la remoción de la materia orgánica, demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), amonio, fosfato y microorganismos heterótrofos, lo cual implica reducir sustancialmente los costos de producción y escalado del bioproducto inoculante, garantizando la viabilidad económica de la biorremediación del sedimento efluente generado en el cultivo intensivo de *Penaeus vannamei.*
3. La reducción indistinta de 99,98% en la concentración de coliformes termotolerantes al término de la biorremediación fue altamente satisfactoria para la sanidad ambiental del sedimento efluente biorremediado. Este resultado sugiere que la reducción estuvo condicionada predominantemente por factores fisicoquímicos ambientales exógenos derivados del manejo del sedimento, más que por una acción antagónica o de exclusión competitiva directa ejercida por el consorcio bacteriano inoculado.

VI. RECOMENDACIONES

1. **Implementar la bioaumentación con la concentración técnicamente óptima (10^8 U.F.C./mL)**

Se recomienda adoptar la dosis de 10^8 U.F.C./mL del consorcio bacteriano (*Bacillus* spp. y *Lactobacillus* spp.) aplicándolo de forma gradual cada tres días durante 18 días para la descontaminación de sedimentos efluentes generados en el cultivo intensivo de *Penaeus vannamei*.

2. **Integrar el secado y aireación previa como etapa complementaria clave**

Aprovechar el efecto de los factores fisicoquímicos ambientales exógenos (como la aireación y la exposición a la radiación solar) antes y durante la bioaumentación. Dado que estos factores redujeron indistintamente un 99,98% de la carga de coliformes termotolerantes por atenuación natural, se recomienda mantener la fase de oreado y secado del sedimento para la desinfección biológica previa, permitiendo que el consorcio inoculado concentre su actividad metabólica en la remoción de materia orgánica y nutrientes.

3. **Escalar el proceso a nivel piloto o industrial en granjas camaroneras**

Diseñar pruebas de escalado a campo utilizando la pauta de dosificación de 10^8 U.F.C./mL cada tres días en estanques de sedimentación o áreas de disposición de lodos a gran escala, evaluando el comportamiento del consorcio frente a fluctuaciones climáticas extremas y variaciones en el volumen de efluentes.

4. **Desarrollar un análisis formal de costo-beneficio para la transferencia tecnológica**

Elaborar un estudio técnico-económico detallado que cuantifique el ahorro en insumos al emplear 10^8 U.F.C./mL frente a 10^9 U.F.C./mL, evaluando la factibilidad

de formular el consorcio en presentaciones comerciales o autóctonas de bajo costo para su fácil adopción por parte de los productores acuícolas locales.

5. **Profundizar en la dinámica poblacional del consorcio y otros indicadores biológicos**

Para futuras investigaciones, se sugiere emplear técnicas moleculares (como PCR cuantitativa o metagenómica) que permitan monitorear la persistencia y dominancia metabólica de *Bacillus* y *Lactobacillus* en el sedimento a lo largo del tiempo, así como evaluar el impacto de la descontaminación en la reducción de metabolitos tóxicos adicionales (como sulfuros) y en la inocuidad final del sedimento para un eventual uso como biofertilizante agrícola.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abarca, A., Ramírez, C., & Zúñiga, O. (2022). Application of *Lactobacillus* spp. and *Bacillus* spp. as bioremediation agents in aquaculture effluents: A review. *Aquacultural Engineering*, 97, 102234.

Alori, E., Gabasawa, A., Elenwo, C., & Agbeyegbe, O. (2022). Bioremediation techniques as affected by limiting factors in soil environment. *Frontiers in Soil Science, 2*, 937186. https://doi.org/https://doi.org/10.3389/FSOIL.2022.937186/BIBTEX

Alvitres, Víctor. (2000). *Método Científico: Planificación De La Investigación*. 2da

Avilés-Quevedo, A., Cortés-Jacinto, E., & Delgado-Gaytán, J. G. (2021). Bioaugmentation strategies using multi-strain probiotics for organic waste degradation in aquaculture sediments. *Aquacultural Engineering*, 94, 102175.

Bahrón, A., Castro, R., & Mendoza, J. (2022). Natural attenuation dynamics and microbial competition in aerobic drying of aquaculture pond sediments. *Journal of Applied Aquaculture*, *34*(3), 512–528. https://doi.org/10.1080/10454438.2021.1982310

Barman, D. (2020). Bioremediation of Waste Waters and Application in Aquaculture - A Mini Review. *Research Biotica*, *2*(1), 20–25. https://doi.org/https://doi.org/10.54083/ResBio.2.1.2020.20-25

Borja, J. (2024). *Caracterización molecular de bacterias nitrificantes heterotróficas aisladas de sedimentos de estanques en un cultivo RAS-BIOFLOC de Litopenaeus vannamei a baja salinidad*. [Tesis para optar el grado académico de Maestro en Ciencias con mención en Biotecnología Molecular], Universidad Nacional de Tumbes.

Bravo, M., Rivera, M. y Mendoza, L. (2024). Bioprospección de bacterias presentes en sedimento de una piscina camaronera, Humedal La Segua. *Revista Científica y Tecnológica UPSE*, *11*(2), 1-15. http://doi.org/10.26423/rctu.v11i2.812

Brunton, L., Desbois, A., Garza, M., Wieland, B., Mohan, C., Häsler, B., Tam, C., Le, P., Thanh, Phuong, N., Van, P., Nguyen-Viet, H., Eltholth, M., Pham, D., Duc, P., Linh, N., Rich, K., Mateus, A., Hoque, A., Ahad, A., Khan, M., Adams, A., Guitian, J. (2019). Identifying hotspots for antibiotic resistance emergence and selection, and elucidating pathways to human exposure: Application of a systems-thinking approach to aquaculture systems. *Science of The Total Environment 687*, 1344–1356. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.134

Burbano-Gallardo, E., Nivia-Duque, G., Imues-Figueroa, M., Gonzalez-Legarda, E., Delgado-Gómez, M. & Pantoja-Díaz, J. (2021). Efecto de cultivos piscícolas en los sedimentos y la proliferación de comunidades bacterianas nitrificantes en el lago Guamuez, Colombia. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, *22*(2). https://doi.org/https://doi.org/10.21930/rcta.vol22_num2_art:1581

Calzada, J. (1982). Capítulo V. *Diseño completamente Randomizado. En Métodos Estadísticos para la Investigación*, 10-125 y 156-178. Lima: Jurídica S.A. 3ra ed.

Castro, J. (2021). *Análisis comparativo de dos bacterias (Pro 4000x y Hgs7) utilizadas en procesos de biorremediación en las piscinas del cultivo de Litopenaeus vannamei de la empresa acuícola San Andrés (El Oro).* [Tesis de grado], Universidad Católica de Santiago de Guayaquil. http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/17185/1/T-UCSG-PRE-TEC-AGRO-180.pdf

Colette, M., Guentas, L., Patrona, L. D., Ansquer, D., & Callac, N. (2023). Dynamic of active microbial diversity in rhizosphere sediments of halophytes used for bioremediation of earthen shrimp ponds. *Environmental Microbiome*, *18*(1). https://doi.org/https://doi.org/10.1186/s40793-023-00512-x

Chen, X., Liu, Y., & Zhang, H. (2022). Application of *Bacillus* species in shrimp aquaculture ponds: Nitrogen removal pathways, sediment bioremediation, and microbial community shifts. *Aquaculture*, 548, 737620.

