

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES**  
**ESCUELA DE POSGRADO**  
**MAESTRÍA EN ACUICULTURA Y GESTIÓN AMBIENTAL**



**Efecto de nanoburbujas de oxígeno molecular generadas por  
electrólisis sobre la calidad de agua para cultivo intensivo de  
*Penaeus vannamei***

**TESIS**

**Para optar el grado académico de Maestro en Acuicultura y  
Gestión Ambiental**

**Autor: Br. Kevin Alexis Castillo Palacios**

**Tumbes, 2026**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES**  
**ESCUELA DE POSGRADO**  
**MAESTRÍA EN ACUICULTURA Y GESTIÓN AMBIENTAL**



**Efecto de nanoburbujas de oxígeno molecular generadas por  
electrólisis sobre la calidad de agua para cultivo intensivo de  
*Penaeus vannamei***

**Tesis aprobada en forma y estilo por:**

**Dr. Oscar Augusto Mendoza Neyra**  
**ORCID: 0000-0002-9637-6250**

**(Presidente)**

**Dra. Tessy Peralta Ortiz**  
**ORCID: 0000-0001-5907-7713**

**(Secretario)**

**Mg. Jorge Humberto Carrasco Casariego**  
**ORCID: 0000-0001-8584-2028**

**(Vocal)**

**Tumbes, 2026**


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES**  
**ESCUELA DE POSGRADO**  
**MAESTRÍA EN ACUICULTURA Y GESTIÓN AMBIENTAL**




**Efecto de nanoburbujas de oxígeno molecular generadas por  
electrólisis sobre la calidad de agua para cultivo intensivo de  
*Penaeus vannamei***

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

**Castillo Palacios Kevin Alexis**  
**ORCID: 0009-0006-4863-9980**

**(Ejecutor)** \_\_\_\_\_ 

**Mg. Jorge Humberto Carrasco Casariego**  
**ORCID: 0000-0001-8584-2028**

**(Asesor)** \_\_\_\_\_ 

**Tumbes, 2026**



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES**  
Licenciada  
Resolución del Consejo Directivo N° 155-2019-SUNEDU/CD  
**ESCUELA DE POSGRADO**  
Tumbes – Perú

*"Año de la Esperanza y el Fortalecimiento de la Democracia"*

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS**

En Tumbes, a los dos días del mes de junio del dos mil veintiséis, siendo las dieciséis horas y treinta minutos en el aula N° 02 de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de Tumbes, se reunieron los miembros del jurado calificador constituidos con la **RESOLUCIÓN N° 456-2024/UNTUMBES-EPG-D** del veintisiete de diciembre del dos mil veinticuatro presidido por el **Dr. Oscar Augusto Mendoza Neyra** e integrado por la **Dra. Tessy Peralta Ortiz** (Secretaria), y el **Mg. Jorge Humberto Carrasco Casariego** (vocal y asesor)

Instalado el jurado, se procedió a la evaluación, deliberación y calificación del acto de la sustentación de la tesis titulada: **"Efecto de nanoburbujas de oxígeno molecular generadas por electrólisis sobre la calidad de agua para cultivo intensivo de *Penaeus vannamei*"**, presentada por el maestrando: **Kevin Alexis Castillo Palacios**, del programa de Maestría en Acuicultura y Gestión Ambiental.

Concluida la sustentación y absueltas las preguntas, por parte del sustentante y después de la correspondiente deliberación el jurado, conforme a lo normado en el artículo N° 111 del Reglamento de Tesis de la Universidad Nacional de Tumbes, declara al maestrando **APROBADO** por **UNANIMIDAD** con el calificativo de **MUY BUENO**.

Por lo anterior, el sustentante está apto para iniciar los trámites correspondientes y conducentes a la obtención del grado académico de **Maestro en Acuicultura y Gestión Ambiental**, en conformidad con lo normado en la Ley Universitaria N° 30220, el Texto Único Ordenado del Estatuto, El Reglamento General, el Reglamento General de Grados Títulos y el Reglamento de Tesis de la Universidad Nacional de Tumbes.

Siendo las diecisiete horas y treinta minutos, del mismo día, se dio por concluida la ceremonia académica, procediendo a firmar el acta en presencia de público asistente.

Dr. Oscar Augusto Mendoza Neyra  
Presidente  
DNI 00201986  
<https://orcid.org/0000-0002-9637-6250>

Dra. Tessy Peralta Ortiz  
Secretaria  
DNI N° 00239540  
<https://orcid.org/0000-0001-5907-7713>

Mg. Jorge Humberto Carrasco Casariego  
Vocal y Asesor  
DNI N° 00241031  
<https://orcid.org/0000-0001-8584-2028>

# Reporte de Turnitin



Página 1 de 98 - Portada

Identificador de la entrega trn:oid::3117:598861985

## Kevin Alexis Castillo Palacios

### INFORME FINAL DE TESIS - Kevin CASTILLO P (4), Para Turnitin

Asesor de Tesis 2026,1

#### Detalles del documento

Identificador de la entrega  
trn:oid::3117:598861985

Fecha de entrega  
9 jun 2026, 20:13 GMT-5

Fecha de descarga  
9 jun 2026, 21:00 GMT-5

Nombre del archivo  
INFORME FINAL DE TESIS - Kevin CASTILLO P (4), Para Turnitin.docx

Tamaño del archivo  
13.4 MB

94 páginas

17.292 palabras

92.302 caracteres

Mg. Jorge Humberto Carrasco Casariego  
Asesor



Página 1 de 98 - Portada

Identificador de la entrega trn:oid::3117:598861985




## 3% 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

- 2%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 2%  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 permitan 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.

  
Mg. Jorge Humberto Carrasco Casariego  
Asesor

### Fuentes principales

- 2% Fuentes de Internet
- 1% Publicaciones
- 2% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

### Fuentes principales

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

1	Internet	repositorio.ual.es	1%
2	Trabajos del estudiante	Universidad Cesar Vallejo on 2026-01-05	<1%
3	Internet	debug.globalseafood.org	<1%
4	Trabajos del estudiante	Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga on 2023-12-21	<1%
5	Internet	es.scribd.com	<1%
6	Internet	issuu.com	<1%
7	Internet	repositorio.ucv.edu.pe	<1%
8	Internet	repositorio.unemi.edu.ec	<1%
9	Internet	doczz.com.br	<1%
10	Trabajos del estudiante	Universidad Nacional de Tumbes on 2024-01-17	<1%
11	Internet	repositorio.autonoma.edu.pe	<1%

  
Mg. Jorge Humberto Carrasco Casariego  
Asesor

12	Internet	repositorio.unisinucartagena.edu.co:8080	<1%
13	Publicación	Deysi Valdivia-Chávez, Cinthya Ramos, Jorge Del Águila-Rivera. "Densidad y comp...	<1%

Mg. Jorge Humberto Carrasco Casariego  
Asesor



## **Dedicatoria**

Dedico este trabajo a Dios, por brindarme fortaleza y perseverancia para alcanzar esta meta académica. A mis padres, prometida y familiares, por su apoyo incondicional, confianza y motivación constante a lo largo de este camino. Asimismo, a todas las personas que contribuyeron a mi crecimiento personal y profesional.

Castillo Palacios, Kevin Alexis

## **Agradecimiento**

Expreso mi sincero agradecimiento a la Universidad Nacional de Tumbes y a los docentes de la Maestría en Acuicultura y Gestión Ambiental por los conocimientos impartidos. De manera especial, a mi asesor, Mg. Jorge Humberto Carrasco Casariego, por su orientación y apoyo durante el desarrollo de esta investigación. Asimismo, agradezco a mi familia por su comprensión y respaldo permanente.

Castillo Palacios, Kevin Alexis

# ÍNDICE

RESUMEN .....	xviii
ABSTRACT .....	xix
I. INTRODUCCIÓN .....	20
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	22
2.1. Antecedentes .....	22
2.1.1. Estudio de nanoburbujas de oxígeno molecular .....	22
2.1.2. Efecto de nanoburbujas en la calidad de agua .....	23
2.1.3. Cultivo intensivo.....	26
2.2. Bases teórico-científicas .....	26
2.2.1. Nanoburbujas .....	26
2.2.2. Características de las nanoburbujas.....	26
2.2.3. Nanoburbujas en el cultivo de langostino .....	27
2.2.4. Generadores de nanoburbujas .....	27
2.2.5. Calidad de agua.....	27
2.2.6. Evaluación biológica de la calidad de agua .....	28
2.2.7. Cultivo intensivo.....	28
2.3. Definición de términos básicos .....	29
2.3.1. Calidad de agua.....	29
2.3.2. Oxígeno disuelto.....	29
2.3.3. Temperatura .....	29
2.3.4. Transparencia-Turbidez.....	29
2.3.5. Sólidos disueltos totales .....	30
2.3.6. pH.....	30
2.3.7. Amonio total.....	30
2.3.8. Alcalinidad total.....	30
2.3.9. Nitrito .....	30
2.3.10. Nitrato.....	30
2.3.11. Nanoburbujas .....	31
2.3.12. Electrólisis como método de generación de burbujas .....	31
III. MATERIALES Y MÉTODO.....	32
3.1. Lugar de ejecución .....	32
3.2. Tipo y diseño de investigación .....	32
3.2.1. Tipo de investigación .....	32
a. De acuerdo al fin que se persigue .....	32

b.	De acuerdo al enfoque.....	33
3.2.2.	Diseño de investigación.....	33
3.3.	Población y muestra.....	33
3.3.1.	Población.....	33
3.3.2.	Muestra.....	34
3.4.	Implementación del sistema experimental .....	34
3.4.1.	Construcción, acondicionamiento y etiquetado de los acuarios experimentales .....	34
3.4.2.	Diseño y Construcción de celda electrolítica regulable de voltaje y amperaje.....	35
3.4.3.	Extracción y llenado de Acuarios con agua de estanque de cultivo .	38
3.4.4.	Análisis de los parámetros físicos y químicos de las muestras de agua .....	38
3.4.5.	Tratamiento con nanoburbujas generadas por electrólisis.....	45
3.4.6.	Tratamiento sin nanoburbujas de oxígeno molecular .....	47
3.5.	Recepción, aclimatación y siembra de los juveniles de <i>Penaeus vannamei</i> .....	47
3.5.1.	Recepción de juveniles.....	47
3.5.2.	Aclimatación .....	48
3.5.3.	Siembra en los acuarios experimentales .....	49
3.5.4.	Análisis de los parámetros fisicoquímicos de las muestras de agua después de tratamiento .....	50
3.5.5.	Crecimiento y supervivencia de individuos .....	52
3.6.	Procesamiento y análisis de datos.....	53
3.6.1.	Evaluación estadística .....	53
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	54
4.1.	Oxígeno.....	54
4.2.	Temperatura.....	58
4.3.	Potencial de hidrógeno (pH).....	63
4.4.	Amonio, nitrito y nitrato.....	68
4.5.	Dureza de carbonatos .....	71
4.6.	Calcio .....	73
4.7.	Crecimiento .....	75
4.8.	Supervivencia.....	78
V.	CONCLUSIONES.....	81
VI.	RECOMENDACIONES .....	83

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	84
ANEXOS .....	93

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Suministración de balanceado para cada tratamiento .....	50
Tabla 2 Mediciones horarias del oxígeno del periodo de pre-activación del sistema .....	55
Tabla 3 Mediciones horarias de oxígeno del periodo de post-activación del sistema .....	57
Tabla 4 Mediciones horarias de la temperatura del periodo de pre-activación del sistema .....	60
Tabla 5 Mediciones horarias de la temperatura del periodo de post-activación del sistema .....	62
Tabla 6 Mediciones horarias del pH del periodo de pre-activación del sistema ...	65
Tabla 7 Mediciones horarias del pH del periodo de post-activación del sistema..	67
Tabla 8 Resultados de amonio en la fase post-activación.....	70
Tabla 9 Resultados de crecimiento de <i>P. vannamei</i> .....	76
Tabla 10 Resultados de supervivencia de <i>P. vannamei</i> .....	78
Tabla 11 Análisis de varianza ( $\alpha=0,05$ ) de los parámetros de oxígeno, temperatura y pH durante la pre-activación del sistema de aireación.....	104
Tabla 12 Subgrupos según la prueba post hoc HSD de Tukey ( $\alpha=0,05$ ): Oxígeno durante la pre-activación del sistema de aireación.....	105
Tabla 13 Análisis de varianza ( $\alpha=0,05$ ) de los parámetros de oxígeno, temperatura y pH durante la post-activación del sistema de aireación .....	106
Tabla 14 Subgrupos según la prueba post hoc HSD de Tukey ( $\alpha=0,05$ ): Oxígeno durante la post-activación del sistema de aireación .....	107
Tabla 15 Subgrupos según la prueba post hoc HSD de Tukey ( $\alpha=0,05$ ): Temperatura durante la pre-activación del sistema de aireación .....	108
Tabla 16 Según la prueba post hoc HSD de Tukey ( $\alpha=0,05$ ): Temperatura durante la post-activación del sistema de aireación .....	109
Tabla 17 Subgrupos según la prueba post hoc HSD de Tukey ( $\alpha=0,05$ ): pH durante la pre-activación del sistema de aireación.....	110
Tabla 18 Subgrupos según la prueba post hoc HSD de Tukey ( $\alpha=0,05$ ): pH durante la post-activación del sistema de aireación .....	111
Tabla 19 Análisis de varianza ( $\alpha=0,05$ ) de los parámetros de amonio, nitrito, nitrato, dureza y calcio durante la pre-activación del sistema de aireación .....	112
Tabla 20 Análisis de varianza ( $\alpha=0,05$ ) de los parámetros de amonio, nitrito, nitrato, dureza y calcio durante la post-activación del sistema de aireación ....	113

Tabla 21 Subgrupos según la prueba post hoc HSD de Tukey ( $\alpha=0,05$ ): Amonio durante la post-activación del sistema de aireación .....	114
Tabla 22 Subgrupos según la prueba post hoc HSD de Tukey ( $\alpha=0,05$ ): Dureza y calcio durante la pre-activación del sistema de aireación.....	115
Tabla 23 Subgrupos según la prueba post hoc HSD de Tukey ( $\alpha=0,05$ ): Dureza durante la post-activación del sistema de aireación .....	116
Tabla 24 Subgrupos según la prueba post hoc HSD de Tukey ( $\alpha=0,05$ ): Calcio durante la post-activación del sistema de aireación .....	117
Tabla 25 Análisis de varianza ( $\alpha=0,05$ ) peso inicial y peso final .....	118
Tabla 26 Subgrupos según la prueba post hoc HSD de Tukey ( $\alpha=0,05$ ): Peso inicial tras la activación del sistema de aireación .....	119
Tabla 27 Subgrupos según la prueba post hoc HSD de Tukey ( $\alpha=0,05$ ): Peso final tras la activación del sistema de aireación .....	119
Tabla 28 Análisis de varianza ( $\alpha=0,05$ ) Supervivencia inicial y final .....	120
Tabla 29 Subgrupos según la prueba post hoc HSD de Tukey ( $\alpha=0,05$ ): Supervivencia inicial tras la activación del sistema de aireación .....	120

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Esquema del diseño de investigación .....	33
Figura 2 Fuente de alimentación .....	36
Figura 3 Separación de electrodos.....	37
Figura 4 Temporizador de encendido y apagado del sistema .....	37
Figura 5 Equipos multiparámetros para medición de oxígeno, temperatura y pH	39
Figura 6 Comparación de tonalidad sobre la escala colorimétrica obtenida de amonio.....	40
Figura 7 Guía visual del kit colorimétrico para la estimación de amoníaco libre (NH <sub>3</sub> ) en función de la concentración de amonio ionizado (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ) y el pH.....	41
Figura 8 Comparación de tonalidad sobre la escala colorimétrica obtenida de nitrito.....	42
Figura 9 Comparación de tonalidad sobre la escala colorimétrica obtenida de nitrato.....	43
Figura 10 Cambio de color característico para determinar dureza de carbonatos (dKH): azul → verde → amarillo .....	44
Figura 11 Cambio de color característico para determinar de calcio: Lila → Azul	45
Figura 12 Formación de nanoburbujas por electrólisis, tratamiento con emisor de titanio (a), tratamiento con emisor de aluminio (b).....	46
Figura 13 Sistema de aireación convencional para acuarios .....	47
Figura 14 Aclimatación de juveniles de <i>Penaeus vannamei</i> en fuente plástica con incorporación progresiva de agua del sistema .....	48
Figura 15 Siembra de juveniles de <i>Penaeus vannamei</i> mediante inmersión lenta del recipiente de aclimatación en los acuarios experimentales. ....	49
Figura 16 Kits colorimétricos para análisis de amonio, nitrito, nitrato, dureza de carbonatos (KH) y calcio.....	51
Figura 17 Registro del peso inicial de los juveniles en balanza analítica. ....	53
Figura 18 Niveles de temperatura de los tres tratamientos. ....	59
Figura 19 Niveles de pH de los tres tratamientos.....	64
Figura 20 Niveles de Amonio tóxico de los tres tratamientos.....	69
Figura 21 Niveles de Dureza de carbonatos (dKH) de los tres tratamientos.....	72
Figura 22 Niveles de Calcio (Ca <sup>2+</sup> ) de los tres tratamientos.....	74

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Registro de análisis de compuestos nitrogenados y calcio del agua.....	93
Anexo 2. Registro de análisis de parámetros fisicoquímicos tratamiento 1 (emisor de titanio).....	94
Anexo 3. Registro de análisis de parámetros fisicoquímicos tratamiento 2 (emisor de aluminio) .....	97
Anexo 4. Registro de análisis de parámetros fisicoquímicos tratamiento 3 (aireación convencional).....	100
Anexo 5.Registro de resultados de crecimiento y supervivencia.....	103

## RESUMEN

El estudio evaluó el efecto de nanoburbujas de oxígeno molecular generadas por electrólisis sobre la calidad físico-química del agua, la supervivencia y el crecimiento de *Penaeus vannamei* en sistemas de cultivo intensivo, comparando dos tratamientos con nanoaireación (T1: emisor de titanio; T2: emisor de aluminio), frente a un sistema de aireación mecánica convencional (T3). Se empleó un diseño completamente al azar con tres repeticiones por tratamiento, monitoreándose oxígeno disuelto, temperatura, pH, amonio, nitrito, nitrato, dureza de carbonatos y calcio antes y después de la activación de los sistemas. El análisis estadístico mediante ANOVA y prueba de Tukey evidenció que, en la fase post-activación, el tratamiento con aireación convencional (T3) registró los valores más altos de oxígeno disuelto, con concentraciones significativamente superiores a las observadas en T1 y T2, especialmente a las 07:00 y 16:00 h. En el crecimiento de langostino, no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos ( $p > 0,05$ ); sin embargo, T3 presentó el mayor incremento promedio de peso (0,28 g), seguido de T1 (0,19 g) y T2 (0,17 g), todos dentro de un mismo subconjunto homogéneo. La supervivencia final, tampoco mostró diferencias significativas ( $p > 0,05$ ), alcanzando 88,3% en T1, 86,7% en T2 y 78,3% en T3, valores considerados aceptables para sistemas intensivos. Los parámetros nitrogenados y la mineralización del agua se mantuvieron dentro de rangos recomendados para el cultivo. En conjunto, los resultados indican que, si bien la aireación mecánica proporciona mayores concentraciones instantáneas de oxígeno, las nanoburbujas generadas por electrólisis permiten mantener una calidad de agua estable y rendimientos biológicos equivalentes, constituyéndose en una tecnología complementaria promisorio para sistemas intensivos de cultivo de *P. vannamei*.

**Palabras clave:** nanoburbujas, aireación convencional, calidad de agua, *Penaeus vannamei*, parámetros fisicoquímicos, electrólisis.

## ABSTRACT

The study evaluated the effect of molecular oxygen nanobubbles generated by electrolysis on the physical-chemical quality of water, survival, and growth of *Penaeus vannamei* in intensive farming systems, comparing two nanoaeration treatments (T1: titanium emitter; T2: aluminum emitter), versus a conventional mechanical aeration system (T3). A completely randomized design with three replicates per treatment was used, monitoring dissolved oxygen, temperature, pH, ammonium, nitrite, nitrate, carbonate hardness, and calcium before and after system activation. Statistical analysis using ANOVA and Tukey's test showed that, in the post-activation phase, the conventional aeration treatment (T3) recorded the highest dissolved oxygen values, with concentrations significantly higher than those observed in T1 and T2, especially at 7:00 a.m. and 4:00 p.m. No significant differences were found between treatments ( $p > 0,05$ ) in shrimp growth; however, T3 showed the highest average weight increase (0,28 g), followed by T1 (0,19 g) and T2 (0,17 g), all within the same homogeneous subset. Final survival also showed no significant differences ( $p > 0,05$ ), reaching 88,3% in T1, 86,7% in T2, and 78,3% in T3, values considered acceptable for intensive systems. Nitrogen parameters and water mineralization remained within the recommended ranges for cultivation. Overall, the results indicate that, although mechanical aeration provides higher instantaneous oxygen concentrations, the nanobubbles generated by electrolysis allow for stable water quality and equivalent biological yields, making it a promising complementary technology for intensive *P. vannamei* farming systems.

**Key words:** nanobubbles, conventional aeration, water quality, *Penaeus vannamei*, physicochemical parameters, electrolysis.

## I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la acuicultura ha crecido significativamente en Perú, destacándose el cultivo de langostino como una actividad clave para la economía local. Sin embargo, su éxito depende de la calidad de agua en los sistemas de cultivo, un factor esencial para el desarrollo y supervivencia de los organismos.

La acuicultura de *Penaeus vannamei*, es una actividad relevante en el norte del Perú, donde Tumbes y Piura concentran la mayor parte de la producción nacional (Ayala y Rodríguez, 2020). La eficiencia productiva depende directamente de la calidad del agua, cuyos parámetros fisicoquímicos influyen en el metabolismo, crecimiento y supervivencia del langostino (Pemberthy y Paz, 2019).

En la búsqueda de soluciones innovadoras para optimizar la calidad del agua, Pizarro et al. (2022) destacan que la nanotecnología es una herramienta prometedora. El uso de micro y nanoburbujas ha sido ampliamente investigado en diversos contextos, reportándose beneficios en especies como la trucha arcoíris y en el tratamiento de aguas residuales, donde mejoran la oxigenación, estimulan la degradación de compuestos nitrogenados y favorecen procesos de purificación. Aunque existen diferentes métodos para generarlas, el sistema basado en bombas de mezcla gas y líquido es el más difundido; no obstante, la electrólisis se considera un método particularmente eficiente para producir nanoburbujas estables (Morales, 2022).

Este proceso utiliza un ánodo y un cátodo para descomponer moléculas de agua en oxígeno e hidrógeno, y ha sido aplicado en distintas industrias (Morales, 2022). Sin embargo, a pesar de que existen estudios sobre micro-nanoburbujas en peces, cultivos de agua dulce y sistemas de tratamiento de efluentes, no se han reportado trabajos que evalúen específicamente nanoburbujas generadas por electrólisis en el cultivo de *P. vannamei*, particularmente en condiciones de baja

salinidad. Este vacío limita la comprensión de los posibles beneficios y desafíos asociados a esta tecnología en la producción de langostino.

Este estudio evaluó el efecto de nanoburbujas generadas por electrólisis sobre la calidad de agua, crecimiento y supervivencia de *P. vannamei* bajo condiciones controladas de laboratorio, utilizando un modelo experimental que reproduce condiciones de cultivo intensivo a pequeña escala.

El objetivo general fue determinar el efecto de las de nanoburbujas de oxígeno molecular generadas por electrólisis sobre la calidad de agua para cultivo intensivo de *Penaeus vannamei* en condiciones de laboratorio.

De manera específica, se buscó lo siguiente:

- Evaluar la variación de los parámetros fisicoquímicos (temperatura, pH, oxígeno disuelto, amonio, nitrito, nitrato, dureza y calcio) antes y después del tratamiento.
- Determinar el efecto de las nanoburbujas sobre el crecimiento y la supervivencia de *Penaeus vannamei*.
- Comparar los resultados obtenidos con un sistema convencional de aireación mecánica.

Con este estudio se buscó llenar el vacío existente en el conocimiento sobre el uso de nanoburbujas generadas por electrólisis en la acuicultura, particularmente en la región de Tumbes, donde la nanotecnología aún no ha sido implementada de manera significativa en los sistemas de cultivo de langostino. Los resultados de esta investigación podrían no solo mejorar la calidad del agua en los estanques de cultivo intensivo, sino también contribuir a una mayor sostenibilidad y eficiencia en la producción acuícola de la región.

