



DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

OPCIÓN 1. - TESIS

TRABAJO PROFESIONAL

**“APROVECHAMIENTO DE LODOS RESIDUALES AVÍCOLAS
MEDIANTE PROCESOS AEROBIOS Y ANAEROBIOS PARA LA
OBTENCIÓN DE BIOMASAS CON POTENCIAL DE CONSUMO
ANIMAL”**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA**

PRESENTA:

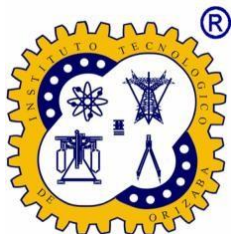
ING. ALONDRA SÁNCHEZ SOLANO

DIRECTOR DE TESIS:

M.C. MARÍA ELENA GARCÍA REYES

CODIRECTOR DE TESIS:

DR. JUAN MANUEL MÉNDEZ CONTRERAS



ORIZABA, VERACRUZ, MÉXICO

MARZO 2026



Instituto Tecnológico de Orizaba
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Orizaba, Veracruz, **11/marzo/2026**
Dependencia: División de Estudios de
Posgrado e Investigación.
Asunto: Autorización de Impresión
Opción: I

ALONDRA SÁNCHEZ SOLANO
CANDIDATO A GRADO DE MAESTRA EN
CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA
PRESENTE

De acuerdo con el Reglamento de Titulación vigente de los Centros de Enseñanza Técnica Superior, dependiente de la Dirección General de Institutos Tecnológicos de la Secretaría de Educación Pública y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo respecto a su Trabajo Profesional titulado:

**APROVECHAMIENTO DE LODOS RESIDUALES AVÍCOLAS MEDIANTE PROCESOS AEROBIOS Y ANAEROBIOS PARA LA
OBTENCIÓN DE BIOMASAS CON POTENCIAL DE CONSUMO ANIMAL**

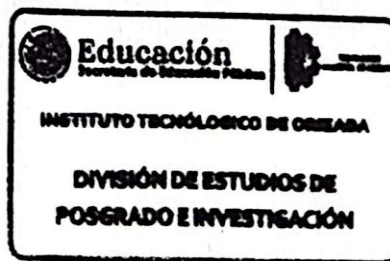
Comunico a usted que este Departamento concede su autorización para que proceda a la impresión del mismo.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica



DR. OSCAR BÁEZ SENTIES
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN

ccp. Archivo
OBS/NAVC





Instituto Tecnológico de Orizaba
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Orizaba, Veracruz, 26/enero/2026
Asunto: revisión de trabajo escrito

DR. OSCAR BAEZ SENTIES
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
PRESENTE

Los que suscriben, miembros del jurado, han realizado la revisión de la Tesis del (la) C.

ALONDRA SÁNCHEZ SOLANO

La cual lleva el título de:

APROVECHAMIENTO DE LODOS RESIDUALES AVÍCOLAS MEDIANTE PROCESOS AEROBIOS Y ANAEROBIOS PARA LA
OBTENCIÓN DE BIOMASAS CON POTENCIAL DE CONSUMO ANIMAL

Y concluyen que se acepta.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica®

PRESIDENTE: M.C. MARÍA ELENA GARCÍA REYES

SECRETARIO: DR. JUAN MANUEL MÉNDEZ CONTRERAS

VOCAL: DR. ALEJANDRO ALVARADO LASSMAN

VOCAL SUP.: M.I. NORMA ALEJANDRA VALLEJO CANTÚ

FIRMA

FIRMA

FIRMA

FIRMA

TA-09-18



2026
año de
**Margarita
Maza**





LICENCIA DE USO OTORGADA POR Alondra Sánchez Solano de nacionalidad mexicana mayor de edad, con domicilio ubicado en U.H. Pluviosilla, Retorno 4, no. 38 A, CP. 94329, Orizaba Veracruz, en mi calidad de titular de los derechos patrimoniales y morales y autor de la tesis denominada **“Aprovechamiento de lodos residuales avícolas mediante procesos aerobios y anaerobios para la obtención de biomásas con potencial de consumo animal”** en adelante **“LA OBRA”** quien para todos los fines del presente documento se denominará **“EL AUTOR Y/O EL TITULAR”**, a favor del Instituto Tecnológico de Orizaba del Tecnológico Nacional de México, la cual se registrará por las cláusulas siguientes:

PRIMERA -OBJETO: **“EL AUTOR Y/O TITULAR”**, mediante el presente documento otorga al Instituto Tecnológico de Orizaba del Tecnológico Nacional de México, licencia de uso gratuita e indefinida respecto de **“LA OBRA”**, para almacenar, preservar, publicar, reproducir y/o divulgar la misma, con fines académicos, por cualquier medio en forma física y a través del repositorio institucional y del repositorio nacional, éste último consultable en la página: (<https://www.repositorionacionalcti.mx/>).

SEGUNDA - TERRITORIO: La presente licencia se otorga, de manera no exclusiva, sin limitación geográfica o territorial alguna, de manera gratuita e indefinida.

TERCERA -ALCANCE: La presente licencia contempla la autorización para formato uso de **“LA OBRA”** en cualquier formato o soporte material y se extiende a la utilización, de manera enunciativa más no limitativa a los siguientes medios: óptico, magnético, electrónico, virtual (red), mensaje de datos o similar conocido por conocerse. en medio óptico, magnético, electrónico, en red, mensajes de datos o similar, conocido o por conocerse.

CUARTA - EXCLUSIVIDAD: La presente licencia de uso aquí establecida no implica exclusividad en favor del Instituto Tecnológico de Orizaba; por lo tanto, **“EL AUTOR Y/O TITULAR”** conserva los derechos patrimoniales y morales de **“LA OBRA”**, objeto del presente documento.

QUINTA - CRÉDITOS: El Instituto Tecnológico de Orizaba y/o el Tecnológico Nacional de México reconoce que el **“AUTOR Y/O TITULAR”** es el único, primigenio y perpetuo titular de los derechos morales sobre **“LA OBRA”**; por lo tanto, siempre deberá otorgarle los créditos correspondientes por la autoría de la misma.

SEXTA - AUTORÍA: **“EL AUTOR Y/O TITULAR”** manifiesta ser el único titular de los derechos de autor que derivan de **“LA OBRA”** y declara que el material objeto del presente fue realizado por él, sin violentar o usurpar derechos de propiedad intelectual de terceros; por lo tanto, en caso de controversia sobre los mismos, se obliga a ser el único responsable.

Dado en la Ciudad de Orizaba, a los días 20 del mes de marzo de 2026.

“EL AUTOR Y/O TITULAR”

“EL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ORIZABA”

DEDICATORIA

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por darme la sabiduría, las oportunidades y las bendiciones que me han permitido concluir este trabajo. Sin su dirección y fortaleza, este logro no se habría alcanzado.

A mi madre, quien me educó con un amor y una fuerza incomparables. Te agradezco por siempre brindarme tu apoyo, por motivarme a perseguir mis sueños y por ser mi fuente de inspiración más grande. Todo lo que he conseguido también es un logro tuyo.

A Joaquín, que irrumpió en mi vida de manera hermosa e inesperada. Gracias por tu apoyo, tu afecto y por ser un soporte fundamental en mi desarrollo tanto a nivel personal como profesional. Mucho ha significado tu presencia para mí.

A mi perrita Ponyo, mi compañera leal, por estar conmigo en los desvelos, por iluminar mis días y ser mi compañía en cada fase de este proceso.

A mis directores de tesis, por su orientación, sus enseñanzas no solo académicas, y su constante apoyo durante el proceso de investigación. La ejecución de este proyecto fue posible gracias a su paciencia y dedicación.

A mis compañeros de laboratorio, por su apoyo, compañía y amistad. Les agradezco por acompañarme en este trayecto, por cada consejo, cada risa y cada instante que aligeraron mi trabajo.

RECONOCIMIENTOS

Expreso mi más sincero agradecimiento a mi directora de tesis, la Mtra. María Elena García Reyes, por su valiosa orientación, apoyo constante y dedicación durante el desarrollo de esta investigación.

De igual manera, agradezco profundamente a mi codirector, el Dr. Juan Manuel Méndez Contreras, por su asesoría, disposición y aportaciones científicas, las cuales enriquecieron significativamente este proyecto de investigación. Sus conocimientos, observaciones y acompañamiento académico fueron fundamentales para la realización y culminación de este trabajo.

Asimismo, agradezco al Laboratorio de Ambiental II del Instituto Tecnológico de Orizaba por las facilidades brindadas, el acceso a sus instalaciones y el apoyo técnico que permitió llevar a cabo las actividades experimentales necesarias para el desarrollo de este estudio.

Finalmente, expreso mi gratitud a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo económico otorgado mediante la beca que hizo posible la realización de mis estudios de posgrado y el desarrollo de este trabajo de investigación.

RESUMEN

Biotransformación de lodos residuales mediante procesos aerobio y anaerobio para la producción de biomasa con aplicación en la alimentación animal

Elaborada por: Ing. Alondra Sanchez Solano

Dirigida por: M.C. María Elena García Reyes

Dr. Juan Manuel Méndez Contreras

La presente investigación aborda la problemática medioambiental que generan los lodos residuales de la industria avícola y propone una alternativa sustentable para biotransformarlos en biomasa por medio de procesos aerobios empleando microorganismos microalgales y también procesos anaerobios con bacterias probióticas y así obtener biomásas con el potencial nutricional que pueden emplearse como suplemento en la alimentación animal. El objetivo de esta investigación fue analizar la biotransformación aerobia y anaerobia de los lodos residuales utilizando *Nannochloropsis oculata* y *Lactobacillus plantarum*, respectivamente, con el fin de obtener una biomasa rica en proteínas y sustancias bioactivas.

Primeramente se realizó una caracterización fisicoquímica y microbiológica del lodo residual avícola (LRA), el cual fue posteriormente pretratado térmicamente con el fin de conocer el estado y características iniciales del lodo y el efecto que tiene el tratamiento térmico en el LRA. Luego, se llevó a cabo la propagación de los microorganismos y su utilización en procesos de biotransformación bajo condiciones controladas, donde se evaluaron las mejores condiciones de operación evaluando la cantidad de inóculo microbiológico y cantidad de lodo LRA, para obtener el mejor rendimiento de biomásas producidas de ambos procesos respectivamente y evaluar su calidad, generando biomásas con un porcentaje de proteínas y nutrientes óptimos.

ABSTRACT

Biotransformation of Residual Sludge Through Aerobic and Anaerobic Processes for Biomass Production with Application in Animal Feed

By: Ing. Alondra Sanchez Solano

Advisor(s):

M.C. María Elena García Reyes

Dr. Juan Manuel Méndez Contreras

This research addresses the environmental issues generated by residual sludge from the poultry industry and proposes a sustainable alternative to biotransform it into biomass through aerobic processes using microalgal microorganisms, as well as anaerobic processes employing probiotic bacteria, in order to obtain biomasses with nutritional potential that can be used as supplements in animal feed. The objective of this study was to analyze the aerobic and anaerobic biotransformation of residual sludge using *Nannochloropsis oculata* and *Lactobacillus plantarum*, respectively, with the aim of obtaining biomass rich in proteins and bioactive compounds.

First, a physicochemical and microbiological characterization of the residual sludge was conducted, followed by thermal pretreatment in order to determine the initial state and characteristics of the sludge and to assess the effect of thermal treatment on poultry residual sludge. Subsequently, the microorganisms were propagated and applied in biotransformation processes under controlled conditions, where optimal operating parameters were evaluated by assessing different microbial inoculum levels and sludge concentrations to achieve the highest biomass yield from both processes and to evaluate their quality, generating biomasses with optimal protein and nutrient contents.

INDICE

LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABLAS	xi
Determinación de ácido láctico producido del producto final del proceso anaerobio con <i>Lactobacillus plantarum Plantarum</i>	xi
Parámetros cinéticos del proceso de biotransformación aerobia de LRA y <i>N. oculata</i>	xi
Caracterización nutrimental de las biomاسas generadas del proceso de biotransformación de LRA con <i>L. plantarum</i> con tres niveles de inóculo	xi
Caracterización nutrimental de las biomاسas generadas del proceso de biotransformación de LRA con <i>N. oculata</i> con tres niveles de concentración de LRA	xi
Perfil nutricional de las biomاسas obtenidas en base seca de la presente investigación y su comparativa con núcleos minerales comerciales para la alimentación de pollos de engorde y cerdos en la etapa de crecimiento obtenido de los manuales veterinarios comerciales de National Research Council	xi
NOMENCLATURA	xii
INTRODUCCION	1
CAPITULO 1	3
FUNDAMENTOS TEÓRICOS	3
1.1 Antecedentes	2
1.2 Generalidades de la Gestión y Aprovechamiento de Residuos Orgánicos	2
1.2.1 Residuos orgánicos en el procesamiento avícola	2
1.2.3. Consumo de agua en la industria avícola	4
1.3. Introducción a la Industria Avícola en México	5
1.3.1. Importancia económica de la industria avícola en México	5
1.3.2 Requerimientos nutricionales de los pollos de engorde	5
1.3.3. Flujo del proceso de pollos en la industria.	7
1.3.4. Contribución al PIB nacional y generación de empleos	9
1.3.5. Volumen anual de producción avícola	10
1.3.6 Comparativa con otros sectores pecuarios	10
1.4. Impacto ambiental de los desechos y lodos residuales avícolas	11
1.4.1. Contaminación de Cuerpos de Agua	11