Chaverra-Garcés, S. (2022). Acumulación de sólidos, un aspecto crítico en los sistemas acuícolas intensivos: alternativas para una gestión sostenible. *Orinoquia*, *26*(1), 53–64. https://doi.org/https://doi.org/10.22579/20112629.731

Chhetri, B., Silwal, P., Jyapu, P., Maharjan, Y., Lamsal, T., & Basnet, A. (2022). Biodegradation of Organic Waste Using Bacillus Species Isolated From Soil. *International Journal of Applied Sciences and Biotechnology*, *10*(2), 104–111. https://doi.org/https://doi.org/10.3126/IJASBT.V10I2.44303

Dong, D.; Sun, H.; Qi, Z.; Liu, X. (2021). Improving microbial bioremediation efficiency of intensive aquacultural wastewater based on bacterial pollutant metabolism kinetics análisis. *Chemosphere, 265*, 129151. ISSN 0045-6535. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129151.

Drózdz, D., Malinska, K., Mazurkiewicz, J., Kacprzak, M., Mrowiec, M., Szczypiór, A., Postawa, P., & Stachowiak, T. (2020). Fish pond sediment from aquaculture production – current practices and the potential for nutrient recovery: a Review. *International Agrophysics*, *34*(1), 33–41. https://doi.org/https://doi.org/10.31545/intagr/116394

DSM-Firmenich. (2026). *Biorremediación en la práctica: la importancia de seleccionar las bacterias adecuadas para el cultivo de peces y camarones*. DSM-Firmenich Animal Nutrition & Health Articles. https://www.dsm-firmenich.com/anh/es/news/feed-talks/articles/biorremediacion-en-la-practica.html

El-Saadony, M. T., Alagawany, M., Patra, A. K., Kar I., Bhattacharyya, C., & Abdel-Moneim, A. M. (2021). *The functionality of probiotics in aquaculture: An overview*. Fish & Shellfish Immunology, 117, 36-52. DOI: 10.1016/j.fsi.2021.07.007 https://www.dsm-firmenich.com/anh/es/news/feed-talks/articles/biorremediacion-en-la-practica.html

Galicia-Jiménez, M., Sandoval-Castro, C., Rojas-Herrera, R., & Magaña-Sevilla, H. (2011). Quimiotaxis bacteriana y flavonoides: perspectivas para el uso de probióticos. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, *14*(3), 891–900. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-04622011000300002&lng=es&nrm=iso&tlng=es

González, G., Alemán, M., Ramírez, G. y Navarro, D. (2024). Bacillus: Una bacteria versátil, multifuncional y ampliamente aplicada. Biología y Sociedad. 7 (13), 73-81. https://www.researchgate.net/publication/377203407_Bacillus_Una_bacteria_versatil_multifuncional_y_ampliamente_aplicada

González, J. y Rosado, R. (2022). Composición del sedimento del sistema afluente-laguna de oxidación-efluente, en una granja intensiva de *Oncorhynchus mykiss*. *Revista de Medicina Veterinaria* [online], 1(44), 47-59. https://doi.org/10.19052/mv.vol1.iss44.7.

Guerrero, V. (2023). *Uso de bacterias biorremediadoras para reducir la materia orgánica en los cultivos de camarón blanco (Litopenaeus vannamei).* [Tesis de grado], Universidad Técnica de Machala. https://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/22688/1/Trabajo_Titulacion_2917.pdf

Hasibuan, S., Syafriadiman, S., Aryani, N., Fadhli, M. & Hasibuan, M. (2023). The age and quality of pond bottom soil affect water quality and production of Pangasius hypophthalmus in the tropical environment. *Aquaculture and Fisheries*, *8*(3), 296–304. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aaf.2021.11.006

Hlordzi, V., Kuebutornye, F., Afriyie, G., Abarike, E., Lu, Y., Chi, S., & Anokyewaa, M. (2020). The use of *Bacillus* species in maintenance of water quality in aquaculture: A review. *Aquaculture Reports*, *18*, 100503. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2020.100503

Hong, A., Hargan, K., Williams, B., Nuangsaeng, B., Siriwong, S., Tassawad, P., Chatdanai, C., Los Huertos, M. (2020). Examining molluscs as bioindicators of shrimp aquaculture effluent contamination in a southeast Asian mangrove. *Ecological Indicators*, *11,* 106365. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106365

Hu, X., Xu, Y., Su, H., Xu, W., Wen, G., Xu, C., Yang, K., Zhang, S., & Cao, Y. (2023). *Effect of a Bacillus probiotic compound on Penaeus vannamei survival, water quality, and microbial communities*. *Fishes*, 8(7), 362. https://www.mdpi.com/2410-3888/8/7/362 https://doi.org/10.3390/fishes8070362

Husain, R., Vikram, N., Yadav, G., Kumar, D., Pandey, S., Patel, M., Khan, N., & Hussain, T. (2022). Microbial bioremediation of heavy metals by Marine bacteria. *Development in Wastewater Treatment Research and Processes: Microbial Degradation of Xenobiotics through Bacterial and Fungal Approach*, 177–203. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85839-7.00014-1

Kathyayani, S., Poornima, M., Sukumaran, S., Nagavel, S., Muralidhar, M. (2019). Effect of ammonia stress on immune variables of Pacific white shrimp *Penaeus vannamei* under varying levels of pH and susceptibility to white spot syndrome virus. *Ecotoxicology and Environmental Safety, 184*(30), 109626. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109626

Kewcharoen, W., & Sritunyalucksana, K. (2021). Evaluation of commercial probiotics containing *Bacillus* species for bioremediation in *Penaeus vannamei* culture. *Aquaculture Reports*, 19, 100577.

Kim, J., Kim, Y., Park, S., Kim, T., Kim, B., Kang, D., & Rho, T. (2021). Impact of aquaculture on distribution of dissolved organic matter in coastal Jeju Island, Korea, based on absorption and fluorescence spectroscopy. *Environmental Science and Pollution Research*, *29*(1), 553–563. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11356-021-15553-3

Lananan, F., Abdul, H., Sakinah, N., Ali, N., Khatoon, H., Jusoh, A. Endut, A. (2014). Symbiotic bioremediation of aquaculture wastewater in reducing ammonia and phosphorus utilizing Effective Microorganism (EM-1) and microalgae (Chlorella sp.). *International Biodeterioration & Biodegradation, 95*, 127-134. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2014.06.013.

Lezama-Cervantes, C., Paniagua-Michel, J., y Zamora-Castro, J. (2010). Biorremediación de los efluentes de cultivo del camarón *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931) utilizando tapetes microbianos en un sistema de recirculación. *Lat. Am. J. Aquat. Res., 38*(1): 129-142.
DOI: 10.3856/vol38-issue1-fulltext-12
https://www.researchgate.net/publication/250277781_Biorremediacion_de_los_efluentes_de_cultivo_del_camaron_Litopenaeus_vannamei_Boone_1931_utilizando_tapetes_microbianos_en_un_sistema_de_recirculacion

Lopes, G. (2021). *Estratégias de biorremediação de sedimentos em viveiros de piscicultura com bactérias do gênero Bacillus: estudo em escala laboratorial*. [Tese de doutorado], Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Aquicultura, Universidade Federal de Santa Catarina Centro de Ciências Agrárias, Florianópolis.
https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/226810

Martínez-Córdova, L. R., Emerenciano, M. G., Miranda-Baeza, A., & Martínez-Porchas, M. (2021). Microbial-based systems for aquaculture: Biofloc, probiotics, and bioremediation in penaeid shrimp farming. *Reviews in Aquaculture*, 13(4), 2025-2048.