## **II. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1. Antecedentes**

#### **2.1.1. Estudio de nanoburbujas de oxígeno molecular**

Gadea et al. (2023), desarrollaron un estudio sobre la termodinámica y la nucleación electroquímica de nanoburbujas superficiales, con el propósito de unificar modelos predictivos para describir su comportamiento en sistemas electroquímicos. Se calcularon potenciales termodinámicos en sustratos hidrofóbicos y se elaboraron diagramas de fase que determinaron las condiciones de estabilidad en función del área del soporte y la concentración de gas. Adicionalmente, se efectuaron simulaciones en nanoelectrodos para analizar cómo la presencia de burbujas modifica la corriente y limita la difusión de gas en el interfaz sólido–gas. Los modelos mostraron que los núcleos de gas pueden formarse desde tamaños de apenas 4 nm y que la presencia de nanoburbujas reduce la eficiencia de los electrodos, afectando procesos electroquímicos clave. Estas conclusiones son relevantes para técnicas de separación, flotación y purificación de agua, donde el control de las nanoburbujas influye directamente en la eficacia de los tratamientos.

Quiroz (2023), realizó una investigación acerca de la degradación del fenol con micro-nanoburbujas de oxígeno generadas por electrólisis, Perú. Trabajó con cinco concentraciones de fenol (0,4 – 3,0 mg/l), cuatro valores de pH (2,0 – 3,5) y tiempos de tratamiento de hasta 30 minutos, usando electrodos de acero inoxidable y carbón conectados a una fuente de 12V y 40A. Los resultados indicaron que la mayor degradación alcanzada fue del 70,8% con 3,0 mg/l de fenol, pH 2 y 30 minutos de tratamiento. El análisis estadístico mostró que la concentración inicial del fenol tuvo el mayor impacto (76%) en la eficiencia del proceso. Este método se presenta como una alternativa efectiva para tratar aguas contaminadas con fenol, contribuyendo a mejorar su calidad.

Guo et al. (2025), investigaron acerca de la hiperoxia inducida por nanoburbujas de oxígeno: efectos sobre el crecimiento, la actividad de las enzimas digestivas, la morfología intestinal y los parámetros bioquímicos en el camarón kuruma (*Penaeus japonicus*). Durante 40 días se comparó cultivo de camarón *Penaeus japonicus* bajo tratamiento con NB-O<sub>2</sub> (DO 15,95 ± 0,11 mg/l) frente a un tratamiento control con aire convencional (DO 7,45 ± 0,16 mg/l). Se evaluaron parámetros de crecimiento, actividad enzimática digestiva, morfología intestinal, composición corporal y parámetros bioquímicos en sangre. Los resultados mostraron que la exposición a NB-O<sub>2</sub> mejoró el rendimiento de crecimiento (mayor ganancia de peso y tasa específica), incrementó la actividad de enzimas digestivas, mejoró indicadores bioquímicos y redujo el número de microorganismos patógenos en agua. También se favoreció la morfología intestinal, sin efectos adversos significativos. Estos resultados sugieren que mayores niveles de DO por NB-O<sub>2</sub> mejoran la calidad de agua y la salud fisiológica de *P. japonicus*.

### **2.1.2. Efecto de nanoburbujas en la calidad de agua**

Chávez y Córdor (2021), evaluaron la efectividad de un sistema de nanoburbujas de aire combinado con filtros de quitosano y óxido de grafeno para la mejora de la calidad del agua en la cuenca baja del río Chillón (Ventanilla, Perú). El tratamiento consistió en la aplicación de nanoburbujas a 70 psi durante 30, 60 y 90 minutos, seguido de la filtración del agua tratada. Se analizaron parámetros fisicoquímicos y microbiológicos antes y después del proceso. Los resultados evidenciaron reducciones significativas, destacando una remoción del 87% de aceites y grasas y una disminución del 98,21% de la turbidez en solo 30 minutos; además, después de 90 minutos se registró una reducción del 61,86% en la conductividad eléctrica y una eliminación microbiológica del 99,99%.

Binh et al. (2025), Investigaron el Impacto de las nanoburbujas de ozono en la calidad del agua, el microbiota intestinal y el rendimiento del crecimiento del camarón pata blanca (*Penaeus vannamei*) en un sistema de cultivo intensivo en interiores. Fueron 12 semanas en cultivo intensivo de *Penaeus vannamei* con grupo tratado con nanoburbujas de ozono (0,3 mg/l) y el control sin NB-O<sub>3</sub>. Se monitorearon parámetros de calidad del agua diariamente (DO, pH, ORP, NH<sub>3</sub>-N, COD). Los resultados mostraron que el tratamiento con NB-O<sub>3</sub> redujo

significativamente COD, NH<sub>3</sub>-N y *Vibrio* spp. ( $p < 0,05$ ) y mejoró parámetros de crecimiento del camarón (mayor peso y tasas de crecimiento específicas, menores FCR y mayor diversidad de microbiota). La comunidad microbiana dominante cambió con el tiempo, mostrando diferencias significativas entre grupos.

Pizarro et al. (2022), evaluaron el efecto de la oxigenación mediante micro-nanoburbujas sobre la calidad del agua y el rendimiento productivo en el cultivo de trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) en Perú. El estudio comparó dos tratamientos con y sin aplicación de nanoburbujas empleando 2000 alevinos por grupo. Se monitorearon parámetros como oxígeno disuelto, pH, temperatura, sólidos disueltos y conductividad, además de variables de crecimiento y conversión alimenticia. Los resultados indicaron que el uso de nanoburbujas incrementó los niveles de oxígeno disuelto, mantuvo estables el pH y la conductividad, y favoreció el crecimiento de los peces, evidenciando beneficios productivos en sistemas acuícolas.

Ansari, et al. (2025), estudiaron sobre la tecnología de nanoburbujas para el tratamiento del agua: fundamentos, oportunidades transformadoras y desafíos para aplicaciones a gran escala. El estudio analiza los fundamentos teóricos, los mecanismos de generación y la estabilidad de las nanoburbujas, así como sus principales aplicaciones en procesos de aireación y remoción de contaminantes. Los resultados evidencian que las nanoburbujas mejoran significativamente la eficiencia de transferencia de gases y el desempeño de los procesos de tratamiento frente a métodos convencionales. Asimismo, se reportan beneficios en la mejora de la calidad del agua y en procesos biológicos asociados.

Gobai et al. (2025), realizaron una una revisión crítica de la flotación con nanoburbujas para el proceso de tratamiento de agua de mar. El estudio corresponde a una revisión sistemática, en la que se evaluaron investigaciones experimentales previas relacionadas con la interacción entre nanoburbujas y contaminantes disueltos. Se basaron en la recopilación y análisis comparativo de estudios que reportan parámetros físico-químicos y eficiencias de remoción. Entre las técnicas revisadas destacaron la flotación iónica, el uso de columnas de flotación y la generación de nanoburbujas mediante aire y nitrógeno. Los resultados indican que el uso de nanoburbujas, con tamaños menores a 200 nm, incrementa

la eficiencia de separación de partículas finas y metales pesados. Se reportan remociones de hasta 99,9% de arsénico y mercurio, así como mejoras del 40–60% en la eficiencia de flotación frente a métodos convencionales.

Castillo y Ochoa (2024), llevaron a cabo un estudio sobre las comunidades de macroinvertebrados en manantiales de la cuenca suroriental de Arequipa, analizando su riqueza taxonómica y los grupos funcionales de alimentación en dos épocas distintas. Asimismo, determinaron la calidad ecológica mediante el Índice de la Comunidad de Macroinvertebrados (MCI) y el Índice de Calidad del Hábitat (IQH). Los resultados revelaron una alta diversidad asociada a las características particulares de cada manantial y un estado ecológico aceptable, resaltando la importancia de estos organismos como bioindicadores.

Nghia et al. (2022), investigaron el efecto de las nanoburbujas (oxígeno, ozono) sobre el camarón blanco del Pacífico (*Penaeus vannamei*), *Vibrio parahaemolyticus* y la calidad del agua en condiciones de laboratorio. Donde realizaron dos experimentos en laboratorio bajo condiciones controladas en tanques de 100 L con agua salina al 15 ‰ y 20 camarones *Penaeus vannamei* por tanque. Los tratamientos se replicaron tres veces, se usaron generadores de nanoburbujas de oxígeno (O<sub>2</sub>-NB) y ozono (O<sub>3</sub>-NB) para tratar el agua; comparación con burbujas grandes (macroburujas) y control con aire-piedra. Se inoculó *Vibrio parahaemolyticus* en experimentos específicos a 10<sup>6</sup> UFC/mL para evaluar reducción bacteriana. Los resultados mostraron que el tratamiento con nanoburbujas de ozono no causó daño significativo en branquias, mortalidad ni crecimiento de camarones; redujo la concentración de *Vibrio parahaemolyticus* y mejoró la calidad del agua en comparación con otros tratamientos. Esto sugiere que la tecnología puede ser útil para el control de patógenos y mejora de la calidad del agua en cultivo de camarones.

Jhunkeaw et al. (2021), investigaron sobre el tratamiento con nanoburbujas de ozono en agua dulce redujo eficazmente las bacterias patógenas de los peces y es seguro para la tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*). Donde se aplicó una exposición de 10 minutos a nanoburbujas de ozono (NB-O<sub>3</sub>) en agua dulce (50 litros) generando 2–3 × 10<sup>7</sup> burbujas/mL (<130 nm). Se evaluó la reducción bacteriana con *Streptococcus agalactiae* y *Aeromonas veronii* inoculadas y tres

exposiciones consecutivas de NB-O<sub>3</sub>. Los resultados mostraron que una exposición redujo bacterias entre 96,11%–97,92%, mientras que tres exposiciones consecutivas lograron 99,93%–99,99% de reducción de bacterias patógenas. En agua con materia orgánica, las reducciones fueron 59,63%, 87,25% y 99,29% tras tres tratamientos. No hubo mortalidad en tilapia tras los tratamientos.

### **2.1.3. Cultivo intensivo**

Bennet y Morán (2018), realizaron un análisis sobre la viabilidad de aplicar nanotecnología para optimizar el cultivo de larvas de camarón en Guayaquil, Ecuador. Se empleó un enfoque mixto con entrevistas y encuestas dirigidas al personal de la camaronera SAFARIMAR S.A. para determinar la viabilidad de esta tecnología. Además, se analizaron aspectos técnicos, económicos, ambientales y organizacionales relacionados con la implementación de nanoburbujas en los sistemas de cultivo. Los resultados indicaron que la implementación de generadores de nanoburbujas en el cultivo de larva de camarón permitiría mejorar la oxigenación del agua, reducir la proliferación de bacterias y aumentar la tasa de supervivencia de las larvas, concluyendo que esta tecnología es factible y podría traer beneficios económicos y ambientales significativos para la empresa.

## **2.2. Bases teórico-científicas**

### **2.2.1. Nanoburbujas**

Cirera (2022), menciona que las nanoburbujas son consideradas burbujas con un tamaño de 150 y 200 nm de diámetro, de las cuales existen dos tipos de nanoburbujas: nanoburbujas de superficie y nanoburbujas de a granel, el primer tipo se encuentran adherida a una superficie sólida sumergido en algún líquido, el segundo tipo no se encuentran adheridas a una superficie, sino que se encuentran rodeadas por un entorno líquido.

### **2.2.2. Características de las nanoburbujas**

Valdivia-Mamani y Vargas-Febres (2019), indican que una de las características más importantes de las nanoburbujas la carga eléctrica presentes en su superficie, esto permitiría la atracción bacterias y virus eliminándolos por completo cuando las nanoburbujas desaparecen, dentro de sus demás características nos señalan:

- Tamaño nanométrico.
- Superficie de contacto mayor a las burbujas normales.
- Excelente purificante.
- Presenta carga negativa en la superficie
- Absorbente físico y químico.

### **2.2.3. Nanoburbujas en el cultivo de langostino**

Bennet y Moran (2018), mencionan que los estanques de cultivo de langostino presentan un descenso de la concentración de oxígeno, esto se debe al consumo en exceso realizado por el fitoplancton durante las noches. Además de solucionar el problema de oxígeno en los cultivos de langostino, las nanoburbujas tienen la capacidad de eliminar virus o bacterias, mejorando la calidad de los estanques de cultivo, incrementando las tasas de sobrevivencia y crecimiento.

### **2.2.4. Generadores de nanoburbujas**

Diversos estudios recientes han descrito múltiples tecnologías para la generación de micro-y nanoburbujas en agua basadas en diferentes principios físicos y mecánicos. Zhao et al. (2025), mencionan entre los métodos más estudiados se encuentran la disolución de gas en condiciones presurizadas, que aprovecha cambios de presión para formar burbujas ultrafinas y los generadores tipo Venturi o jet, que utilizan diferencias de presión y geometrías de flujo para fragmentar gas en burbujas finas. Asimismo, Vásquez (2020), sostiene que la electrólisis también sirve para la generación de nanoburbujas, debido a que mediante el uso de un ánodo y un cátodo permiten separar las moléculas de oxígeno e hidrógeno del agua mediante una corriente eléctrica, esa corriente eléctrica generaría pequeñas partículas de oxígeno denominadas nanoburbujas.

### **2.2.5. Calidad de agua**

La calidad de agua es uno de los factores más determinantes para la vida y el desarrollo sostenible, puesto que influye directamente en los procesos fisiológicos de los organismos y en la productividad de sistemas como la acuicultura y la ganadería (Al Mamun et al., 2025).

### 2.2.6. Evaluación biológica de la calidad de agua

Los organismos acuáticos están adaptados evolutivamente a algunas condiciones ambientales determinadas a rangos específicos de condiciones ambientales y presentan límites de tolerancia bien definidos ante alteraciones en su entorno físico y químico (Dildar et al., 2025).

Sholihah y Gharesifard (2025), mencionan que la calidad de agua es considerada como el conjunto de características físicas, químicas y microbiológicas presentes en un cuerpo de agua, entre ellas tenemos:

- **Parámetros físicos:** temperatura, sólidos suspendidos, turbiedad y conductividad.
- **Parámetros químicos:** demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), pH, oxígeno disuelto, nitrato, fosfato, entre otros.

### 2.2.7. Cultivo intensivo

Noguera et al. (2019), menciona que los cultivos intensivos permiten densidades de siembra de hasta 500 ind/m<sup>2</sup>, lo que incrementa la productividad del sistema. Así mismo, también menciona que estos cultivos requieren una gestión rigurosa de la calidad del agua, el control de parámetros fisicoquímicos y el uso de tecnologías avanzadas para minimizar impactos ambientales ya que algunos estudios sugieren que los sistemas intensivos pueden ser diseñados con estrategias sostenibles, como el uso eficiente del agua y la reducción de desechos, su impacto ambiental y socioeconómico dependerá de la implementación de buenas prácticas de manejo.

## **2.3. Definición de términos básicos**

### **2.3.1. Calidad de agua**

“La calidad del agua es una caracterización compleja pero medible de las propiedades químicas, biológicas y físicas de los sistemas hídricos naturales o de ingeniería. La calidad del agua afecta directamente la salud de los animales y los seres humanos debido a los contaminantes químicos y microbianos” (Rose et al., 2025, p. 2).

### **2.3.2. Oxígeno disuelto**

“El oxígeno disuelto (OD) es uno de los parámetros cruciales de calidad del agua que se utilizan para evaluar la calidad del cuerpo de agua, ya sea en la acuicultura de agua dulce o en la acuicultura marina terrestre” (Ma et al., 2024, p. 2).

### **2.3.3. Temperatura**

“La temperatura es un factor limitante en el crecimiento de los organismos acuáticos y puede afectar directamente muchos procesos químicos y biológicos, incluida la actividad enzimática metabólica, la respiración aeróbica y la transducción de señales” (Jianqiang, et al., 2024, p. 1).

### **2.3.4. Transparencia-Turbidez**

“Las partículas se definen como suspendidas cuando miden más de 2 micras o están disueltas. Generalmente, hay una gran cantidad de partículas suspendidas en los estanques, pero son la arcilla y otros minerales los que, junto con la biomasa de las algas, afectan con mayor intensidad la transparencia del agua. Se producen de forma natural debido a la erosión causada por tormentas o la aparición de materia orgánica en los estanques y, por sí solas, no son dañinas. El problema radica en que estas partículas absorben o reflejan la luz” (Bartz, y Feiden, 2023, p. 912).

### **2.3.5. Sólidos disueltos totales**

“Los sólidos disueltos totales (TDS) miden la concentración de minerales disueltos en el agua. Generalmente se expresan en miligramos por litro (mg/l) y sirven como indicador del nivel de salinidad del agua” (García, et al., 2024, p. 1).

### **2.3.6. pH**

“El valor de pH [una medida de la acidez de una solución acuosa] es uno de los factores de estrés ambiental más sensibles para los animales de acuicultura y puede fluctuar entre 6,6 y 10,2 debido a la fotosíntesis y la respiración en el agua” (Xie, 2020, p. 2).

### **2.3.7. Amonio total**

“En el agua, el amoníaco se presenta normalmente en dos formas: amoníaco no ionizado ( $\text{NH}_3$ ) y amonio ionizado ( $\text{NH}_4^+$ ). El amoníaco no ionizado es más tóxico que los iones de amonio para los organismos acuáticos” (Lin, et al., 2022, p. 2).

### **2.3.8. Alcalinidad total**

“La alcalinidad total desempeña un papel fundamental en la amortiguación de las fluctuaciones ácido-base y el mantenimiento de la estabilidad del pH en los ecosistemas acuáticos” (Tahraou et al., p. 1).

### **2.3.9. Nitrito**

“El nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) juega un papel clave en el ciclo del nitrógeno ambiental, y su presencia en aguas naturales es un indicador importante de la calidad del agua, ya que puede actuar como un potencial contaminante capaz de causar efectos adversos sobre la salud humana” (Oliveira, et al., 2025, p. 1).

### **2.3.10. Nitrato**

“El nitrato es una de las formas más reactivas de nitrógeno inorgánico en el ambiente acuático y un componente esencial del ciclo del nitrógeno que sustenta la vida en la Tierra” (Kermorvant, et al., 2023, p. 2).

### **2.3.11. Nanoburbujas**

“Las nanoburbujas definidas por la Organización Internacional de Normalización (ISO) como cavidades llenas de gas con diámetros inferiores a 1  $\mu\text{m}$  en soluciones acuosas, que exhiben propiedades únicas como alta estabilidad, baja flotabilidad y alta eficiencia de transferencia de masa gas-líquido en comparación con burbujas más grandes” (Jia, et al., 2023, p. 1)

### **2.3.12. Electrólisis como método de generación de burbujas**

“Las burbujas de gas se generan por la reacción de evolución del hidrógeno y la reacción de evolución del oxígeno durante la electrólisis del agua, donde las reacciones electroquímicas en los electrodos producen hidrógeno y oxígeno gaseosos que se nuclean, crecen y se desprenden de las superficies de los electrodos” (Kempler et al., 2024, p. 1).

### III. MATERIALES Y MÉTODO

#### 3.1. Lugar de ejecución

La ejecución del proyecto se realizó en el Laboratorio de Recursos Pesqueros de la FIPCM, situado en Puerto Pizarro, distrito y provincia de Tumbes, cuyas coordenadas geográficas son: 3°30'17"S 80°23'37"W.



Fuente: Google earth (2026)

#### 3.2. Tipo y diseño de investigación

##### 3.2.1. Tipo de investigación

###### a. De acuerdo al fin que se persigue

###### Aplicada

Ya que los resultados podrán ser utilizados como una estrategia para mejorar la calidad de agua, supervivencia y crecimiento en sistemas de cultivo intensivo de *Penaeus vannamei*.

## b. De acuerdo al enfoque

### Cuantitativa, explicativa, experimental

Dado que la investigación se realizó mediante un experimento desarrollado en un entorno de laboratorio, donde se realizó mediciones y análisis de parámetros específicos del agua antes y después del tratamiento con nanoburbujas de oxígeno molecular mediante electrólisis.

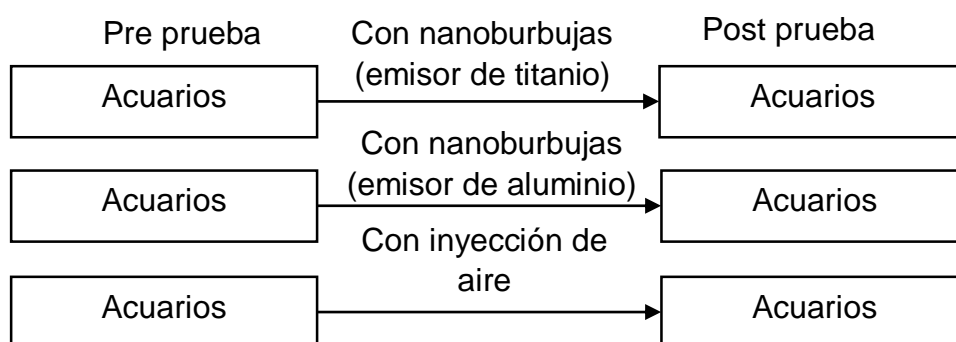
### 3.2.2. Diseño de investigación

#### a. Diseño experimental verdadero

**Diseño paralelo:** Debido a que la determinación de los niveles de los parámetros físicos y químicos del agua de los tratamientos se realizaron al azar, antes y después de la aplicación con nanoburbujas de oxígeno molecular por electrólisis (Figura 1).

#### Figura 1

*Esquema del diseño de investigación*



### 3.3. Población y muestra

#### 3.3.1. Población

Debido a las restricciones de acceso a estos centros de producción, se optó por utilizar agua proveniente de cultivo de tilapia previamente filtrada, la cual se consideró representativa de un sistema camaronero de baja salinidad, ya que sus parámetros fisicoquímicos se encontraban dentro de los rangos recomendados para el cultivo de *Penaeus vannamei*. Este cultivo se desarrolla en la Facultad de Ingeniería Pesquera, en el Taller de Enseñanza Experimental

de Acuicultura y Producción Acuícola. El agua extraída fue posteriormente utilizada en el laboratorio para la ejecución de las pruebas experimentales.

### **3.3.2. Muestra**

La muestra utilizada en el experimento fue tomada de un tanque con cultivo de tilapia previamente tratada del Taller de Enseñanza Experimental de Acuicultura de la FIPCM. Para el experimento se emplearon 30 litros de agua distribuidos en acuarios experimentales.

## **3.4. Implementación del sistema experimental**

### **3.4.1. Construcción, acondicionamiento y etiquetado de los acuarios experimentales**

#### **a. Construcción de los acuarios**

Extracción Los acuarios experimentales fueron construidos utilizando paneles de vidrio, cortados previamente con dimensiones estandarizadas, con el fin de garantizar uniformidad estructural y volumen equivalente en todas las unidades experimentales. Para la construcción de los nueve acuarios, se emplearon los siguientes componentes:

- 18 piezas de 40 × 45 cm, destinadas a los paneles laterales (dos por acuario).
- 18 piezas de 30 × 40 cm, correspondientes a los extremos frontal y posterior (dos por acuario).
- 9 piezas de 30 × 45 cm, utilizadas como base o fondo de cada acuario.

Las dimensiones finales de cada acuario permitieron una capacidad útil aproximada de 40,5 litros.

#### **b. Acondicionamiento de los acuarios**

Una vez construidos, los acuarios fueron sometidos a un proceso de acondicionamiento previo al uso experimental. Inicialmente, se realizó una inspección visual de las uniones para verificar la correcta adhesión de la silicona y la ausencia de fugas. Posteriormente, los acuarios fueron lavados con agua corriente y detergente neutro, seguidos de un enjuague exhaustivo con agua potable.

Para la desinfección, se empleó una solución de hipoclorito 50 ml/litro de agua según las indicaciones del producto, la cual se dejó actuar durante 30 minutos. Finalizado este proceso, los acuarios fueron enjuagados repetidas veces con agua clorada hasta asegurar la eliminación total de residuos químicos. Finalmente, se dejaron secar al aire y se colocaron en el área experimental.

### **c. Etiquetado de los acuarios**

Con el objetivo de garantizar una correcta identificación de las unidades experimentales y facilitar el manejo y registro de datos, cada acuario fue etiquetado de manera individual. El sistema de codificación incluyó el tratamiento experimental y la repetición correspondiente, empleando la siguiente nomenclatura:

- T1-R1, T1-R2, T1-R3: Sistema de electrólisis con electrodo de titanio
- T2-R1, T2-R2, T2-R3: Sistema de electrólisis con electrodo de aluminio
- T3-R1, T3-R2, T3-R3: Sistema de aireación convencional

Las etiquetas fueron elaboradas con material impermeable y colocadas en una zona visible de cada acuario, asegurando su permanencia y legibilidad durante todo el periodo experimental.