1.4.2. Emisión de Gases de Efecto Invernadero emitidos durante la descomposición anaerobia de los lodos	12
1.4.3. Proliferación de Enfermedades causada por lodos residuales	12
1.4.4. Impacto en comunidades cercanas a plantas de procesamiento.....	12
1.5. Economía Circular y Biotransformación de Residuos	13
1.5.1. Concepto de economía circular	13
1.5.2. Biotransformación de residuos en biomasa	14
1.6. Microalgas en la Biotransformación de Lodos Residuales.....	14
1.6.1. Descripción, Características y Beneficios de <i>Nannochloropsis oculata</i>	14
1.6.2. Biosíntesis de lípidos en <i>Nannochloropsis oculata</i>	15
1.6.3. Beneficios de su uso en procesos de biotransformación	15
1.6.4. Microalgas en Procesos de Biotransformación Aerobia.....	16
1.6.5. Funcionamiento y ventajas de la biotransformación aeróbica con microalgas	16
1.6.6. Aplicaciones de la Biomasa de <i>Nannochloropsis oculata</i> en la Alimentación Animal.....	17
1.6.7. Valor nutricional y beneficios para la salud animal	17
1.7. Bacterias Ácido-lácticas en Procesos Anaerobios de Biotransformación	19
1.7.2 Ruta metabólica de la conversión de aminoácidos a partir de la degradación de proteínas utilizando probióticos	20
1.7.3 Características de <i>Lactobacillus plantarum</i> en la Digestión Anaerobia.....	22
1.7.4. Uso de <i>Lactobacillus plantarum</i> en Procesos Anaerobios	22
1.7.5. Metabolismo y Adaptabilidad de <i>Lactobacillus plantarum</i>	23
1.7.6. Proceso de Biotransformación con Probióticos (<i>Lactobacillus plantarum</i>)	23
1.8. Comparación entre procesos aerobios y anaerobios en la biotransformación de LRA.....	24
1.8.1. Diferencias en el mecanismo de los procesos	24
1.8.2. Beneficios y Desventajas de Cada Proceso	24
1.9. Integración de <i>Lactobacillus plantarum</i> y <i>Nannochloropsis oculata</i> en Sistemas de Tratamiento de Residuos	25
1.9.1. Sinergia entre microalgas y bacterias en procesos biológicos.....	25
1.10. Biotransformación de Lodos Residuales en la Industria Avícola.....	26
1.10.1. Aplicación práctica en la industria avícola mexicana	26

1.10.2. Retos y oportunidades de la biotransformación en la industria.....	26
1.11. Beneficios del Uso de <i>Lactobacillus plantarum</i> y <i>Nannochloropsis oculata</i> en la Alimentación Animal.....	26
1.11.1. Efectos en el crecimiento, salud y productividad de aves.....	27
1.11.2. Comparación con otros suplementos alimenticios.....	28
CAPITULO 2	30
MATERIALES Y MÉTODOS	30
2.1 Recolección y caracterización de la muestra.....	32
Tabla 2.1 Descripción de caracterización fisicoquímica de LRA.....	33
2.2. Acondicionamiento de la muestra (tratamiento térmico).....	34
2.4. Proceso de fermentación anaerobia y proceso aerobio.....	36
2.5 Proceso de biotransformación del LRA mediante <i>Lactobacillus plantarum</i>	37
2.5.1 Obtención de los parámetros cinéticos del proceso anaerobio con <i>Lactobacillus plantarum</i>	38
Determinación de ácido láctico.....	39
2.6. Proceso de biotransformación de LRA mediante <i>Nannochloropsis oculata</i>	39
2.6.1 Obtención de parámetros cinéticos del proceso aerobio con <i>Nannochloropsis oculata</i>	41
2.7.1 Variables y parámetros del modelo Monod-Haldane.....	42
2.7.2 Parámetros del modelo de Luedeking-Piret.....	43
2.8 Acondicionamiento de biomاسas generadas de procesos anaerobio y aerobio en base seca.....	43
2.9 Evaluación nutricional de la biomasa generada mediante microalga y <i>Lactobacillus plantarum</i>	44
CAPITULO 3	45
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
3.1 Acondicionamiento de la muestra y caracterización fisicoquímica y microbiológica.....	46
3.1.1 Reducción de patógenos.....	47
3.1.2 Solubilización de materia orgánica y nutrientes.....	48
3.1.3 Mejora en la fermentabilidad y uso potencial en bioprocesos.....	48
3.1.4 Análisis comparativo con otros autores.....	49

3.2 Cinéticas de biotransformación del LRA con diferentes concentraciones de inóculo de <i>Lactobacillus plantarum</i>	52
3.3 Determinación de ácido láctico	55
3.4 Cinéticas de biotransformación de LRA con diferentes concentraciones de inóculo de <i>Nannochloropsis oculata</i>	57
3.4.1 Análisis de la DQO.....	59
3.4.2 Evolución del (COT): asimilación de carbono orgánico total.....	60
3.4.3. Carbohidratos: producción de metabolitos asociados al metabolismo microalgal	62
3.4.4. Densidad celular (Abs 679 nm): crecimiento de la biomasa	64
3.4.5. Relación entre el crecimiento microalgal y la remoción de materia orgánica	65
3.5. Obtención y análisis de biomásas generadas	66
3.5.1 Análisis de las propiedades nutricionales de la biomasa generada con <i>L. plantarum</i>	68
3.5.2 Análisis de las propiedades nutricionales de la biomasa generada con <i>N. oculata</i>	70
3.6. Comparativa de aporte nutricional de las biomásas producidas a partir de los procesos aerobios y anaerobios	72
CAPITULO 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	76
4.1 Caracterización fisicoquímica y microbiológicamente de los lodos residuales avícolas.....	77
4.2 Condiciones favorables para el crecimiento de <i>Lactobacillus plantarum</i> en los lodos residuales avícolas en condiciones anaerobias.....	77
4.3 Condiciones para el cultivo y producción de biomásas a partir de lodos residuales avícolas en procesos aerobios con <i>Nannochloropsis oculata</i>	78
4.4 Viabilidad y la calidad nutricional de las biomásas obtenidas como posibles suplementos alimenticios para aves.	79
4.5 Enfoque de economía circular para la valorización de biomasa derivada de biotransformación.....	80
4.6 Discusión integrada: Procesos con <i>Lactobacillus plantarum</i> y <i>Nannochloropsis oculata</i>	81

LISTA DE FIGURAS

Figura	Descripción	Pág.
	CAPITULO 1: FUNDAMENTOS TEORICOS	
1.1	Grupos nutricionales esenciales para el desarrollo y crecimiento de las aves de engorde	6
1.2	Proceso de una planta procesadora avícola	9
1.3	Metabolitos producidos por microalgas	18
1.4	Ruta metabólica de la conversión de aminoácidos a partir de la degradación de proteínas utilizando probióticos adaptado de Wang <i>et al.</i> (2024).	20
	CAPITULO 2: MATERIALES Y METODOS	
2.1	Metodología general para el proceso de biotransformación de LRA	32
2.2	Pretratamiento térmico para la inactivación de patógenos presentes en LRA	35
2.3	Cultivo y propagación de <i>L. Plantarum</i>	36
2.4	Cultivo y propagación de <i>Nannochloropsis Oculata</i>	36
2.5	Cinética de biotransformación del lodo residual avícola mediante <i>Lactobacillus Plantarum</i>	38
2.6	Biotransformación del lodo residual avícola mediante condiciones aerobias con <i>N. Oculata</i>	41
2.7	Recolección y acondicionamiento de biomásas obtenidas de los procesos de biotransformación en base seca	44
	CAPITULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
3.1	Recolección y tratamiento térmico del LRA (fotografía)	48
3.2	Resultados del proceso anaerobio de LRA con <i>Lactobacillus plantarum</i>	53
3.3	Cinéticas de crecimiento celular, consumo de carbohidratos (g/L) y producción de proteínas (% base seca) durante el proceso de biotransformación anaerobio de LRA con <i>L. plantarum</i> , a tres concentraciones de inóculo (a) 5% v/v, (b) 10% v/v, (c) 15%v/v	54
3.4	Resultados del proceso aerobio de LRA con <i>Nannochloropsis</i>	58
3.5	Disminución de la DQO total y soluble en el proceso aerobio con <i>N. oculata</i>	61
3.6	Asimilación de Carbono Orgánico Total (COT)	62
3.7	Comportamiento de Carbohidratos con diferentes concentraciones de LRA con <i>N. oculata</i>	63
3.8	Densidad celular (Abs 679 nm) del proceso aerobio con <i>N. oculata</i>	65
3.9	Relación entre el crecimiento microalgal vs la remoción de materia orgánica	66
3.10	Acondicionamiento y obtención de biomásas en base seca	68
	CAPITULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
4.1	Aprovechamiento de las biomásas obtenidas de los procesos aerobios y anaerobios con microalgas y lactobacilos respectivamente, usando LRA, como alternativa sostenible en la economía circular.	81

LISTA DE TABLAS

Tabla	Descripción	Pág.
	CAPITULO 1: FUNDAMENTOS TEORICOS	
1.1	Comparación de la Producción Pecuaria a Nivel Mundial (2022-2024) (Millones de Toneladas)	11
1.2	Comparación de la Producción Pecuaria en México (2022-2024) (Millones de Toneladas)	11
1.3	Descripción de los pasos de la ruta metabólica de la conversión de aminoácidos a partir de la degradación de proteínas utilizando probióticos (presentes en la Figura 1.3).	21
1.4	Beneficios y Desventajas del proceso aerobio	25
1.5	Beneficios y Desventajas del proceso anaerobio	25
	CAPITULO 2: MATERIALES Y METODOS	
2.1	Descripción para caracterización fisicoquímica de LRA	33
2.2	Descripción para caracterización microbiológica de LRA	34
2.3	Descripción de la propagación de microorganismos anaerobios y aerobios	35
2.4	Descripción del proceso de fermentación anaerobia y proceso aerobio	37
2.5	Parámetros de análisis para el crecimiento y rendimiento de la biomasa	40
2.6	Parámetros de calidad del medio (para monitorear la biotransformación)	40
2.7	Observaciones cualitativas con <i>Nannochloropsis oculata</i> (no instrumentales)	41
2.8	Evaluación de parámetros nutricionales de las biomasas generadas de los procesos con <i>N. oculata</i> y <i>Lactobacillus Plantarum</i>	45
	CAPITULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
3.1	Resultados de la caracterización fisicoquímica y microbiológica para el LRA	48
3.2	Análisis comparativo de resultados de la caracterización fisicoquímica y microbiológica en el empleo del pretratamiento térmico para el LRA tratado térmicamente (comparativa con otros autores).	51
3.3	Parámetros cinéticos del proceso de biotransformación anaerobia de LRA y <i>L. plantarum</i>	55
3.4	Determinación de ácido láctico producido del producto final del proceso anaerobio con <i>Lactobacillus plantarum Plantarum</i>	57
3.5	Parámetros cinéticos del proceso de biotransformación aerobia de LRA y <i>N. oculata</i>	59
3.6	Sólidos totales, volátiles, fijos y rendimiento de biomasa en base seca	67
3.7	Caracterización nutrimental de las biomasas generadas del proceso de biotransformación de LRA con <i>L. plantarum</i> con tres niveles de inóculo	69
3.8	Caracterización nutrimental de las biomasas generadas del proceso de biotransformación de LRA con <i>N. oculata</i> con tres niveles de concentración de LRA	71
3.9	Perfil nutricional de las biomasas obtenidas en base seca de la presente investigación y su comparativa con núcleos minerales comerciales para la alimentación de pollos de engorde y cerdos en la etapa de crecimiento obtenido de los manuales veterinarios comerciales de National Research Council	73

NOMENCLATURA

LRA: Lodo residual avícola

L. plantarum: *Lactobacillus plantarum*

N. oculata: *Nannochloropsis oculata*

NRC: National Research Council

BAL: Bacterias ácido lácticas

BMAA: Biotransformación microbiana aerobia y anaerobia

BMPAL: Biomasa microbiana con potencial para la alimentación animal

PPE: Producción de pollos de engorde

PTAR: Planta de tratamiento de aguas residuales avícola

INTRODUCCION

La producción avícola en México ha estado aumentando, con un total de 4.1 millones de toneladas de carne de ave en 2024, que consiste en pollo, huevos y pavo. Se produjeron alrededor de 2 millones de toneladas en la primera mitad de 2024, con un aumento del 3.2 % respecto al período de 2023 (SEMARNAT, 2024). Esta expansión destaca el papel vital de las operaciones avícolas como una fuente importante de proteína animal en el país, que sigue siendo un contribuyente importante tanto para la seguridad alimentaria como para el desarrollo (SAGARPA, 2024). Se predice que crecerá a una tasa anual del 2.5 % y se convertirá en uno de los sectores más grandes del sector alimentario nacional (Banco Mundial, 2023).

El tratamiento correcto de los desechos generados por la producción en la industria avícola es un problema creciente en México, con la producción anual de lodos de origen avícola siendo aproximadamente de millones de toneladas. Sin embargo, solo el 65% de estos desechos se trata adecuadamente, exponiendo los problemas ambientales y de salud pública (SEMARNAT, 2023; Banco Mundial, 2023). No manejar adecuadamente estos lodos conduciría a la contaminación del suelo y el agua, emisiones de gases de efecto invernadero y propagación de enfermedades (Acosta Slane, Valles Aragón, y Parra Acosta, 2021).

Existe una alternativa para minimizar este resultado mediante la introducción de microorganismos probióticos (*Lactobacillus plantarum*). Este probiótico es capaz de mejorar el contenido de nutrientes de los alimentos a través de la producción de enzimas digestivas y ácidos orgánicos, resultando en un mayor rendimiento de nutrientes necesarios como las proteínas (Acosta-Hoyos *et al.*, 2025). Además, *Lactobacillus plantarum* proporciona péptidos antimicrobianos y antioxidantes, que se ha encontrado que promueven la salud intestinal en animales con un rendimiento mejorado (Khanna *et al.*, 2023). Este organismo también está en la práctica de fermentar desechos orgánicos en biomasa rica en nutrientes para alimento para animales (Estrada-García *et al.*, 2021).

Por otro lado, *Nannochloropsis oculata*, una microalga conocida por producir una cantidad considerable de ácidos grasos poliinsaturados, particularmente EPA, ha surgido como una fuente prometedora de nutrición animal. Esta microalga puede desarrollarse rápidamente, en aguas residuales tratadas, utilizando los nutrientes y se utiliza para mejorar la biomasa de microalgas de alta calidad (rica en proteínas y ácidos grasos omega-3) (Zahran *et al.*, 2023). Aspectos de aerobiosis y biotransformación de alimentos no solo producen una característica nutricional más alta del producto que ha mejorado el rendimiento, sino también la sostenibilidad de los productos animales (Carvajal-Oses *et al.*, 2018).