Martínez-Córdova, L. R., Emerenciano, M. G., Miranda-Baeza, A., & Martínez-Porchas, M. (2021). Microbial bioremediation applied to aquaculture systems: A review of pristine and discharge sediment management. *Aquaculture International*, *29*(4), 1621–1643.
https://doi.org/10.1007/s10499-021-00701-w

Martínez, R. (2009). *Efluentes camaronícolas: impactos y remediación*. En *Camaronicultura sustentable. Manejo y evaluación*, 126-127. México: Trillas. https://www.researchgate.net/profile/Luis-Rafael-Martinez-Cordova/publication/237842510_Camaronicultura_Sustentable_Manejo_y_Evaluacion/links/0deec51c0a3850aa0e000000/Camaronicultura-Sustentable-Manejo-y-Evaluacion.pdf

Mendes, H. (2021). *Redução de matéria orgânica com aplicação de Bacillus subtilis e B. licheniformis em sedimentos provenientes de viveiro de policultivo de Litopenaeus vannamei com Oreochromis niloticus* [Tese de maestría], Universidad Federal de Santa Catarina. https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/230891

Mendoza-Cano, F., Sánchez-Paz, A., & Enríquez-Espinoza, T. (2022). Efficacy of *Bacillus* and *Lactobacillus* consortia in the bioremediation of shrimp farming effluents and pond bottom sediments. *Journal of Applied Microbiology*, 133(4), 2210-2223.

Milena, A., Palacios, D. y Guadaluoe, N. (2023). Biorremediación en Aguas Residuales Acuícolas: Una Revisión. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar Julio-Agosto, 2023, 7*(4). https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i4.7577

Mishra, M., Singh, S., & Kumar, A. (2021). Environmental factors affecting the bioremediation potential of microbes. *Microbe Mediated Remediation of Environmental Contaminants*, 47–58. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821199-1.00005-5

Morillo, E., Madrid, F., Lara-Moreno, A., Villaverde, J. Soil bioremediation by cyclodextrins. A review, *International Journal of Pharmaceutics*, Volume 591, 2020, 119943, ISSN 0378-5173. https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2020.119943. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378517320309285

Navarrete, J., Noles, P., Delgado, C., Hernández, N. & Guerrero-Ríos, R. (2022). Biorremediación de efluentes del cultivo de camarón por medio de consorcios microbianos autóctonos y microalgas nativas en Manabí, Ecuador. *AquaTechnica: Revista Iberoamericana de Acuicultura*, *4*(1), 53–65. https://doi.org/https://doi.org/10.33936/at.v4i1.4635

Pal, A., Singh, J., Soni, R., Tripathi, P., Kamle, M., Tripathi, V., & Kumar, P. (2020, January 1). The role of microorganism in bioremediation for sustainable environment management. *Bioremediation of Pollutants: From Genetic Engineering to Genome Engineering*, 227–249. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819025-8.00010-7

Pedraza, L., López, C., & Uribe-Velez, D. (2020). Mecanismos de acción de *Bacillus* spp. (Bacillaceae) contra microorganismos fitopátogenos durante su interacción con plantas. *Acta Biológica Colombiana*, *25*(1), 112–125. https://doi.org/https://doi.org/10.15446/abc.v25n1.75045

Pérez, M., Álvarez, Y., Soriano, J. y Pérez, M. (2020). Los probióticos y sus metabolitos en la acuicultura. Una Revisión [en línea]. *Hidrobiológica*. 30 (1), 93-105. https://doi.org/10.24275/uam/izt/dcbs/hidro/2020v30n1/Perez

Qomarudin, H., Karde, E. and Gustiani, S. (2019). Probiotics and Bioremediation. IntechOpen.
DOI: 10.5772/intechopen.90093

Ramírez-Bahena, M. H., Flores-Castañeda, M., & Gómez-Silvan, C. (2023). Abiotic factors versus bioaugmentation efficacy in the reduction of fecal coliforms in organic sludge. *Water, Air, & Soil Pollution*, *234*(2), Article 114.

Rodríguez-Gonzales, S., Zárate-Villarroe, G. y Bastida-Codina, A. (2022). Biodiversidad bacteriana presente en suelos contaminados con hidrocarburos para realizar biorremediación. *Revista de Ciencias Ambientales* (Trop J Environ Sci) e-ISSN: 2215-3896 (Enero-Junio, 2022). Vol 56(1): 178-208
DOI: https://doi.org/10.15359/rca.56-1.9
https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2215-38962022000100178

Saldarriaga, D. (2013). *Tratamiento de efluentes del cultivo intensivo de Penaeus vannamei por sedimentación y biofiltración* [Tesis de Doctor en Ciencias Ambientales], Universidad Nacional de Tumbes. https://biblioteca.imarpe.gob.pe/opac_css/index.php?lvl=notice_display&id=17537

Saldarriaga, D. (2009). *Experiencias exitosas en el desarrollo de especies acuícolas: Langostino*. Presentación. EXPOACUÍCOLA. I Exhibición Internacional de Acuicultura. La Punta, Callao, Perú. https://es.scribd.com/doc/29566213/David-Saldarriaga

Sandifer, P. and Hopkings, J. (1995). Conceptual design of a sustainable pond-based shrimp culture system. *Aquacultural Engineering 15*(1), 41-52. https://doi.org/10.1016/0144-8609(95)00003-W

Shah, A. & Shah, M. (2020). Characterization and bioremediation of wastewater: A review exploring bioremediation as a sustainable technique for pharmaceutical wastewater. *Groundwater for Sustainable Development, 11*, 100383. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100383.

Shu, H., Sun, H., Huang, W., Zhao, Y., Ma, Y., Chen, W., Sun, Y., Chen, X., Zhong, P., Yang, H., Wu, X., Huang, M., & Liao, S. (2022). Nitrogen removal characteristics and potential application of the heterotrophic nitrifying-aerobic denitrifying bacteria Pseudomonas mendocina S16 and Enterobacter cloacae DS'5 isolated from aquaculture wastewater ponds. *Bioresource Technology, 345*(126541), 126541. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126541

Soltani, M., Ghosh, K., Hoseinifar, S., Kumar, V., Lymbery, A., Roy, S., & Ringø, E. (2019). Genus bacillus, promising probiotics in aquaculture: Aquatic animal origin, bio-active components, bioremediation and efficacy in fish and shellfish. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, *27*(3), 331–379. https://doi.org/https://doi.org/10.1080/23308249.2019.1597010

Tran, H. T., Nguyen, T. K., & Vo, P. D. (2023). Repeated inoculation of probiotic bacteria enhances organic matter removal kinetics in intensive *Litopenaeus vannamei* pond sediments. *Aquaculture*, 571, 739450.

Tresierra, Á. (2000). *Metodología De La Investigación Científica*. Trujillo: Biociencia. Primera Edición.

Vargas-Albores, F., Martínez-Porchas, M., & Lago-Lestón, A. (2021). Phosphate uptake and solubilization mechanisms by *Bacillus* species in aquaculture pond sediments. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(14), 17450-17462.

Vargas-Albores, F., Martínez-Porchas, M., & Lago-Lestón, A. (2020). Sediment drying and bioaugmentation strategies to improve nitrogen turnover in aquaculture ponds. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(18), 22100-22112.

Vu, Q. D. H. (2025). Gut microbiota deliverables: reflecting the efficacy of dietary probiotic supplementation for growth and feed utilization in Litopenaeus vannamei towards sustainable aquaculture. *Israeli Journal of Aquaculture - Bamidgeh.* 2025;77(2):377-390.
https://doi.org/10.46989/001c.141379
https://ija.scholasticahq.com/article/141379-gut-microbiota-deliverables-reflecting-the-efficacy-of-dietary-probiotic-supplementation-for-growth-and-feed-utilization-in-_litopenaeus-vannamei_-to

Yu, J., et al. (2025). Risk assessment of shrimp-derived probiotics on culture performance and environmental biosafety in shrimp larvae rearing system. *Frontiers in Marine Science*, 12, 1683189.
https://doi.org/10.3389/fmars.2025.1683189
https://www.frontiersin.org/journals/marine-science/articles/10.3389/fmars.2025.1683189/full

Zheng, Y., Ma, Z., Vega-Carranza, M., & Monier, L. (2025). *Effects of Bacillus licheniformis on the water quality, growth performance and bacterial community in Penaeus vannamei aquaculture system*. Frontiers in Microbiology, 16, 1595680. https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1595680 https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2025.1595680/full

Zhou, S., Zhou, H., Xia, S., Ying, J., Ke, X., Zou, S., Xue, Y., & Zheng, Y. (2021). Efficient biodegradation of food waste through improving the microbial community compositions by newly isolated Bacillus strains. *Bioresource Technology*, *321*, 124451. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2020.124451

ANEXOS

Tabla 10.