### **3.4.2. Diseño y Construcción de celda electrolítica regulable de voltaje y amperaje**

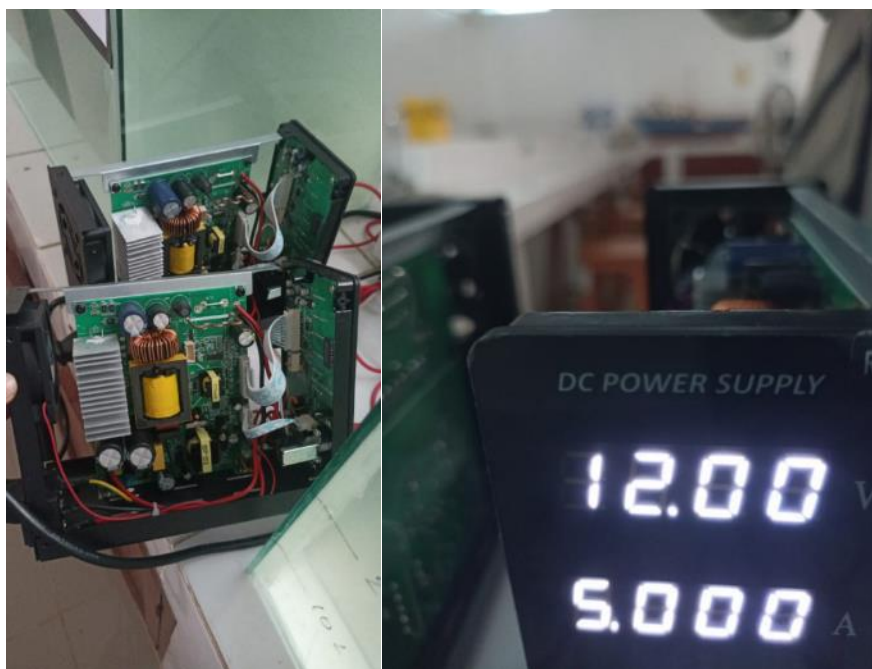
La elaboración de la celda electrolítica se llevó a cabo siguiendo el modelo propuesto por Morales (2022), con algunas modificaciones para adaptarse a las necesidades específicas de este estudio.

El sistema de generación consistió en una fuente de alimentación regulable capaz de entregar hasta 12 V y 5 A (Figura 2). Para evaluar el efecto del material del emisor en la generación y en la respuesta del sistema se definieron dos tratamientos experimentales:

T1: emisor constituido por dos electrodos (ánodo y cátodo) de titanio.

T2: emisor constituido por dos electrodos (ánodo y cátodo) de aluminio.

**Figura 2**  
*Fuente de alimentación*



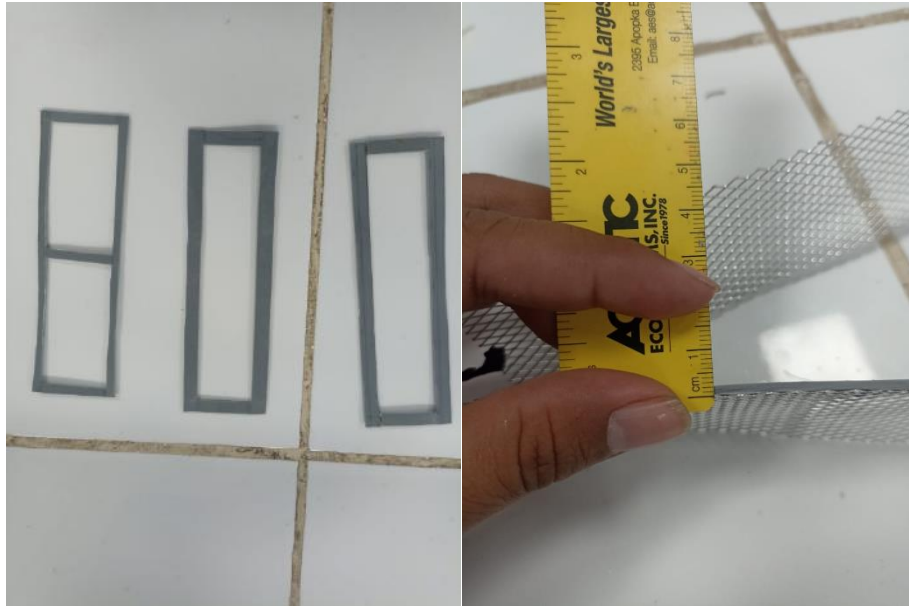
En relación con el uso de aluminio como emisor, es necesario considerar implicancias de seguridad asociadas a su comportamiento electroquímico. Si bien durante este estudio el aluminio funcionó adecuadamente bajo las condiciones operativas definidas, existe la posibilidad de liberación de iones  $Al^{3+}$  al medio acuático. La presencia de aluminio disuelto puede representar un riesgo potencial para organismos sensibles, ya que ciertos niveles pueden resultar tóxicos o alterar la estabilidad química del sistema.

Cabe señalar que en esta investigación no se realizaron mediciones directas de metales disueltos; por tanto, se sugiere que futuros estudios incluyan la cuantificación de aluminio en agua con el fin de confirmar la inocuidad del material y asegurar que su uso no comprometa el bienestar de los organismos ni la calidad del cultivo.

Cada emisor constó de un ensamblaje con dos electrodos separados por un separador dieléctrico de tubo PVC que fija una distancia de 2 mm, los electrodos tuvieron dimensiones de 10 cm de largo por 5 cm de ancho (Figura 3).

**Figura 3**

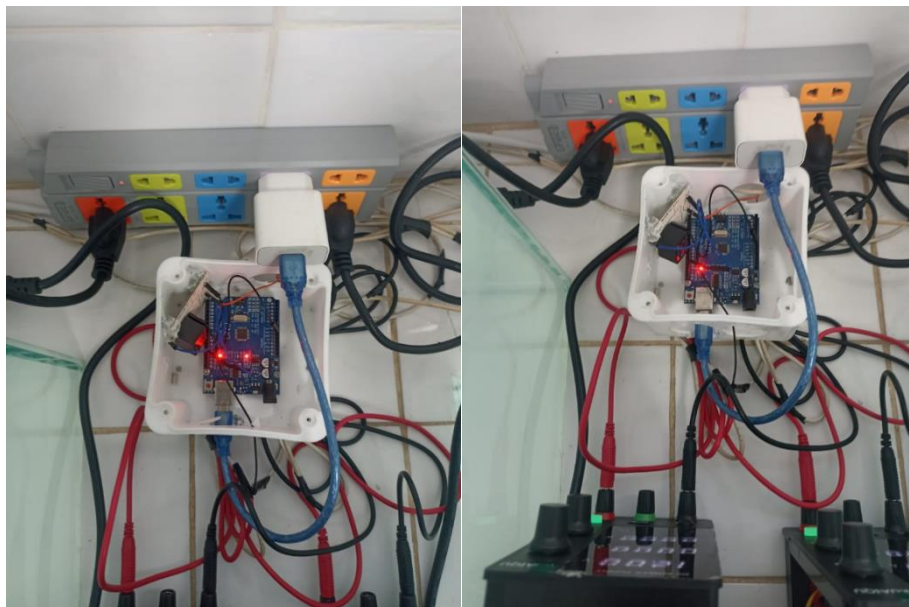
*Separación de electrodos*



Se empleó un controlador Arduino para conmutar el suministro eléctrico y así generar un régimen intermitente de operación. El ciclo programado fue de 15 minutos de encendido y 10 minutos de apagado (Figura 4).

**Figura 4**

*Temporizador de encendido y apagado del sistema*



### **3.4.3. Extracción y llenado de Acuarios con agua de estanque de cultivo**

La extracción del agua se realizó de un tanque fabricado en polietileno con una capacidad para hasta 1000 litros de agua y se procedió con el llenado de todos los acuarios, cada uno con 30 litros. El agua provenía del cultivo de tilapia desarrollado en la Facultad de Ingeniería Pesquera y Ciencias del Mar, correspondiente al Taller de Enseñanza Experimental de Acuicultura y Producción Acuícola. El uso de esa agua se debió a condiciones operativas propias del taller de enseñanza durante la etapa de aprobación del proyecto de tesis. Al momento de la formulación y presentación del proyecto, los estanques destinados al cultivo de langostino (*Penaeus vannamei*) no se encontraban sembrados ni en operación, debido a que el ciclo productivo aún no estaba planificado institucionalmente. Fue recién durante el proceso de evaluación y aprobación del proyecto cuando se inició la siembra de los estanques de langostino, situación que imposibilitó disponer de agua activa de dicho sistema en la fase inicial del experimento.

En ese sentido, se optó por utilizar agua de estanques de cultivo de tilapia como fuente experimental, considerando que el objetivo principal del estudio fue evaluar el efecto de las nanoburbujas de oxígeno molecular generadas por electrólisis sobre la calidad fisicoquímica del agua, independientemente de la especie previamente cultivada.

### **3.4.4. Análisis de los parámetros físicos y químicos de las muestras de agua**

#### **a) Oxígeno, temperatura y pH**

Una vez recolectadas las muestras de agua de los acuarios experimentales se procedió a la medición de los parámetros fisicoquímicos básicos: oxígeno disuelto, temperatura y pH. Dichas mediciones se efectuaron utilizando equipos multiparámetro calibrados (Figura 5). El monitoreo se realizó desde el día 0 hasta la culminación del experimento (día 14), registrándose los valores en cuatro horarios diarios: 07:00, 10:00, 13:00 y 16:00 horas, con el fin de obtener un perfil diario representativo de las variaciones de dichos parámetros.

Todas las condiciones experimentales y los valores obtenidos fueron registrados en las fichas correspondientes, las cuales se presentan en los anexos del presente trabajo.

- Anexo 1: Parámetros fisicoquímicos del T1 (oxígeno, pH y temperatura).
- Anexo 2: Parámetros fisicoquímicos del T2 (oxígeno, pH y temperatura).
- Anexo 3: Parámetros fisicoquímicos del T3 (oxígeno, pH y temperatura).
- Anexo 4: Parámetros fisicoquímicos de los tres tratamientos (amonio, nitrito, nitrato, dureza y calcio).

### **Figura 5**

*Equipos multiparámetros para medición de oxígeno, temperatura y pH*



Para la determinación de amonio, nitrito, nitrato, dureza del agua (KH) y calcio, se tomaron muestras pre-activación del sistema (día 0), siguiendo un procedimiento estandarizado. El muestreo consistió en la extracción de agua desde el fondo de cada acuario mediante una pipeta de 10 mL, depositándose

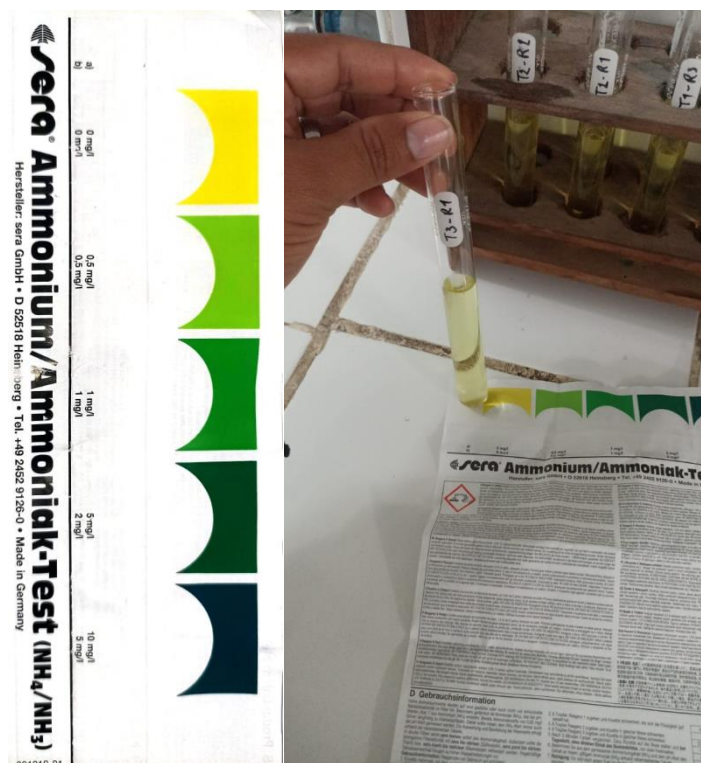
en vasos beaker de 50 mL. Posteriormente, con la ayuda de la misma pipeta, se transfirieron volúmenes específicos de acuerdo con el parámetro a evaluar hacia tubos de ensayo previamente etiquetados para su análisis.

### b) Determinación de amonio ionizado ( $\text{NH}_4^+$ )

El análisis de amonio se efectuó mediante un kit colorimétrico específico. En cada tubo de ensayo se colocaron 10 mL de muestra, a los cuales se añadieron secuencialmente 6 gotas de los reactivos 1, 2 y 3, agitando tras cada adición para garantizar la completa homogenización. Luego de un tiempo de reacción de 5 minutos, los tubos se colocaron sobre la escala colorimétrica del kit y, bajo luz natural, se comparó la tonalidad obtenida (Figura 6). Con base en la tabla de referencia (Figura 7), se determinó la concentración de amonio ionizado ( $\text{NH}_4^+$ ) y, en función del pH, se estimó el contenido de amoníaco libre ( $\text{NH}_3$ ) y su fracción tóxica.

**Figura 6**




*Comparación de tonalidad sobre la escala colorimétrica obtenida de amonio.*



## Figura 7

Guía visual del kit colorimétrico para la estimación de amoníaco libre ( $\text{NH}_3$ ) en función de la concentración de amonio ionizado ( $\text{NH}_4^+$ ) y el pH.

$\text{NH}_4$	valor pH					contenido efectivo de $\text{NH}_3$ en mg/l
	7	7,5	8	8,5	9	
0,5 mg/l	0,003	0,009	0,03	0,08	0,18	
1 mg/l	0,006	0,02	0,05	0,15	0,36	
2 mg/l	0,01	0,03	0,11	0,30	0,72	
5 mg/l	0,03	0,09	0,27	0,75	1,80	
10 mg/l	0,06	0,17	0,53	1,51	3,60	

 = inocuo  
 = nocivo en caso de exposición permanente  
 = alta toxicidad

escala cromática:  
a) agua dulce  
b) agua salada

Nota: Figura tomada de la guía del kit de colorimetría para la determinación de amonio

### c) Determinación de nitrito ( $\text{NO}_2^-$ )

Para el análisis de nitrito, se tomaron 5 mL de agua de cada muestra y se transfirieron a los tubos de ensayo correspondientes. Se adicionaron 5 gotas del reactivo 1 y se agitó hasta disolver completamente, seguido de 5 gotas del reactivo 2, repitiendo el proceso de agitación. Tras un periodo de reacción de 5 minutos, se compararon los colores obtenidos con la escala del kit colorimétrico para nitritos (Figura 8), permitiendo clasificar el agua según su grado de inocuidad o toxicidad.

**Figura 8**

*Comparación de tonalidad sobre la escala colorimétrica obtenida de nitrito*



**d) Determinación de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ )**

El análisis de nitrato se realizó también mediante un kit colorimétrico. Se emplearon 10 mL de muestra a los cuales se añadieron, en orden, 6 gotas del reactivo 1 (agitándose hasta disolver), 6 gotas del reactivo 2, una cucharada rasa del reactivo 3 (agitándose enérgicamente durante 15 segundos) y finalmente 6 gotas del reactivo 4. Luego de homogenizar, se dejó reposar durante 5 minutos y se efectuó la lectura colorimétrica comparando la tonalidad del líquido con la escala de referencia (Figura 9).

**Figura 9**

*Comparación de tonalidad sobre la escala colorimétrica obtenida de nitrato*



**e) Determinación de dureza del agua (KH)**

Para la dureza de carbonatos se empleó un kit colorimétrico específico. Se colocaron 5 mL de agua de cada muestra en los tubos de ensayo, añadiendo el reactivo gota a gota mientras se agitaba suavemente, hasta observar el cambio de color característico: azul → verde → amarillo (Figura 10). El número total de gotas empleadas se interpretó directamente como la dureza de carbonatos (dKH).

## Figura 10

Cambio de color característico para determinar dureza de carbonatos (dKH): azul → verde → amarillo



### f) Determinación de calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ )

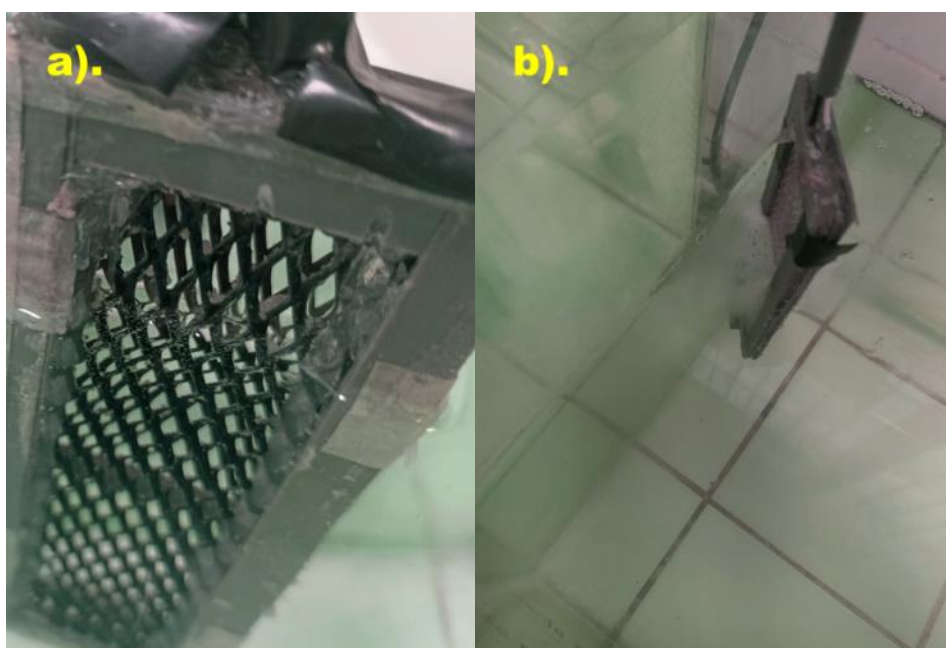
La determinación de calcio se realizó con un kit colorimétrico específico para este ion. Se depositaron 5 mL de muestra en tubos de ensayo, a los cuales se añadieron 8 gotas del reactivo 1 y se agitó para su completa disolución. Luego, utilizando la cuchara dosificadora, se incorporó una medida rasa del reactivo 2 y se agitó hasta la completa disolución del polvo. Posteriormente, se añadió el reactivo 3 gota a gota, agitando tras cada adición, hasta que el color de la muestra cambió progresivamente de rosa o lila y finalmente a azul (Figura 11). El número total de gotas utilizadas, multiplicado por 20, correspondió al contenido de calcio expresado en mg/l.



hidrógeno. Para la generación de nanoburbujas, se utilizaron emisores metálicos (electrodos) que actuaron como cátodo y ánodo dentro de cada acuario experimental, garantizando una eficiente formación de burbujas con diámetro nanométrico (Figura 12). En el tratamiento 1 se emplearon electrodos de titanio, mientras que en el tratamiento 2 se utilizaron electrodos de aluminio, ambos bajo las mismas condiciones experimentales.

### **Figura 12**

*Formación de nanoburbujas por electrólisis, tratamiento con emisor de titanio (a), tratamiento con emisor de aluminio (b)*



Dado que la generación continua de oxígeno podía incrementar las concentraciones por encima de los niveles fisiológicamente tolerables para los organismos acuáticos, se estableció un régimen de funcionamiento intermitente del sistema generador. Con ello se buscó evitar la sobresaturación del medio y mantener una oxigenación controlada. El generador fue programado para operar con un ciclo de 15 minutos de encendido y 10 minutos de apagado, considerando además la alta estabilidad y persistencia de las nanoburbujas en la columna de agua, que les permite permanecer suspendidas durante períodos prolongados y sostener la concentración de oxígeno disuelto de manera más uniforme.

### 3.4.6. Tratamiento sin nanoburbujas de oxígeno molecular

El tratamiento sin nanoburbujas sirvió como grupo de comparación, utilizando una bomba con inyección de aire, similar a las empleadas en acuarios domésticos (Figura 13)

Este sistema es representativo de los métodos convencionales de oxigenación empleados en pequeños sistemas de cultivo, donde el oxígeno se introduce mediante burbujas de mayor tamaño en lugar de nanoburbujas.

En el tratamiento 3, la bomba de aireación operó de manera continua, ya que este es el mecanismo estándar en los sistemas convencionales de oxigenación. La comparación con los tratamientos de nanoburbujas permitió evaluar si el método de electrólisis puede mantener niveles adecuados de oxígeno disuelto con un menor tiempo de operación. Para garantizar que estos tiempos sean adecuados y no varíen significativamente, se realizó un monitoreo constante de los parámetros fisicoquímicos.

**Figura 13**

*Sistema de aireación convencional para acuarios*



### 3.5. Recepción, aclimatación y siembra de los juveniles de *Penaeus vannamei*

#### 3.5.1. Recepción de juveniles

Los juveniles fueron donados del taller de enseñanza experimental de acuicultura de la Facultad de Ingeniería Pesquera y Ciencias del Mar, de un

estanque en cultivo y trasladados a un acuario acondicionado en el laboratorio de recursos pesqueros. A su llegada, se verificó el estado general de actividad, coloración y respuesta natatoria, descartándose individuos con signos de estrés severo.

### 3.5.2. Aclimatación

Una vez obtenidos los pesos iniciales de los individuos destinados a cada acuario experimental, se procedió a su aclimatación. Para ello, los juveniles fueron colocados en una fuente plástica y, de manera gradual, se añadieron pequeñas cantidades de agua proveniente de cada acuario experimental (Figura 14). Este proceso se realizó por 15 minutos, permitiendo que los organismos se adaptaran progresivamente a las condiciones físico-químicas del nuevo ambiente sin sufrir estrés térmico u osmótico.

#### Figura 14

*Aclimatación de juveniles de *Penaeus vannamei* en fuente plástica con incorporación progresiva de agua del sistema*

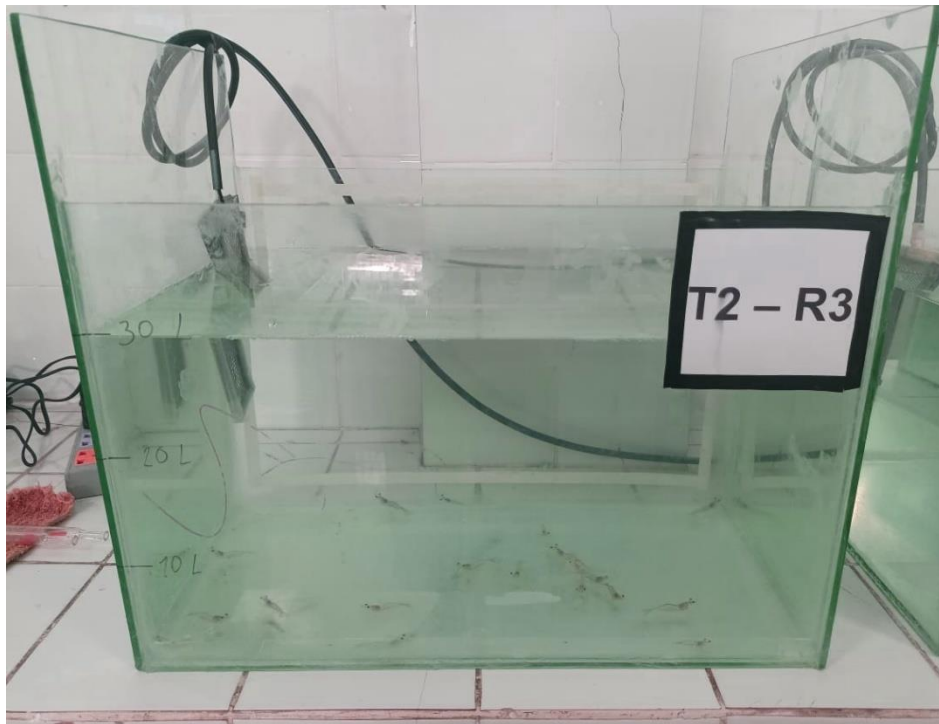


### 3.5.3. Siembra en los acuarios experimentales

Una vez completados el pesaje y el proceso de aclimatación, se procedió a la siembra de los juveniles. Cada acuario experimental recibió 20 individuos, manteniendo igualdad en el número de organismos entre tratamientos y repeticiones. La siembra se realizó mediante la inmersión lenta del recipiente de aclimatación, permitiendo que los juveniles ingresaran voluntariamente al acuario sin manipulación directa, reduciendo así el estrés físico y fisiológico (Figura 15)

#### Figura 15

*Siembra de juveniles de *Penaeus vannamei* mediante inmersión lenta del recipiente de aclimatación en los acuarios experimentales.*



Posteriormente, se inició el suministro de alimento utilizando un porcentaje equivalente al 15% de la biomasa inicial de cada unidad experimental. Las raciones correspondientes fueron las siguientes (Tabla 1):

**Tabla 1***Suministración de balanceado para cada tratamiento*

Repeticiones	Alimento suministrado (g)		
	Titanio	Aluminio	Aireación conv.
R1	1,53	1,56	1,53
R2	1,53	1,41	1,68
R3	1,53	1,44	1,50
D.E	±0,000	±0,079	±0,096

Estas cantidades fueron distribuidas de manera uniforme durante el día, asegurando una adecuada disponibilidad de alimento y condiciones estables para el desarrollo de los juveniles.