Desde el punto de vista de la industria avícola en México, la planta de procesamiento ubicada en Fortín, Veracruz experimenta problemas de lodos residuales que deben

ser tratados, lo que lleva a la contaminación del suelo y el agua cuando no se eliminan adecuadamente (Flores-Luna y Chávez-Inca, 2024). Este problema con regulaciones ambientales más estrictas obliga a respuestas innovadoras para la gestión de desechos (Flores-Luna y Chávez-Inca, 2024). En este sentido, trabajar en conjunto con la planta, tiene como objetivo utilizar tecnologías biológicas como procesos anaerobios como la fermentación con *Lactobacillus plantarum* para descomponer la materia orgánica y mejorar la proteína en la biomasa (Fajardo-Argoti, 2021). De manera similar, la utilización de *Nannochloropsis oculata* en procesos aerobios suministra biomasa con ácidos grasos esenciales para enriquecer su valor nutricional y promover la economía circular en la agricultura (Sales-Pérez *et al.*, 2023).

La limpieza del tratamiento de aguas residuales de la industria avícola también es vital para minimizar la carga de contaminantes y obtener una utilización óptima de los nutrientes en los desechos. Se examina la optimización del entorno para el enriquecimiento de microorganismos útiles y la remediación de fuentes no beneficiosas (Darmastuti *et al.*, 2025)

Objetivo general Evaluar el potencial de utilización del lodo residual avícola en procesos de digestión aerobia y anaerobia para la producción de biomasa destinada a la alimentación animal.

Objetivos específicos

- Caracterizar fisicoquímica y microbiológicamente los lodos residuales avícolas.
- Evaluar las condiciones recomendables de crecimiento de *Lactobacillus plantarum* en los lodos residuales avícolas mediante procesos anaerobios.
- Establecer las condiciones de cultivo adecuadas para la obtención de biomasas a partir de lodos residuales avícolas mediante procesos aerobios con la especie *Nannochloropsis oculata*.
- Recolectar y acondicionar las biomasas producidas a partir de los procesos anaerobios y aerobios con *Lactobacillus plantarum* y *Nannochloropsis oculata* a partir de los lodos residuales avícolas.
- Evaluar la viabilidad y la calidad nutricional de las biomasas obtenidas como posibles suplementos alimenticios para aves.

Alcance del estudio

Esta investigación se desarrollará en colaboración con una planta procesadora avícola de la zona, donde se llevará a cabo la recolección del lodo residual avícola (LRA). Los análisis y experimentación se llevará a cabo en el laboratorio de ambiental 2 de la institución, se incluirán la determinación de parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y nutricionales, con el fin de establecer la viabilidad del uso de la biomasa generada como suplemento en la alimentación animal.

CAPITULO 1

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1 Antecedentes

Vásquez y Morales. (2022) realizaron un estudio sobre el uso de biomasa algal en la elaboración de alimentos balanceados para la nutrición en animales, debido a su aporte proteico, minerales, fibras, antioxidantes, prebióticos e inmunoestimulantes, favoreciendo la salud animal y la calidad en la carne destinada a consumo humano.

Chang *et al.* (2022) exploraron la biotransformación de desechos con la ayuda de microorganismos, encuentran que los microorganismos bio-sellan los desechos y este enfoque es una estrategia potencial para reducir el impacto ambiental adverso, puede simultáneamente valorizar los desechos orgánicos para crear productos de valor agregado.

Peng *et al.* (2016) que evaluaron la adición de *Lactobacillus plantarum* a la dieta de pollos de engorde, informaron una mejora notable en el crecimiento, así como en el equilibrio del microbiota intestinal e indicando que este microorganismo puede ser una alternativa viable a los antibióticos promotores del crecimiento y suplementar la nutrición animal.

Por su parte, Salem *et al.* (2022) estudiaron la utilidad de la microalga *Nannochloropsis oculata* en la dieta de Nile Tilapia y encontraron que los peces alimentados con *Nannochloropsis oculata* mostraron un mejor rendimiento y respuestas inmunitarias en los animales, mejorando su integridad intestinal y un mayor contenido de ácidos grasos poliinsaturados, especialmente EPA.

Finalmente, El-Araby *et al.* (2022) han destacado que tal estrategia no solo reduce la carga contaminante de la industria avícola en la producción, sino que también estimula la economía circular al convertir los desechos en alimento con potencial, ayudando así a lograr una producción más amigable con el medio ambiente, más rentable y sostenible.

1.2 Generalidades de la Gestión y Aprovechamiento de Residuos Orgánicos

Como un problema ambiental clave, los desechos orgánicos son uno de los desafíos más significativos en México, ya que generan una cantidad considerable de residuos sólidos con sus diversas entradas industriales y agrícolas. La generación de residuos sólidos ascendió a más de 50 millones de toneladas en 2023, con alrededor del 30% de estos siendo residuos orgánicos (SEMARNAT, 2024). Estos residuos se gestionarán correctamente, incluyendo su clasificación, tratamiento y reciclaje, lo que puede ayudar a reducir la contaminación y optimizar los recursos naturales en la economía circular (García, 2022).

1.2.1 Residuos orgánicos en el procesamiento avícola

Una amplia variedad de residuos orgánicos de diferentes etapas de producción se genera en la industria avícola. Los principales son:

Gallinaza y pollinaza: El término se refiere a cualquier mezcla de excrementos de aves, restos de comida, plumas y material de cama utilizado en las granjas avícolas. Con nutrientes nutritivos, este residuo se aplica frecuentemente como fertilizante.

Vísceras y desechos de sacrificio: Incluye partes del cuerpo de las aves, e incluye órganos internos, cabezas, patas y otros subproductos como resultado de cómo son sacrificadas. Este residuo representa una gran parte de los desechos utilizados durante el sacrificio.

Plumas: Representan alrededor del 10% del peso total de un ave y se producen en grandes cantidades durante el desplume.

Cáscaras de huevo: De las plantas procesadoras de huevos, las cáscaras de huevo tienen carbonato de calcio, estas cáscaras están disponibles para su reutilización en una amplia variedad de propósitos industriales (Díaz y de la Cruz, 2021).

1.2.2. Métodos de aprovechamiento de residuos

La gestión adecuada de los residuos animales en la industria avícola es crucial para que la industria reduzca sus consecuencias negativas y fomente la sostenibilidad. A continuación, se muestran algunas alternativas ecológicas para su valorización:

Compostaje: Un proceso aeróbico que convierte material orgánico como la cama avícola y las vísceras en compost. Este compuesto puede ayudar a aumentar la fertilidad del suelo y las prácticas agrícolas sostenibles en el proceso (Rosas-Martínez y Aguilar-Rivera, 2022).

Producción de biogás mediante digestión anaerobia: los residuos orgánicos, incluidos los excrementos y los desechos del procesamiento, pueden procesarse en biodigestores para obtener biogás. Este biogás puede funcionar como materia prima de energía renovable y el digestato que crea puede usarse como fertilizante líquido (López-Velarde *et al.*, 2024).

Hidrolización de plumas: Con queratina en las plumas, que puede convertirse mediante hidrólisis en harina de plumas, que puede usarse como proteína en la alimentación animal (Contexto Ganadero, 2023)

Recuperación de nutrientes de las aguas residuales: En ciertos casos, los nutrientes, por ejemplo, nitrógeno, fósforo, etc., pueden recuperarse de las aguas residuales mediante tratamiento y usarse como alimento en fertilizantes. La extracción de fósforo se está promoviendo como una de las estrategias para abordar este problema, capaz de llenar del 15 al 20%, en la medida de lo posible durante los procesos de purificación (CEIT, 2025) del uso final internacional de este nutriente crítico (CEIT, 2025).

Uso de cáscaras de huevo en la industria: Las cáscaras de huevo pueden procesarse para extraer carbonato de calcio, que se utiliza en la producción de productos para suplementos dietéticos, cosméticos y materiales de construcción. Hallazgos recientes revelan que este subproducto puede ser ampliamente utilizado como recurso mineral y apoyar el reciclaje de materiales agroindustriales y la conservación a través de este subproducto (Vázquez-Martínez *et al.*, 2021).

La aplicación de estas alternativas no solo es una de las soluciones para reducir la contaminación ambiental, sino que también ayuda al concepto de economía circular al convertir los desechos en productos de valor agregado. (Avinews, 2020)

Aguas residuales: Producidas durante la limpieza y el procesamiento son altamente orgánicas con alto contenido de contaminantes como materia orgánica y nutrientes y deben limpiarse para evitar la contaminación ambiental (La Ciencia en Corto, 2021)

1.2.3. Consumo de agua en la industria avícola

El consumo de agua en la industria avícola abarca diversos aspectos, desde la ingesta diaria de las aves hasta el uso en procesos de limpieza y procesamiento. A continuación, se detallan estos consumos:

Consumo de agua por gallina:

- **Ingesta diaria:** Una gallina adulta consume entre 200 y 250 mL de agua al día. Este consumo puede aumentar en climas cálidos debido a la necesidad de regular su temperatura corporal (Nanta, 2024). Multiplicando el consumo diario por 365 días, una gallina requiere aproximadamente entre 73 y 91 L de agua al año para su ingesta.

Uso de agua en el procesamiento y limpieza:

- **Procesamiento de aves:** El agua se utiliza en diversas etapas del procesamiento, incluyendo el lavado, escaldado, desplume y evisceración. Aunque las cifras exactas pueden variar según la planta y las prácticas implementadas, es conocido que el procesamiento avícola demanda una cantidad significativa de agua
- **Limpieza y desinfección:** Las instalaciones avícolas requieren limpieza y desinfección regular para mantener estándares de bioseguridad. Esto incluye la limpieza de galpones, equipos y sistemas de suministro de agua (WATT Global Media, 2024).
- **Producción de huevos:** Para producir un huevo de 60 gramos, se estima que se requieren alrededor de 200 L de agua.
- **Producción de carne de pollo:** La producción de 1 Kg de carne de pollo puede requerir aproximadamente 4,300 L de agua.

- Estas cifras incluyen no solo el agua consumida directamente por las aves, sino también la utilizada en la producción de su alimento, mantenimiento de instalaciones y otros procesos indirectos. (Avinews, 2021 a).

El consumo total de agua por gallina en una industria procesadora de aves varía según múltiples factores, incluyendo prácticas de manejo, eficiencia de los sistemas de procesamiento y condiciones ambientales. Mientras que el consumo directo para ingesta es relativamente bajo, la huella hídrica total, que considera todos los aspectos de la producción, es considerablemente mayor. Implementar prácticas de manejo sostenible y tecnologías eficientes puede ayudar a reducir el uso total de agua en la industria avícola (Avinews, 2021 b).

1.3. Introducción a la Industria Avícola en México

1.3.1. Importancia económica de la industria avícola en México

La industria avícola mexicana es un pilar fundamental de la economía nacional, representando aproximadamente el 28.5 % de la producción pecuaria total del país. En 2022, la producción de huevo en México creció un 4.6 %, alcanzando 3.15 millones de toneladas, lo que refleja un aumento en la demanda interna y una mejora en los hábitos alimenticios de la población (Meléndez, 2023; UAG, 2023).

Además, México se posiciona como el principal productor mundial de carne de ave en canal y el sexto productor de huevo para plato, destacando su relevancia en el mercado avícola global (CNA, 2022).

1.3.2 Requerimientos nutricionales de los pollos de engorde

Se estima que los pollos de engorde requieren al menos 38 nutrientes en sus dietas (Manual Veterinario Merck, 2023). Los pollos de engorde necesitan tener un conjunto de grupos nutricionales importantes que se representan en la Figura 1.1.

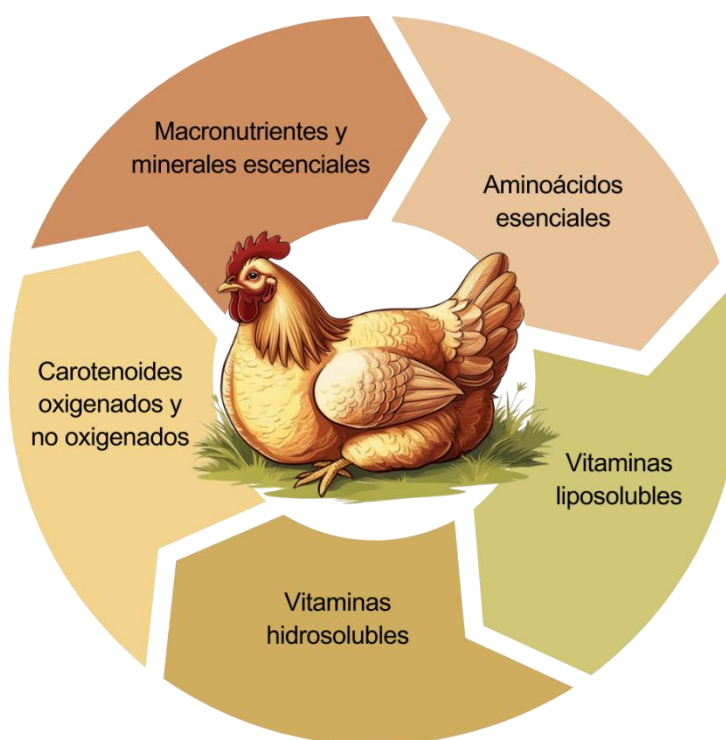


Figura 1.1 Grupos nutricionales esenciales para el desarrollo y crecimiento de las aves de engorde

Los nutrientes más esenciales necesarios para los pollos se dividen en las siguientes categorías:

Macronutrientes y minerales esenciales

Las proteínas son los aminoácidos básicos requeridos para el crecimiento y desarrollo muscular de los pollos, lo que lleva a la formación de tejidos, músculos, órganos internos, piel y plumas. La dieta recomendada durante las primeras cuatro semanas debe proporcionar una ingesta de proteínas del 22 al 24%, con reducciones posteriores al 19%. Las grasas y los carbohidratos suministran el combustible para la digestión, el movimiento, el crecimiento y la reproducción. Otros minerales, incluidos el calcio (Ca), fósforo (P), potasio (K) y zinc (Zn) desempeñan roles críticos en acciones fisiológicas, incluyendo la formación de huesos, la contracción muscular y la inmunidad (Korver y Stewart-Brown, 2023).

Aminoácidos esenciales

Los aminoácidos treonina, tirosina, leucina, lisina, histidina y similares son esenciales para diferentes funciones biológicas en los pollos. La treonina es importante para la síntesis de proteínas y la salud intestinal; la tirosina es un precursor de hormonas involucradas en la respuesta al estrés; la leucina es necesaria para la síntesis de proteínas musculares; la lisina desempeña un papel esencial en la formación de

proteínas y la absorción de calcio; y la histidina es esencial para el crecimiento y la producción de hemoglobina (Elnesr *et al.*, 2020).