Concentración de la materia orgánica (%) durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para la biorremediación del sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei

	Tiempo (día)	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Promedio	D.E.
Control	0	22,06	21,92	22,00	21,99	0,07
	9	20,68	20,70	20,78	20,72	0,05
	12	19,90	19,76	19,84	19,83	0,07
	15	14,50	12,94	13,14	13,53	0,85
	18	**12,38**	**12,16**	**11,86**	**12,13**	**0,26**
Tasa de remoción específica total	**(por día)**	**-0,54**	**-0,54**	**-0,56**	**-0,55**	**0,01**
Eficiencia de remoción total	**(%)**	**-43,88**	**-44,53**	**-46,09**	**-44,83**	**1,14**
10^8 U.F.C./mL	0	22,06	21,92	22,00	21,99	0,07
	9	18,20	17,58	17,50	17,76	0,38
	12	15,52	15,76	15,58	15,62	0,12
	15	11,50	11,58	11,54	11,54	0,04
	18	**9,94**	**10,16**	**10,28**	**10,13**	**0,17**
Tasa de remoción específica total	**(por día)**	**-0,67**	**-0,65**	**-0,65**	**-0,66**	**0,01**
Eficiencia de remoción total	**(%)**	**-54,94**	**-53,65**	**-53,27**	**-53,95**	**0,87**
10^9 U.F.C./mL	0	22,06	21,92	22,00	21,99	0,07
	9	15,76	16,28	15,68	15,91	0,33
	12	15,10	15,20	15,28	15,19	0,09
	15	11,34	11,26	11,28	11,29	0,04
	18	**8,94**	**9,50**	**9,30**	**9,25**	**0,28**
Tasa de remoción específica total	**(por día)**	**-0,73**	**-0,69**	**-0,71**	**-0,71**	**0,02**
Eficiencia de remoción total	**(%)**	**-59,47**	**-56,66**	**-57,73**	**-57,95**	**1,42**

Tabla 11.

Concentración de la demanda bioquímica de oxígeno (mg/kg) durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para la biorremediación del sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei

	Tiempo (día)	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Promedio	D.E.
Control	0	508,00	522,00	497,00	509,00	12,53
	9	500,00	503,00	498,00	500,33	2,52
	12	450,00	462,00	476,00	462,67	13,01
	15	330,00	325,00	329,00	328,00	2,65
	18	**280,00**	**284,00**	**276,00**	**280,00**	**4,00**
Tasa de remoción específica total	**(por día)**	**-12,67**	**-13,22**	**-12,28**	**-12,72**	**0,47**
Eficiencia de remoción total	**(%)**	**-44,88**	**-45,59**	**-44,47**	**-44,98**	**0,57**
10^8 U.F.C./mL	0	508,00	522,00	497,00	509,00	12,53
	9	406,00	412,00	399,00	405,67	6,51
	12	345,00	402,00	368,00	371,67	28,68
	15	323,00	302,00	310,00	311,67	10,60
	18	**271,00**	**264,00**	**268,00**	**267,67**	**3,51**
Tasa de remoción específica total	**(por día)**	**-13,17**	**-14,33**	**-12,72**	**-13,41**	**0,83**
Eficiencia de remoción total	**(%)**	**-46,65**	**-49,43**	**-46,08**	**-47,39**	**1,79**
10^9 U.F.C./mL	0	508,00	522,00	497,00	509,00	12,53
	9	414,00	400,00	401,00	405,00	7,81
	12	381,00	377,00	343,00	367,00	20,88
	15	304,00	310,00	301,00	305,00	4,58
	18	**262,00**	**257,00**	**260,00**	**259,67**	**2,52**
Tasa de remoción específica total	**(por día)**	**-13,67**	**-14,72**	**-13,17**	**-13,85**	**0,79**
Eficiencia de remoción total	**(%)**	**-48,43**	**-50,77**	**-47,69**	**-48,96**	**1,61**

Tabla 12.

Concentración del amonio (mg/kg) durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para la biorremediación del sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei

	Tiempo (día)	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Promedio	D.E.
Control	0	406,50	390,00	380,25	392,25	13,27
	9	455,00	403,00	442,00	433,33	27,06
	12	553,00	559,00	533,00	548,33	13,61
	15	546,00	533,00	520,00	533,00	13,00
	18	**156,00**	**159,00**	**148,00**	**154,33**	**5,69**
Tasa de remoción específica total	**(por día)**	**-13,92**	**-12,83**	**-12,90**	**-13,22**	**0,61**
Eficiencia de remoción total	**(%)**	**-61,62**	**-59,23**	**-61,08**	**-60,64**	**1,25**
10^8 U.F.C./mL	0	406,50	390,00	380,25	392,25	13,27
	9	312,00	299,00	306,00	305,67	6,51
	12	273,00	273,00	267,00	271,00	3,46
	15	260,00	260,00	267,00	262,33	4,04
	18	**91,00**	**111,00**	**99,00**	**100,33**	**10,07**
Tasa de remoción específica total	**(por día)**	**-17,53**	**-15,50**	**-15,63**	**-16,22**	**1,14**
Eficiencia de remoción total	**(%)**	**-77,61**	**-71,54**	**-73,96**	**-74,37**	**3,06**
10^9 U.F.C./mL	0	406,50	390,00	380,25	392,25	13,27
	9	104,00	130,00	143,00	125,67	19,86
	12	130,00	117,00	117,00	121,33	7,51
	15	111,00	104,00	111,00	108,67	4,04
	18	**88,00**	**91,00**	**85,00**	**88,00**	**3,00**
Tasa de remoción específica total	**(por día)**	**-17,69**	**-16,61**	**-16,40**	**-16,90**	**0,69**
Eficiencia de remoción total	**(%)**	**-78,35**	**-76,67**	**-77,65**	**-77,55**	**0,85**

Tabla 13.

Concentración del nitrito (mg/kg) durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para la biorremediación del sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei

	Tiempo (día)	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Promedio	D.E.
Control	0	4,85	5,30	5,11	5,09	0,23
	9	1,80	1,76	1,81	1,79	0,03
	12	1,50	1,40	1,40	1,43	0,06
	15	1,40	3,40	3,22	2,67	1,11
	18	**5,32**	**6,73**	**6,59**	**6,21**	**0,78**
Tasa de remoción específica total	**(por día)**	**0,03**	**0,08**	**0,08**	**0,06**	**0,03**
Eficiencia de remoción total	**(%)**	**9,69**	**26,98**	**28,96**	**21,88**	**10,60**
10^8 U.F.C./mL	0	4,85	5,30	5,11	5,09	0,23
	9	3,40	3,20	3,30	3,30	0,10
	12	4,30	4,40	4,00	4,23	0,21
	15	5,50	6,30	5,00	5,60	0,66
	18	**10,00**	**10,50**	**9,80**	**10,10**	**0,36**
Tasa de remoción específica total	**(por día)**	**0,29**	**0,29**	**0,26**	**0,28**	**0,02**
Eficiencia de remoción total	**(%)**	**106,19**	**98,11**	**91,78**	**98,69**	**7,22**
10^9 U.F.C./mL	0	4,85	5,30	5,11	5,09	0,23
	9	5,20	5,50	5,40	5,37	0,15
	12	6,40	6,50	6,30	6,40	0,10
	15	10,50	11,70	11,30	11,17	0,61
	18	**10,00**	**10,50**	**11,20**	**10,57**	**0,60**
Tasa de remoción específica total	**(por día)**	**0,29**	**0,29**	**0,34**	**0,30**	**0,03**
Eficiencia de remoción total	**(%)**	**106,19**	**98,11**	**119,18**	**107,83**	**10,63**

Tabla 14.