#### **3.5.4. Análisis de los parámetros fisicoquímicos de las muestras de agua después de tratamiento**

Posterior a la activación de los sistemas de aireación convencional y de generación de nanoburbujas por electrólisis (día 0 a las 16:00 h), se continuó con el monitoreo sistemático de los parámetros fisicoquímicos del agua durante todo el periodo experimental.

Los parámetros oxígeno disuelto, temperatura y pH se registraron diariamente desde el inicio (día 0) hasta la finalización del experimento (día 14), con mediciones realizadas a las 07:00, 10:00, 13:00 y 16:00 horas. Este seguimiento continuo permitió determinar las variaciones diarias en la concentración de oxígeno disuelto y su relación con las fluctuaciones de temperatura y pH, tanto en los acuarios con nanoburbujas como en los sistemas de aireación convencional.

Asimismo, los parámetros de amonio ( $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$ ), nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ), nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), dureza del agua (KH) y calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) fueron evaluados los días 4, 8 y 12 (post-activación del sistema), siguiendo el mismo protocolo de muestreo y análisis descrito anteriormente. Las muestras se recolectaron desde el fondo de cada

acuario mediante pipetas de 10 mL, transferidas a vasos beaker de 50 mL y luego distribuidas en tubos de ensayo etiquetados según el parámetro y tratamiento correspondiente.

Cada análisis se efectuó utilizando kits colorimétricos específicos para cada parámetro (Figura 16), aplicando los volúmenes y reactivos establecidos bajo condiciones controladas de iluminación y temperatura para evitar sesgos cromáticos en la lectura de resultados.

### **Figura 16**

*Kits colorimétricos para análisis de amonio, nitrito, nitrato, dureza de carbonatos (KH) y calcio.*



El monitoreo periódico permitió observar la evolución de los compuestos nitrogenados (amonio, nitrito y nitrato), así como los cambios en la dureza y el contenido de calcio del agua a lo largo del experimento. Estas variaciones fueron comparadas entre los tratamientos con nanoburbujas generadas por electrólisis y el sistema convencional de aireación, a fin de determinar el impacto del método de oxigenación sobre la calidad del agua y la estabilidad de sus parámetros fisicoquímicos.

El oxígeno, temperatura y pH se continuó realizando un monitoreo constante antes y después del tratamiento con nanoburbujas de oxígeno molecular en los horarios de 7:00 h, 10:00 h, 13:00 h, 16:00 h. El monitoreo de los demás

parámetros físicos y químicos se siguieron realizando los días 4, 8 y 12 (post-activación del sistema) en el laboratorio de recursos pesqueros, comparando los resultados obtenidos después terminado el tratamiento con las nanoburbujas de oxígeno molecular generadas por electrólisis.

### **3.5.5. Crecimiento y supervivencia de individuos**

Durante la etapa biológica, se realizó el registro del número de individuos al inicio (día 4) y al finalizar el ensayo (día 14), con el fin de determinar la tasa de supervivencia (%) asociada a cada tratamiento experimental. Asimismo, se evaluó la variación en el peso promedio individual (g) como indicador del crecimiento y desempeño fisiológico de los organismos.

Para registrar el peso promedio inicial de los organismos (Anexo 5), se procedió a extraer los juveniles desde el acuario acondicionado donde fueron recepcionados. Mediante el uso de un chayo (colador acuícola), se capturaron cuidadosamente 20 individuos, correspondiente al número exacto de organismos que serían sembrados en cada acuario experimental y sus respectivas repeticiones.

La captura se realizó de forma lenta y sin generar turbulencias para evitar estrés o daño en las extremidades de los juveniles.

Una vez extraídos, los organismos fueron colocados en un recipiente con agua para su rápida selección y traslado hacia el área de pesaje. Los juveniles fueron escurridos para eliminar el exceso de humedad superficial y colocados en una bandeja de plástico para posteriormente registrar su peso individual utilizando una balanza analítica digital con precisión de 0,001 g (Figura 17).

## Figura 17

*Registro del peso inicial de los juveniles en balanza analítica.*



### 3.6. Procesamiento y análisis de datos

#### 3.6.1. Evaluación estadística

Al finalizar el experimento los datos obtenidos de cada unidad experimental, fueron registrados en una hoja de cálculo organizados en tablas para una mejor interpretación. Para determinar si hay diferencia significativa entre los tratamientos se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de significancia de 5%. También se llevó a cabo una prueba post hoc como la prueba de Tukey, la cual permitió identificar específicamente entre qué tratamientos existen variaciones significativas, los resultados estadísticos fueron colocados en tablas en los anexos.

Para verificar los supuestos del ANOVA se aplicaron las pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk y de homogeneidad de varianzas de Levene. En algunos casos específicos, estas pruebas no pudieron calcularse debido a la presencia de varianzas iguales a cero entre repeticiones, situación que puede ocurrir cuando los valores registrados son idénticos. Esta condición fue considerada en la interpretación de los resultados estadísticos.”

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Oxígeno

Durante la fase pre-activación del sistema (día 0), las concentraciones de oxígeno disuelto entre los tratamientos con emisor de titanio, emisor de aluminio y aireación convencional, fueron similares (Tabla 2).

El análisis de varianza ANOVA no evidenció diferencias significativas entre los tratamientos (Anexo, Tabla 11) a las 10:00 horas ( $p = 0,723$ ), confirmando la homogeneidad inicial de los grupos experimentales en los distintos horarios. Asimismo, los tres tratamientos se agruparon en un único subconjunto homogéneo según la prueba post hoc, lo que ratifica la similitud en la concentración de oxígeno disuelto al inicio del experimento (Anexo, Tabla 12).

Esta condición inicial homogénea valida las comparaciones posteriores, ya que cualquier variación significativa observada en las etapas subsiguientes, puede atribuirse directamente al efecto del tipo de sistema de aireación aplicado.

**Tabla 2***Mediciones horarias del oxígeno (mg/l) del periodo de pre-activación del sistema*

Tratamiento	Repetición	Hora			
		07:00	10:00	13:00	16:00
Titanio	1	6,40	5,00	5,40	5,00
	2	5,30	5,00	5,10	4,80
	3	5,30	5,50	5,50	4,80
	Promedio	5,67 <sup>a</sup> ±0,635	5,17 <sup>a</sup> ±0,288	5,33 <sup>a</sup> ±0,208	4,87 <sup>a</sup> ±0,115
Aluminio	1	4,80	5,40	5,10	4,90
	2	5,20	5,30	5,60	5,60
	3	5,10	5,20	5,30	5,00
	Promedio	5,03 <sup>a</sup> ±0,208	5,30 <sup>a</sup> ±0,100	5,33 <sup>a</sup> ±0,251	5,17 <sup>a</sup> ±0,378
Aireación Convencional	1	5,70	5,10	5,00	5,20
	2	6,50	5,20	5,40	5,30
	3	5,70	5,40	5,60	5,10
	Promedio	5,97 <sup>a</sup> ±0,461	5,23 <sup>a</sup> ±0,152	5,33 <sup>a</sup> ±0,305	5,20 <sup>a</sup> ±0,100

Durante la fase post-activación, se observaron diferencias en los niveles de oxígeno disuelto entre los tratamientos, especialmente durante los periodos de menor aireación natural (horas nocturnas y de madrugada) y al finalizar el día (Tabla 3).

El análisis estadístico evidenció diferencias significativas entre los tratamientos ( $p < 0,05$ ) (Anexo, Tabla 13). De acuerdo con la prueba de comparación múltiple de Tukey (Anexo, Tabla 14), a las 16:00 horas, el tratamiento T3 alcanzó un promedio de 6,47 mg/l, superando significativamente a T1 (4,37 mg/l) y T2 (3,90 mg/l). De manera similar, a las 07:00 horas el oxígeno disuelto promedio fue de 6,06 mg/l en T3 y 3,76 mg/l en T1, ambos significativamente mayores que el registrado en T2 (3,36 mg/l). En esta fase, los tratamientos se agruparon en distintos subconjuntos homogéneos, confirmando diferencias en la concentración de oxígeno disuelto.

**Tabla 3***Mediciones horarias de oxígeno (mg/l) del periodo de post-activación del sistema*

Tratamiento	Repetición	Hora			
		07:00	10:00	13:00	16:00
Titanio	1	4,02	4,19	4,45	4,59
	2	3,66	3,80	3,99	4,34
	3	3,63	3,80	4,08	4,19
	Promedio	3,77 <sup>a</sup> ±0,217	3,93 <sup>a</sup> ±0,222	4,17 <sup>a</sup> ±0,242	4,37 <sup>a</sup> ±0,205
Aluminio	1	3,43	3,58	4,00	3,99
	2	3,31	3,46	3,89	3,83
	3	3,39	3,59	3,86	3,88
	Promedio	3,38 <sup>a</sup> ±0,062	3,54 <sup>a</sup> ±0,068	3,92 <sup>a</sup> ±0,074	3,90 <sup>a</sup> ±0,080
Aireación Convencional	1	5,76	5,94	6,11	6,21
	2	6,08	6,16	6,23	6,64
	3	6,25	6,32	6,42	6,61
	Promedio	6,03 <sup>b</sup> ±0,246	6,14 <sup>b</sup> ±0,193	6,25 <sup>b</sup> ±0,155	6,49 <sup>b</sup> ±0,243

Los mayores valores de oxígeno disuelto registrados en el tratamiento con aireación mecánica convencional concuerdan parcialmente con lo reportado por Ramesh et al. (2025), quienes señalan que los sistemas de aireación por difusión y paletas incrementan la transferencia gaseosa superficial, favoreciendo una mayor oxigenación en sistemas de cultivo intensivo.

Sharman et al. (2024), indican que el tamaño de las burbujas y su área superficial relativa son factores determinantes para la eficiencia del intercambio gaseoso en sistemas acuáticos. Además, Xue et al., (2021), han encontrado que las nanoburbujas y microburbujas ultrafinas presentan una superficie de contacto mucho mayor y una velocidad de ascenso reducida en comparación con burbujas más grandes, lo que contribuye a coeficientes de transferencia de masa ( $K_L \cdot a$ ) hasta 3–4 veces mayores, facilitando una mayor disolución de oxígeno en el medio.

Si bien el tratamiento con aireación convencional registró los mayores valores absolutos de oxígeno disuelto a lo largo del ensayo, los tratamientos con titanio y aluminio presentaron una mayor estabilidad temporal. Esta estabilidad se evidenció en la menor dispersión de los valores horarios, reflejada en desviaciones estándar más bajas en comparación con el sistema convencional. Esto indica que, aunque las nanoburbujas generadas por electrólisis no alcanzan los valores máximos de oxígeno del sistema mecánico, sí contribuyen a mantener condiciones más constantes en el tiempo.

## **4.2. Temperatura**

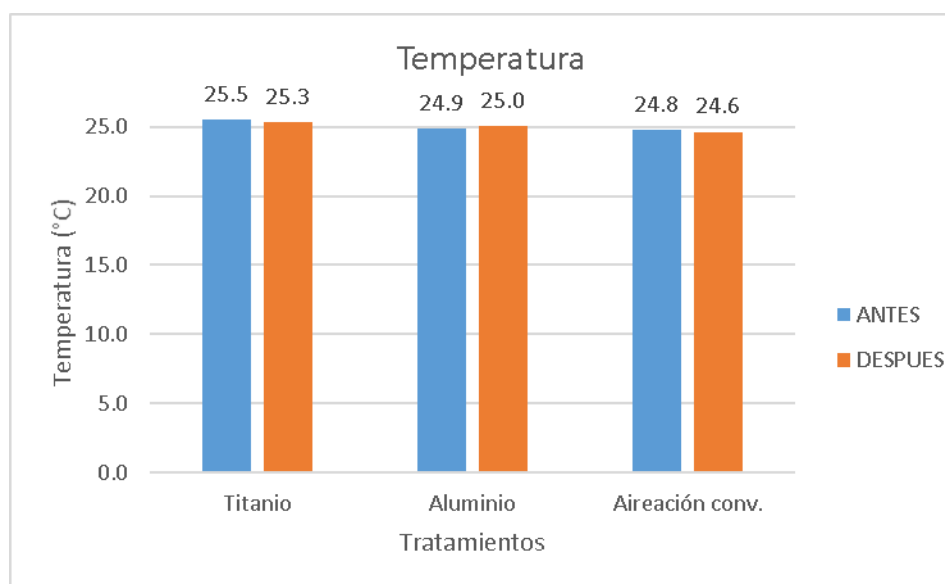
Durante el periodo experimental, la temperatura del agua se mantuvo dentro de un rango de 24,6 a 25,5 °C en todos los tratamientos, sin registrar variaciones abruptas (Figura 18).

No se identificaron diferencias significativas globales entre tratamientos ( $p > 0,05$ ), lo que indica que los procesos de electrólisis empleados en los tratamientos con emisor de titanio y emisor de aluminio no generaron un calentamiento significativo del medio acuático.

Estos resultados confirman que los sistemas evaluados garantizaron una adecuada estabilidad térmica, condición esencial para la homeostasis fisiológica de *Penaeus vannamei*.

**Figura 18**

*Niveles de temperatura de los tres tratamientos.*



Durante la fase pre-activación, se registraron variaciones puntuales de temperatura entre los tratamientos en determinados horarios del día (Tabla 4).

El análisis de varianza (ANOVA) evidenció diferencias significativas en la temperatura a las 07:00, 13:00 y 16:00 horas ( $p < 0,05$ ). La prueba de comparación múltiple de Tukey (Anexo, Tabla 15) mostró que el tratamiento emisor de titanio presentó temperaturas significativamente mayores en comparación con el emisor de aluminio y la aireación convencional, superando los 25 °C en dichos horarios.

Sin embargo, a las 10:00 horas, los tratamientos se agruparon en un único subconjunto homogéneo, lo que confirmó la similitud térmica en ese momento del día.

La falta de homogeneidad térmica inicial observada en el emisor de titanio sugiere la presencia de una variación sistemática previa al inicio de la fase experimental, la cual debe considerarse al interpretar los resultados posteriores.

**Tabla 4***Mediciones horarias de la temperatura (°C) del periodo de pre-activación del sistema*

Tratamiento	Repetición	Hora			
		07:00	10:00	13:00	16:00
Titanio	1	25,80	25,70	25,90	25,90
	2	25,40	25,40	25,50	25,50
	3	25,10	24,90	25,30	25,40
	Promedio	25,43 <sup>b</sup> ±0,351	25,33 <sup>a</sup> ±0,404 <sup>c</sup>	25,57 <sup>b</sup> ±0,305	25,60 <sup>b</sup> ±0,264
Aluminio	1	24,80	24,80	25,10	25,20
	2	24,60	24,80	25,00	25,00
	3	24,60	24,90	25,00	25,00
	Promedio	24,67 <sup>a</sup> ±0,115	24,83 <sup>a</sup> ±0,057	25,03 <sup>a</sup> ±0,057	25,07 <sup>a</sup> ±0,115
Aireación Convencional	1	24,50	24,80	24,90	24,90
	2	24,60	24,80	24,80	24,80
	3	24,60	24,80	24,80	24,80
	Promedio	24,57 <sup>a</sup> ±0,057	24,80 <sup>a</sup> ±0,000	24,83 <sup>a</sup> ±0,057	24,83 <sup>a</sup> ±0,057

Durante la etapa post-activación, el patrón de heterogeneidad térmica se mantuvo, observándose una tendencia del emisor de titanio a registrar temperaturas ligeramente superiores durante la mayoría de los horarios de monitoreo.

A las 13:00 horas, el tratamiento de titanio alcanzó una temperatura media de 25,33 °C, significativamente mayor que las registradas en el emisor de aluminio (25,03 °C) y la aireación convencional (24,66 °C), según la prueba post hoc de Tukey ( $p < 0,05$ ) (Anexo, Tabla 16). Asimismo, los tratamientos se agruparon en distintos subconjuntos homogéneos, confirmando la existencia de diferencias térmicas entre tratamientos (Tabla 5).

**Tabla 5***Mediciones horarias de la temperatura (°C) del periodo de post-activación del sistema*

Tratamiento	Repetición	Hora			
		07:00	10:00	13:00	16:00
Titanio	1	25,26	25,25	25,40	25,67
	2	25,06	25,16	25,29	25,66
	3	25,06	25,11	25,29	25,61
	Promedio	25,13 <sup>c</sup> ±0,111	25,18 <sup>c</sup> ±0,068 <sup>c</sup>	25,33 <sup>b</sup> ±0,064	25,65 <sup>c</sup> ±0,033
Aluminio	1	24,93	24,91	25,15	25,51
	2	24,79	24,80	25,09	25,46
	3	24,81	24,76	24,84	25,25
	Promedio	24,85 <sup>b</sup> ±0,072	24,82 <sup>b</sup> ±0,080	25,02 <sup>b</sup> ±0,166	25,41 <sup>b</sup> ±0,140
Aireación Convencional	1	24,59	24,64	24,69	25,03
	2	24,42	24,42	24,55	24,91
	3	24,39	24,36	24,71	24,89
	Promedio	24,47 <sup>a</sup> ±0,108	24,47 <sup>a</sup> ±0,143	24,65 <sup>a</sup> ±0,087	24,94 <sup>a</sup> ±0,077

El rango térmico observado (24,6–25,5 °C) se considera óptimo para el cultivo de *P. vannamei*, coincidiendo con los valores recomendados por Topus y Kir (2023), quienes señalan que desviaciones menores a 25 °C o mayor a 32 °C afectan la eficiencia metabólica y la respuesta inmunológica. Investigaciones previas han demostrado que el mantenimiento de un rango térmico adecuado es fundamental para la salud y el crecimiento de la especie.

Wang et al. (2020), han demostrado que la temperatura del agua es un factor ambiental crítico que influye en la respuesta inmunológica de *Penaeus vannamei* frente a patógenos y que, en condiciones de fluctuación térmica, la exposición a temperaturas subóptimas disminuye la riqueza del microbiota intestinal y reduce la respuesta inmune de *P. vannamei* frente a agentes patógenos y actividad antibacteriana, lo cual compromete su salud y resistencia a enfermedades.

Además, Duan et al. (2025) mencionan que el estrés por altas temperaturas puede provocar daños en la mucosa intestinal y una disfunción del sistema inmune, alterando la expresión de genes relacionados con defensas inmunitarias y favoreciendo un ambiente que podría facilitar infecciones oportunistas.

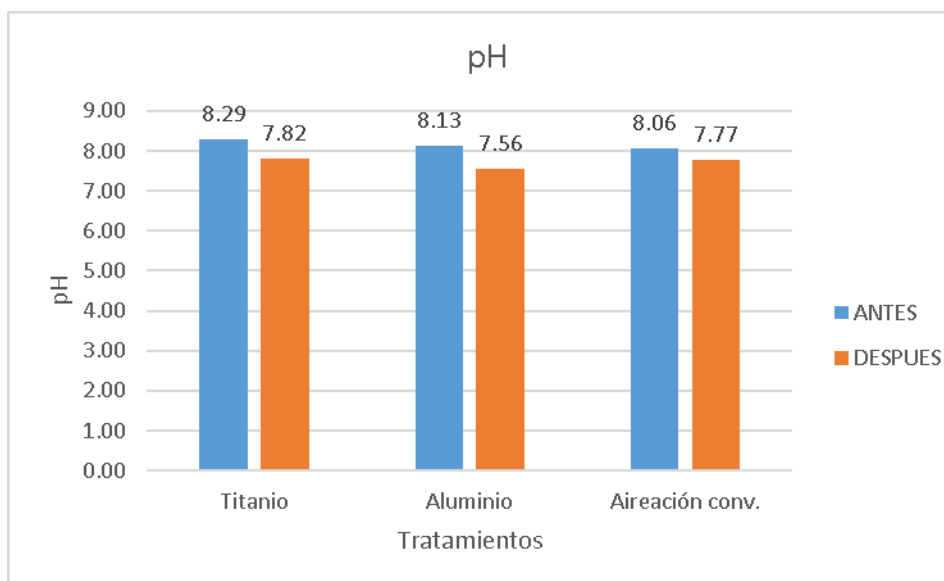
#### **4.3. Potencial de hidrógeno (pH)**

Tras la activación de los sistemas de aireación, el pH del agua presentó un ligero descenso, manteniéndose dentro de un rango de 7,56 a 7,82 a lo largo del periodo experimental. Esta disminución fue más notoria en el tratamiento con emisor de aluminio, mientras que el tratamiento con emisor de titanio mantuvo valores más estables cercanos a 7,8 (Figura 19).

Los valores registrados se mantuvieron dentro del rango adecuado para el cultivo de *Penaeus vannamei*, indicando que ninguno de los sistemas evaluados generó condiciones adversas en términos de acidez o alcalinidad.

**Figura 19**

*Niveles de pH de los tres tratamientos.*



Durante la fase pre-activación, se observaron diferencias basales en los valores de pH entre los tratamientos en todas las horas de muestreo (Tabla 6).

El análisis de varianza (ANOVA) reveló diferencias significativas entre tratamientos en todas las horas evaluadas ( $p \leq 0,009$ ). La prueba de comparación múltiple de Tukey (Anexo, Tabla 17) mostró que el tratamiento con emisor de titanio presentó valores de pH significativamente más elevados, reflejando condiciones más alcalinas en comparación con los tratamientos de aluminio y aireación convencional. Asimismo, los tratamientos se agruparon en distintos subconjuntos homogéneos, confirmando las diferencias iniciales en los niveles de pH.

Estos resultados evidencian la existencia de una diferencia basal en el equilibrio químico del sistema carbonato–bicarbonato, siendo que el emisor de titanio fue el tratamiento con mayor alcalinidad inicial.

**Tabla 6***Mediciones horarias del pH del periodo de pre-activación del sistema*

Tratamiento	Repetición	Hora			
		07:00	10:00	13:00	16:00
Titanio	1	8,21	8,35	8,40	8,37
	2	8,14	8,26	8,30	8,29
	3	8,23	8,23	8,34	8,34
	Promedio	8,193 <sup>b</sup> ±0,047	8,280 <sup>b</sup> ±0,062	8,347 <sup>b</sup> ±0,050	8,333 <sup>b</sup> ±0,040
Aluminio	1	8,13	8,10	8,20	8,25
	2	8,11	8,09	8,20	8,25
	3	8,03	7,97	8,10	8,16
	Promedio	8,090 <sup>ab</sup> ±0,053	8,053 <sup>a</sup> ±0,072	8,167 <sup>a</sup> ±0,058	8,220 <sup>a</sup> ±0,052
Aireación Convencional	1	8,04	8,00	8,14	8,21
	2	7,98	7,95	8,09	8,17
	3	7,95	7,93	8,06	8,16
	Promedio	7,990 <sup>a</sup> ±0,046	7,960 <sup>a</sup> ±0,036	8,097 <sup>a</sup> ±0,040	8,180 <sup>a</sup> ±0,026

Durante la fase post-activación, las diferencias de pH entre tratamientos persistieron a lo largo del periodo de evaluación.

A las 16:00 horas, el tratamiento con emisor de titanio registró un valor promedio de pH de 7,82, significativamente mayor que los observados en T3 (7,67) y T2 (7,56), con un nivel de significancia  $p < 0,05$  según la prueba post hoc HSD de Tukey (Anexo, Tabla 18). En esta etapa, los tratamientos se agruparon en distintos subconjuntos homogéneos, confirmando la permanencia de diferencias en el pH entre tratamientos (Tabla 7).

El comportamiento observado en los tratamientos con emisor de titanio y aireación convencional, caracterizado por valores de pH más elevados en comparación con T2, sugiere que tanto la aireación convencional como la generación de nanoburbujas favorecen la eliminación de  $\text{CO}_2$  disuelto, desplazando el equilibrio ácido-base hacia condiciones ligeramente más alcalinas.

Este fenómeno concuerda con lo reportado por Wu et al. (2022), quienes demostraron que una aireación eficiente promueve la desgasificación de  $\text{CO}_2$  desde el agua hacia la atmósfera, reduciendo la concentración de carbonatos disueltos e incrementando el pH del medio.

Li, et al. (2025), destacan que el equilibrio del pH en el agua y en los fluidos corporales de los crustáceos es fundamental para amortiguar las variaciones provocadas por procesos metabólicos como la fotosíntesis y la respiración, y para mantener la disponibilidad de iones carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) y bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ).