Vitaminas liposolubles y Vitaminas hidrosolubles

Las vitaminas liposolubles son A, D3, E y K, que son críticas para muchas funciones en los pollos. La vitamina A ayuda con la visión y el desarrollo del sistema inmunológico; la D3 es responsable de la absorción de calcio y fósforo (importante para asegurar el crecimiento óseo); la E es un antioxidante y protege las células del estrés oxidativo; y la K es esencial para la coagulación sanguínea y la mineralización ósea. Las vitaminas hidrosolubles, incluyendo B12 (cobalamina), biotina, niacina (B3), ácido fólico (B9), ácido pantoténico (B5), piridoxina (B6), riboflavina (B2) y tiamina (B1), son importantes para el metabolismo energético, la función celular y nerviosa en los pollitos. Por ejemplo, vitaminas como la vitamina B12 son críticas para la producción de glóbulos rojos; la biotina está implicada en el metabolismo de macronutrientes; y la niacina es necesaria para fabricar enzimas digestivas (Korver y Stewart-Brown, 2023).

Carotenoides oxigenados y no oxigenados

Los carotenoides oxigenados pueden promover la pigmentación en los pollos, incluyen xantofila (luteína), zeaxantina, cantaxantina y astaxantina. La luteína es responsable del pigmento amarillo dentro de las yemas de huevo y la piel; la zeaxantina actúa para mejorar la pigmentación amarilla de la piel y la grasa; la cantaxantina mejora la pigmentación de la piel y la yema de huevo; mientras que la astaxantina, que se encuentra en algas y crustáceos, mejora la coloración y protege contra el estrés oxidativo. Incluso los compuestos que carecen de oxígeno, como el β -caroteno, α -caroteno y licopeno pueden alterar menos la pigmentación y también son necesarios por sus propias propiedades antioxidantes. El β -caroteno es un precursor de la vitamina A que mejora la respuesta inmune y promueve el crecimiento, y su análogo es el α -caroteno, pero el α -caroteno es menos capaz de convertirse en vitamina A; y el licopeno ayuda a proteger contra el estrés oxidativo (Elnesr *et al.*, 2020).

1.3.3. Flujo del proceso de pollos en la industria.

Recepción de pollos

El primer método es la recepción del pollo, que incluye la llegada de los pollos a la planta de procesamiento y su descarga de camiones en jaulas o contenedores situados directamente en diferentes lugares. Esto genera estiércol, que debe ser gestionado para prevenir la contaminación ambiental y salvaguardar el bienestar animal durante el manejo (Méda *et al.*, 202).

Los pollos se suspenden en un riel de procesamiento y luego se corta la arteria carótida y la vena yugular para sacrificarlos. A continuación, se les permite un tiempo de sangrado para drenar la mayor cantidad de sangre posible, y esta sangre se recogerá y utilizará en la producción de harina de sangre para alimentación animal o como desecho (HSA., 2016).

Las aves se sumergen en agua caliente (50-60° C) para que las máquinas de desplume puedan eliminar cualquier pluma. En ese proceso, las plumas se separan y pueden recogerse para producir productos que incluyen harina de plumas, que es un material altamente procesado para su uso como alimento animal debido a su alto contenido de proteínas (SENASICA, 2014).

Al igual que el cuerpo, las patas de pollo se sumergen en agua caliente, lo que ayuda a la eliminación de la cutícula del pie por fricción mecánica. Estas patas se procesan más para el consumo humano o se procesan en productos de colágeno (SENASICA, 2014).

En la etapa de extracción de vísceras se realiza el proceso de evisceración, en el que se eliminan los órganos internos del ave. Las secciones comestibles del cuerpo, incluyendo la molleja, se eliminan de las partes no comestibles restantes (por ejemplo, cloaca, pulmones, cutícula de molleja) que generalmente se utilizan para producir harinas que son subproductos animales o se desechan como desechos (Georganas *et al.*, 2023).

Enfriamiento

Después de la evisceración, las aves procesadas se someten a un proceso de enfriamiento mediante inmersión en agua fría o un sistema de enfriamiento por aire. Aquí se produce el desbordamiento del enfriador; un residuo líquido hecho de grasas y proteínas disueltas que requiere tratamiento para minimizar su carga ambiental (Vaishnav *et al.*, 2023).

Ahora procesadas y enfriadas, las aves se venden en varios formatos (enteras, en piezas o deshuesadas) dentro de los límites del formato comercial. En la segunda etapa, se utilizan materiales de embalaje adecuados para garantizar la calidad del producto y reducir la contaminación microbiológica (Zhang *et al.*, 2023).

En la última etapa, los productos avícolas empaquetados se almacenan y distribuyen tanto en mercados nacionales como internacionales bajo estrictos estándares de temperatura y calidad para garantizar su seguridad y frescura hasta que lleguen al cliente final (Coe *et al.*, 2022).

La Figura 1.2 muestra la secuencia de producción en una planta avícola como un diagrama, con cada una de las etapas descritas anteriormente. Se identifican los principales procesos, insumos de consumo, salidas y emisiones producidas, los puntos de necesidad, así como todos los puntos críticos de control que no se comprometerán en estas operaciones para lograr un producto final de alta calidad que no contamine el medio ambiente. El diagrama ayuda a visualizar el plan de flujo de trabajo en la planta de procesamiento avícola para que se pueda presentar visualmente la conexión de diferentes etapas como recepción, empaque y entrega de pollo. También muestra la importancia de la gestión adecuada de los desechos de subproductos y desechos producidos en cada etapa de operación e indica conceptos sostenibles para la industria avícola.

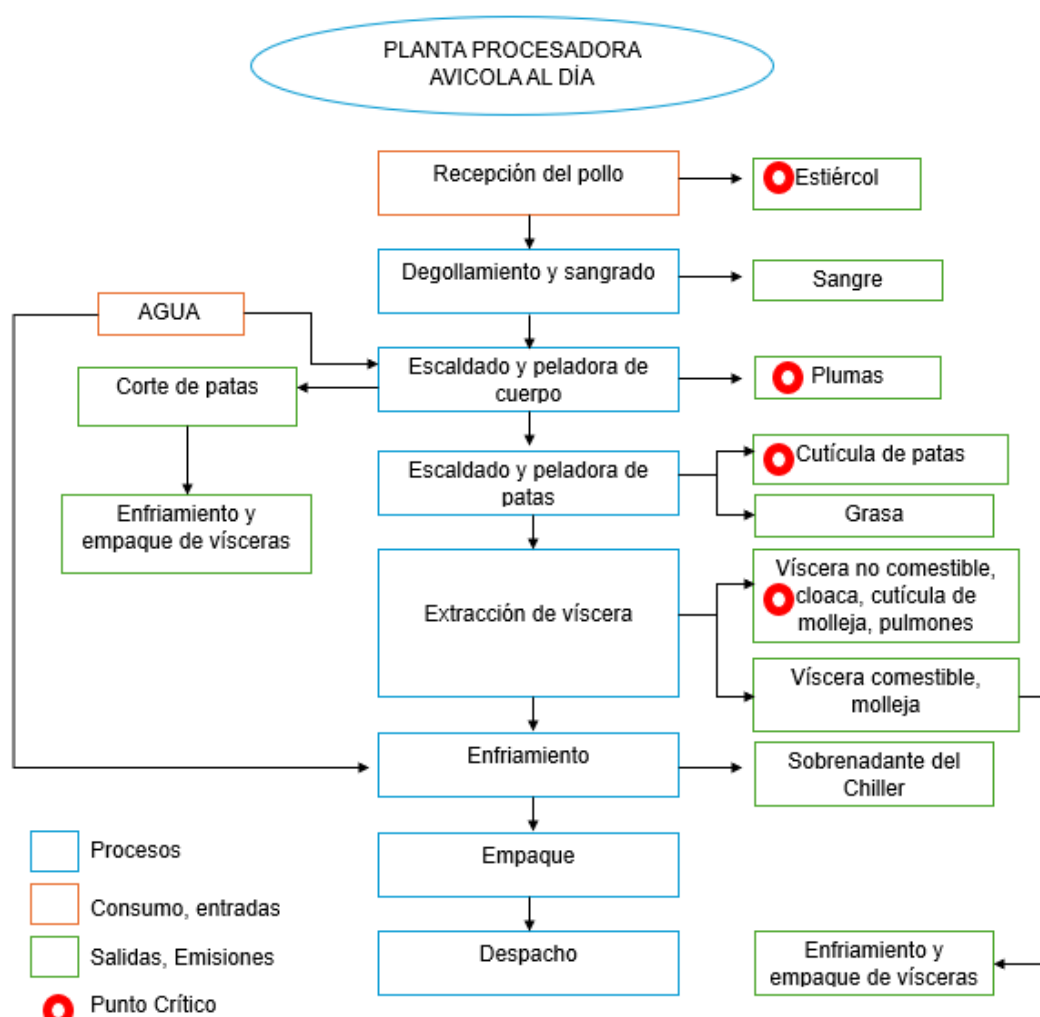


Figura 1.2. Proceso de una planta procesadora avícola

1.3.4. Contribución al PIB nacional y generación de empleos

La producción avícola representa el 2 por ciento del Producto Interno Bruto (PIB) nacional y el 16 por ciento del PIB agrícola, y por lo tanto es responsable de

aproximadamente el 16% del PIB agrícola. Este no solo es un sector importante que creará empleos en la agricultura, lo cual es crítico para el crecimiento económico de este país, sino que también crea alrededor de 200,000 oportunidades de empleo directas e indirectas. En el empleo, la industria avícola emplea a cerca de 70,200 individuos, ganando un salario mensual promedio de \$5,440 MXN. La fuerza laboral es de hombres 66.3%, mujeres 33.7%; Edad promedio: 42.4 años (Secretaría de economía, 2024).

Esta información enfatiza el papel crítico de la industria avícola, que sirve como el principal motor económico en México y una fuente importante de empleos junto con el desarrollo regional (SADER, 2023; Urbe Economía, 2023).

1.3.5. Volumen anual de producción avícola

En 2023, la producción de carne avícola mexicana alcanzó un nivel récord de 3.888 millones de toneladas, un aumento del 2.8% respecto al año anterior. Este crecimiento puede explicarse principalmente por la demanda local y los avances en la producción avícola. La producción estatal durante este tiempo resultó de Veracruz, Jalisco y Aguascalientes, todos contribuyendo con más del 36% de la producción nacional. (El sitio avícola, 2024). Se proyecta que en el año 2024 la producción total de carne avícola alcanzará los 3.989 millones de toneladas, manteniendo la tendencia al alza observada en años anteriores. Un aumento en la producción avícola debe mantenerse constante en este sentido y con la eficiencia de la producción avícola aumentada y la cadena de suministro en productos avícolas también fortalecida (SIAP, 2024 a).

1.3.6 Comparativa con otros sectores pecuarios

La avicultura se está convirtiendo en el sector más vibrante de las actividades ganaderas en México. En 2021, la avicultura representó el 36.8% del Producto Interno Bruto (PIB) ganadero nacional, mayor que la producción de carne de res y cerdo (UNA, 2023; El sitio porcino, 2023).

Parte de esto se atribuye a la demanda actual de los consumidores de carne de pollo, que se considera una opción de carne más competitiva y saludable que muchas otras proteínas animales. Además, la producción de carne de pollo ha tenido una tasa de crecimiento anual promedio del 3.4% en los últimos 10 años, lo que indica su posición primordial en el sector ganadero nacional. (Avinews, 2023).

También, las estadísticas comparativas de la producción de carne de pollo, res y cerdo a nivel mundial durante 2022, y para México, para 2022 y 2025, aparecen en la Tabla 1.1 y la Tabla 1.2.

Tabla 1.1 Comparación de la Producción Pecuaria a Nivel Mundial (2022-2024) (Millones de Toneladas)

Año	Carne de ave	Carne de cerdo	Carne de res	Carne de ovino	Fuente
2022	137.3	111	72.6	16.5	USDA (2023)
2023	140.1	114.2	74	17	USDA (2024)
2024	142.5	116.5	75.2	17.5	USDA (2025)

Tabla 1.2 Comparación de la Producción Pecuaria en México (2022-2024) (Millones de Toneladas)

Año	Carne de ave	Carne de cerdo	Carne de res	Carne de ovino	Fuente
2022	3.79	1.65	2.19	0.07	SIAP (2023)
2023	3.94	1.72	2.25	0.08	SIAP (2024 b)
2024	4.10	1.80	2.31	0.08	SIAP (2025)

1.4. Impacto ambiental de los desechos y lodos residuales avícolas

Los lodos residuales avícolas conllevan una carga ambiental debido a su alto contenido orgánico y nutrientes que, si no se tratan adecuadamente, pueden causar contaminación del suelo y cuerpos de agua. Los lodos de procesamiento de pollo tienen efectos ambientales negativos, resultando en la eutrofización de cuerpos de agua por el exceso de nutrientes (nitrógeno y fósforo), liberación de gases de efecto invernadero y propagación de patógenos, cuando el tratamiento de lodos no se lleva a cabo adecuadamente y el proceso sigue siendo ineficiente. (IMTA, 2020; Acosta Slane, Valles Aragón, y Parra Acosta, 2021).

1.4.1. Contaminación de Cuerpos de Agua

La eutrofización ha afectado a muchos cuerpos de agua en México como resultado de las descargas de desechos orgánicos. Aunque no se mencionan casos recientes en las fuentes consideradas, se ha reconocido que la carga extra de nutrientes de las actividades humanas, incluyendo, pero no limitándose a la agricultura y la ganadería, ha llevado al empeoramiento de la calidad del agua en los ríos y lagos del país. Estudios previos documentaron este fenómeno y sigue siendo un problema ambiental relevante (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2022).

En México, diversos cuerpos de agua han sido afectados por la eutrofización debido a descargas de residuos orgánicos. Aunque no se especifican casos recientes en las fuentes consultadas, es reconocido que la carga excesiva de nutrientes por actividades humanas, como la agricultura y la ganadería, ha contribuido al deterioro de la calidad del agua en ríos y lagos del país. Este fenómeno ha sido documentado en estudios previos y continúa siendo una preocupación ambiental relevante (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2020).

1.4.2. Emisión de Gases de Efecto Invernadero emitidos durante la descomposición anaerobia de los lodos

La descomposición anaeróbica de lodos residuales produce gases de efecto invernadero (GEI), principalmente metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O). Estos gases resultan de la actividad microbiana en condiciones anaeróbicas en las que la materia orgánica se degrada en ausencia de oxígeno. El metano tiene un potencial de calentamiento global mucho mayor que el dióxido de carbono; por lo tanto, es un contribuyente al cambio climático (Aguilar-Benítez y Blanco, 2020).