Concentración del fosfato (mg/kg) durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para la biorremediación del sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei

	Tiempo (día)	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Promedio	D.E.
Control	0	525,00	525,00	600,00	550,00	43,30
	9	200,00	200,00	200,00	200,00	0,00
	12	175,00	184,00	190,00	183,00	7,55
	15	180,00	180,00	200,00	186,67	11,55
	18	**143,00**	**140,00**	**140,00**	**141,00**	**1,73**
Tasa de remoción específica total	**(por día)**	**-21,22**	**-21,39**	**-25,56**	**-22,72**	**2,46**
Eficiencia de remoción total	**(%)**	**-72,76**	**-73,33**	**-76,67**	**-74,25**	**2,11**
10^8 U.F.C./mL	0	525,00	525,00	600,00	550,00	43,30
	9	200,00	200,00	200,00	200,00	0,00
	12	140,00	134,00	137,00	137,00	3,00
	15	135,00	135,00	130,00	133,33	2,89
	18	**95,00**	**110,00**	**96,00**	**100,33**	**8,39**
Tasa de remoción específica total	**(por día)**	**-23,89**	**-23,06**	**-28,00**	**-24,98**	**2,65**
Eficiencia de remoción total	**(%)**	**-81,90**	**-79,05**	**-84,00**	**-81,65**	**2,49**
10^9 U.F.C./mL	0	525,00	525,00	600,00	550,00	43,30
	9	160,00	160,00	180,00	166,67	11,55
	12	125,00	130,00	130,00	128,33	2,89
	15	120,00	120,00	125,00	121,67	2,89
	18	**100,00**	**90,00**	**90,00**	**93,33**	**5,77**
Tasa de remoción específica total	**(por día)**	**-23,61**	**-24,17**	**-28,33**	**-25,37**	**2,58**
Eficiencia de remoción total	**(%)**	**-80,95**	**-82,86**	**-85,00**	**-82,94**	**2,02**

Tabla 15.

Concentración de los microorganismos heterótrofos (U.F.C./g) durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para la biorremediación del sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei

	Tiempo (día)	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Promedio	D.E.
Control	0	3,80 x 10^7	4,70 x 10^7	2,50 x 10^7	3,67 x 10^7	1,11 x 10^7
	9	4,00 x 10^6	2,60 x 10^6	2,50 x 10^6	3,03 x 10^6	8,39 x 10^5
	12	2,10 x 10^6	1,90 x 10^6	3,00 x 10^6	2,33 x 10^6	5,86 x 10^5
	15	5,00 x 10^6	6,50 x 10^6	6,20 x 10^6	5,90 x 10^6	7,94 x1 0^5
	18	**8,80 x 10^6**	**8,70 x 10^6**	**6,60 x 10^6**	**8,03 x 10^6**	**1,24 x 10^6**
Tasa de remoción específica total	**(por día)**	**-1,62 x 10^6**	**-2,13 x 10^6**	**-1,02 x 10^6**	**-1,59 x 10^6**	**5,53 x 10^5**
Eficiencia de remoción total	**(%)**	**-76,84**	**-81,49**	**-73,60**	**-77,31**	**3,97**
10^8 U.F.C./mL	0	3,80 x 10^7	4,70 x 10^7	2,50 x 10^7	3,67 x 10^7	1,11 x 10^7
	9	3,00 x 10^6	2,40 x 10^6	3,30 x 10^6	2,90 x 10^6	4,58 x 10^5
	12	3,20 x 10^6	3,60 x 10^6	3,00 x 10^6	3,27 x 10^6	3,06 x 10^5
	15	5,00 x 10^6	6,50 x 10^6	6,20 x 10^6	5,90 x 10^6	7,94 x 10^5
	18	**9,10 x 10^6**	**1,06 x 10^7**	**1,34 x 10^7**	**1,10 x 10^7**	**2,18 x 10^6**
Tasa de remoción específica total	**(por día)**	**-1,61 x 10^6**	**-2,02 x 10^6**	**-6,44 x 10^5**	**-1,42 x 10^6**	**7,07 x 10^5**
Eficiencia de remoción total	**(%)**	**-76,05**	**-77,45**	**-46,40**	**-66,63**	**17,54**
10^9 U.F.C./mL	0	3,80 x 10^7	4,70 x 10^7	2,50 x 10^7	3,67 x 10^7	1,11 x 10^7
	9	5,10 x 10^7	3,30 x 10^6	6,20 x 10^6	5,65 x 10^6	7,78 x 10^5
	12	3,20 x 10^6	3,60 x 10^6	3,00 x 10^6	3,27 x 10^6	3,06 x 10^5
	15	5,30 x 10^6	5,00 x 10^6	5,20 x 10^6	5,17 x 10^6	1,53 x1 0^5
	18	**1,14 x 10^7**	**9,90 x 10^6**	**1,16 x 10^7**	**1,10** x 10^7	**9,29 x 10^5**
Tasa de remoción específica total	**(por día)**	**-1,4**8 x 10^6	**-2,06 x 10^6**	**-7,44 x 10^5**	**-1,43** x 10^6	**6,60 x 10^5**
Eficiencia de remoción total	**(%)**	**-70,00**	**-78,94**	**-53,60**	**-67,51**	**12,85**

Tabla 16.

Concentración de los coliformes termotolerantes (NMP/100 g) durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para la biorremediación del sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei

	Tiempo (día)	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Promedio	D.E.
Control	0	9,30 x 10^6	1,50 x 10^6	4,30 x 10^6	5,03 x 10^6	3,95 x 10^6
	9	4,30 x 10^4	2,10 x 10^4	9,30 x 10^4	5,23 x 10^4	3,69 x 10^4
	12	7,50 x 10^3	9,30 x 10^3	1,50 x 10^4	1,06 x 10^4	3,92 x 10^3
	15	4,30 x 10^3	2,30 x 10^3	2,30 x 10^3	2,97 x 10^3	1,15 x 10^3
	18	**4,30 x 10^2**	**6,50 x 10^2**	**9,20** x 10^2	**6,67** x 10^2	**2,45 x 10^2**
Tasa de remoción específica total	**(por día)**	**-5,17 x 10^5**	**-8,33 x 10^4**	**-2,39** x 10^5	**-2,80** x 10^5	**2,20 x 10^5**
Eficiencia de remoción total	**(%)**	**-100,00**	**-99,96**	**-99,98**	**-99,98**	**0,02**
10^8 U.F.C./mL	0	9,30 x 10^6	1,50 x 10^6	4,30 x 10^6	5,03 x 10^6	3,95 x 10^6
	9	4,20 x 10^3	2,10 x 10^3	4,20 x 10^3	3,50 x 10^3	1,21 x 10^3
	12	2,00 x 10^3	4,30 x 10^3	2,30 x 10^3	2,87 x 10^3	1,25 x 10^3
	15	2,30 x 10^3	2,10 x10^3	2,30 x 10^3	2,23 x 10^3	1,15 x 10^2
	18	**4,30 x 10^2**	**4,30 x 10^2**	**6,50** x 10^2	**5,03 x 10^2**	**1,27 x 10^2**
Tasa de remoción específica total	**(por día)**	**-5,17 x 10^5**	**-8,33 x 10^4**	**-2,39** x 10^5	**-2,80 x 10^5**	**2,20 x 10^5**
Eficiencia de remoción total	**(%)**	**-100,00**	**-99,97**	**-99,98**	**-99,98**	**0,01**
10^9 U.F.C./mL	0	9,30 x 10^6	1,50 x 10^6	4,30 x 10^6	5,03 x 10^6	3,95 x 10^6
	9	4,20 x 10^3	9,20 x 10^3	2,10 x 10^3	5,17 x 10^3	3,65 x 10^3
	12	2,30 x 10^3	9,20 x 10^2	1,50 x 10^3	1,57 x 10^3	6,93 x 10^2
	15	2,30 x 10^3	2,30 x 10^3	2,10 x 10^3	2,23 x 10^3	1,15 x 10^2
	18	**6,50 x 10^2**	**4,30 x 10^2**	**4,30 x 10^2**	**5,03 x 10^2**	**1,27 x 10^2**
Tasa de remoción específica total	**(por día)**	**-5,17 x 10^5**	**-8,33** x 10^4	**-2,39 x 10^5**	**-2,80 x 10^5**	**2,20 x 10^5**
Eficiencia de remoción total	**(%)**	**-99,99**	**-99,97**	**-99,99**	**-99,98**	**0,01**

Tabla 17.