**Tabla 7***Mediciones horarias del pH del periodo de post-activación del sistema*

Tratamiento	Repetición	Hora			
		07:00	10:00	13:00	16:00
Titanio	1	7,99	8,01	7,94	7,97
	2	7,71	7,74	7,75	7,77
	3	7,73	7,72	7,72	7,75
	Promedio	7,81 <sup>ab</sup> ±0,159	7,82 <sup>b</sup> ±0,161	7,80 <sup>b</sup> ±0,115	7,83 <sup>b</sup> ±0,126
Aluminio	1	7,59	7,58	7,58	7,61
	2	7,57	7,51	7,51	7,52
	3	7,57	7,55	7,58	7,57
	Promedio	7,57 <sup>a</sup> ±0,012	7,55 <sup>a</sup> ±0,038	7,56 <sup>a</sup> ±0,043	7,56 <sup>a</sup> ±0,043
Convencional	1	7,88	7,79	7,73	7,67
	2	7,87	7,76	7,73	7,63
	3	7,89	7,79	7,79	7,71
	Promedio	7,88 <sup>b</sup> ±0,008	7,78 <sup>b</sup> ±0,016	7,75 <sup>ab</sup> ±0,032	7,67 <sup>ab</sup> ±0,040

#### 4.4. Amonio, nitrito y nitrato

Previo a la activación de los sistemas de aireación, las concentraciones de los compuestos nitrogenados evaluados —amonio ionizado ( $\text{NH}_4^+$ ), nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) y nitrato ( $\text{NO}_3^-$ )— fueron idénticas en todos los tratamientos.

El análisis de varianza (ANOVA) no reportó el estadístico F, ya que tanto la suma de cuadrados como la media cuadrática entre grupos y dentro de los grupos fueron iguales a 0,000. Este resultado confirma varianza nula, es decir, que las nueve mediciones correspondientes a la línea base fueron exactamente iguales para los tres tratamientos (Anexo, Tabla 19).

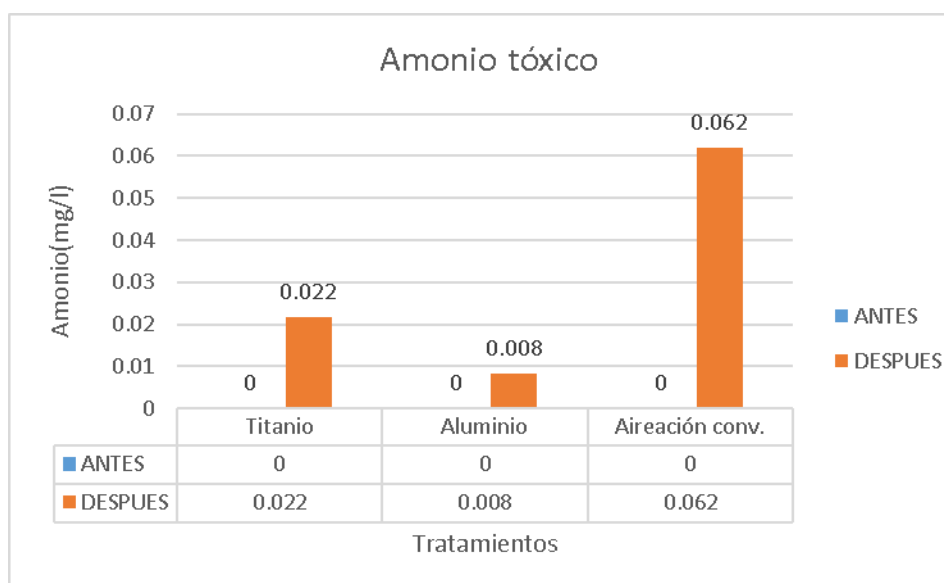
La ausencia de diferencias iniciales confirma una línea base perfectamente homogénea para los compuestos nitrogenados, lo que fortalece la validez de las comparaciones realizadas durante la fase experimental.

Duan et al. (2025) señalan el amonio actúa como un factor de estrés fisiológico importante en *Penaeus vannamei*, particularmente bajo condiciones de baja salinidad. También mencionan que la exposición continua a amonio provoca daños en tejidos intestinales, alteraciones en la respuesta inmune y en el metabolismo energético, y que las respuestas de estrés son más pronunciadas en camarones criados en agua de baja salinidad que en aquellos en agua de mar, indicando que la salinidad modula la toxicidad del amonio y la vulnerabilidad fisiológica de los organismos.

Durante la fase post-activación, las concentraciones de amonio se mantuvieron en niveles bajos en todos los tratamientos. Se registraron valores mínimos de 0,022 mg/l en T1, 0,008 mg/l en T2 y 0,062 mg/l en T3 (Figura 20).

**Figura 20**

*Niveles de Amonio tóxico de los tres tratamientos.*



En términos generales, no se detectaron diferencias estadísticamente significativas (Anexo, Tabla 20) entre tratamientos ( $p > 0,05$ ). No obstante, la prueba post hoc HSD de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ) mostró que a partir del día 12 los tratamientos comenzaron a agruparse en distintos subconjuntos homogéneos, evidenciando diferencias en la concentración de amonio (Anexo, Tabla 21).

Durante las fases tempranas (Días 4 y 8), los valores de probabilidad (p-valor = 0,053 y 0,054, respectivamente) indicaron que las diferencias observadas en la tasa de remoción de amonio no fueron estadísticamente significativas. Sin embargo, en el Día 12 se registró una diferencia significativa ( $p = 0,003$ ).

En esta etapa, el tratamiento con aireación convencional (T3) presentó la mayor concentración media de amonio (0,14800 mg/l), superando a T1 (0,04067 mg/l) y T2 (0,01400 mg/l) (Tabla 8).

**Tabla 8***Resultados de amonio (mg/l) en la fase post-activación*

Tratamiento	Repetición	Día de cultivo		
		04	08	12
Titanio	1	0,000	0,052	0,090
	2	0,000	0,013	0,015
	3	0,000	0,007	0,017
	Promedio	0,000	0,024 <sup>a</sup> ±0,024	0,041 <sup>a</sup> ±0,043
Aluminio	1	0,000	0,012	0,014
	2	0,000	0,010	0,014
	3	0,000	0,011	0,014
	Promedio	0,000	0,011 <sup>a</sup> ±0,001	0,014 <sup>a</sup> ±0,000
Aireación Convencional	1	0,000	0,038	0,148
	2	0,000	0,035	0,126
	3	0,000	0,041	0,170
	Promedio	0,000	0,038 <sup>a</sup> ±0,003	0,148 <sup>b</sup> ±0,022

El mayor nivel de amonio registrado en el tratamiento con aireación convencional sugiere que, a pesar de haber presentado mayores concentraciones de oxígeno disuelto, este sistema pudo haber mostrado una tasa de nitrificación más lenta durante la fase final del experimento. Alternativamente, el incremento podría estar asociado a una mayor mineralización del nitrógeno, es decir, a una descomposición más intensa de la materia orgánica generadora de amonio.

Yujin et al. (2025), señalan que la mayor parte del nitrógeno que ingresa a los sistemas de cultivo se incorpora al agua en forma de amonio, ya sea por excreción de los organismos o por la mineralización del nitrógeno orgánico proveniente del alimento no consumido y las fecas.

Diversos estudios han destacado el potencial de los sistemas basados en nanoburbujas para mejorar la calidad del agua. Xu et al. (2022), reportaron que este tipo de sistemas favorecen la nitrificación al proporcionar un suministro de

oxígeno más eficiente y una mayor superficie de contacto para el crecimiento de bacterias nitrificantes, lo que reduce la acumulación de amonio en el medio acuático.

Este comportamiento concuerda con los resultados obtenidos en los tratamientos con emisores de titanio y aluminio, donde se registraron menores concentraciones de amonio en comparación con el sistema convencional, donde en el día 12 de evaluación, la prueba HSD de Tukey mostró diferencias significativas entre tratamientos ( $p = 0,003$ ), observándose que el tratamiento con aireación convencional presentó la mayor concentración media de amonio ( $0,148 \pm 0,022$  mg/l; grupo b), mientras que los tratamientos con emisor de titanio ( $0,041 \pm 0,043$  mg/l; grupo a) y emisor de aluminio ( $0,014 \pm 0,000$  mg/l; grupo a) conformaron un mismo subconjunto homogéneo y registraron concentraciones significativamente menores.

#### **4.5. Dureza de carbonatos**

La dureza del agua presentó valores similares entre los tratamientos durante todo el periodo experimental. El tratamiento con emisor de titanio registró el valor medio más alto (14,00 dKH), seguido del emisor de aluminio (12,67 dKH) y aireación convencional (12,33 dKH).

El análisis de varianza (ANOVA) no evidenció diferencias significativas entre tratamientos ( $p = 0,072$ ). De acuerdo con la prueba de comparación múltiple de Tukey ( $p = 0,075$ ), los tres tratamientos se agruparon en un único subconjunto homogéneo, confirmando la similitud en la composición iónica del sistema (Anexo, Tabla 22).

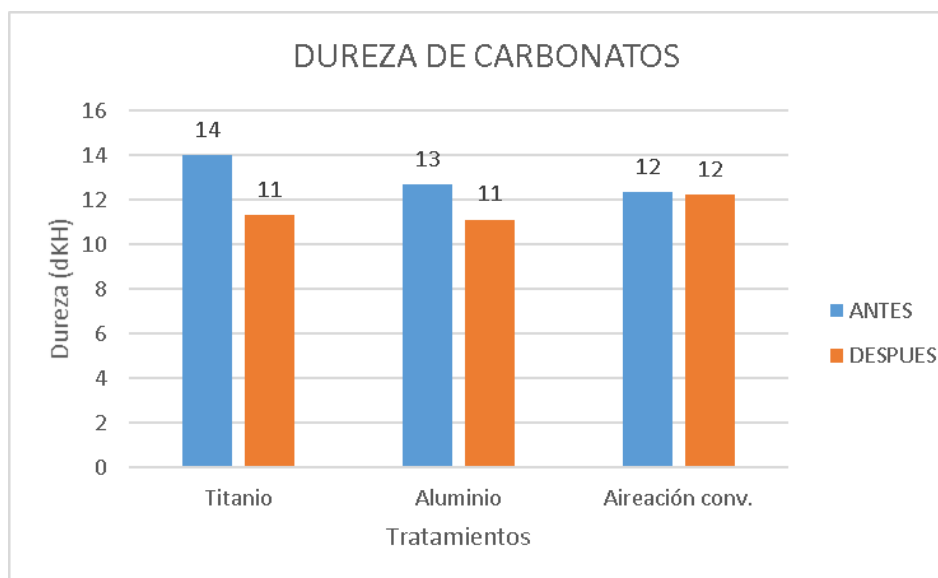
Durante los días 4, 8 y 12 del periodo experimental, la dureza se mantuvo estable en todos los tratamientos, sin presentar fluctuaciones marcadas (Figura 21). Aunque el tratamiento con aireación convencional mostró valores ligeramente superiores en algunos momentos, alcanzando hasta 13,33 dKH en el día 12, estas variaciones fueron mínimas.

No se registraron diferencias significativas entre tratamientos en los días evaluados ( $p = 0,296$ ;  $0,865$  y  $0,079$ , respectivamente). La prueba post hoc de

Tukey confirmó que todos los tratamientos pertenecieron a un mismo grupo homogéneo en cada uno de los muestreos (Anexo, Tabla 23).

**Figura 21**

*Niveles de Dureza de carbonatos (dKH) de los tres tratamientos.*



Investigaciones recientes resaltan que la alcalinidad del agua es un factor crítico para la estabilidad del pH y la calidad del agua en sistemas acuícolas intensivos. Mantener niveles adecuados de alcalinidad, generalmente por encima de 70 mg/l  $\text{CaCO}_3$ , ayuda a prevenir fluctuaciones bruscas de pH que pueden provocar estrés y deterioro de las condiciones ambientales para organismos como *Penaeus vannamei* (Kubitza, 2025). Estudios han mostrado además que la adición de fuentes de alcalinidad como  $\text{CaCO}_3$  mejora la calidad del agua, favorece la formación de bioflóculos y promueve un mejor desempeño productivo del camarón (Amjad et al., 2025). Ensayos con distintos niveles de alcalinidad (80–160 mg  $\text{CaCO}_3$ /l) han evidenciado que mantener estas condiciones contribuye a una mayor estabilidad de los parámetros físico-químicos del agua durante el cultivo intensivo (Huong et al., 2025).

La estabilidad de la dureza observada en todos los tratamientos sugiere que ninguno de los sistemas de aireación, incluidos aquellos basados en electrólisis, alteró de manera significativa la composición iónica del agua. Esta condición favorece el mantenimiento del equilibrio ácido base y contribuye a generar un

ambiente químicamente estable, adecuado para el cultivo intensivo de *Penaeus vannamei*.

#### **4.6. Calcio**

Durante la fase inicial del experimento, las concentraciones de calcio fueron similares entre los tratamientos. Los valores medios registrados fueron de 46,67 mg/l en T1, 53,33 mg/l en T3 y 60,00 mg/l en T2.

El análisis de varianza (ANOVA) no evidenció diferencias significativas entre tratamientos ( $p = 0,579$ ). De igual manera, la prueba post hoc de Tukey confirmó que esta dispersión no fue estadísticamente significativa ( $p = 0,551$ ), lo que indica una homogeneidad en la concentración inicial de calcio entre los grupos experimentales.

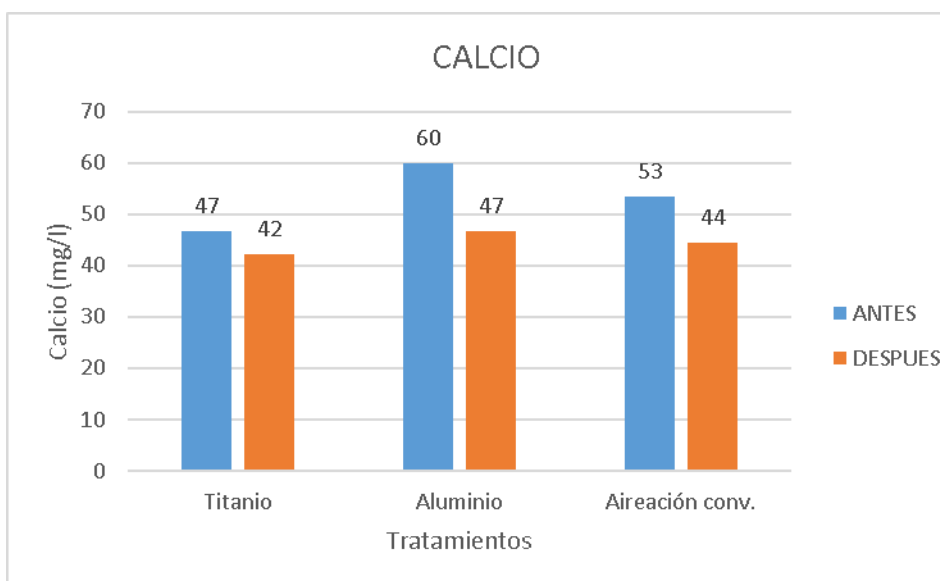
Esta uniformidad inicial resulta fundamental para garantizar que cualquier variación posterior en la concentración de calcio pueda atribuirse a los efectos de los tratamientos aplicados y no a diferencias basales del sistema.

A lo largo de los días evaluados, la concentración de calcio se mantuvo estable en todos los tratamientos, con valores que oscilaron entre 40 y 46 mg/l, evidenciando una notable constancia en la disponibilidad de este catión (Figura 22).

No se detectaron diferencias significativas entre tratamientos durante el periodo experimental ( $p = 0,630$ ). Asimismo, la prueba post hoc HSD de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ) agrupó a los tratamientos en un único subconjunto homogéneo, confirmando la similitud en los niveles de calcio entre tratamientos (Anexo, Tabla 24).

**Figura 22**

*Niveles de Calcio ( $Ca^{2+}$ ) de los tres tratamientos.*



La estabilidad observada en los niveles de calcio es consistente con estudios recientes que señalan que la concentración de calcio disuelto en cuerpos de agua tiende a permanecer relativamente estable en ausencia de procesos de precipitación o remoción significativos, y que está fuertemente vinculada con el pH y la alcalinidad del agua, dos variables clave en la química acuática que regulan procesos biológicos y la fisiología de organismos acuáticos (Tahraoui et al., 2025). Investigaciones han demostrado que las concentraciones de Ca y alcalinidad siguen patrones consistentes a lo largo de gradientes de pH, con máximos alrededor de valores ligeramente alcalinos, evidenciando una relación entre dureza total del agua y estabilidad química, especialmente en sistemas acuáticos con niveles moderados de pH (Guerin et al., 2024).

Velásquez et al. (2023), mencionan que a una alcalinidad de 40 mg/l los camarones presentaron retraso del crecimiento y conducta anómala de muda, lo que sugiere que valores menores a ese nivel pueden ser perjudiciales. Los valores obtenidos en este estudio (40-60 mg/l) se encuentran dentro de este rango, lo que sugiere condiciones adecuadas en términos de disponibilidad de calcio.

Velásquez et al. (2023), han indicado que los niveles de calcio y los iones que conforman la dureza total del agua (principalmente  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$ ) son parámetros

de calidad del agua fundamentales en sistemas acuícolas y suelen permanecer relativamente estables cuando no existen procesos de remoción activa significativos.

Por otro lado, Lama et al. (2025), han demostrado que calcio en agua de cultivo ayuda a mitigar variaciones de pH causadas por procesos biológicos y químicos, y que niveles moderados de dureza y alcalinidad son esenciales para mantener condiciones óptimas de calidad del agua en sistemas intensivos debido a su papel en la química acuática y en la fisiología de los organismos cultivados.

Finalmente, la investigación de Wahyuni et al. (2024), indican la relevancia del calcio en la salud general de los camarones, influyendo no solo en el endurecimiento del exoesqueleto después de la muda, sino también en la salud ósea y el metabolismo. La estabilidad de calcio en los rangos observados sugiere que los animales en todos los tratamientos expuestos a condiciones de calcio que no deben haber comprometido estos procesos fisiológicos vitales.

#### **4.7. Crecimiento**

Al inicio del experimento, los camarones presentaron pesos promedio similares en todos los tratamientos. El tratamiento con emisor de titanio (T1) registró un peso inicial promedio de 0,51 g, el tratamiento con emisor de aluminio (T2) de 0,49 g y el tratamiento con aireación convencional (T3) de 0,51 g (Tabla 9).

Al finalizar el periodo experimental, los pesos promedio fueron de 0,70 g en T1, 0,66 g en T2 y 0,79 g en T3. En términos de incremento absoluto de peso, T3 presentó el mayor aumento (0,28 g), seguido de T1 (0,19 g) y T2 (0,17 g).

**Tabla 9***Resultados de crecimiento de P. vannamei*

Tratamiento	Repetición	Peso inicial promedio (g)	Peso final promedio (g)	Incremento de peso (g)
Titanio	1	0,51	0,72	0,21
	2	0,51	0,70	0,19
	3	0,51	0,68	0,17
	Promedio	0,51 <sup>a</sup> ±0,000	0,70 <sup>a</sup> ±0,020	0,19 <sup>a</sup> ±0,020
Aluminio	1	0,52	0,74	0,22
	2	0,47	0,65	0,18
	3	0,48	0,59	0,11
	Promedio	0,49 <sup>a</sup> ±0,026	0,66 <sup>a</sup> ±0,075	0,17 <sup>a</sup> ±0,056
Aireación Convencional	1	0,51	0,92	0,41
	2	0,53	0,77	0,24
	3	0,50	0,68	0,18
	Promedio	0,51 <sup>a</sup> ±0,015	0,79 <sup>a</sup> ±0,121	0,28 <sup>a</sup> ±0,119

El análisis de varianza unidireccional no reveló diferencias significativas (Anexo, Tabla 25) entre los tratamientos para el peso inicial ( $p > 0,05$ ), lo que demuestra que todos los grupos experimentales comenzaron el ensayo con condiciones homogéneas de biomasa. Posteriormente, en el peso final, aunque se observó una tendencia ascendente en el tratamiento con aireación convencional (T3), con una media de 0,79 g, frente a 0,70 g en T1 y 0,66 g en T2, las diferencias no alcanzaron significancia estadística ( $p = 0,215$ ).

La prueba post hoc de Tukey confirmó la ausencia de agrupamientos diferenciados entre tratamientos (Anexo, Tabla 26 y 27), ubicando a los tres dentro de un mismo subconjunto homogéneo. Los resultados indican que, aunque el sistema de aireación convencional mostró una mayor ganancia promedio de peso, los sistemas de aireación basados en electrólisis (T1 y T2) permitieron tasas de crecimiento comparables. Esto sugiere que las condiciones

de oxigenación generadas por las nanoburbujas no comprometieron el crecimiento de *Penaeus vannamei* durante el periodo experimental.

De acuerdo con Nazarudin, et al. (2025), el crecimiento de *P. vannamei* se maximiza cuando las concentraciones de oxígeno disuelto superan los 5 mg/l, condición registrada en todos los tratamientos de este estudio.

Asimismo, Ramesh, et al. (2024), destacan que la aeración y gestión de oxígeno en cultivo de camarón destaca que los aireadores mecánicos son una herramienta fundamental para mantener niveles adecuados de oxígeno disuelto en estanques, especialmente en sistemas intensivos donde la demanda de oxígeno es alta. Este antecedente coincide con la tendencia observada en el tratamiento con aireación convencional, aunque en el presente estudio dicha diferencia no alcanzó significancia estadística.

Por otro lado, De Oliveira et al. (2024), señalan que los sistemas basados en nanoburbujas contribuyen a generar ambientes más estables y a reducir la acumulación de compuestos nitrogenados, favoreciendo el crecimiento de manera indirecta, aunque con una respuesta más gradual en comparación con los sistemas convencionales.

Si bien el tratamiento con aireación convencional mostró una mayor ganancia promedio de peso, los tratamientos con emisores de titanio y aluminio presentaron resultados biológicamente equivalentes, sin diferencias estadísticas significativas. Esto evidencia que las nanoburbujas generadas por electrólisis constituyen una alternativa viable para la oxigenación en sistemas de cultivo de *P. vannamei*, permitiendo mantener tasas de crecimiento adecuadas.

No obstante, la tendencia observada sugiere que futuros estudios deberían incorporar un mayor número de réplicas y periodos experimentales más prolongados para evaluar con mayor precisión el impacto de cada sistema de aireación sobre el crecimiento.

#### 4.8. Supervivencia

Los valores iniciales de supervivencia fueron homogéneos (100% en todos los tratamientos), lo que indica que los tratamientos experimentales iniciaron el ensayo en condiciones equivalentes (Tabla 10).

El análisis de varianza (ANOVA) aplicado a los datos de supervivencia inicial no mostró diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ( $p > 0,05$ ), confirmando la homogeneidad inicial de los grupos experimentales (Anexo, Tabla 28).

**Tabla 10**

*Resultados de supervivencia de P. vannamei*

Tratamiento	Repetición	Supervivencia inicial (%)	Supervivencia final (%)
Titanio	1	100	95
	2	100	90
	3	100	80
	Promedio	$100^a \pm 0,000$	$88,3^a \pm 7,63$
Aluminio	1	20	80
	2	20	90
	3	20	90
	Promedio	$100^a \pm 0,000$	$86,7^a \pm 5,77$
Aireación Convencional	1	20	70
	2	20	85
	3	20	80
	Promedio	$100^a \pm 0,000$	$78,3^a \pm 7,63$

Al finalizar el periodo experimental, los porcentajes promedio de supervivencia fueron de 88,3% en el tratamiento con emisor de titanio (T1), 86,7% en el tratamiento con emisor de aluminio (T2) y 78,3% en el sistema de aireación convencional (T3).

El análisis estadístico no evidenció diferencias significativas entre tratamientos ( $p > 0,05$ ). Si bien se verificaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas (Shapiro-Wilk y Levene), estos no pudieron calcularse debido a la constancia absoluta de las desviaciones dentro de cada celda. No obstante, la prueba post hoc de Tukey confirmó que los tres tratamientos pertenecen a un mismo subconjunto homogéneo ( $p = 0,269$ ) (Anexo, Tabla 29).

Estos resultados indican que, aunque las diferencias numéricas favorecieron a los sistemas con electrólisis, la variabilidad entre repeticiones fue insuficiente para establecer significancia estadística.

Los valores de supervivencia obtenidos en los tres tratamientos fueron superiores al 75%, porcentaje considerado aceptable para sistemas de cultivo intensivo de camarón (Inayah et al., 2023).

La mayor supervivencia observada en el tratamiento con emisor de titanio podría estar asociada a la estabilidad electroquímica del material, el cual evita la liberación de iones metálicos y permite una generación más constante de oxígeno, tal como describen Liu et al. (2020), en estudios sobre emisores metálicos en sistemas de electrólisis.

De manera similar, Yaparathne et al. (2024), reportaron mayores tasas de supervivencia en sistemas que emplean nanoburbujas, en comparación con sistemas de aireación mecánica, atribuyendo este efecto a la mayor persistencia del oxígeno disuelto y a la reducción del nitrógeno amoniacal total (TAN). Asimismo, Patkaew et al. (2024), señalaron que una oxigenación estable mejora la eficiencia respiratoria y la respuesta inmunológica de *P. vannamei*, reduciendo el estrés oxidativo y la susceptibilidad a enfermedades bacterianas.