La contaminación del aire por la mala gestión de lodos residuales en la industria avícola aumenta las emisiones de GEI, que están vinculadas al cambio climático. Los desechos en México son un contribuyente a las emisiones de GEI en el sector de residuos, aumentando de 12,550.11 Gg de CO_2 equivalente (1990) a 45,909.01 Gg (2015), un aumento del 265.8% de 1990 a 2015. El aumento se debe en parte al tratamiento inadecuado de desechos orgánicos, como los lodos producidos en actividades agroindustriales (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2020).

1.4.3. Proliferación de Enfermedades causada por lodos residuales

Microorganismos infecciosos pueden encontrarse en lodos residuales, como bacterias, virus y parásitos, y pueden ser peligrosos para la salud humana y animal. El contacto directo, la inhalación de aerosoles contaminados en el aire o el agua y alimentos contaminados pueden exponer a estos organismos a los humanos. Las aguas residuales y lodos no tratados en el contexto de prácticas agrícolas también pueden utilizarse para propagar enfermedades infecciosas (OMS, 2023).

1.4.4. Impacto en comunidades cercanas a plantas de procesamiento

Los lodos residuales pueden ser gestionados de manera inadecuada en las comunidades cercanas a las plantas de procesamiento avícola. Olores desagradables, propagación de vectores de enfermedades y contaminación del agua pueden ser los problemas mencionados. Además, la exposición prolongada a sustancias contaminantes también tiene impactos a largo plazo en la salud, incluyendo enfermedades respiratorias y gastrointestinales. Se necesitan implementar prácticas

adecuadas de gestión y tratamiento para ayudar a mitigar estos riesgos, así como proteger la salud de las comunidades vecinas.

1.5. Economía Circular y Biotransformación de Residuos

La gestión de residuos se aborda a través de la economía circular, que intenta cambiar las fuentes de residuos para producir recursos valiosos que contribuyan positivamente al medio ambiente y la economía. La posibilidad de la biotransformación de residuos, en particular los residuos orgánicos, representa una opción atractiva. En México, la utilización de la biotecnología para la valorización de residuos avícolas está aumentando debido a las posibilidades de producir biomasa que puede ser utilizada en la alimentación animal, resultando en un desarrollo sostenible (Castro-Viteri, 2022).

1.5.1. Concepto de economía circular

El concepto de economía circular no se trata solo del diseño y comercialización de productos, sino más bien de todo el sistema que el modelo y los modos de consumo en los negocios han cambiado. Esta estrategia integradora tiene como objetivo cerrar los ciclos de materiales para mantener los recursos en uso el mayor tiempo posible y reducir la producción de residuos. La economía circular presenta considerables oportunidades para implementar sistemas regenerativos que permitan que los recursos y productos circulen por más tiempo, de manera más sostenible. Esto refleja un cambio en los mecanismos existentes de producción y consumo y hacia modelos que incorporan dinámicas de ecosistemas y protegen el medio ambiente natural (Guerrero-Villegas, 2024).

La economía circular es un modelo de producción y consumo industrial que maximiza el uso de recursos, así como prolonga la vida útil de los productos y minimiza los residuos. Mientras que el modelo lineal del pasado, que tiene un patrón de "tomar, hacer, desechar" ha evolucionado, ahora hay un nuevo paradigma que ve los materiales reutilizados, reparados, reacondicionados y recirculados. Esto no solo libera presión sobre el medio ambiente, sino que también aumenta la eficiencia tecnológica de los procesos industriales. En el sector de la construcción, se emplearon nuevos materiales y métodos sostenibles para disminuir la huella de carbono, el uso de concreto con cemento de bajo carbono, por ejemplo, con una reducción del 27% de CO₂ en ciertos proyectos de trabajo (Rodríguez Parrondo y Pérez Rivero, 2025).

La economía circular es un modelo de producción y consumo industrial que maximiza el uso de recursos, así como prolonga la vida útil de los productos y minimiza los residuos. Mientras que el modelo lineal del pasado, que tiene un patrón de "tomar, hacer, desechar" ha evolucionado, ahora hay un nuevo paradigma que ve los materiales reutilizados, reparados, reacondicionados y recirculados. Esto no solo libera presión sobre el medio ambiente, sino que también aumenta la eficiencia tecnológica de los procesos industriales. En el sector de la construcción, se emplearon

nuevos materiales y métodos sostenibles para disminuir la huella de carbono, el uso de concreto con cemento de bajo carbono, por ejemplo, con una reducción del 27% de CO₂ en ciertos proyectos de trabajo (Rodríguez Parrondo y Pérez Rivero, 2025).

1.5.2. Biotransformación de residuos en biomasa

Este fenómeno también incluye el cambio de residuos en biomasa: la conversión de residuos orgánicos en forma de una mezcla de residuos agrícolas, forestales e industriales en combustibles, productos fertilizantes y/o productos químicos. Este enfoque es coherente con los principios de una economía circular en la medida en que convierte los residuos en productos útiles, reduce la dependencia de recursos no renovables y tiene impactos ambientales negativos mínimos. Otros beneficios económicos de este método son la creación de nuevas fuentes de ingresos a partir de lo que anteriormente se consideraba desechos desechables, empleando la industria de la biomasa y el sector de transformación, y disminuyendo los costos de eliminación de residuos. Por ejemplo, la empresa Ence ya ha realizado grandes inversiones en la construcción de plantas de biometano en España, financiando proyectos no solo para impulsar la energía renovable sino también para producir fertilizantes orgánicos para aumentar la sostenibilidad y mejorar aún más la economía circular (Ence, 2025).

Ecológicamente, la biotransformación de residuos en biomasa es un motor importante para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. También ayuda a utilizar materiales orgánicos para generar energía, reduciendo así el uso de combustibles fósiles, ya que se evita la liberación de metano y otros gases de la descomposición no regulada de dichos residuos (Siu, 2024). Finalmente, puede apoyar la conservación de ecosistemas para estos últimos (es decir, la disminución del número de vertederos) así como el desarrollo de una agricultura más sostenible con cultivos de biomasa de residuos fertilizados orgánicamente (Foro Económico Mundial, 2024).

1.6. Microalgas en la Biotransformación de Lodos Residuales

1.6.1. Descripción, Características y Beneficios de *Nannochloropsis oculata*

Nannochloropsis oculata es una microalga marina unicelular y parte de la clase *Eustigmatophyceae*. Es pequeña (2 a 4 µm de diámetro) y tiene una gran capacidad para obtener altos lípidos, principalmente ácidos grasos poliinsaturados como el ácido eicosapentaenoico (EPA); omega-3 de cadena larga, valorado por numerosos efectos beneficiosos para la salud (Wan *et al.*, 2022).

Nannochloropsis oculata es una microalga con relevancia biotecnológica basada en su capacidad para formar ácidos grasos poliinsaturados (PFA) basados en EPA (ácido eicosapentaenoico) que es crucial para la salud humana y animal. Esta microalga está disponible en aguas residuales tratadas y puede fermentar la base de nutrientes para producir proteínas y lípidos de alto valor (Carvajal-Oses *et al.*, 2018), lo que hace que

la microalga sea ventajosa para la producción sostenible de alimentos. Un marcado aumento en su producción industrial en México en 2023 también demostró su potencial agrícola y acuícola (Chlebicki *et al.*, 2023).

1.6.2. Biosíntesis de lípidos en *Nannochloropsis oculata*.

La energía liberada por los fotones que viajan a través de la luz puede producir la catálisis para oxidar moléculas de agua, generando O_2 para la síntesis de los productos de la siguiente manera: ATP y NADPH (Adenosina Trifosfato y Fosfato de Nicotinamida Adenina Dinucleótido). Estos sirven como sustratos en el Ciclo de Calvin, donde el CO_2 se fija en forma de proteínas, carbohidratos y lípidos. En el caso de los lípidos, las moléculas de carbono se transforman para generar almidón y acetil-CoA, estos dos carbonos al ser carboxilados pasan por innumerables ciclos de descarboxilación y β -reducción para producir ácidos grasos. Finalmente, los ácidos grasos se transfieren secuencialmente a través de la acción de gliceraldehído-3-fosfato (G3P) para formar triacilglicerol (TAG).

Esta microalga parece ser una fuente potencial de EPA con estudios recientes que muestran que algunas cepas podrían tener el perfil total de ácidos grasos en EPA hasta un 37.5%. Además, *N. oculata* tiene flexibilidad para diversas condiciones ambientales, apoyando su cultivo generalizado para fines industriales (Emam *et al.*, 2024).

1.6.3. Beneficios de su uso en procesos de biotransformación

La incorporación de *Nannochloropsis oculata* en procesos de biotransformación ofrece múltiples ventajas:

- **Producción de Biomasa Nutritiva:** Debido a su alto contenido en proteínas y ácidos grasos esenciales, la biomasa de *N. oculata* se utiliza como suplemento en la alimentación animal, mejorando el rendimiento y la salud de especies como aves y peces (Emam *et al.*, 2024).
- **Aplicaciones en Acuicultura:** En la acuicultura, *N. oculata* se emplea para enriquecer la dieta de organismos en etapas larvales, contribuyendo a una mejor supervivencia y crecimiento ((Emam *et al.*, 2024).)
- **Producción de Biocombustibles:** El elevado contenido lipídico de *N. oculata* la hace adecuada para la producción de biodiésel, ofreciendo una alternativa sostenible a los combustibles fósiles (Chlebicki *et al.*, 2023).
- **Biorremediación:** Esta microalga tiene la capacidad de absorber nutrientes y contaminantes del agua, lo que la convierte en una herramienta eficaz para el tratamiento de aguas residuales y la mejora de la calidad ambiental (Sousa *et al.*, 2022 a).

Nannochloropsis oculata es una microalga versátil con propiedades que la hacen valiosa en diversos sectores, desde la nutrición animal hasta la producción de energía y la protección ambiental (Sousa *et al.*, 2022 b).

1.6.4. Microalgas en Procesos de Biotransformación Aerobia

Nannochloropsis oculata, y otras microalgas se utilizan en operaciones de biotransformación aeróbica ya que son capaces de biorremediar los nutrientes encontrados en efluentes líquidos para producir biomasa utilizable. Se ha encontrado que las microalgas aplicadas a la remediación de aguas residuales reducen la carga de contaminantes y generan biomasa rica en nutrientes que está disponible para la alimentación animal (Zahran *et al.*, 2023).

1.6.5. Funcionamiento y ventajas de la biotransformación aeróbica con microalgas

La biotransformación aeróbica con microalgas es un proceso biotecnológico que utiliza las capacidades fotosintéticas de las microalgas para la bioconversión de materia orgánica en biomasa y la conversión de aguas residuales y otros materiales inorgánicos. Además de ser uno de los principales productores orgánicos de productos de biomasa en la naturaleza, el metabolismo aeróbico es también un elemento esencial del crecimiento microbiano de las microalgas. En la fotosíntesis, las microalgas producen oxígeno que es utilizado por las bacterias aeróbicas presentes en el medio para ayudar a descomponer la materia orgánica contaminante en este sistema. Este tipo de relación simbiótica aumenta la eficiencia del tratamiento de aguas residuales y, por lo tanto, ayuda en la limpieza de una fuente de agua determinada. Las microalgas también absorben nitrógeno y fósforo, lo que limita la eutrofización en las aguas receptoras. Este enfoque integrado ha sido extremadamente efectivo en la reducción de estos contaminantes y en la generación de biomasa capaz de aplicaciones en biocombustibles y otros productos de valor añadido (Cinvestav, 2021).

Ventajas de la Biotransformación Aeróbica con Microalgas

Producción de Biomasa de Alto Valor: Las microalgas pueden proporcionar lípidos, proteínas y carbohidratos, producción para uso industrial en biocombustibles, alimento para animales y varios productos industriales. Esta capacidad potencial también convierte a las microalgas en un recurso renovable que se puede desarrollar como un activo de sustancias valiosas al mismo tiempo para una economía circular y para minimizar la dependencia del consumo de combustibles fósiles.

Mitigación de Gases de Efecto Invernadero: Captura de CO₂ por microalgas mediante fotosíntesis: La fotosíntesis y la captura de carbono en microalgas ayudan a capturar CO₂ del aire, lo que lleva a la reducción de gases de efecto invernadero y ayuda a reducir los gases de efecto invernadero. Este proceso ayuda a disminuir el

CO₂ atmosférico y el producto final es biomasa útil que representa energía sostenible que contribuye a abordar la crisis climática (Manzoni *et al.*, 2021).

Eficiencia Energética: El oxígeno generado por las microalgas reduce los requisitos de aireación mecánica en el tratamiento de aguas residuales al minimizar el consumo total de energía de las aguas residuales en uso en la vía industrial. Un sistema de oxígeno autogenerado de energía proporciona una gran sostenibilidad y competitividad de costos al sistema, que puede tener un valor más alto en comparación con los tratamientos convencionales y los procesos convencionales que tienen un alto consumo de energía (Cinvestav, 2021).

Aplicaciones en Biorremediación: Las microalgas no solo limpian los desechos sólidos (agua) al eliminar o convertir impurezas en medios de tratamiento líquidos o gaseosos, sino que también purifican el agua y el aire. Su naturaleza es especialmente pertinente ya que las microalgas pueden eliminar eficientemente metales pesados, compuestos orgánicos tóxicos y nutrientes en exceso en la purificación de aguas residuales industriales y municipales para proteger los ambientes acuáticos.

1.6.6. Aplicaciones de la Biomasa de *Nannochloropsis oculata* en la Alimentación Animal

El uso de biomasa derivada de *Nannochloropsis oculata* ha ido en aumento para alimento animal, que actúa como ácidos grasos omega-3 y entre otros alimentos importantes. Se informa que esta microalga proporciona nutrientes de alta calidad que promueven la salud intestinal en los animales, y se ha encontrado que los animales se desempeñan mejor con un mayor contenido de nutrientes. Evidencia reciente presentada en la literatura indica un aumento en la eficiencia del alimento y la calidad del producto mediante la inclusión de microalgas nutricionales en las dietas avícolas (Sales-Pérez *et al.*, 2022).