ANOVA (α = 0,05) de un factor, de las concentraciones finales de los parámetros de calidad del sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para su biorremediación

Parámetros de calidad del sedimento		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	Valor crítico de F	Significación (p valor)
Materia orgánica (%)	Entre tratam.	13,134	2	6,567	110,431	0,000
	Error	0,357	6	0,059		
	Total	13,491	8			
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) (mg/kg)	Entre tratam.	629,556	2	314,778	27,240	0,001
	Error	69,333	6	11,556		
	Total	698,889	8			
Amonio (mg/kg)	Entre tratam.	7468,222	2	3734,111	78,521	0,000
	Error	285,333	6	47,556		
	Total	7753,556	8			
Nitrito (mg/kg)	Entre tratam.	34,275	2	17,138	46,877	0,000
	Error	2,194	6	0,366		
	Total	36,469	8			
Fosfato (mg/kg)	Entre tratam.	3974,889	2	1987,444	55,897	0,000
	Error	213,333	6	35,556		
	Total	4188,222	8			
Microorganismos heterótrofos totales (U.F.C./mL)	Entre tratam.	1760888888 8888,890	2	8804444444 444,445	3,684	0,090
	Error	1433999999 9999,998	6	2390000000 000,000		
	Total	3194888888 8888,890	8			
Coliformes termotolerantes (NMP/100 g)	Entre tratam.	53355,556	2	26677,778	0,865	0,468
	Error	185000,000	6	30833,333		
	Total	238355,556	8			

Tabla 18.

Agrupación por la prueba de Tuckey (α = 0,05) de las concentraciones finales de la materia orgánica en el sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para su biorremediación

Tratamiento	Datos	Subconjunto para alfa = 0,05		
		1	2	3
10^9 U.F.C./mL	3	9,2467	-	-
10^8 U.F.C./mL	3	-	10,1267	-
Control	3	-	-	12,1333
Significación	-	1,000	1,000	1,000

Tabla 19.

Agrupación por la prueba de Tuckey (α = 0,05) de las concentraciones finales de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) (mg/kg) en el sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para su biorremediación

Tratamiento	Datos	Subconjunto para alfa = 0,05		
		1	2	-
10^9 U.F.C./mL	3	259,6667	-	-
10^8 U.F.C./mL	3	267,6667	-	-
Control	3	-	280,0000	-
Significación	-	0,063	1,0000	-

Tabla 20.

Agrupación por la prueba de Tuckey (α = 0,05) de las concentraciones finales del amonio en el sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para su biorremediación

Tratamiento	Datos	Subconjunto para alfa = 0,05		
		1	2	-
10^9 U.F.C./mL	3	88,0000	-	-
10^8 U.F.C./mL	3	100,3333	-	-
Control	3	-	154,3333	-
Significación	-	0,152	1,000	-

Tabla 21.

Agrupación por la prueba de Tuckey (α = 0,05) de las concentraciones finales del nitrito en el sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para su biorremediación

Tratamiento	Datos	Subconjunto para alfa = 0,05		
		1	2	-
Control	3	6,2133	-	-
10^8 U.F.C./mL	3	-	10,1000	-
10^9 U.F.C./mL	3	-	10,5667	-
Significación	-	1,000	0,634	-

Tabla 22.

Agrupación por la prueba de Tuckey (α = 0,05) de las concentraciones finales del fosfato en el sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para su biorremediación

Tratamiento	Datos	Subconjunto para alfa = 0,05		
		1	2	-
10^9 U.F.C./mL	3	93,3333	-	-
10^8 U.F.C./mL	3	100,3333	-	-
Control	3	-	141,0000	-
Significación	-	0,382	1,000	-

Tabla 23.

Agrupación por la prueba de Tuckey (α = 0,05) de las concentraciones finales de los microorganismos heterótrofos totales en el sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para su biorremediación

Tratamiento	Datos	Subconjunto para alfa = 0,05		
		1	-	-
Control	3	8033333,333	-	-
10^9 U.F.C./mL	3	10966666,67	-	-
10^8 U.F.C./mL	3	11033333,33	-	-
Significación	-	0,119	-	-

Tabla 24.

Agrupación por la prueba de Tuckey (α = 0,05) de las concentraciones finales de los coliformes termotolerantes en el sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para su biorremediación

Tratamiento	Datos	Subconjunto para alfa = 0,05		
		1	-	-
10^8 U.F.C./mL	3	503,3333	-	-
10^9 U.F.C./mL	3	503,3333	-	-
Control	3	666,6667	-	-
Significación	-	0,527	-	-

Tabla 25.

ANOVA (α = 0,05) de un factor, de las tasas de remoción específicas totales de los parámetros de calidad del sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para su biorremediación

Parámetros de calidad del sedimento		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	Valor crítico de F	Significación (p valor)
Materia orgánica (%/día)	Entre tratam.	0,042	2	0,021	93,650	0,000
	Error	0,001	6	0,000		
	Total	0,043	8			
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) (mg/kg-día)	Entre tratam.	1,943	2	0,972	1,894	0,230
	Error	3,078	6	0,513		
	Total	5,021	8			
Amonio (mg/kg-día)	Entre tratam.	23,049	2	11,525	16,136	0,004
	Error	4,285	6	0,714		
	Total	27,335	8			
Nitrito (mg/kg-día)	Entre tratam.	0,107	2	0,053	81,508	0,000
	Error	0,004	6	0,001		
	Total	0,111	8			
Fosfato (mg/kg-día)	Entre tratam.	12,262	2	6,131	0,934	0,443
	Error	39,379	6	6,563		
	Total	51,640	8			
Microorganismos heterótrofos totales (U.F.C./mL-día)	Entre tratam.	53590222222,222	2	267951111111,111	0,065	0,938
	Error	2485594666666,667	6	414265777777,778		
	Total	2539184888888,889	8			
Coliformes termotolerantes (NMP/100 g-día)	Entre tratam.	0,0000	2	0,000	0,000	1,000
	Error	289622180000,000	6	48270363333,333		
	Total	289622180000,000	8			

Tabla 26

Agrupación por la prueba de Tuckey (α = 0,05) de las tasas de remoción específicas totales de la materia orgánica (%/día) en el sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para su biorremediación

Tratamiento	Datos	Subconjunto para alfa = 0,05		
		1	2	3
10^9 U.F.C./mL	3	-0,7100	-	-
10^8 U.F.C./mL	3	-	-0,6567	-
Control	3	-	-	-0,5467
Significación		1,000	1,000	1,000

Tabla 27.

Agrupación por la prueba de Tuckey (α = 0,05) de las tasas de remoción específicas totales de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) (mg/kg-día) en el sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para su biorremediación

Tratamiento	Datos	Subconjunto para alfa = 0,05		
		1	2	-
10^9 U.F.C./mL	3	-13,8533	-	-
10^8 U.F.C./mL	3	-13,4067	-	-
Control	3	-12,72333	-	-
Significación	-	0,210	-	-

Tabla 28.