Los resultados demuestran que los tres sistemas de aireación evaluados proporcionaron condiciones adecuadas para la supervivencia del camarón. Sin embargo, la tendencia a mayores porcentajes de supervivencia en los tratamientos con electrólisis sugiere que las nanoburbujas podrían contribuir a generar un ambiente más estable, favoreciendo el bienestar de los organismos, aun cuando las diferencias no alcanzaron significancia estadística.

Una limitación del estudio fue la falta de homogeneidad inicial en algunos parámetros fisicoquímicos. Los valores de temperatura y pH registrados el día 0 mostraron diferencias significativas entre tratamientos, lo que indica que los acuarios no iniciaron bajo condiciones completamente equivalentes. Este comportamiento podría estar relacionado con la posición espacial de las unidades experimentales, variaciones en la iluminación o pequeñas fluctuaciones térmicas dentro del laboratorio.

No obstante, dichos valores se mantuvieron dentro de los rangos aceptables para el cultivo de *P. vannamei*. con mortalidades moderadas ( $\leq 22\%$ ) y sin eventos de mortalidad masiva en ninguno de los tratamientos. Por esta razón, el análisis de los resultados consideró no solo los valores absolutos posteriores a la activación, sino también las variaciones respecto al día 0, permitiendo una interpretación más robusta de los efectos atribuibles a cada sistema de aireación.

## V. CONCLUSIONES

1. La aireación mecánica convencional (T3) registró las concentraciones más altas de oxígeno disuelto durante la fase post-activación, especialmente en los horarios de 07:00 y 16:00 h. Sin embargo, los tratamientos con nanoburbujas generadas por electrólisis (T1 y T2) mantuvieron niveles de oxígeno disuelto dentro de rangos adecuados para el cultivo intensivo de *Penaeus vannamei*.
2. Los parámetros fisicoquímicos asociados a la calidad de agua (temperatura, pH, amonio, nitrito, nitrato, dureza de carbonatos y calcio) se mantuvieron dentro de rangos recomendados para el cultivo de *P. vannamei* en los tres tratamientos, sin evidenciarse efectos negativos atribuibles al uso de nanoburbujas de oxígeno molecular generadas por electrólisis. Asimismo, los tratamientos con emisores de titanio y aluminio contribuyeron a mantener menores concentraciones de amonio tóxico respecto al sistema de aireación convencional, registrándose diferencias significativas al día 12 de evaluación ( $p = 0,003$ ), lo que evidencia su potencial para mejorar la calidad del agua mediante la reducción de este compuesto nitrogenado.
3. No se observaron diferencias significativas en el crecimiento de *P. vannamei* entre los tratamientos evaluados ( $p > 0,05$ ). Aunque el sistema de aireación convencional (T3) mostró el mayor incremento de peso promedio, los tratamientos con nanoburbujas (T1 y T2) presentaron ganancias de peso similares y biológicamente aceptables, lo que indica que la aplicación de electrólisis no compromete el desempeño productivo de los organismos.

4. La supervivencia final fue alta y sin diferencias significativas entre tratamientos ( $p > 0,05$ ), con valores de 88,3% en T1, 86,7% en T2 y 78,3% en T3, todos dentro de rangos compatibles con sistemas intensivos. Estos resultados sugieren que las nanoburbujas generadas por electrólisis contribuyen a mantener condiciones ambientales favorables para la supervivencia de *P. vannamei*.
5. En conjunto, los resultados permiten considerar la tecnología de nanoburbujas de oxígeno molecular generadas por electrólisis como una alternativa complementaria viable a la aireación mecánica convencional en sistemas intensivos de cultivo de *P. vannamei*.

## VI. RECOMENDACIONES

1. Replicar el presente estudio en sistemas de cultivo a mayor escala y bajo condiciones productivas reales, con el fin de validar el desempeño de las nanoburbujas de oxígeno generadas por electrólisis fuera del entorno controlado de laboratorio y evaluar su aplicabilidad en estanques comerciales de *Penaeus vannamei*.
2. Incluir en futuras investigaciones el análisis de metales disueltos en el agua, particularmente aluminio, cuando se empleen electrodos de este material, a fin de evaluar su posible liberación al medio acuático y confirmar la inocuidad del sistema de electrólisis para los organismos cultivados.
3. Evaluar diferentes regímenes de operación (voltaje, amperaje y tiempos de encendido y apagado) en la generación de nanoburbujas por electrólisis, con el objetivo de optimizar la eficiencia energética del sistema y maximizar la estabilidad de los parámetros de calidad del agua.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al Mamun, A., Neogi, S., Ujjaman, R. & Hasan, M. (2025). Water quality interactions and their synergistic effects on aquaculture performance in Bangladesh: A critical review. *Results in Chemistry*, 16, 102306.
- Amjad, K., Dahms, H., Triawan, A., Lin, f., Wu, Y. & Lai, H. Impact of alkalinity treatments on biofloc dynamics and growth performance in *Penaeus vannamei* shrimp culture. *Aquaculture Reports*, 42, 102797.
- Ansari, A., Alharbi, S., Bustamante, H., Duong, H., Gao, L., Hasan, M., Luo, W. & Nghiem, L. (2025). Nanobubble technology for water treatment: Fundamentals, transformative opportunities, and challenges to full-scale applications. *Journal of Water Process Engineering*. 78, 108746.
- Ayala, J. J. y Rodríguez, C. P. (2020). *Plan de negocios para la exportación de langostinos congelados a china* [Trabajo de investigación para optar el grado de maestro en ciencias empresariales, Universidad San Ignacio de Loyola]. Repositorio institucional. <https://repositorio.usil.edu.pe/server/api/core/bitstreams/65bfe77c-8e2c-4135-9618-5267a161ef8a/content>.
- Bartz, R. & Feiden, A. (2023). Water transparency analysis in fish farming environment through unmanned aerial vehicles. *Journal of applied research and technology*, 21(6), 912-920.
- Bennet, N. y Morán, M. (2018). *Análisis acerca de la factibilidad de la nanotecnología para mejorar el cultivo de larvas de camarón. Caso: SAFARIMAR* [Trabajo de titulación presentado como requisito para optar por el título de ingeniería en sistemas administrativos computacionales, Universidad de Guayaquil]. Repositorio institucional. <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/37006/1/TESIS%20NICKY%20BENNET-MAR IUXI%20MORAN.pdf>.

- Binh, P., Van, P., Nghia, N., Huy, T., May, L., St-Hilaire, S. & Giang, P. (2025). Impact of ozone nanobubble on water quality, gut microbiota, and growth performance of white leg shrimp (*Penaeus vannamei*) in an intensive indoor farming system. *Energy Nexus*, 18, 100450.
- Castillo, L. V. y Ochoa, N. A. (2024). Comunidad de macroinvertebrados y calidad ecológica de manantiales en la cuenca suroriental de Arequipa - Perú. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 28(125), 186-194: <https://doi.org/10.47460/uct.v28i125.871>.
- Chávez, J. J. y Cóndor, L. H. (2021). *Aplicación del sistema de nanoburbuja de aire y filtro de quitosano - óxido de grafeno para mejorar la calidad del agua en la cuenca baja del río Chillón – Ventanilla 2021* [Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Ambiental, Universidad César Vallejo]. Repositorio institucional. [https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/76369/Ch%C3%A1vez\\_GJJ-C%C3%B3ndor\\_RLH-SD.pdf?sequence=1](https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/76369/Ch%C3%A1vez_GJJ-C%C3%B3ndor_RLH-SD.pdf?sequence=1).
- Cirera, M. (2022). Nanoburbujas, *MoleQla revista de Ciencias de la Universidad Pablo de Olavide*, 2173-0903(44), 43-44. <https://www.upo.es/cms1/export/sites/upo/moleqla/documentos/Numero44/N44-Moleqla.pdf>.
- De Oliveira, B., Wasielesky, w., Ferreira, o., da Silva, L., Advent, B., Gonçalves, G. & Krummenauer, D. (2024). The effect of using nano and microbubbles as aeration strategies on the nitrification process, microbial community composition, and growth of *Penaeus vannamei* in a super-intensive biofloc system. *Aquaculture*, 587, 740842.
- Dildar, T., Cui, W., Ikhwanuddin, M. & Ma, H. (2025). Aquatic Organisms in Response to Salinity Stress: Ecological Impacts, Adaptive Mechanisms, and Resilience Strategies. *Biology*, 14(6), 667.
- Duan, Y., Huang, J., Wang, Y., Yang, Y. & Li, H. (2025). High-temperature stress impairs the intestinal functional homeostasis of *Litopenaeus vannamei* by altering mucosal integrity, immune signaling, and microbial community. *Fish and Shellfish Immunology*, 110701.

- Duan, Y., Nan, Y., Li, J., Xiao, M., Wang, Y. & Zhu, R. (2025). Ammonia Stress Disrupts Intestinal Health in *Litopenaeus vannamei* Under Seawater and Low-Salinity Environments by Impairing Mucosal Integrity, Antioxidant Capability, Immunity, Energy Metabolism, and Microbial Community. *Antioxidants (Basel)*, 14(11):1383.
- Gadea, E., Scherlis, D. y Baraldo, L. (2023). *Termodinámica y nucleación electroquímica de nanoburbujas superficiales*, Buenos Aires [Tesis presentada para optar por el título de Doctor en el área de Química Inorgánica, Química Analítica y Química Física, Universidad de Buenos Aires]. Repositorio institucional Universidad de Buenos Aires. [https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/download/tesis/tesis\\_n7421\\_Gadea.pdf](https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/download/tesis/tesis_n7421_Gadea.pdf).
- García, J., Heo, J. & Kim, C. (2024). Machine Learning Algorithms for Water Quality Management Using Total Dissolved Solids (TDS) Data Analysis. *Water*, 16(18), 2639.
- Gobai, J., Joni, H., Panatarani, C. & Faizal, F. (2025). A Critical Review of Nanobubble Flotation for Seawater Treatment Process. *Water*, 17(7), 1054.
- Guerin, A., Weise, A., Chu, J., Wilcox, M., Greene, E. & Therriault, T. (2024). High-resolution freshwater dissolved calcium and pH data layers for Canada and the United States. *Scientific Data volume*, 11(370).
- Guo, J., Chen, Y., Zhang, Y., Zhan, R., Inaba, K., Osato, T., Zhao, X., Han, Y. & Ren, T. (2025). Oxygen nanobubble-induced hyperoxia: Effects on growth, digestive enzyme activity, intestinal morphology, and biochemical parameters in kuruma prawn (*Penaeus japonicus*). *Aquaculture Reports*, 43, 102882.
- Huong, H., Vu, L., Nhi, N. & Diep, D. (2025). Effects of densities and alkalinities on the rearing performance of all-male giant freshwater prawns (*Macrobrachium rosenbergii* De Man, 1879) postlarvae. *Israeli Journal of Aquaculture – Bamidgeh*. 77(2), 274-284.

- Inayah, Z., Musa, M. & Arfiati, D. (2023). Growth of *Vannamei* shrimp (*Litopenaeus vannamei*) in Intensive Cultivation Systems. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 9(10), 8821-8829.
- Jhunkeaw, C., Khongcharoen, N., Rungrueng, N., Sangpo, P., Panphut, W., Thapinta, A., Senapin, S., St-Hilaire, S. & Dong, H. (2021). Ozone nanobubble treatment in freshwater effectively reduced pathogenic fish bacteria and is safe for Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture*, 534, 736286.
- Jia, M., Usman, M., Kharraz, J., Manoj, N., Chopra, S., Jang, A., Chew, J., Kumar, S., Chen, G. & Kyoungjin, A. (2023). Nanobubbles in water and wastewater treatment systems: Small bubbles making big difference. *Water Research*, 15, 120613.
- Jianqiang, Z., Wenjun, S., Ran, Z., Chen, G., Hui, S., Hui, L., Libao, W., Jie, C. & Xihe, W. (2024). Integrated physiological, transcriptome, and metabolome analyses of the hepatopancreas of *Litopenaeus vannamei* under cold stress. *Comparative Biochemistry and Physiology - Part D: Genomics and Proteomics*, 49, 101196.
- Kempler, P., Coridan, R. & Luo, L. (2024). Gas Evolution in Water Electrolysis. *Chemical Reviews*, 124(19), 10964–11007.
- Kubitza, F. (2025). Water quality impacts on health and performance of fish and shrimp, Part 2: pH, carbon dioxide, alkalinity, hardness and the water buffering system. *Responsible seafood Advocate*.
- Lama, S., Marcelino, K., Wongkiew, S., Surendra, K., Hu, Z., Lee, J. & Khanal, S. (2025). Recent Advances in Aquaponic Systems: A Critical Review. *Reviews in aquaculture*,
- Li, Y., Ye, Y., Tang, Z., Zhou, Z., Yao, Z., Gao, P., Zhao, Y. & Lai, Q. (2025). Effects of high pH on molting and calcium absorption of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Aquaculture Reports*, 46, 103274.

- Lin, W., Luo, H., Wu, J., Hung, T., Cao, B., Liu, X., Yang, J. & Yang, P. (2020). A Review of the Emerging Risks of Acute Ammonia Nitrogen Toxicity to Aquatic Decapod Crustaceans, *Water*, 15(1), 27.
- Liu, S., Oshita, S., & Takaoka, M. (2020). Stability and performance of metal-based electrodes for nanobubble generation. *Water Research*, 173, 115598.
- Ma, Y; Fang, Q.; Xia, S. & Zhou, Y. (2024). Prediction of the Dissolved Oxygen Content in Aquaculture Based on the CNN-GRU Hybrid Neural Network. *Water*, 16(24), 3547. <https://doi.org/10.3390/w16243547>.
- Morales, V. B. (2022). *Remoción de cromo hexavalente en aguas residuales a partir de tratamientos electroquímicos en la empresa Tenería Núñez* [Trabajo de titulación previo a la obtención del Grado Académico de Magister en Química mención Química – Física, Universidad Técnica de Ambato]. Repositorio institucional. <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/34284/1/t1939mquim.pdf>.
- Nazarudin, M., Faiz M., Hasif, M., Khairil, N., Afiqah, N., Mohamed, N., Ahmad, M., Mohd, N., Salwany, I. & Hafiz, M. (2025). Optimizing Shrimp Culture Through Environmental Monitoring: Effects of Water Quality and Metal Ion Profile on Whiteleg Shrimp (*Litopenaeus vannamei*) Performance in a Semi-Intensive Culture Pond. *Water*, 17(19), 2818.
- Nghia, N., Nguyen, N., Binh, P., May, L., Huy, T., Giang, P., Hilaire, S. & Van, P. (2022). Effect of nanobubbles (oxygen, ozone) on the Pacific white shrimp (*Penaeus vannamei*), *Vibrio parahaemolyticus* and water quality under lab conditions. *Fish Aquat Sci*, 25(8), 429-440
- Noguera, F., Castillo-Vargasmachuca, S., Ponce-Palafox, J., Wicab, O. y Burgos, A. (2019). Acuicultura intensiva del camarón, estrategias para la implementación de nuevas tecnologías al sector productivo: una alternativa para la sustitución de cultivos ilícitos en el municipio de Tumaco. *Hélices y anclas para el desarrollo local* (Editorial: Consorcio Universidades Huelva-Cartagena de Indias). <https://www.researchgate.net/publication>

/337604157\_Acuicultura\_intensiva\_del\_camaron\_estrategias\_para\_la\_implementacion\_de\_nuevas\_tecnologias\_al\_sector\_productivo\_una\_alternativa\_para\_la\_sustitucion\_de\_cultivos\_ilicitos\_en\_el\_municipio\_de\_Tumaco\_Narin.

Oliveira, A., Bernalte, E., Melo, L., Augusto, K., Dos santos, W., Fatibello-Filho, O., Munoz, R., Crapnell, R. & Banks, C. (2025). Dual validation of nitrite in water samples through combining bromocresol green with colorimetric and electrochemical analysis. *Microchemical Journal*, 218, 115553.

Patkaew, S., Direkbusarakom, S., Hirono, I., Wuthisuthimethavee, S., Powtongsook, S. & Pooljun, S. (2024). Effect of supersaturated dissolved oxygen on growth-, survival-, and immune-related gene expression of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Vetworld*, 17(1):50-58.

Pemberthy, L. y Paz, N. (2019). Diseño e implementación de un sistema de monitoreo de parámetros de calidad de agua en cultivo de tilapia en una granja piscícola del departamento del Cauca. *Publicaciones e Investigación*, 13(2), 11-22. <https://doi.org/10.22490/25394088.3255>.

Pizarro, R. P., Ochoa, W. W., Tineo-Vargas, V. S., Tello-Ataucusi, D. S., Pariona-Garay, L. D., Ochoa-Rodríguez, D. W., Castro-Carranza, T. S. y Tenorio-Bautista, S. M. (2022). Efecto de la oxigenación con micro-nanoburbujas en la calidad de agua y producción de “truchas” *Oncorhynchus mykiss*. *Llamkasun*, 3(1), 66-73. <https://doi.org/10.47797/llamkasun.v3i1.84>.

Quiroz, B. K. (2023). *Degradación del fenol con microburbujas de oxígeno generadas por electrólisis, Perú* [Tesis para optar el título profesional de ingeniera ambiental, Universidad Científica del Sur]. Repositorio institucional Universidad Científica del Sur. <https://repositorio.cientifica.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12805/3032/TL-Quiroz%20K-Ext.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Ramesh, P., Jasmin, A., Tanveer, M., Prabakaran, R., Rajendra, K., Roy, S., Kumar, D., Chbinnathambi, A. & Brindhadevi, K. (2025). Reprint of “Optimizing aeration efficiency and forecasting dissolved oxygen in brackish

water aquaculture: Insights from paddle wheel aerator. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 166(2), 105868.

Ramesh, P., Jasmin, A., Tanveer, M., Prabakaran, R., Rajendra, K., Roy, S., Kumar, D., Chbinnathambi, A. & Brindhadevi, K. (2024). Optimizing aeration efficiency and forecasting dissolved oxygen in brackish water aquaculture: Insights from paddle wheel aerator. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 156, 105353.

Rose, J., Örmeci, B. & Gim, T. (2025). Water Quality and Health: An Ecological Perspective. *Water & Ecology*, 1(2), 100007.

Sharma, H., Nirmalkar, N. & Zhang, W. (2024). Nanobubbles produced by nanopores to probe gas-liquid mass transfer characteristics. *Journal of Colloid And Interface Science*, 665, 274-285.

Tahraou, H., Bouallouche, R., Madi, K., Rayane, O., Boudraa, R., Belkacemi, H., Lekmine, S., Moussa, H., Touzout, N., Shamsul, M., Triki, Z., Zamouche, M., Kebir, M., Nasrallah, N., Aymen, A., Benguerba, Y., Zhang, J. & Amrane, A. (2025). Modeling Total Alkalinity in Aquatic Ecosystems by Decision Trees: Anticipation of pH Stability and Identification of Main Contributors. *Water*, 17(20), 2939.

Tahraoui, H., Bouallouche, R., Madi, K., Benkouachi, O., Boudraa, R., Belkacemi, H., Lekmine, S., Moussa, H., Touzout, N. & Amrane, A. (2025). Modeling Total Alkalinity in Aquatic Ecosystems by Decision Trees: Anticipation of pH Stability and Identification of Main Contributors. *Water*, 17(20), 2939.

Topus, M. & Kir, M. (2023). Critical temperatures and aerobic metabolism in post-larvae of Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931). *Journal Comp Physiol B.*, 193(6):607-614.

Valdivia-Mamani, D. y Vargas-Febres, C. (2019). Tecnología de nanoburbujas para la limpieza del material pétreo de la arquitectura religiosa de Cusco, Perú. *Revista Legado de Arquitectura y Diseño*, 2019(26). <https://www.redalyc.org/journal/4779/477961406012/477961406012.pdf>

- Vásquez, M. I. (2020). *Tecnología de burbujas finas y ultrafinas: actuales y potenciales aplicaciones en el área agroindustrial* [Tesis para optar al grado de Magíster en Ingeniería Agrícola con mención en Agroindustrias, Universidad de Concepción]. Repositorio institucional. [http://repositorio.udec.cl/bitstream/11594/440/3/Tesis\\_Tecnolog%C3%ADa\\_de\\_burbujas\\_finas\\_y\\_ultrafinas\\_actuales.Image.Marked.pdf](http://repositorio.udec.cl/bitstream/11594/440/3/Tesis_Tecnolog%C3%ADa_de_burbujas_finas_y_ultrafinas_actuales.Image.Marked.pdf).
- Velásquez, P., Solórzano, J., Ochoa, P. & Solano, G. (2023). Characterization of water quality during freshwater culture of shrimp *Litopenaeus vannamei* in southern Ecuador. *Selva Andina Research Society*, 10(2), 2311-3766.
- Velásquez, P., Solorzano, J., Ochoa, P., Solano, G., Quizhpe, P. y Guillen, R. (2023). Caracterización de la calidad del agua durante el cultivo del camarón *Litopenaeus vannamei* con agua dulce en el Sur del Ecuador. *Revista de Ciencia Animal de la Selva Andina*, 10(2), 74-87.
- Wahyuni, S., Lestari, D. & Diniariwisan, D. (2024). Effect of Adding Calcium Dolomite (CaMg(CO<sub>3</sub>)) and Tohor (CaO) in Cultivation Media to Increase Moulting of *Litopenaeus vannamei*. *Journal of Fish Health*, 4(2), 52-62
- Walidatush Sholihah, W. & Gharesifard, M. (2025). Citizen Science for Water Quality Monitoring: Analyzing Key Parameters, Success Factors, and Research Gaps for Aquaculture. *Environmental Managemen*, 75, 2583-2595.
- Walker, SJ, Neill, WH, Lawrence, AL & Gatlin III, DM (2011). Effects of temperature and starvation on ecophysiological performance of the Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*), *Acuicultura*, 319(1-4), 164-171.
- Wang, Z., Zhou, J., Li, J., Zou, J. & Lanfen, F. (2020). The immune defense response of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) to temperature fluctuation. *Fish Shellfish Immunol*, 103,103-110.
- Wu, J., Zhang, Q., Guo, C., Li, Q., Hu, Y., Jiang, X., Zhao, Y., Wang, J. & Zhao, Q. (2022). Effects of Aeration on Pollution Load and Greenhouse Gas Emissions from Agricultural Drainage Ditches. *Water*, 14(22), 3783

- Xie, J. (2020). *Assessing effects of long-term pH stress to Pacific white shrimp juveniles*. Global Seafood Advocate. <https://www.globalseafood.org/advocate/assessing-effects-of-long-term-ph-stress-to-pacific-white-shrimp-juveniles/>.
- Xu, Y., Li, L., Lou, S., Tian, J., Sun, S., Li, X. & Yingdong, Y. (2022). Effects of Nano-Aerators on Microbial Communities and Functions in the Water, Sediment, and Shrimp Intestine in *Litopenaeus vannamei* Aquaculture Ponds. *Microorganismos*, 10(7), 1302.
- Xue, S., Zhang, Y., Marhaba, T. & Zhang, W. (2022). Aeration and dissolution behavior of oxygen nanobubbles in water. *Journal of Colloid and Interface Science*, 609, 584-591.
- Yaparathne, S., Morón-López, J., Bouchard, D., García-Segura, S. & Apul, O. (2024). Nanobubble applications in aquaculture industry for improving harvest yield, wastewater treatment, and disease control. *Ciencia del Medio Ambiente Total*, 931, 172687
- Yujin, K., GyuRi, K., Min-Young, L., Parque, S., Chung-Sook, K. & Tae-Hoon, K. (2025). Dominant contribution of land-based aquaculture to coastal organic matter and nutrient loads: Quantifying particulate organic carbon and ammonium fluxes from Jeju Island, South Korea. *Regional Studies in Marine Science*, 91, 104520.
- Zhao, S., Wu, J. & Li, Y. (2025). Advances in the Research on the Properties and Applications of Micro-Nano Bubbles. *Processes*, 13(7), 2106.