1.6.7. Valor nutricional y beneficios para la salud animal

Las fracciones de biomasa obtenidas de microalgas representan una fuente de nutrientes rica en fibra beneficiosa para la salud del huésped y múltiples variables de

salud animal. Consistirá principalmente en metabolitos de microalgas y su efecto positivo se ve en la Figura 1.3.

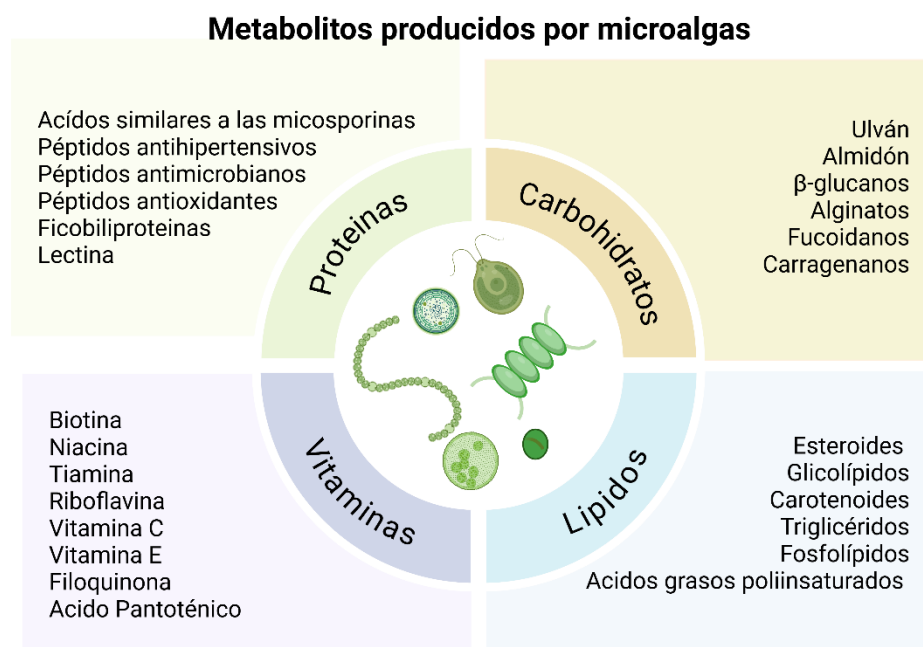


Figura 1.3. Metabolitos producidos por microalgas

Valor Nutricional de la Biomasa de Microalgas

- **Proteínas:** Las microalgas son abundantes en proteínas de calidad que pueden alcanzar contenidos superiores al 68% del peso seco. Tal es la propiedad del alimento animal que sirve como suplemento proteico perfecto para el crecimiento y desarrollo óptimo de múltiples clases (Cabrera-Núñez *et al.*, 2018; Umaña Venegas, 2019).
- **Aminoácidos Esenciales:** Hay muchos aminoácidos que son indispensables en las microalgas como la metionina, treonina y triptófano, que no pueden ser fabricados por los animales, pero son necesarios para funciones corporales fundamentales (Quinapanta-Pérez *et al.*, 2023).
- **Lípidos y Ácidos Grasos Omega-3:** Algunas especies de microalgas como *Nannochloropsis oceanica* son ricas en ácidos grasos omega-3 (ácido eicosapentaenoico (EPA)) así como ácidos grasos poliinsaturados esenciales para la salud cardiovascular de los animales. Esto también contribuye a la salud cerebral (Wan-Razali *et al.*, 2022).
- **Vitaminas y Minerales:** Estas son vitaminas A, B12, C y E, así como todos los minerales vitales calcio, hierro, magnesio, fósforo, zinc y potasio, promoviendo así la salud y la inmunidad (Prates, 2025).

Beneficios para la Salud Animal

- **Mejora del Sistema Inmunológico:** Los estudios han demostrado que la sustitución de ingredientes de microalgas en una dieta restaura y apoya la inmunidad, un factor crítico para disminuir el riesgo de enfermedades y contenido de antioxidantes (Mavrommatis *et al.*, 2023).
- **Salud Intestinal Óptima:** Las microalgas, ricas en fibra y prebióticos, ayudan a mantener la microbiota intestinal equilibrada, facilitando la digestión de los alimentos y la absorción de nutrientes (Quinapanta-Pérez *et al.*, 2023).
- **Desarrollo y Crecimiento Mejorados:** Se ha demostrado que las microalgas son más densas en nutrientes y de rápido crecimiento, por lo que su suplementación en animales jóvenes como cerdos y aves de corral (Prates, 2025).
- **Reducción de Emisiones Contaminantes:** Con la incorporación de algas en las dietas de rumiantes, se reduce el metano. Esto también disminuye los gases de efecto invernadero y hace que la producción sea más sostenible ambientalmente (Prates, 2025).

1.7. Bacterias Ácido-lácticas en Procesos Anaerobios de Biotransformación

Lactobacillus plantarum es una de las bacterias del ácido láctico que tiene una actividad de digestión anaeróbica y adaptabilidad metabólica. El uso de bacterias ácido lácticas (BAL) en procesos de biotransformación de residuos orgánicos, se ha convertido en una estrategia viable para el tratamiento de residuos complejos (Strick *et al.*, 2023). Esto debido a que pueden hidrolizar matrices lignocelulósicas y consumir compuestos asimilados mediante acidogénesis como glucosa, fructuosa y lactosa (Villanueva-Galindo *et al.*, 2025). De esta manera pueden generar compuestos de interés como ácido láctico, ácido acético, etanol e incluso producir enzimas (Romero-Mota *et al.*, 2023). Se han estudiado algunos residuos orgánicos como fuente de nutrientes para el crecimiento de distintas especies de BAL como estiércol porcino con *Lactobacillus acidophilus* estiércol bovino con *Lactobacillus acidophilus*, *Lactobacillus fermentum* y *Bacillus subtilis*, y residuos cerveceros con *Lactobacillus casei* y *Bacillus subtilis* (Estrada-García *et al.*, 2023)

Los desechos industriales deben ser controlados porque los desechos generados de esta manera (particularmente de aves de corral) son perjudiciales para el medio ambiente y pueden ser utilizados. Los lodos avícolas contaminarán si no se tratan adecuadamente en la corriente de desechos que contiene una multitud de materia orgánica y nutrientes. Sin embargo, las prácticas biológicas permiten los procesos que transforman estos lodos en productos efectivos y sostenibles para una economía circular (Barreto *et al.*, 2023). Por lo tanto, *Lactobacillus plantarum* con microalgas como *Nannochloropsis oculata* se consideran un candidato experimental prometedor para transformar la biomasa de desechos orgánicos en biomasa de alto valor, rica en nutrientes y económicamente viable. Estos tipos producen biomasa rica en proteínas en un entorno más sofisticado que es adecuado para uso industrial, como alimento para animales.

Tabla 1.3 Descripción de los pasos de la ruta metabólica de la conversión de aminoácidos a partir de la degradación de proteínas utilizando probióticos (presentes en la Figura 1.3).

Etapas clave	Descripción
Proteinasa de la Envoltura Celular	La proteína de la superficie celular de los probióticos inicia la proteólisis, rompiendo las proteínas en oligopéptidos de menor tamaño.
Peptidasas	Estos oligopéptidos se transportan al interior de la célula, donde las peptidasas los descomponen en dipéptidos y tripéptidos más simples.
Enzimas Biosintéticas	Estas enzimas contribuyen a la transformación de los péptidos en compuestos precursores para la síntesis de aminoácidos.
Deshidrogenasa	Participa en reacciones de oxidación-reducción, facilitando la conversión de ciertos aminoácidos y otros compuestos intermedios.
Aldolasas	Participa en reacciones de oxidación-reducción, facilitando la conversión de ciertos aminoácidos y otros compuestos intermedios.
Liasas	Estas enzimas actúan sobre los enlaces carbono-carbono y carbono-oxígeno, ayudando a formar o romper estructuras moleculares complejas en la ruta de síntesis de aminoácidos
Aciltransferasas Esterasas	Estas enzimas participan en la transferencia de grupos acilo, facilitando la conversión de algunos compuestos en intermediarios que alimentan otros ciclos metabólicos
Deshidrogenasa (Segunda Fase)	Otra reacción de deshidrogenación que convierte intermediarios en compuestos útiles en el metabolismo energético de las bacterias.
Aminotransferasas	Estas enzimas transfieren grupos amino entre moléculas, produciendo aminoácidos a partir de otros compuestos intermedios
Descarboxilasa	Elimina grupos carboxilo de algunos aminoácidos, generando compuestos que pueden incorporarse en otras rutas metabólicas
Deiminasa y Descarboxilasas	Enzimas que eliminan grupos amino o grupos carboxilo, respectivamente, para formar productos intermedios que se convierten en otros aminoácidos o en compuestos metabólicos.
Complejo Deshidrogenasa	Este complejo multienzimático facilita la producción de energía al oxidar los intermediarios formados en las etapas anteriores.
Enzimas Biosintéticas (Segunda Fase)	Finalmente, las enzimas biosintéticas convierten los intermediarios generados en aminoácidos finales que son útiles tanto para el crecimiento de los probióticos como para su aporte proteico en el medio.

1.7.3 Características de *Lactobacillus plantarum* en la Digestión Anaerobia

Lactobacillus plantarum es una bacteria del ácido láctico con capacidad metabólica heterofermentativa facultativa. Esto significa que puede fermentar predominantemente azúcares hexosa a ácido láctico, incluyendo concentraciones muy bajas de ácido acético, etanol y CO₂, lo cual es un efecto estabilizador anaeróbico. Tiene propiedades que son ideales para controlar su proceso de fermentación controlada esperada en un entorno acuoso de baja acidez para aplicaciones deseadas, como el control del valor de pH de baja densidad iónica, control de pH volumétrico bajo en digestores anaerobios. Dado que *L. plantarum* produce ácido láctico como el principal producto metabólico y su medio es más ácido ya que el proceso de fermentación es ácido. Tales situaciones ácidas no favorecen a los microorganismos patógenos y pueden aliviar los contaminantes mientras hacen la digestión anaeróbica mucho más eficiente. Al promover la actividad metanogénica en la etapa posterior del proceso, este mecanismo además mejora la producción de biogás (FAO, s.f.; Wang *et al.*, 2021).

Ventajas de *Lactobacillus plantarum* en la Digestión Anaerobia

- **Adaptabilidad a Diferentes Condiciones Ambientales:** *L. plantarum* es capaz de crecer a diversas temperaturas y desde varios niveles de pH, lo que significa que puede manejar diferentes condiciones ambientales de los sistemas de digestión anaeróbica.
- **Mejora en la Descomposición de Residuos Orgánicos:** La actividad fermentativa de *L. plantarum* facilita la descomposición de materiales orgánicos complejos, acelerando la producción de biogás y mejorando la eficiencia general del proceso de digestión anaerobia

Incremento del Contenido Proteico de la Biomasa: La actividad fermentativa por *L. plantarum* facilita la descomposición de materiales orgánicos complejos, lo que acelera la producción de biogás y la eficiencia general en la digestión anaeróbica. **Aumento del Contenido de Proteínas de la Biomasa:** La fermentación de *L. plantarum* puede aumentar el contenido de proteínas de la biomasa derivada de *L. plantarum*, haciéndola un material de alimentación apropiado (Zhu *et al.*, 2024).

Eliminación de Contaminantes y Patógenos: Las especies antimicrobianas y las propiedades de reducción de pH de *L. plantarum* crean una vía que reduce el nivel de microorganismos patógenos y contaminantes en los productos de desecho al reducir la concentración de los contaminantes junto con el pH, lo que hace que el digestato procesado de *L. plantarum* sea más saludable (Carvajal-Garay *et al.*, 2021).

1.7.4. Uso de *Lactobacillus plantarum* en Procesos Anaerobios

Lactobacillus plantarum y otras bacterias del ácido láctico contribuyen de manera importante a la biotransformación anaeróbica de residuos orgánicos. Permiten que las

fibras de celulosa crezcan a partir de residuos orgánicos. Se espera que estos microorganismos fermenten los desechos, así como degraden la materia orgánica, produciendo biomasa rica en nutrientes y sirviendo como una solución potencial para los lodos residuales avícolas (Insuasti *et al.*, 2022). Además, los productos fermentados de *Lactobacillus plantarum* pueden ser utilizados para mejorar la nutrición animal como proteínas y otros componentes bioactivos (Osorio-Urtecho *et al.*, 2020).

1.7.5. Metabolismo y Adaptabilidad de *Lactobacillus plantarum*

El metabolismo de *Lactobacillus plantarum* es altamente adaptable y adecuado para entornos variados en diferentes condiciones ambientales, por lo que esta planta adaptada a autófalos y fitobacterias nos da alguna esperanza para la biotransformación por agentes anaerobios. Esta flexibilidad permite que las bacterias estén en un ambiente ácido y faciliten la degradación del producto crudo, así como el aumento del contenido de proteínas de la biomasa final. Además, se informa que *Lactobacillus plantarum* es eficiente para la eliminación de contaminantes y agentes patógenos de los desechos (Fajardo-Argoti, 2021).

Lactobacillus plantarum es una bacteria del ácido láctico con una alta flexibilidad metabólica y su capacidad para resistir alteraciones ambientales. Es altamente adaptable y puede fermentar diferentes carbohidratos en un entorno variable de pH y O₂. Los sistemas microbianos y la función metabólica única de los microbios bajo el proceso de fermentación de *L. plantarum* han sido mejorados a partir de los procesos de fermentación de *L. plantarum* por un estudio sobre una bacteria fermentativa establecida que había sido estudiada (Zhao *et al.*, 2023).

1.7.6. Proceso de Biotransformación con Probióticos (*Lactobacillus plantarum*)

La incorporación de *Lactobacillus plantarum* destaca en estrategias de biotransformación ha sido beneficioso para la producción de biomasa (aumento de la eficiencia de producción de biomasa, así como la calidad del producto final). Además de la fermentación, *L. plantarum* es un probiótico con propiedades beneficiosas para la salud del huésped. Una revisión sistemática concluyó que la infusión de *L. plantarum* puede permitir el control de citoquinas pro- y antiinflamatorias, así como una mejor respuesta inmune y supresión de la expresión de citoquinas inflamatorias (Wu *et al.*, 2025).

Estos efectos son particularmente beneficiosos en la producción de alimentos fermentados y suplementos probióticos, donde la calidad y funcionalidad de la biomasa son esenciales.