Agrupación por la prueba de Tuckey (α = 0,05) de las tasas de remoción específicas totales del amonio (mg/kg-día) en el sedimento efluente del cultivo intensivo de *Penaeus vannamei* durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para su biorremediación

Tratamiento	Datos	Subconjunto para alfa = 0,05		
		1	2	-
10^9 U.F.C./mL	3	-16,9000	-	-
10^8 U.F.C./mL	3	-16,2200	-	-
Control	3	-	-13,2167	-
Significación	-	0,612	1,000	-

Tabla 29.

Agrupación por la prueba de Tuckey (α = 0,05) de las tasas de remoción específicas totales del nitrito (mg/kg-día) en el sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para su biorremediación

Tratamiento	Datos	Subconjunto para alfa = 0,05		
		1	2	-
Control	3	0,0633	-	-
10^8 U.F.C./mL	3	-	0,2800	-
10^9 U.F.C./mL	3	-	0,3067	-
Significación	-	1,000	0,457	-

Tabla 30.

Agrupación por la prueba de Tuckey (α = 0,05) de las tasas de remoción específicas totales del fosfato (mg/kg-día) en el sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para su biorremediación

Tratamiento	Datos	Subconjunto para alfa = 0,05		
		1	2	-
10^9 U.F.C./mL	3	-25,3700	-	-
10^8 U.F.C./mL	3	-24,9833	-	-
Control	3	-22,7233	-	-
Significación	-	0,462	-	-

Tabla 31.

Agrupación por la prueba de Tuckey (α = 0,05) de las tasas de remoción específicas totales de los microorganismos heterótrofos totales en el sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para su biorremediación

Tratamiento	Datos	Subconjunto para alfa = 0,05		
		1	-	-
Control	3	-1590000,000	-	-
10^8 U.F.C./mL	3	-1428000,000	-	-
10^9 U.F.C./mL	3	-1424666,667	-	-
Significación	-	0,947	-	-

Tabla 32.

Agrupación por la prueba de Tuckey (α = 0,05) de las tasas de remoción específicas totales de los coliformes termotolerantes en el sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para su biorremediación

Tratamiento	Datos	Subconjunto para alfa = 0,05		
		1	-	-
Control	3	-279766,6667	-	-
10^8 U.F.C./mL	3	-279766,6667	-	-
10^9 U.F.C./mL	3	-279766,6667	-	-
Significación		1,000	-	-

Tabla 33.

ANOVA (α = 0,05) de un factor, de las eficiencias de remoción totales (%) de los parámetros de calidad del sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para su biorremediación

Parámetros de calidad del sedimento		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	Valor crítico de F	Significación (p valor)
Materia orgánica	Entre tratam.	271,309	2	135,654	100,047	0,000
	Error	8,135	6	1,356		
	Total	279,444	8			
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5)	Entre tratam.	24,145	2	12,072	5,919	0,038
	Error	12,237	6	2,040		
	Total	36,382	8			
Amonio	Entre tratam.	484,637	2	242,319	62,558	0,000
	Error	23,241	6	3,873		
	Total	507,878	8			
Nitrito	Entre tratam.	13371,621	2	6685,810	72,272	0,000
	Error	555,057	6	92,510		
	Total	13926,678	8			
Fosfato	Entre tratam.	131,766	2	65,883	13,410	0,006
	Error	29,478	6	4,913		
	Total	161,244	8			
Microorganismos heterótrofos totales	Entre tratam.	210,569	2	105,284	,647	0,556
	Error	975,927	6	162,654		
	Total	1186,496	8			
Coliformes termotolerantes	Entre tratam.	0,000	2	0,000	.	.
	Error	0,000	6	0,000		
	Total	0,000	8			

Tabla 34.

Agrupación por la prueba de Tuckey (α = 0,05) de las eficiencias de remoción totales (%) de la materia orgánica en el sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para su biorremediación

Tratamiento	Datos	Subconjunto para alfa = 0,05		
		1	2	3
10^9 U.F.C./mL	3	-57,9533	-	-
10^8 U.F.C./mL	3	-	-57,9533	-
Control	3	-	-	-44,8333
Significación		1,000	1,000	1,000

Tabla 35.

Agrupación por la prueba de Tuckey (α = 0,05) de las eficiencias de remoción totales (%) de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) (mg/kg) en el sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para su biorremediación

Tratamiento	Datos	Subconjunto para alfa = 0,05		
		1	2	-
10^9 U.F.C./mL	3	-48,9633	-	-
10^8 U.F.C./mL	3	-47,3867	-47,3867	-
Control	3	-	-44,9800	-
Significación	-	0,421	0,178	-

Tabla 36.

Agrupación por la prueba de Tuckey (α = 0,05) de las eficiencias de remoción totales (%) del amonio en el sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para su biorremediación

Tratamiento	Datos	Subconjunto para alfa = 0,05		
		1	2	-
10^9 U.F.C./mL	3	-77,5567	-	-
10^8 U.F.C./mL	3	-74,3700	-	-
Control	3	-	-60,6433	-
Significación	-	0,197	1,000	-

Tabla 37.

Agrupación por la prueba de Tuckey (α = 0,05) de las eficiencias de remoción totales (%) del nitrito en el sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para su biorremediación

Tratamiento	Datos	Subconjunto para alfa = 0,05		
		1	2	-
Control	3	21,8767	-	-
10^8 U.F.C./mL	3	-	98,6933	-
10^9 U.F.C./mL	3	-	107,8267	-
Significación	-	1,000	0,515	-

Tabla 38.

Agrupación por la prueba de Tuckey (α = 0,05) de las eficiencias de remoción totales (%) del fosfato en el sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para su biorremediación

Tratamiento	Datos	Subconjunto para alfa = 0,05		
		1	2	-
10^9 U.F.C./mL	3	-82,9367	-	-
10^8 U.F.C./mL	3	-81,6500	-	-
Control	3	-	-74,2533	-
Significación	-	0,766	1,000	-

Tabla 39.

Agrupación por la prueba de Tuckey (α = 0,05) de las eficiencias de remoción totales (%) de los microorganismos heterótrofos totales en el sedimento efluente del cultivo intensivo de Penaeus vannamei durante el ensayo de bioaumentación bacteriana para su biorremediación

Tratamiento	Datos	Subconjunto para alfa = 0,05		
		1	-	-
Control	3	-77,3000	-	-
10^9 U.F.C./mL	3	-67,5000	-	-
10^8 U.F.C./mL	3	-66,6333	-	-
Significación	-	0,590	-	-