## ANEXOS

### Anexo 1. Registro de análisis de compuestos nitrogenados y calcio del agua

DIA	Tratamiento	T1			T2			T3		
	Repeticiones	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3
0	Amonio Tòxico	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Nitrito	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Nitrato	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
	dkh	15	14	13	13	12	13	12	12	13
	Calcio	60	40	40	80	40	60	60	60	40
4	Amonio Tòxico	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Nitrito	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Nitrato	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	dkh	11	12	11	9	11	12	12	12	12
	Calcio	40	40	40	60	40	40	60	40	40
8	Amonio Tòxico	0,052	0,013	0,007	0,012	0,010	0,011	0,038	0,035	0,041
	Nitrito	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Nitrato	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	dkh	9	11	12	9	13	10	11	13	10
	Calcio	40	40	40	40	40	60	60	40	40
12	Amonio Tòxico	0,090	0,015	0,017	0,014	0,014	0,014	0,148	0,126	0,17
	Nitrito	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Nitrato	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	dkh	11	12	13	12	12	12	13	13	14
	Calcio	40	60	40	40	40	60	40	40	40

## Anexo 2. Registro de análisis de parámetros fisicoquímicos tratamiento 1 (emisor de titanio)

REPORTE DE ANALISIS DE PARAMETROS FISICO-QUIMICOS													
Proyecto:	Efecto de nanoburbujas de oxígeno molecular generadas por electrolisis sobre la calidad de agua, supervivencia y crecimiento de <i>P. vannamei</i>												
Laboratorio:	Recursos Pesqueros						Fecha de inicio:	1/10/2025			Fecha fin:	15/10/2025	
Muestra:	Agua <input type="text"/>			(Resultados en mg/l)			Suelo <input type="text"/>			(Resultados en mg/l)			
Tratamiento	Tratamiento con nanoburbujas generadas por electrolisis con emisor de titanio (T1)												
Repeticiones	R1												
Hora	7:00			10:00			13:00			16:00			
Días	Oxígeno	Tempertura	pH	Oxígeno	Tempertura	pH	Oxígeno	Tempertura	pH	Oxígeno	Tempertura	pH	
0	6,4	25,8	8,21	5,0	25,7	8,35	5,4	25,9	8,40	5,0	25,9	8,37	
1	5,7	25,0	8,54	5,4	24,7	8,48	6,5	24,8	8,48	5,4	24,6	8,42	
2	5,6	24,2	8,51	6,2	24,4	8,57	5,7	23,9	8,33	6,2	24,6	8,47	
3	6,7	24,4	8,41	6,9	24,1	8,35	5,5	24,1	8,41	5,4	24,5	8,38	
4	4,7	24,7	8,38	5,0	24,4	8,30	5,4	24,7	8,24	5,6	24,7	8,22	
5	3,3	24,8	8,02	3,0	24,6	7,90	3,0	24,5	7,62	2,5	24,5	7,62	
6	2,4	24,6	7,57	3,0	25,0	7,70	2,5	25,3	7,25	3,2	25,6	7,58	
7	3,7	25,4	7,53	4,1	26,0	7,60	5,8	26,3	7,68	6,0	26,2	7,70	
8	4,5	25,7	8,22	4,8	26,3	8,10	5,0	26,3	8,00	5,8	26,6	8,00	
9	2,5	26,1	7,50	2,5	26,1	7,50	3,8	26,4	7,50	4,2	26,7	7,55	
10	3,6	25,8	7,85	3,6	25,2	7,88	3,9	25,9	7,88	4,0	26,0	7,84	
11	3,8	25,6	8,04	3,9	25,5	7,98	4,2	25,7	7,86	4,5	26,1	7,86	
12	3,0	25,9	7,56	3,2	25,9	7,62	3,6	25,8	7,61	3,9	26,5	7,72	

13	3,2	26,1	7,68	3,4	26,0	8,00	3,7	26,2	8,14	3,8	26,7	8,14
14	3,6	25,3	8,1	3,6	25,3	8,13	3,7	25,7	8,10	3,8	26,1	8,14
PROMEDIO	4,0	25,3	8,0	4,2	25,3	8,0	4,5	25,4	7,9	4,6	25,7	7,97
Tratamiento	Tratamiento con nanoburbujas generadas por electrolisis con emisor de titanio (T1)											
Repeticiones	R2											
Hora:	7:00			10:00			13:00			16:00		
Días	Oxigeno	Tempertura	pH	Oxigeno	Tempertura	pH	Oxigeno	Tempertura	pH	Oxigeno	Tempertura	pH
0	5,3	25,4	8,14	5,0	25,4	8,26	5,1	25,5	8,3	4,8	25,5	8,29
1	4,7	24,7	8,43	4,8	24,4	8,39	4,7	24,4	8,33	5,2	24,4	8,28
2	5,4	24,0	8,41	5,4	24,1	8,43	5,3	23,9	8,27	5,8	24,3	8,32
3	5,2	24,0	8,27	5,2	24,0	8,2	5,4	24	8,24	5,6	24,2	8,20
4	4,6	24,4	8,28	4,7	24,2	8,15	4,7	24,5	8,08	5,6	24,5	8,06
5	3,2	24,6	7,81	2,6	24,4	7,73	2,5	24,2	7,53	2,2	24,4	7,51
6	1,6	24,3	7,48	2,0	24,8	7,48	2,1	26	7,35	2,8	25,9	7,44
7												
	3,3	25,2	7,42	3,8	26,8	7,62	4,7	26,8	7,7	4,8	26,5	7,75
8	4,4	25,6	7,62	4,6	26,3	7,61	4,7	26,3	7,68	5,3	26,7	7,70
9	2,6	26,0	7,40	2,6	26,0	7,33	3,1	26,1	7,28	3,8	26,8	7,28
10	3,1	25,5	7,36	3,4	25,0	7,4	3,8	25,2	7,48	4,1	26,0	7,52
11	3,2	25,8	7,39	3,6	25,6	7,5	3,9	25,5	7,65	4,3	26,1	7,70
12	3,1	25,4	7,35	3,3	25,4	7,38	3,7	25,4	7,45	3,8	26,7	7,53
13	3,4	25,8	7,32	3,5	26,0	7,46	3,5	26,1	7,83	3,7	26,7	7,69
14	3,5	25,6	7,41	3,7	25,3	7,65	3,8	25,7	7,67	3,8	26,0	7,73
PROMEDIO	3,7	25,1	7,7	3,8	25,2	7,7	4,0	25,3	7,8	4,3	25,7	7,77
Tratamiento:	Tratamiento con nanoburbujas generadas por electrolisis con emisor de titanio (T1)											
Repeticiones:	R3											

Hora:	7:00			10:00			13:00			16:00		
Días	Oxigeno	Tempertura	pH	Oxigeno	Tempertura	pH	Oxigeno	Tempertura	pH	Oxigeno	Tempertura	pH
0	5,3	25,1	8,23	5,5	24,9	8,23	5,5	25,3	8,34	4,8	25,4	8,34
1	5,1	24,6	8,44	5,2	24,4	8,39	5,3	24,3	8,31	5,4	24,4	8,24
2	5,5	24,0	8,43	6,3	24,0	8,43	5,6	24,0	8,28	5,5	24,2	8,31
3	5,8	23,9	8,26	5,7	23,9	8,18	5,7	24,0	8,23	5,4	24,2	8,18
4	5,0	24,3	8,28	5,0	24,2	8,13	5,1	24,5	8,08	5,3	24,5	8,05
5	3,0	24,5	7,80	2,6	24,4	7,70	2,4	24,3	7,5	2,2	24,4	7,47
6	1,6	24,2	7,46	2,2	24,8	7,34	2,0	25,8	7,33	1,8	25,9	7,35
7	3,5	25,2	7,43	3,7	26,1	7,54	4,5	26,8	7,6	4,3	26,5	7,66
8	3,0	25,7	7,44	3,0	26,2	7,50	4,2	26,2	7,45	4,7	26,8	7,47
9	2,2	25,9	7,42	2,5	26,1	7,32	3,6	26,1	7,35	4,1	26,6	7,37
10	3,4	25,5	7,38	3,6	25,0	7,42	4,0	25,3	7,49	4,0	25,9	7,53
11	3,0	25,9	7,34	3,3	25,6	7,40	3,7	25,5	7,46	4,2	26,1	7,60
12	2,9	25,6	7,40	3,0	25,4	7,43	3,5	25,4	7,47	3,8	26,4	7,52
13	3,1	25,8	7,53	3,3	26,0	7,70	3,7	26,1	7,79	3,9	26,6	7,83
14	3,7	25,8	7,55	3,8	25,5	7,60	3,8	25,7	7,75	4,0	26,0	7,87
PROMEDIO	3,6	25,1	7,7	3,8	25,1	7,7	4,1	25,3	7,7	4,2	25,6	7,75

### Anexo 3. Registro de análisis de parámetros fisicoquímicos tratamiento 2 (emisor de aluminio)

REPORTE DE ANALISIS DE PARAMETROS FISICO-QUIMICOS												
Proyecto:	Efecto de nanoburbujas de oxígeno molecular generadas por electrolisis sobre la calidad de agua, supervivencia y crecimiento de <i>P. vannamei</i>											
						Fecha de inicio:			01/10/2025			
Laboratorio:	Recursos Pesqueros					Fecha fin:			15/10/2025			
Muestra:	Agua		<input type="text"/>		(Resultados en mg/l)		Suelo		<input type="text"/>		(Resultados en mg/l)	
Tratamiento:	Tratamiento con nanoburbujas generadas por electrolisis con emisor de aluminio (T2)											
Repeticiones:	R1											
Hora:	7:00			10:00			13:00			16:00		
Días	Oxígeno	Tempertura	pH	Oxígeno	Tempertura	pH	Oxígeno	Tempertura	pH	Oxígeno	Tempertura	pH
0	4,8	24,8	8,13	5,4	24,8	8,10	5,1	25,1	8,20	4,9	25,2	8,25
1	5,4	24,5	8,26	5,2	24,2	8,20	4,9	24,6	7,73	4,0	24,6	7,84
2	4,3	23,9	8,1	4,5	23,9	8,10	4,8	23,9	8,01	5,0	24,5	8,06
3	4,8	23,8	7,98	4,5	23,8	7,94	5,2	24,0	8,00	4,8	24,1	7,96
4	4,4	24,1	8,1	5,2	24,1	7,80	5,5	24,4	7,85	5,6	24,5	7,86
5	3,1	24,4	7,63	2,8	24,3	7,52	2,5	24,3	7,40	2,5	24,4	7,35
6	1,8	24,1	7,33	1,4	24,6	7,26	2,7	25,4	7,37	1,5	25,9	7,31
7	3,1	25,1	7,35	4,0	25,5	7,52	5,2	26,2	7,58	5,3	26,2	7,60
8	4,1	25,6	7,58	4,1	26,0	7,55	4,4	26,1	7,50	5,0	26,2	7,50
9	2,0	25,8	7,31	2,2	26,0	7,20	3,0	26,1	7,27	3,6	26,7	7,28
10	2,8	25,3	7,33	3,1	24,8	7,37	3,6	25,0	7,42	3,8	25,9	7,5
11	3,0	25,8	7,31	3,2	25,5	7,35	3,7	25,4	7,40	4,0	26,0	7,48

12	2,9	25,5	7,3	3,4	25,3	7,34	3,6	25,3	7,40	3,6	25,8	7,42
13	3,0	25,6	7,28	3,3	25,7	7,55	3,5	25,9	7,69	3,7	26,5	7,81
14	3,3	25,5	7,38	3,2	25,1	7,46	3,4	25,5	7,49	3,4	25,9	7,50
PROMEDIO	3,4	24,9	7,60	3,6	24,9	7,60	4,0	25,2	7,60	4,0	25,5	7,61
Tratamiento:	Tratamiento con nanoburbujas generadas por electrolisis con emisor de aluminio (T2)											
Repeticiones:	R2											
Hora:	7:00			10:00			13:00			16:00		
Días	Oxigeno	Tempertura	pH	Oxigeno	Tempertura	pH	Oxigeno	Tempertura	pH	Oxigeno	Tempertura	pH
0	5,2	24,6	8,11	5,3	24,8	8,09	5,6	25,0	8,20	5,6	25,0	8,25
1	5,5	24,4	8,17	5,6	24,2	8,18	4,5	24,5	7,67	3,6	24,4	7,74
2	4,3	23,8	8,03	4,8	23,7	8,06	4,6	23,8	7,96	5,3	24,3	7,99
3	4,9	23,6	7,94	5,2	23,7	7,81	5,4	23,9	7,94	5,3	23,9	7,89
4	4,5	24,0	8,05	4,6	24	7,75	5,3	24,2	7,77	5,1	24,2	7,77
5	3,0	24,3	7,56	2,8	24,2	7,45	5,3	24,1	7,36	2,3	24,2	7,26
6	1,5	24,0	7,26	1,1	24,4	7,18	2,0	25,8	7,43	1,5	25,9	7,32
7	3,0	25,0	7,37	3,5	25,2	7,38	4,6	26,8	7,44	4,7	26,6	7,50
8	3,8	25,5	7,54	4	25,8	7,47	4,1	25,9	7,32	4,8	26,1	7,32
9	1,9	25,6	7,27	1,9	25,9	7,11	2,4	25,9	7,13	3,0	26,5	7,15
10	2,3	25,1	7,24	2,8	24,8	7,3	3,1	25,0	7,26	3,7	26,2	7,31
11	2,5	25,5	7,26	2,8	25,5	7,36	3,3	25,2	7,42	3,9	26,0	7,53
12	2,9	25,4	7,31	3,0	25,1	7,25	3,2	25,1	7,28	3,4	26,1	7,34
13	3,0	25,6	7,46	3,1	25,6	7,27	3,3	25,6	7,71	3,5	26,4	7,61
14	3,2	25,3	7,46	3,3	25,1	7,51	3,4	25,4	7,39	3,5	25,7	7,52
PROMEDIO	3,3	24,8	7,6	3,5	24,8	7,5	3,9	25,1	7,5	3,8	25,5	7,52
Tratamiento:	Tratamiento con nanoburbujas generadas por electrolisis con emisor de aluminio (T2)											

Repeticiones:	R3											
Hora:	7:00			10:00			13:00			16:00		
Días	Oxígeno	Tempertura	pH	Oxígeno	Tempertura	pH	Oxígeno	Tempertura	pH	Oxígeno	Tempertura	pH
0	5,1	24,6	8,03	5,2	24,9	7,97	5,3	25,0	8,10	5,0	25,0	8,16
1	5,4	24,4	8,13	5,3	24,2	8,22	4,7	24,0	8,11	4,4	24,4	7,77
2	4,5	23,7	8,08	4,9	23,7	8,10	4,8	23,7	7,99	5,2	24,1	7,98
3	4,8	23,6	7,93	5,4	23,7	7,80	5,5	23,8	7,92	4,8	23,8	7,86
4	4,7	24,0	8,03	4,7	24,0	7,67	4,8	24,1	7,71	5,0	24,2	7,73
5	3,0	24,3	7,51	3,0	24,2	7,43	2,5	24,1	7,36	2,7	24,1	7,26
6	2,0	24,0	7,28	1,7	24,3	7,20	2,8	25,4	7,47	1,9	25,6	7,29
7	3,3	24,9	7,42	3,6	25,0	7,56	4,6	25,3	7,71	4,6	25,7	7,75
8	3,7	25,5	7,57	3,8	25,6	7,46	3,8	25,7	7,37	3,6	26,0	7,32
9	1,8	25,7	7,25	2,0	26,0	7,16	3,6	25,9	7,18	3,9	26,4	7,18
10	2,5	25,0	7,28	2,9	24,7	7,34	3,2	24,9	7,34	3,6	25,7	7,4
11	2,6	25,8	7,25	3,2	25,5	7,32	3,4	25,2	7,41	3,8	25,9	7,47
12	2,9	25,4	7,29	3,1	25,1	7,35	3,3	25,0	7,42	3,5	25,8	7,5
13	2,9	25,6	7,42	3,2	25,5	7,46	3,4	25,4	7,73	3,6	26,2	7,77
14	3,4	25,5	7,49	3,4	25,1	7,60	3,6	25,2	7,42	3,7	25,6	7,68
PROMEDIO	3,4	24,8	7,6	3,6	24,8	7,5	3,9	24,8	7,6	3,9	25,3	7,57

### Anexo 4. Registro de análisis de parámetros fisicoquímicos tratamiento 3 (aireación convencional)

REPORTE DE ANALISIS DE PARAMETROS FISICO-QUIMICOS														
Proyecto:	Efecto de nanoburbujas de oxígeno molecular generadas por electrolisis sobre la calidad de agua, supervivencia y crecimiento de <i>P. vannamei</i>													
							Fecha de inicio:	01/10/2025						
Laboratorio:	Recursos Pesqueros						Fecha fin:	15/10/2025						
Muestra:	Agua	<input type="text"/>					(Resultados en mg/l)	Suelo	<input type="text"/>					(Resultados en mg/l)
Tratamiento:	Tratamiento con bomba de oxígeno (T3)													
Repeticiones:	R1													
Hora:	7:00			10:00			13:00			16:00				
Días	Oxígeno	Tempertura	pH	Oxígeno	Tempertura	pH	Oxígeno	Tempertura	pH	Oxígeno	Tempertura	pH		
0	5,7	24,5	8,04	5,1	24,8	8,00	5,0	24,9	8,14	5,2	24,9	8,21		
1	6,7	24,3	8,32	5,9	24,1	8,31	6,0	23,9	8,17	6	24,1	8,16		
2	6,1	23,7	8,38	6,5	23,6	8,40	6,5	23,7	8,30	6,7	23,8	8,24		
3	6,8	23,5	8,17	7,0	23,7	8,06	7,3	23,7	8,15	6,9	23,7	8,10		
4	6,8	24,0	8,28	7,0	24,0	7,85	7,0	24,2	8,00	6,9	24,1	7,99		
5	6,6	24,3	7,93	6,8	24,2	7,85	7,0	23,9	7,80	6,7	24,0	7,71		
6	6,2	23,9	7,86	6,5	24,2	7,76	6,4	24,7	7,88	6,3	25,0	7,72		
7	5,5	24,8	7,73	5,2	24,9	7,55	5,3	25,1	7,30	5,2	25,2	7,21		
8	5,4	25,3	7,8	6,3	25,3	7,71	6,8	25,5	7,63	6,8	25,6	7,60		
9	5,6	25,4	7,65	5,7	25,8	7,73	5,8	25,8	7,50	6,0	26,1	7,38		
10	4,5	24,9	7,53	4,6	24,6	7,53	4,9	24,8	7,48	5,0	25,5	7,34		

11	4,8	25,2	7,7	5,0	25,1	7,49	5,2	25,0	7,38	5,8	25,9	7,40
12	5,0	25,0	7,4	5,4	24,8	7,5	5,7	24,8	7,51	6,0	25,7	7,50
13	5,2	25,1	7,71	5,5	25,8	7,66	5,8	25,5	7,45	6,2	26,3	7,42
14	5,5	24,9	7,82	5,7	24,8	7,71	5,9	25,0	7,63	6,4	25,4	7,63
PROMEDIO	5,8	24,6	7,9	5,9	24,6	7,8	6,1	24,7	7,7	6,2	25,0	7,67
Tratamiento:	Tratamiento con bomba de oxígeno (T3)											
Repeticiones:	R2											
Hora:	7:00			10:00			13:00			16:00		
Días	Oxigeno	Tempertura	pH	Oxigeno	Tempertura	pH	Oxigeno	Tempertura	pH	Oxigeno	Tempertura	pH
0	6,5	24,6	7,98	5,2	24,8	7,95	5,4	24,8	8,09	5,3	24,8	8,17
1	6,8	24,2	8,28	6,6	24,0	8,28	6,5	23,8	8,18	6,9	24,0	8,14
2	6,8	23,5	8,39	6,7	23,6	8,41	6,8	23,6	8,31	7,0	23,6	8,22
3	6,5	23,5	8,16	6,8	23,5	8,04	6,8	23,4	8,06	7,0	23,6	8,07
4	7,0	23,8	8,26	7,4	23,8	7,82	7,1	24,0	7,97	7,1	24,0	7,96
5	6,2	24,2	7,95	7,2	24,0	7,83	6,8	23,9	7,81	7,0	23,9	7,70
6	6,8	23,8	7,78	6,4	24,1	7,7	6,6	24,7	7,89	6,8	24,7	7,22
7	5,0	24,7	7,73	4,8	24,7	7,55	5,0	25,0	7,35	5,2	25,0	7,25
8	5,7	25,1	7,76	6,5	25,2	7,68	7,0	25,4	7,55	7,1	26,1	7,52
9	6,0	25,2	7,65	6,6	25,5	7,62	6,6	25,8	7,62	6,8	25,9	7,56
10	5,6	24,7	7,68	3,8	24,4	7,66	4,0	24,7	7,57	6,4	25,3	7,45
11	5,8	24,9	7,72	5,9	24,9	7,63	5,9	24,8	7,56	6,3	24,9	7,22
12	5,1	24,7	7,3	5,5	24,6	7,40	5,8	24,7	7,48	6,3	25,8	7,50
13	5,6	24,9	7,72	5,8	25,0	7,43	6,0	25,1	7,29	6,4	26,4	7,36
14	6,2	24,7	7,84	6,2	24,6	7,65	6,3	24,8	7,63	6,7	25,5	7,61
PROMEDIO	6,1	24,4	7,9	6,2	24,4	7,8	6,2	24,6	7,7	6,6	24,9	7,63

Tratamiento:	Tratamiento con bomba de oxígeno (T3)											
Repeticiones:	R3											
Hora:	7:00			10:00			13:00			16:00		
Días	Oxígeno	Tempertura	pH	Oxígeno	Tempertura	pH	Oxígeno	Tempertura	pH	Oxígeno	Tempertura	pH
0	5,7	24,6	7,95	5,4	24,8	7,93	5,6	24,8	8,06	5,1	24,8	8,16
1	6,8	24,1	8,25	7	24	8,24	6,7	23,8	8,15	6,8	23,9	8,1
2	7,1	23,5	8,37	7	23,5	8,38	7,0	23,6	8,30	7,1	23,6	8,19
3	7,2	23,4	8,13	6,9	23,4	7,99	7,4	23,4	8,04	7,1	23,6	8,04
4	7,3	23,8	8,23	7,5	23,8	7,81	7,5	24,0	7,91	7,0	23,9	7,92
5	7,1	24,1	7,86	7,1	24,0	7,81	6,0	23,8	7,80	7,1	23,9	7,71
6	7,0	23,7	7,73	6,7	24,0	7,70	6,8	24,9	8,14	6,7	24,6	7,77
7	5,1	24,5	7,74	5,3	24,6	7,60	5,4	24,9	7,43	5,3	24,9	7,36
8	5,2	25,5	7,85	6,1	25,2	7,76	6,7	25,3	7,67	6,8	25,9	7,64
9	5,8	25,2	7,69	5,5	25,5	7,63	5,7	26,1	7,65	6,0	26,1	7,65
10	5,6	24,7	7,70	5,7	24,3	7,68	5,8	24,6	7,58	6,2	25,3	7,43
11	5,5	24,9	7,75	5,5	24,8	7,61	5,7	24,7	7,55	6,4	24,7	7,44
12	5,7	24,6	7,55	5,7	24,6	7,6	6,0	25,6	7,65	6,5	25,8	7,56
13	5,8	24,9	7,76	5,8	24,9	7,59	6,4	26,4	7,66	6,7	26,3	7,45
14	6,3	24,6	7,84	6,7	24,5	7,71	6,8	24,9	7,48	6,9	25,9	7,64
PROMEDIO	6,3	24,4	7,9	6,3	24,4	7,8	6,4	24,7	7,8	6,6	24,9	7,71

## Anexo 5.Registro de resultados de crecimiento y supervivencia

Tratamientos	Repetición	Peso inicial	Individuos inicial	Peso final	Individuos final
Titanio	R1	0,51	20	0,72	19
	R2	0,51	20	0,70	18
	R3	0,51	20	0,68	16
	Promedio	0,51	20	0,70	0,18
Aluminio	R1	0,52	20	0,74	16
	R2	0,47	20	0,65	18
	R3	0,48	20	0,59	18
	Promedio	0,49	20	0,66	0,17
Aireación convencional	R1	0,51	20	0,92	14
	R2	0,56	20	0,77	17
	R3	0,50	20	0,68	16
	Promedio	0,52	20	0,79	0,16

**Tabla 11**

*Análisis de varianza ( $\alpha=0,05$ ) de los parámetros de oxígeno, temperatura y pH durante la pre-activación del sistema de aireación*

		<b>ANOVA</b>			
		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F
OXIGENO_DIA_0_HOR A_7	Entre grupos	1,362	2	,681	3,096
	Dentro de grupos	1,320	6	,220	
	Total	2,682	8		
TEMPERATURA_DIA_0 _HORA_7	Entre grupos	1,349	2	,674	14,452
	Dentro de grupos	,280	6	,047	
	Total	1,629	8		
pH_DIA_0_HORA_7	Entre grupos	,062	2	,031	13,042
	Dentro de grupos	,014	6	,002	
	Total	,076	8		
OXIGENO_DIA_0_HOR A_10	Entre grupos	,027	2	,013	,343
	Dentro de grupos	,233	6	,039	
	Total	,260	8		
TEMPERATURA__DIA_ 0_HORA_10	Entre grupos	,536	2	,268	4,820
	Dentro de grupos	,333	6	,056	
	Total	,869	8		
pH__DIA_0_HORA_10	Entre grupos	,162	2	,081	23,361
	Dentro de grupos	,021	6	,003	
	Total	,183	8		
OXIGENO_DIA_0_HOR A_13	Entre grupos	,000	2	,000	
	Dentro de grupos	,400	6	,067	
	Total	,400	8		
TEMPERATURA_DIA_0 _HORA_13	Entre grupos	,862	2	,431	12,933
	Dentro de grupos	,200	6	,033	
	Total	1,062	8		
pH_DIA_0_HORA_13	Entre grupos	,100	2	,050	19,960
	Dentro de grupos	,015	6	,002	
	Total	,115	8		
OXIGENO_DIA_0_HOR A_16	Entre grupos	,202	2	,101	1,820
	Dentro de grupos	,333	6	,056	
	Total	,536	8		
TEMPERATURA_DIA_0 _HORA_16	Entre grupos	,927	2	,463	16,038
	Dentro de grupos	,173	6	,029	
	Total	1,100	8		
pH_DIA_0_HORA_16	Entre grupos	,038	2	,019	11,311
	Dentro de grupos	,010	6	,002	
	Total	,048	8		