1.8. Comparación entre procesos aerobios y anaerobios en la biotransformación de LRA

1.8.1. Diferencias en el mecanismo de los procesos

Los procesos aerobios y anaerobios se emplean en el tratamiento de lodos residuales, cada uno con mecanismos y características operativas distintas. En el tratamiento aeróbico, la materia orgánica es degradada por microorganismos que consumen oxígeno, generando dióxido de carbono, agua y más biomasa. Esta operación suele ser más rápida y mejor para reducir la DBO y eliminar patógenos. El tratamiento anaeróbico es un proceso anaeróbico donde, en ausencia de oxígeno, microorganismos específicos descomponen la materia orgánica para producir biogás (principalmente metano y dióxido de carbono) junto con un residuo sólido llamado digestato. Hay un beneficio en este proceso, ya que produce biogás, pero es un proceso más lento por naturaleza, además de que es una generación de energía renovable. Una comparación de eficiencia, tiempo y condiciones en operaciones (Tchobanoglous *et al.*, 2021)

Comparación de eficiencia, tiempo y condiciones operativas

El tratamiento aeróbico puede eliminar rápidamente contaminantes y patógenos y dar un efluente de alta calidad compatible para descarga o reutilización. Sin embargo, supone la necesidad de un suministro perpetuo de oxígeno que conlleva mayores costos de energía y operación. Además, conduce a una mayor producción de lodo secundario que puede ser eliminado posteriormente. El tratamiento anaeróbico, por otro lado, genera menos lodo y también produce biogás como fuente de energía, reduciendo así el costo de las operaciones.

El tratamiento de efluentes en la planta de tratamiento es un proceso de alta calidad realizado por múltiples autores que, como ejemplo, estudiaron ERC en la Unión Europea (EBR) (Fawkes, 2012; Isaza y González, 2021). Sin embargo, el efluente tratado necesita ser descargado como entrada al sistema para establecer los estándares de descarga, y es más sensible a las condiciones ambientales variables como la temperatura (Isaza y González, 2021).

1.8.2. Beneficios y Desventajas de Cada Proceso

Los tratamientos microbianos aerobios y anaerobios presentan ventajas y desafíos, que deben considerarse al seleccionar la tecnología adecuada para el tratamiento de lodos residuales. El método aeróbico ofrece la rapidez para descomponer la materia orgánica y los patógenos, mientras que el proceso anaeróbico proporciona la posibilidad de generar biogás para generar energía renovable y es la parte más notable de estas tecnologías. Las tablas 1.4 y 1.5 revisan las ventajas y desventajas destacadas de los dos procesos y estos métodos de comparación pueden ayudar a

evaluar cada proceso para casos particulares de gestión en la gestión de residuos orgánicos (Peng *et al.*, 2016).

Tabla 1.4. Beneficios y Desventajas del proceso aerobio

Aspecto	Proceso aerobio
Beneficios	• Eficiencia en la eliminación de materia orgánica. (Teamb, 2024) • Menor producción de lodos en comparación con anaerobios. (Teamb, 2024)
Desventajas	• Requiere un suministro constante de oxígeno, aumentando el consumo energético. (Teamb, 2024) • Limitada capacidad para tratar aguas con alta carga orgánica sin pretratamientos. (HRS Heat Exchangers, 2023)

Tabla 1.5. Beneficios y Desventajas del proceso anaerobio

Aspecto	Proceso Anaerobio
Beneficios	• Generación de biogás (metano), útil para energía renovable. (HRS Heat Exchangers, 2023) • Menor consumo de energía en la aireación, reduciendo los costos operativos. (EcoRich, 2023)
Desventajas	• El proceso es más lento y requiere tiempos de retención más largos. (EcoRich, 2023)

1.9. Integración de *Lactobacillus plantarum* y *Nannochloropsis oculata* en Sistemas de Tratamiento de Residuos

1.9.1. Sinergia entre microalgas y bacterias en procesos biológicos

Las microalgas y las bacterias juntas en sistemas de tratamiento de aguas residuales son ventajosas porque existe una relación simbiótica entre ellas. Las microalgas generan oxígeno a través de la fotosíntesis, el cual es utilizado por las bacterias para la descomposición de la materia orgánica. Las bacterias, a su vez, producen dióxido de carbono y nutrientes inorgánicos que las microalgas utilizan en su crecimiento. Esta asociación mejora la eficiencia de eliminación de contaminantes y produce biomasa de valor añadido.

En una investigación reciente, se revisó el biogás como fuente de dióxido de carbono para la producción de *Nannochloropsis oculata* a partir de plantas de biogás en fotobiorreactores. Se informó que la combustión de biogás como material de CO₂ para el cultivo era la más adecuada para el CO₂ para la microalga, mientras que se encontró

una mayor eficiencia de todo el proceso para mejorar la sostenibilidad del tratamiento de gas de biogás. (García-Pérez *et al.*, 2023).

1.10. Biotransformación de Lodos Residuales en la Industria Avícola

1.10.1. Aplicación práctica en la industria avícola mexicana

Los procesos de producción utilizados en la industria avícola de México generan una cantidad considerable de lodos residuales. La aplicación de sistemas de tratamiento basados en microalgas y bacterias ácido lácticas, se muestra como una alternativa viable para la gestión sostenible de los residuos generados por este tipo de actividades. Sin embargo, no se identificó ningún estudio específico en México utilizando *Lactobacillus plantarum*, ni para *Nannochloropsis oculata*, para la utilización de tratamientos biológicos en el sector avícola con un enfoque nutricional, se tiene antecedente de que los tratamiento de biotransformación, proporciona una reducción en la carga de orgánica del efluente tratado y en la calidad del agua residual tratada y redujo la cantidad de contaminantes en la industria avícola mediante la aplicación de tratamientos biológicos (Moscoso, 2021).

1.10.2. Retos y oportunidades de la biotransformación en la industria

La industria avícola es un área de gran potencial, donde se pueden aplicar tecnologías para mejorar la eficiencia de la producción, la optimización operativa y la compatibilidad ambiental.

En la industria avícola, estas soluciones se aplican y tienen los siguientes desafíos: obtener el mejor rendimiento de los tratamientos, tanto en tipo como en calidad. Sin embargo, también traen una gran esperanza de reducción de costos operativos, la producción de productos de valor añadido como biogás, biomasa rica en nutrientes y la sostenibilidad ecológica de la avicultura (Amador-Sanabria *et al.*, 2021).

La biotransformación de los desechos avícolas abre oportunidades potenciales para la generación de proteína microbiana rica en nutrientes. Las bacterias metanotróficas convierten ese biogás en proteínas microbianas, las cuales son una fuente sostenible de proteínas debido a sus bajos costos en comparación con las formas convencionales de proteína animal, ayudando a minimizar la presión sobre la agricultura. (Balboa y Vergara-González *al.*, 2021).

1.11. Beneficios del Uso de *Lactobacillus plantarum* y *Nannochloropsis oculata* en la Alimentación Animal

Se ha informado que el uso de *Lactobacillus plantarum* y *Nannochloropsis oculata* implementados en la alimentación animal tiene efectos positivos no solo en el valor nutricional del ganado, sino también en la sostenibilidad general de la industria animal. *Lactobacillus plantarum* mejora la digestibilidad de los nutrientes y la salud intestinal

en los animales, y *Nannochloropsis oculata* aporta ácidos grasos esenciales a los productos animales, mejorando su calidad y rendimiento (Souza *et al.*, 2021).

1.11.1. Efectos en el crecimiento, salud y productividad de aves

Se ha demostrado que el uso de *Lactobacillus plantarum* en la alimentación avícola aumenta la tasa de conversión alimenticia, el peso corporal y la función digestiva de las aves. Un estudio reciente de Peng *et al.* (2016 a) mostró que la suplementación de *Lactobacillus plantarum* en dietas de pollos de engorde mejoró notablemente la absorción de nutrientes y la integridad de la mucosa intestinal, resultando en un mejor rendimiento de crecimiento.

Por el contrario, *Nannochloropsis oculata*, una microalga abundante en ácidos grasos esenciales (particularmente EPA), proteínas y compuestos antioxidantes, se ha aplicado como aditivo en la alimentación avícola con buenos resultados. Se ha informado que *Nannochloropsis oculata* afecta no solo la calidad de la carne, sino también la conversión alimenticia y la estimulación inmunológica al incluirse en las dietas de animales, según estudios recientes (Salem *et al.*, 2022). Además, se ha informado un aumento en la deposición de ácidos grasos poliinsaturados en los tejidos de los productos animales, mejorando el perfil lipídico.

Un estudio diferente realizado por Anam *et al.* (2025) reveló que la introducción de biomasa de microalgas en la dieta de gallinas ponedoras contribuyó a una mejor calidad del huevo, un aumento de ácidos grasos omega-3 y una mayor pigmentación de la yema, lo que tuvo un impacto positivo para la industria y el consumidor.

Mejora del Rendimiento Productivo: La suplementación de *Lactobacillus plantarum* puede mejorar el rendimiento de crecimiento de los pollos de engorde. La aplicación de *L. plantarum* aumentó la ganancia de peso diaria promedio y tuvo un efecto beneficioso en la relación alimento-ganancia para la eficiencia alimenticia de las aves (Axon Comunicación, 2023).

Fortalecimiento del Sistema Inmunológico: La adición de *L. plantarum* puede mejorar la respuesta inmunitaria en la alimentación de pollos de engorde. Según estudios, la incorporación de este probiótico aumenta los títulos de anticuerpos post-vacunación y la abundancia de bacterias beneficiosas en la microbiota intestinal y, por lo tanto, ayuda significativamente al desarrollo de la resistencia a enfermedades (Mirsalami y Mirsalami 2024).

Salud Intestinal Óptima: En el uso de *L. plantarum* puede observarse en una mejor morfología intestinal con una elevación de la altura de las vellosidades y un aumento de la relación vellosidad/cripta en el intestino delgado. Tales alteraciones estructurales permiten una mayor absorción de nutrientes y mejoran un ambiente intestinal equilibrado (Coe *et al.*, 2022).

Beneficios de *Nannochloropsis oculata*:

Aunque falta evidencia sobre la aplicación de *N. oculata* en aves de corral, estudios en otras especies animales han demostrado que esta microalga proporciona ácidos grasos omega-3 y antioxidantes como una fuente potencial de nutrientes de valor agregado y se ha informado que mejoran el rendimiento y la salud avícola (Emam *et al.*, 2024).

1.11.2. Comparación con otros suplementos alimenticios

Ventajas Comparativas en Términos de Salud Animal y Rentabilidad

En comparación con otros suplementos alimenticios tradicionales, como los antibióticos promotores del crecimiento (GPA) y la harina de pescado, el uso de *Lactobacillus plantarum* y *Nannochloropsis oculata* presenta ventajas significativas en las ganancias de salud y productividad en la producción.

- **Sustitución de antibióticos promotores del crecimiento (APC):** Varios estudios han demostrado que los probióticos (*Lactobacillus plantarum* como probióticos) pueden potencialmente reemplazar a los GPA sin afectar los niveles de productividad de las aves. Un estudio de Karekezi *et al.* (2025) mostró que el uso de dietas suplementadas con *Lactiplantibacillus plantarum* fomentó un equilibrio del microbioma y menos infecciones digestivas sin los efectos secundarios asociados con los antibióticos.

Los probióticos, como *Lactobacillus plantarum*, son una alternativa efectiva a los GPA. Torres *et al.* (2024) realizaron recientemente un estudio que destacó que la administración de *Lactobacillus plantarum* en dietas de pollos de engorde mantiene el perfil de la microbiota intestinal para una mayor productividad y reducción de infecciones digestivas, al tiempo que minimiza los posibles efectos adversos de la suplementación con antibióticos.

- **Sostenibilidad en comparación con la harina de pescado:** La harina de pescado es una fuente tradicional de proteínas en la alimentación animal, aunque se ha cuestionado por su impacto ambiental y altos precios. En comparación, *Nannochloropsis oculata* tiene un valor nutricional similar y puede usarse para mejorar la eficiencia alimenticia de las aves sin la necesidad de pesca industrial (Gutiérrez-Salinas *et al.*, 2024).
- **Beneficios en la calidad del producto final:** Aunque el crecimiento puede mejorarse con otros suplementos, la biomasa de *Nannochloropsis oculata* puede enriquecer la carne y los huevos con ácidos grasos esenciales, mejorando su valor nutricional para el consumidor final.

A nivel de rentabilidad, agregar microorganismos beneficiosos como *Lactobacillus plantarum* y microalgas, como *Nannochloropsis oculata*, a la alimentación animal es un plan prometedor para el futuro para reducir costos y aumentar la productividad en los animales. Y dado que *L. plantarum* actúa como probiótico, esto no solo mejora el sistema inmunológico y la salud intestinal, sino que también reduce las posibilidades de enfermedades y disminuye la demanda de medicamentos veterinarios como los antibióticos. Esta disminución en el uso de medicamentos también significa ahorros económicos y aceptación en mercados donde el uso de promotores de crecimiento antimicrobianos está más estrictamente regulado.

N. oculata, sin embargo, es una microalga abundante en proteínas de alta calidad y ácidos grasos poliinsaturados omega-3 como el EPA (ácido eicosapentaenoico), esenciales en la función cardiovascular, inmunológica y neurológica de los animales. Su proporción de lípidos también añade valor nutricional a los alimentos (carne, leche, huevos), particularmente en mercados premium y orientados a la sostenibilidad o al bienestar animal.

Además, su uso en dietas también está relacionado con el menor uso de alimentos básicos costosos como la harina de pescado o la soja que pueden utilizarse en etapas anteriores de la dieta, y con una formulación económica y ecológica. Además, ambos microorganismos mejoran la conversión alimenticia y la tasa de crecimiento de los animales, optimizando así el consumo de recursos para alcanzar el peso de mercado, disminuyendo el tiempo necesario para alcanzar el rendimiento de peso comercial objetivo. La mayor reducción en la excreción de desechos contaminantes, junto con esto, también fortalece la producción animal circular y sostenible con una menor huella ambiental. Estos dos mejoran mutuamente tanto los ingresos generados por el sistema de producción como la robustez del sistema para nuevos mercados y su demanda relacionada con productos agroalimentarios (Torres-Tiji *et al.*, 2020).