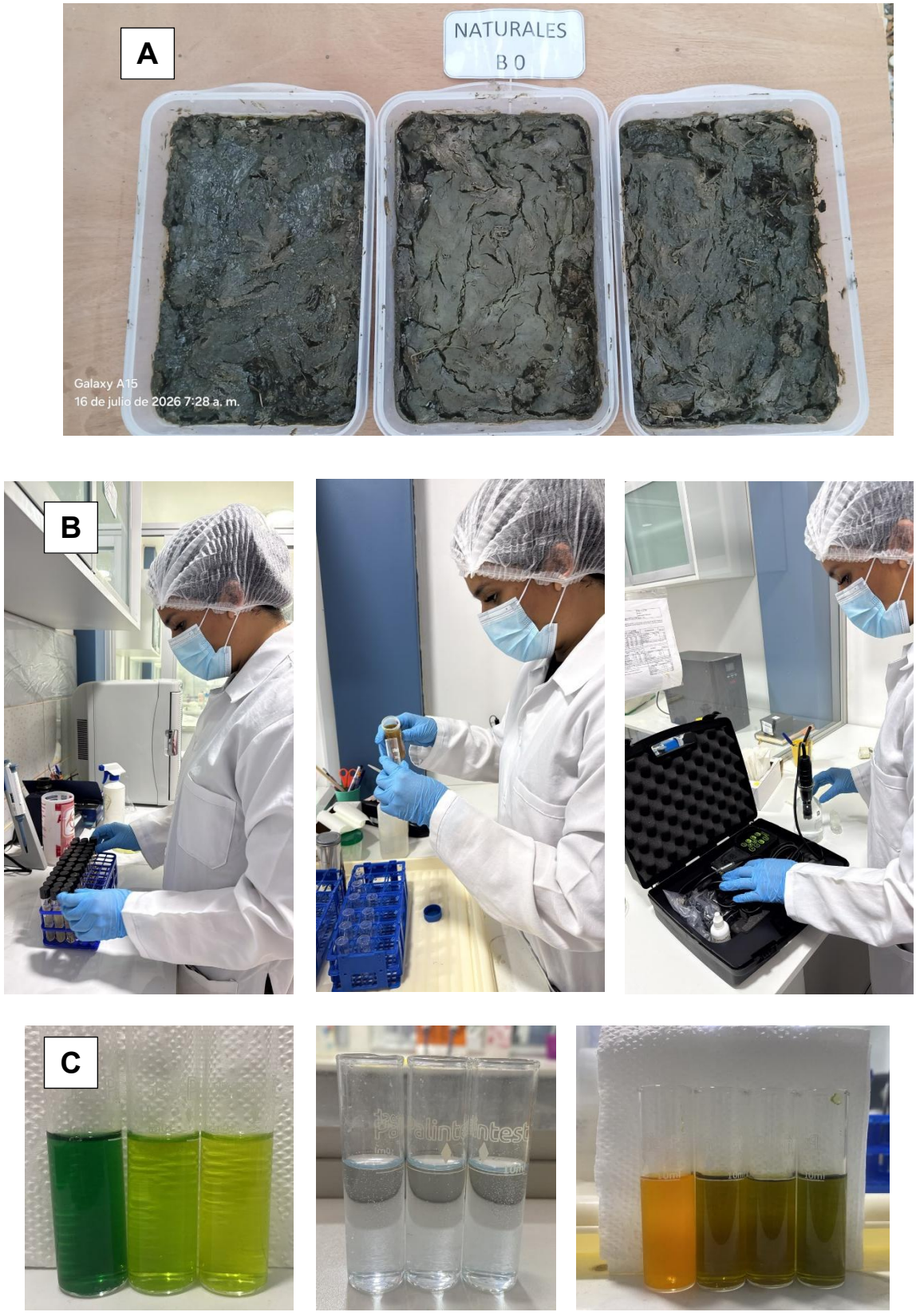


Figura 4. Fotografías sobre el análisis de calidad del sedimento fluente: A) Muestras, B) Uso del fotómetro y C) Tubos para determinación de la concentración del parámetro

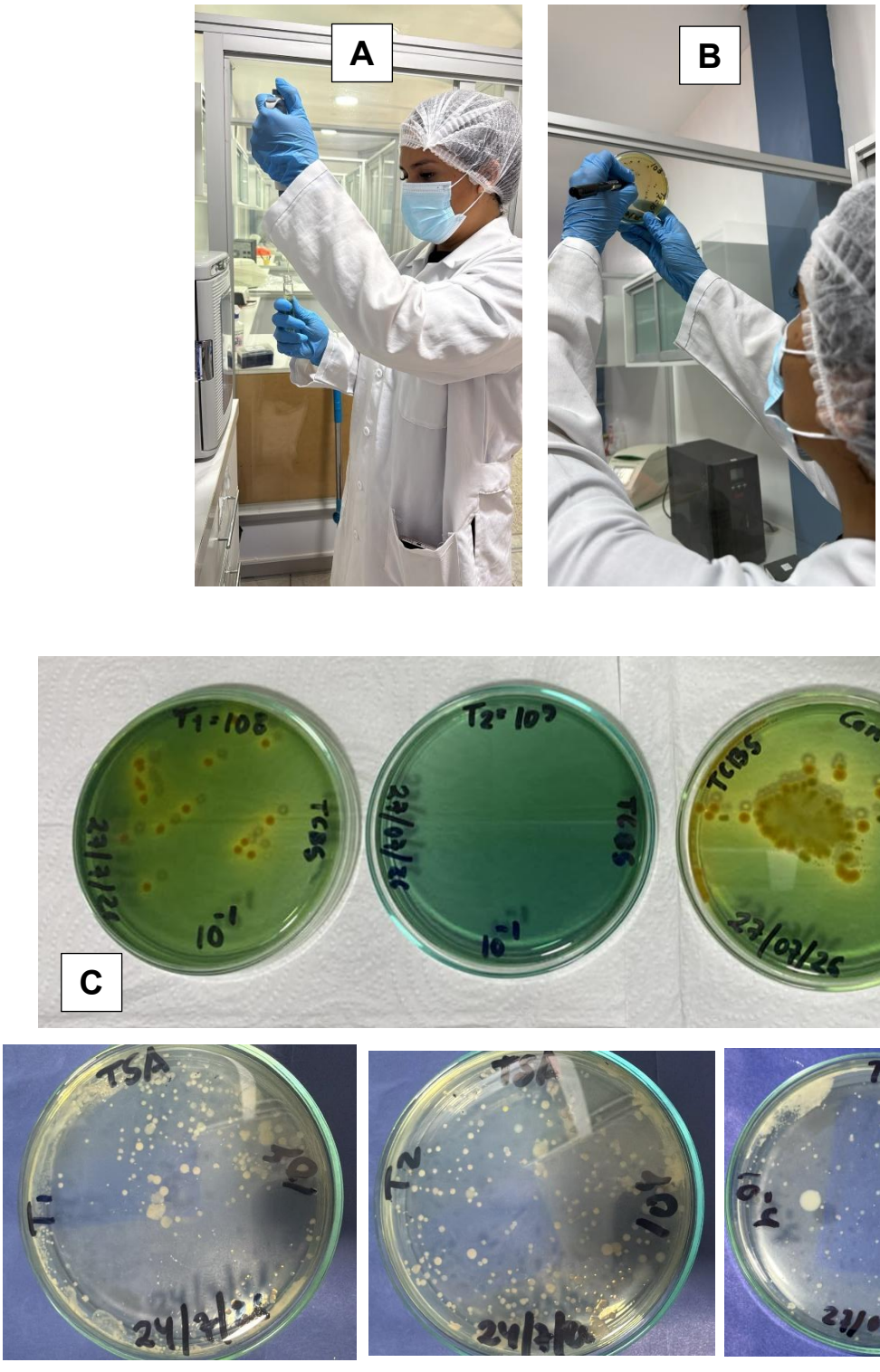


Figura 5. Fotografías sobre el análisis de calidad del sedimento fluente: A) Inóculo, B) recuento microbiológico y C) Cultivo de microorganismos

CERTIFICADO DE ORIGINALIDAD

Dr. David Edilberto Saldarriaga Yacila, profesor en la Facultad de Ingeniería Pesquera y Ciencias del Mar de la Universidad Nacional de Tumbes, adscrito al Departamento Académico de Acuicultura.

CERTIFICA:

Que, la tesis titulada: **Eficiencia de la bioaumentación bacteriana gradual para la biorremediación de sedimentos efluentes del cultivo intensivo de *Penaeus vannamei***, presentado por la Bachiller en Ingeniería Pesquera Acuícola: **Yanela Stefany Campoverde Vera**, ha sido asesorada y revisada por mi persona, por tanto, queda autorizada para su presentación e inscripción en la Facultad de Ingeniería Pesquera y Ciencias del Mar de la Universidad Nacional de Tumbes para su revisión y aprobación correspondiente.

Tumbes, 3 de octubre de 2026.



Dr. DAVID EDILBERTO SALDARRIAGA YACILA
Asesor de la Tesis
Código ORCID N° 0000-0002-4919-8607