**Tabla 12**

*Subgrupos según la prueba post hoc HSD de Tukey ( $\alpha=0,05$ ): Oxígeno durante la pre-activación del sistema de aireación*

<b>OXIGENO_DIA_0_HORA_7</b>		
HSD Tukey <sup>a</sup>		
		Subconjunto para alfa = 0,05
TRATAMIENTO	N	1
T2 (EMISOR DE ALUMINIO)	3	5,0333
T1 (EMISOR DE TITANIO)	3	5,6667
T3 (AIREACIÓN CONVENCIONAL)	3	5,9667
Sig.		,111
<b>OXIGENO_DIA_0_HORA_10</b>		
HSD Tukey <sup>a</sup>		
		Subconjunto para alfa = 0,05
TRATAMIENTO	N	1
T1 (EMISOR DE TITANIO)	3	5,1667
T3 (AIREACIÓN CONVENCIONAL)	3	5,2333
T2 (EMISOR DE ALUMINIO)	3	5,3000
Sig.		,701
<b>OXIGENO_DIA_0_HORA_13</b>		
HSD Tukey <sup>a</sup>		
		Subconjunto para alfa = 0,05
TRATAMIENTO	N	1
T1 (EMISOR DE TITANIO)	3	5,3333
T2 (EMISOR DE ALUMINIO)	3	5,3333
T3 (AIREACIÓN CONVENCIONAL)	3	5,3333
Sig.		1,000
<b>OXIGENO_DIA_0_HORA_16</b>		
HSD Tukey <sup>a</sup>		
		Subconjunto para alfa = 0,05
TRATAMIENTO	N	1
T1 (EMISOR DE TITANIO)	3	4,8667
T2 (EMISOR DE ALUMINIO)	3	5,1667
T3 (AIREACIÓN CONVENCIONAL)	3	5,2000
Sig.		,269

**Tabla 13**

*Análisis de varianza ( $\alpha=0,05$ ) de los parámetros de oxígeno, temperatura y pH durante la post-activación del sistema de aireación*

		<b>ANOVA</b>				
		Suma de	gl	Media	F	Sig.
		cuadrados		cuadrática		
OXIGENO_DIA_1_14_H ORA_7	Entre grupos	12,740	2	6,370	173,727	
	Dentro de grupos	,220	6	,037		
	Total	12,960	8			
TEMPERATURA_DIA_1 _14_HORA_7	Entre grupos	,736	2	,368	36,778	
	Dentro de grupos	,060	6	,010		
	Total	,796	8			
pH_DIA_1_14_HORA_7	Entre grupos	,140	2	,070	7,000	0,27
	Dentro de grupos	,060	6	,010		
	Total	,200	8			
OXIGENO_DIA_1_14_H ORA_10	Entre grupos	11,562	2	5,781	173,433	
	Dentro de grupos	,200	6	,033		
	Total	11,762	8			
TEMPERATURA__DIA_ 1_14_HORA_10	Entre grupos	,807	2	,403	45,375	
	Dentro de grupos	,053	6	,009		
	Total	,860	8			
pH__DIA_1_14_HORA_ 10	Entre grupos	,142	2	,071	6,400	,033
	Dentro de grupos	,067	6	,011		
	Total	,209	8			
OXIGENO_DIA_1_14_H ORA_13	Entre grupos	9,496	2	4,748	147,345	
	Dentro de grupos	,193	6	,032		
	Total	9,689	8			
TEMPERATURA_DIA_1 _14_HORA_13	Entre grupos	,669	2	,334	20,067	,002
	Dentro de grupos	,100	6	,017		
	Total	,769	8			
pH_DIA_1_14_HORA_1 3	Entre grupos	,087	2	,043	7,800	,021
	Dentro de grupos	,033	6	,006		
	Total	,120	8			
OXIGENO_DIA_1_14_H ORA_16	Entre grupos	11,216	2	5,608	157,719	
	Dentro de grupos	,213	6	,036		
	Total	11,429	8			
TEMPERATURA_DIA_1 _14_HORA_16	Entre grupos	,842	2	,421	63,167	
	Dentro de grupos	,040	6	,007		
	Total	,882	8			
pH_DIA_1_14_HORA_1 6	Entre grupos	,100	2	,050	7,443	,024
	Dentro de grupos	,040	6	,007		
	Total	,140	8			

**Tabla 14**

*Subgrupos según la prueba post hoc HSD de Tukey ( $\alpha=0,05$ ): Oxígeno durante la post-activación del sistema de aireación*

<b>OXIGENO_DIA_1_14_HORA_7</b>			
HSD Tukey <sup>a</sup>			
TRATAMIENTO	N	Subconjunto para alfa = 0,05	
		1	2
T2 (EMISOR DE ALUMINIO)	3	3,3667	
T1 (EMISOR DE TITANIO)	3	3,7667	
T3 (AIREACIÓN CONVENCIONAL)	3		6,0667
Sig.		,095	1,000

<b>OXIGENO_DIA_1_14_HORA_10</b>			
HSD Tukey <sup>a</sup>			
TRATAMIENTO	N	Subconjunto para alfa = 0,05	
		1	2
T2 (EMISOR DE ALUMINIO)	3	3,5667	
T1 (EMISOR DE TITANIO)	3	3,9333	
T3 (AIREACIÓN CONVENCIONAL)	3		6,1333
Sig.		,107	1,000

<b>OXIGENO_DIA_1_14_HORA_13</b>			
HSD Tukey <sup>a</sup>			
TRATAMIENTO	N	Subconjunto para alfa = 0,05	
		1	2
T2 (EMISOR DE ALUMINIO)	3	3,9333	
T1 (EMISOR DE TITANIO)	3	4,2000	
T3 (AIREACIÓN CONVENCIONAL)	3		6,2333
Sig.		,242	1,000

<b>OXIGENO_DIA_1_14_HORA_16</b>			
HSD Tukey <sup>a</sup>			
TRATAMIENTO	N	Subconjunto para alfa = 0,05	
		1	2
T2 (EMISOR DE ALUMINIO)	3	3,9000	
T1 (EMISOR DE TITANIO)	3	4,3667	
T3 (AIREACIÓN CONVENCIONAL)	3		6,4667
Sig.		,052	1,000

**Tabla 15**

*Subgrupos según la prueba post hoc HSD de Tukey ( $\alpha=0,05$ ): Temperatura durante la pre-activación del sistema de aireación.*

<b>TEMPERATURA_DIA_0_HORA_7</b>			
HSD Tukey <sup>a</sup>			
Subconjunto para alfa = 0,05			
TRATAMIENTO	N	1	2
T3 (AIREACIÓN CONVENCIONAL)	3	24,5667	
T2 (EMISOR DE ALUMINIO)	3	24,6667	
T1 (EMISOR DE TITANIO)	3		25,4333
Sig.		,842	1,000

<b>TEMPERATURA__DIA_0_HORA_10</b>			
HSD Tukey <sup>a</sup>			
Subconjunto para alfa = 0,05			
TRATAMIENTO	N	1	2
T3 (AIREACIÓN CONVENCIONAL)	3		24,8000
T2 (EMISOR DE ALUMINIO)	3		24,8333
T1 (EMISOR DE TITANIO)	3		25,3333
Sig.			,072

<b>TEMPERATURA_DIA_0_HORA_13</b>			
HSD Tukey <sup>a</sup>			
Subconjunto para alfa = 0,05			
TRATAMIENTO	N	1	2
T3 (AIREACIÓN CONVENCIONAL)	3	24,8333	
T2 (EMISOR DE ALUMINIO)	3	25,0333	
T1 (EMISOR DE TITANIO)	3		25,5667
Sig.		,425	1,000

<b>TEMPERATURA_DIA_0_HORA_16</b>			
HSD Tukey <sup>a</sup>			
Subconjunto para alfa = 0,05			
TRATAMIENTO	N	1	2
T3 (AIREACIÓN CONVENCIONAL)	3	24,8333	
T2 (EMISOR DE ALUMINIO)	3	25,0667	
T1 (EMISOR DE TITANIO)	3		25,6000
Sig.		,287	1,000

**Tabla 16**

*Según la prueba post hoc HSD de Tukey ( $\alpha=0,05$ ): Temperatura durante la post-activación del sistema de aireación*

<b>TEMPERATURA_DIA_1_14_HORA_7</b>				
HSD Tukey <sup>a</sup>				
Subconjunto para alfa = 0,05				
TRATAMIENTO	N	1	2	3
T3 (AIREACIÓN CONVENCIONAL)	3	24,4667		
T2 (EMISOR DE ALUMINIO)	3		24,8333	
T1 (EMISOR DE TITANIO)	3			25,1667
Sig.		1,000	1,000	1,000

<b>TEMPERATURA__DIA_1_14_HORA_10</b>				
HSD Tukey <sup>a</sup>				
Subconjunto para alfa = 0,05				
TRATAMIENTO	N	1	2	3
T3 (AIREACIÓN CONVENCIONAL)	3	24,4667		
T2 (EMISOR DE ALUMINIO)	3		24,8333	
T1 (EMISOR DE TITANIO)	3			25,2000
Sig.		1,000	1,000	1,000

<b>TEMPERATURA_DIA_1_14_HORA_13</b>				
HSD Tukey <sup>a</sup>				
Subconjunto para alfa = 0,05				
TRATAMIENTO	N	1	2	
T3 (AIREACIÓN CONVENCIONAL)	3	24,6667		
T2 (EMISOR DE ALUMINIO)	3			25,0333
T1 (EMISOR DE TITANIO)	3			25,3333
Sig.		1,000		,066

<b>TEMPERATURA_DIA_1_14_HORA_16</b>				
HSD Tukey <sup>a</sup>				
Subconjunto para alfa = 0,05				
TRATAMIENTO	N	1	2	3
T3 (AIREACIÓN CONVENCIONAL)	3	24,9333		
T2 (EMISOR DE ALUMINIO)	3		25,4333	
T1 (EMISOR DE TITANIO)	3			25,6667
Sig.		1,000	1,000	1,000

**Tabla 17**

*Subgrupos según la prueba post hoc HSD de Tukey ( $\alpha=0,05$ ): pH durante la pre-activación del sistema de aireación*

<b>pH_DIA_0_HORA_7</b>			
HSD Tukey <sup>a</sup>			
Subconjunto para alfa = 0,05			
TRATAMIENTO	N	1	2
T3 (AIREACIÓN CONVENCIONAL)	3	7,9900	
T2 (EMISOR DE ALUMINIO)	3	8,0900	8,0900
T1 (EMISOR DE TITANIO)	3		8,1933
Sig.		,101	,090

<b>pH_DIA_0_HORA_10</b>			
HSD Tukey <sup>a</sup>			
Subconjunto para alfa = 0,05			
TRATAMIENTO	N	1	2
T3 (AIREACIÓN CONVENCIONAL)	3	7,9600	
T2 (EMISOR DE ALUMINIO)	3	8,0533	
T1 (EMISOR DE TITANIO)	3		8,2800
Sig.		,209	1,000

<b>pH_DIA_0_HORA_13</b>			
HSD Tukey <sup>a</sup>			
Subconjunto para alfa = 0,05			
TRATAMIENTO	N	1	2
T3 (AIREACIÓN CONVENCIONAL)	3	8,0967	
T2 (EMISOR DE ALUMINIO)	3	8,1667	
T1 (EMISOR DE TITANIO)	3		8,3467
Sig.		,275	1,000

<b>pH_DIA_0_HORA_16</b>			
HSD Tukey <sup>a</sup>			
Subconjunto para alfa = 0,05			
TRATAMIENTO	N	1	2
T3 (AIREACIÓN CONVENCIONAL)	3	8,1800	
T2 (EMISOR DE ALUMINIO)	3	8,2200	
T1 (EMISOR DE TITANIO)	3		8,3333
Sig.		,497	1,000

**Tabla 18**

*Subgrupos según la prueba post hoc HSD de Tukey ( $\alpha=0,05$ ): pH durante la post-activación del sistema de aireación*

<b>pH_DIA_1_14_HORA_7</b>			
HSD Tukey <sup>a</sup>			
		Subconjunto para alfa = 0,05	
TRATAMIENTO	N	1	2
T2 (EMISOR DE ALUMINIO)	3	7,6000	
T1 (EMISOR DE TITANIO)	3	7,8000	7,8000
T3 (AIREACIÓN CONVENCIONAL)	3		7,9000
Sig.		,109	,483

<b>pH_DIA_1_14_HORA_10</b>			
HSD Tukey <sup>a</sup>			
		Subconjunto para alfa = 0,05	
TRATAMIENTO	N	1	2
T2 (EMISOR DE ALUMINIO)	3	7,5333	
T1 (EMISOR DE TITANIO)	3		7,8000
T3 (AIREACIÓN CONVENCIONAL)	3		7,8000
Sig.		1,000	1,000

<b>pH_DIA_1_14_HORA_13</b>			
HSD Tukey <sup>a</sup>			
		Subconjunto para alfa = 0,05	
TRATAMIENTO	N	1	2
T2 (EMISOR DE ALUMINIO)	3	7,5667	
T3 (AIREACIÓN CONVENCIONAL)	3	7,7333	7,7333
T1 (EMISOR DE TITANIO)	3		7,8000
Sig.		,075	,551

<b>pH_DIA_1_14_HORA_16</b>			
HSD Tukey <sup>a</sup>			
		Subconjunto para alfa = 0,05	
TRATAMIENTO	N	1	2
T2 (EMISOR DE ALUMINIO)	3	7,5667	
T3 (AIREACIÓN CONVENCIONAL)	3	7,6700	7,6700
T1 (EMISOR DE TITANIO)	3		7,8233
Sig.		,338	,133

**Tabla 19**

*Análisis de varianza ( $\alpha=0,05$ ) de los parámetros de amonio, nitrito, nitrato, dureza y calcio durante la pre-activación del sistema de aireación*

<b>ANOVA</b>						
		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
AMONIO_	Entre grupos	,000	2	,000	.	.
DIA_0	Dentro de grupos	,000	6	,000		
	Total	,000	8			
NITRITO_	Entre grupos	,000	2	,000	.	.
DIA_0	Dentro de grupos	,000	6	,000		
	Total	,000	8			
NITRATO	Entre grupos	,000	2	,000	.	.
_DIA_0	Dentro de grupos	,000	6	,000		
	Total	,000	8			
DUREZA_	Entre grupos	4,667	2	2,333	4,200	,072
DIA_0	Dentro de grupos	3,333	6	,556		
	Total	8,000	8			
CALCIO_	Entre grupos	266,667	2	133,333	,600	,579
DIA_0	Dentro de grupos	1333,333	6	222,222		
	Total	1600,000	8			

**Tabla 20**

*Análisis de varianza ( $\alpha=0,05$ ) de los parámetros de amonio, nitrito, nitrato, dureza y calcio durante la post-activación del sistema de aireación*

		<b>ANOVA</b>				
		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
AMONIO_DIA_4	Entre grupos	,000	2	,000	.	.
	Dentro de grupos	,000	6	,000		
	Total	,000	8			
NITRITO_DIA_4	Entre grupos	,000	2	,000	.	.
	Dentro de grupos	,000	6	,000		
	Total	,000	8			
NITRATO_DIA_4	Entre grupos	,000	2	,000	.	.
	Dentro de grupos	,000	6	,000		
	Total	,000	8			
DUREZA_DIA_4	Entre grupos	2,667	2	1,333	1,500	,296
	Dentro de grupos	5,333	6	,889		
	Total	8,000	8			
CALCIO_DIA_4	Entre grupos	88,889	2	44,444	,500	,630
	Dentro de grupos	533,333	6	88,889		
	Total	622,222	8			
AMONIO_DIA_8	Entre grupos	,001	2	,001	2,703	,146
	Dentro de grupos	,001	6	,000		
	Total	,002	8			
NITRITO_DIA_8	Entre grupos	,000	2	,000	.	.
	Dentro de grupos	,000	6	,000		
	Total	,000	8			
NITRATO_DIA_8	Entre grupos	,000	2	,000	.	.
	Dentro de grupos	,000	6	,000		
	Total	,000	8			
DUREZA_DIA_8	Entre grupos	,889	2	,444	,148	,865
	Dentro de grupos	18,000	6	3,000		
	Total	18,889	8			
CALCIO_DIA_8	Entre grupos	88,889	2	44,444	,500	,630
	Dentro de grupos	533,333	6	88,889		
	Total	622,222	8			
AMONIO_DIA_12	Entre grupos	,030	2	,015	19,599	,002
	Dentro de grupos	,005	6	,001		
	Total	,035	8			
NITRITO_DIA_12	Entre grupos	,000	2	,000	.	.
	Dentro de grupos	,000	6	,000		
	Total	,000	8			
NITRATO_DIA_12	Entre grupos	,000	2	,000	.	.
	Dentro de grupos	,000	6	,000		
	Total	,000	8			
DUREZA_DIA_12	Entre grupos	3,556	2	1,778	4,000	,079
	Dentro de grupos	2,667	6	,444		
	Total	6,222	8			
CALCIO_DIA_12	Entre grupos	88,889	2	44,444	,500	,630
	Dentro de grupos	533,333	6	88,889		
	Total	622,222	8			

**Tabla 21**

*Subgrupos según la prueba post hoc HSD de Tukey ( $\alpha=0,05$ ): Amonio durante la post-activación del sistema de aireación*

<b>AMONIO_DIA_8</b>			
HSD Tukey <sup>a</sup>			
Subconjunto para alfa = 0,05			
TRATAMIENTOS	N	1	
T2 (EMISOR DE ALUMINIO)	3	,01100	
T1 (EMISOR DE TITANIO)	3	,02400	
T3 (AIREACIÓN CONVENCIONAL)	3	,03800	
Sig.		,128	
<b>AMONIO_DIA_12</b>			
HSD Tukey <sup>a</sup>			
Subconjunto para alfa = 0,05			
TRATAMIENTOS	N	1	2
T2 (EMISOR DE ALUMINIO)	3	,01400	
T1 (EMISOR DE TITANIO)	3	,04067	
T3 (AIREACIÓN CONVENCIONAL)	3		,14800
Sig.		,507	1,000

**Tabla 22**

Subgrupos según la prueba post hoc HSD de Tukey ( $\alpha=0,05$ ): Dureza y calcio durante la pre-activación del sistema de aireación

<b>DUREZA_DIA_0</b>		
Concentración de extracto de cefalotórax (%)	N	Subconjunto para alfa = 0,05
		1
T3 (Aireación convencional)	3	12,3333
T2 (emisor de aluminio)	3	12,6667
T1 (emisor de titanio)	3	14,0000
Sig.		0,075
<b>CALCIO_DIA_0</b>		
Concentración de extracto de cefalotórax (%)	N	Subconjunto para alfa = 0,05
		1
T1 (emisor de titanio)	3	46,6667
T3 (Aireación convencional)	3	53,3333
T2 (emisor de aluminio)	3	60,0000
Sig.		0,551

**Tabla 23**

*Subgrupos según la prueba post hoc HSD de Tukey ( $\alpha=0,05$ ): Dureza durante la post-activación del sistema de aireación*

<b>DUREZA_DIA_4</b>		
HSD Tukey <sup>a</sup>		
TRATAMIENTOS	N	Subconjunto para alfa = 0,05
		1
T2 (EMISOR DE ALUMINIO)	3	10,6667
T1 (EMISOR DE TITANIO)	3	11,3333
T3 (AIREACIÓN CONVENCIONAL)	3	12,0000
Sig.		,269
<b>DUREZA_DIA_8</b>		
HSD Tukey <sup>a</sup>		
TRATAMIENTOS	N	Subconjunto para alfa = 0,05
		1
T1 (EMISOR DE TITANIO)	3	10,6667
T2 (EMISOR DE ALUMINIO)	3	10,6667
T3 (AIREACIÓN CONVENCIONAL)	3	11,3333
Sig.		,887
<b>DUREZA_DIA_12</b>		
HSD Tukey <sup>a</sup>		
TRATAMIENTOS	N	Subconjunto para alfa = 0,05
		1
T1 (EMISOR DE TITANIO)	3	12,0000
T2 (EMISOR DE ALUMINIO)	3	12,0000
T3 (AIREACIÓN CONVENCIONAL)	3	13,3333
Sig.		,109

**Tabla 24**

*Subgrupos según la prueba post hoc HSD de Tukey ( $\alpha=0,05$ ): Calcio durante la post-activación del sistema de aireación*

<b>CALCIO_DIA_4</b>		
HSD Tukey <sup>a</sup>		
TRATAMIENTOS	N	Subconjunto para alfa = 0,05
		1
T1 (EMISOR DE TITANIO)	3	40,0000
T2 (EMISOR DE ALUMINIO)	3	46,6667
T3 (AIREACIÓN CONVENCIONAL)	3	46,6667
Sig.		,679
<b>CALCIO_DIA_8</b>		
HSD Tukey <sup>a</sup>		
TRATAMIENTOS	N	Subconjunto para alfa = 0,05
		1
T1 (EMISOR DE TITANIO)	3	40,0000
T2 (EMISOR DE ALUMINIO)	3	46,6667
T3 (AIREACIÓN CONVENCIONAL)	3	46,6667
Sig.		,679
<b>CALCIO_DIA_12</b>		
HSD Tukey <sup>a</sup>		
TRATAMIENTOS	N	Subconjunto para alfa = 0,05
		1
T3 (AIREACIÓN CONVENCIONAL)	3	40,0000
T1 (EMISOR DE TITANIO)	3	46,6667
T2 (EMISOR DE ALUMINIO)	3	46,6667
Sig.		,679

**Tabla 25***Análisis de varianza ( $\alpha=0,05$ ) peso inicial y peso final*

		<b>ANOVA</b>				
		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
PESO_INICIO	Entre grupos	,001	2	,000	1,536	,289
	Dentro de grupos	,002	6	,000		
	Total	,003	8			
PESO_FINAL	Entre grupos	,027	2	,013	1,918	,227
	Dentro de grupos	,042	6	,007		
	Total	,068	8			

**Tabla 26**

*Subgrupos según la prueba post hoc HSD de Tukey ( $\alpha=0,05$ ): Peso inicial tras la activación del sistema de aireación*

<b>PESO_INICIO</b>		
HSD Tukey <sup>a</sup>		
		Subconjunto para alfa = 0,05
TRATAMIENTO	N	1
T2 (EMISOR DE ALUMINIO)	3	,4900
T1 (EMISOR DE TITANIO)	3	,5100
T3 (AIREACIÓN CONVENCIONAL)	3	,5133
Sig.		,308

**Tabla 27**

*Subgrupos según la prueba post hoc HSD de Tukey ( $\alpha=0,05$ ): Peso final tras la activación del sistema de aireación*

<b>PESO_FINAL</b>		
HSD Tukey <sup>a</sup>		
		Subconjunto para alfa = 0,05
TRATAMIENTO	N	1
T2 (EMISOR DE ALUMINIO)	3	,6600
T1 (EMISOR DE TITANIO)	3	,7000
T3 (AIREACIÓN CONVENCIONAL)	3	,7900
Sig.		,215

**Tabla 28***Análisis de varianza ( $\alpha=0,05$ ) Supervivencia inicial y final*

<b>ANOVA</b>						
		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
%SUPERVIVENCIA INICIAL	Entre grupos	,000	2	,000	.	.
	Dentro de grupos	,000	6	,000		
	Total	,000	8			
%SUPERVIVENCIA FINAL	Entre grupos	172,222	2	86,111	1,722	,256
	Dentro de grupos	300,000	6	50,000		
	Total	472,222	8			

**Tabla 29***Subgrupos según la prueba post hoc HSD de Tukey ( $\alpha=0,05$ ): Supervivencia inicial tras la activación del sistema de aireación*

<b>%SUPERVIVENCIA FINAL</b>		
HSD Tukey <sup>a</sup>		
		Subconjunto para alfa = 0,05
TRATAMIENTO	N	1
T3 (AIREACIÓN CONVENCIONAL)	3	78,3333
T2 (EMISOR DE ALUMINIO)	3	86,6667
T1 (EMISOR DE TITANIO)	3	88,3333
Sig.		,269