CAPITULO 2

MATERIALES Y MÉTODOS

Este capítulo presenta el trabajo que incluyó los materiales y la metodología en el estudio, y tiene como objetivo proporcionar la información adecuada para que los estudios puedan replicar los experimentos. Presenta las condiciones operativas del procedimiento aeróbico y anaeróbico utilizado para la biotransformación de lodos residuales avícolas, el análisis y la caracterización de la biomasa generada.

Los materiales utilizados, como reactivos, cepas microbianas y medios de cultivo, se detallan aquí junto con las herramientas analíticas utilizadas para verificar la composición y calidad de la biomasa obtenida. Además, se presentan los siguientes procedimientos de trabajo experimental en la propagación de *Nannochloropsis oculata* en condiciones aeróbicas y *Lactobacillus plantarum* en condiciones anaeróbicas, para maximizar la biomasa con valor nutricional para su uso en la alimentación animal.

Dado que la medición de los aspectos fisicoquímicos y microbiológicos se basa en protocolos internacionales y artículos científicos contemporáneos, utilizan métodos estandarizados para hacerlos precisos. Además de eso, se describen los métodos de cálculo utilizados para la evaluación de la eficiencia de conversión de los procesos (concentración, reducción de contaminantes, caracterización del producto generado).

Este capítulo proporcionará la información para facilitar la replicabilidad del estudio en otras instalaciones similares que puedan tener en cuenta políticas sostenibles y control para utilizar los desechos avícolas en la producción de un alto valor de materia prima.

Para tener una visión completa del método experimental, se muestra un diagrama general del proceso de producción en la Figura 2.1; y las principales etapas de la biotransformación de lodos residuales avícolas, incluyendo el proceso aeróbico y anaeróbico. Este modelo indica las etapas de recolección de lodos seguidas del pretratamiento, la propagación aeróbica de *Nannochloropsis oculata* y la fermentación anaeróbica con *Lactobacillus plantarum*, y el monitoreo de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos. Finalmente, se presentan los métodos de separación y caracterización de la biomasa obtenida, incluyendo una evaluación de su composición nutricional y la consideración de su potencial utilización para su uso en la alimentación animal. Al hacer este diagrama, se ven las conexiones entre cada etapa del sistema en la investigación y contribuyen a la eficiencia del tratamiento y al valor agregado en la generación de productos.

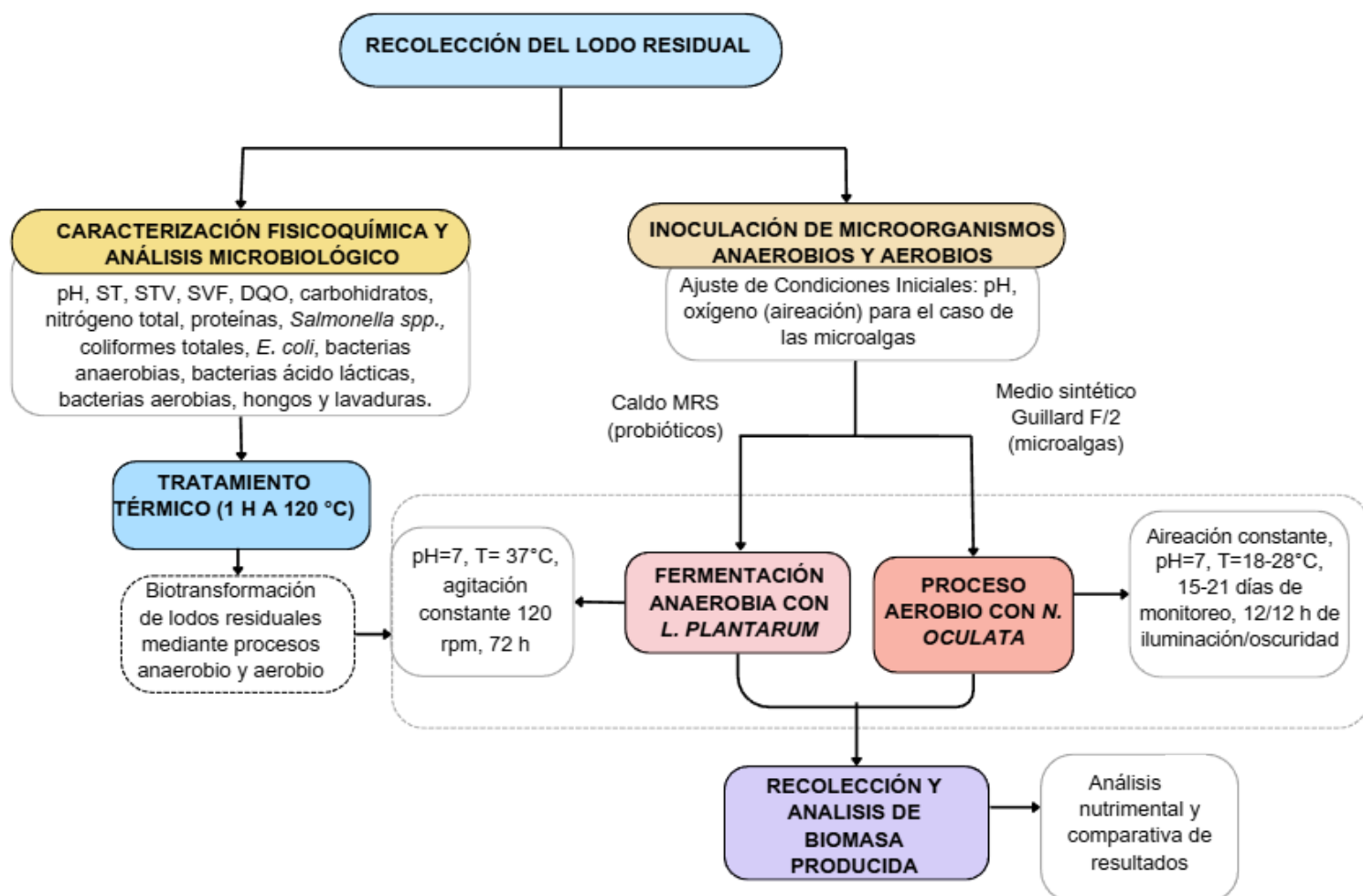


Figura 2.1 Metodología general para el proceso de biotransformación de LRA

2.1 Recolección y caracterización de la muestra

La muestra de lodo residual de aves utilizada en este estudio se obtuvo de la planta procesadora de aves Alpesur en Fortín, Veracruz. Esta planta produce abundante LRA como subproducto de sus operaciones de sacrificio y evisceración, con alto contenido orgánico y microbiológico. El proceso de recolección de muestras se llevó a cabo empleando un procedimiento estándar para obtener una muestra representativa, obtenida de un punto de descarga con características uniformes. Estas fueron transferidas a un ambiente estable para evitar el deterioro orgánico y a las instalaciones de tratamiento biológico de este trabajo. La caracterización fisicoquímica se realizó de acuerdo con la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Descripción de caracterización fisicoquímica de LRA

Parámetro	Tipo de Método	Descripción del Proceso	Norma Oficial o Referencia
pH	Potenciométrico	Medición del pH con potenciómetro calibrado con estándares de pH 4, 7 y 10.	NOM-001-SEMARNAT-2021
Sólidos Totales (ST)	Gravimétrico	Determinación por evaporación de una muestra a 103-105°C.	APHA 2540 B
Sólidos Totales Volátiles (STV)	Gravimétrico	Determinación de la fracción volátil de los sólidos totales tras calcinación a 550°C.	APHA 2540 E
Sólidos Fijos (SF)	Gravimétrico	Determinación de la fracción inorgánica de los sólidos totales tras calcinación a 550°C.	APHA 2540 E
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Método colorimétrico	Uso de un digestor químico para medir el oxígeno necesario para oxidar materia orgánica.	NOM-001-SEMARNAT-2021; APHA 5220 B
Proteínas	Método colorimétrico (Biuret o Bradford)	Cuantificación espectrofotométrica de proteínas presentes en la muestra.	APHA 4500-Norg B
Carbohidratos	Colorimétrico (fenol-ácido sulfúrico)	Cuantificación usando espectrofotómetro tras la reacción con ácido sulfúrico.	Metodología de Dubois <i>et al.</i> (1956)
Nitrógeno total	Método Kjeldahl	Determinación del nitrógeno total mediante digestión ácida y destilación.	APHA 4500-Norg B

La caracterización microbiológica del LRA se considera un tema importante para comprender la calidad y la tasa de tratamiento de aguas residuales de los productos de lodo formados en procesos industriales, específicamente de tales instalaciones de tratamiento. Esta caracterización ayuda a evaluar la composición bacteriana, fúngica y de otras microbiologías del lodo, lo que puede afectar el manejo y la disposición final. Aspectos como la presencia y cantidad/diversidad de patógenos y la diversidad de especies microbianas afectan directamente la seguridad sanitaria, la eficiencia en el proceso de tratamiento y la posible utilización del lodo como recurso renovable para la producción de biomasa con potencial de suplemento alimenticio.

Los principales parámetros microbiológicos para la caracterización de LRA se proporcionan en la Tabla 2.2. Esta información es necesaria para cumplir con los estándares ambientales y de salud pública, de modo que el material de desecho

tratado o descartado en el medio ambiente no sea un peligro para el medio ambiente y la salud humana.

Tabla 2.2. Descripción para caracterización microbiológica de LRA

Parámetro	Tipo de Método	Descripción del Proceso	Norma Oficial o Referencia
<i>Salmonella</i> spp.	Cultivo selectivo	Detección y enumeración en medio selectivo para <i>Salmonella</i> spp.	NOM-210-SSA1-2014
Coliformes Totales	Cultivo en medio selectivo	Enumeración de coliformes en medio cromogénico.	NOM-112-SSA1-1994
<i>Escherichia coli</i>	Cultivo en medio selectivo	Confirmación de <i>E. coli</i> en medio cromogénico diferencial.	NOM-113-SSA1-2009
Bacterias Anaerobias	Cultivo Petrifilm	Cuantificación en condiciones anaerobias utilizando placas Petrifilm.	Método Petrifilm 3M
Bacterias Aerobias	Cultivo Petrifilm	Enumeración de bacterias aerobias en medio sólido bajo condiciones aerobias.	Método Petrifilm 3M
Bacterias Ácido Lácticas	Cultivo Petrifilm	Cuantificación en medio específico para bacterias ácido lácticas.	Método Petrifilm 3M
Hongos y Levaduras	Cultivo Petrifilm	Identificación y cuantificación en medio selectivo para hongos y levaduras.	Método Petrifilm 3M

2.2. Acondicionamiento de la muestra (tratamiento térmico)

Se realiza inhibiendo microorganismos patógenos y alterando estructuralmente el LRA para aumentar el acceso a procesos biológicos y a una temperatura de 120 °C durante una hora, y la muestra tratada térmicamente se informa de acuerdo con la Figura 2.2, comparándose con el lodo inicialmente recolectado para evaluar la influencia del tratamiento térmico no solo para evaluaciones microbiológicas, sino también fisicoquímicas.

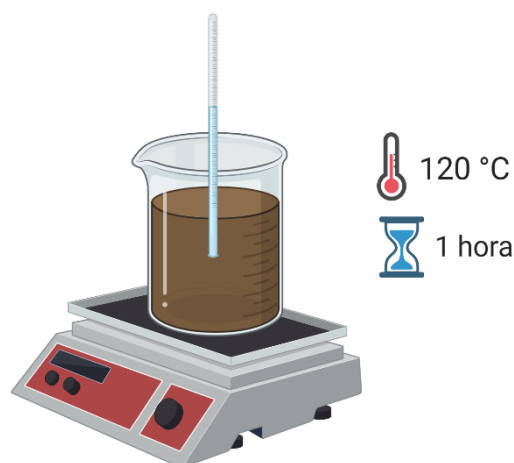


Figura 2.2 Pretratamiento térmico para la inactivación de patógenos presentes en LRA

2.3. Propagación de microorganismos anaerobios y aerobios

Los microorganismos anaerobios y aerobios son cruciales para su explotación en aplicaciones biotecnológicas, incluyendo la fermentación y el tratamiento biológico de desechos. Todas las especies de microorganismos requieren sus propias condiciones de cultivo para promover un crecimiento óptimo y actividad metabólica. Los métodos para controlar el crecimiento y desarrollo de bacterias anaeróbicas (*Lactobacillus plantarum*) y microalgas aeróbicas (*Nannochloropsis oculata*) se describen en la Tabla 2.3: medios de cultivo, condiciones ambientales y referencias normativas para un crecimiento eficiente y reproducible.

Tabla 2.3. Descripción de la propagación de microorganismos anaerobios y aerobios

Microorganismo	Método	Descripción del proceso	Norma o Referencia
<i>Lactobacillus plantarum</i>	Medio caldo MRS (Mar, Rogosa and Sharpe),	Propagación en medio MRS bajo condiciones anaerobias a 37°C, 120 rpm.	APHA 9260 B
<i>Nannochloropsis oculata</i>	Medio Guillard/F2	Cultivo en medio sintético con aireación constante, ciclo de luz/oscuridad de 12:12 y T= 24-30°C.	Protocolo Guillard (1975); APHA 10200 H

Para un crecimiento adecuado, *Lactobacillus Plantarum* se cultiva y propaga en medio de caldo MRS (Mar, Rogosa and Sharpe), en tubos de ensayo donde se incuba bajo las condiciones anaeróbicas descritas en la Tabla 2.3 que eventualmente se utilizarán para biotransformar el lodo residual.

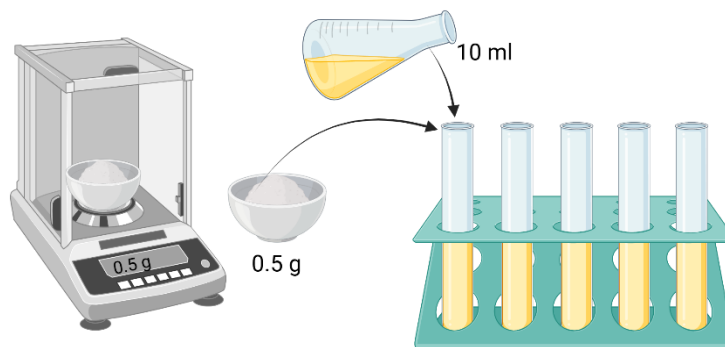


Figura 2.3 Cultivo y propagación de *Lactobacillus Plantarum*

El medio Guillard F/2 se utiliza como medio para el cultivo y propagación de microalgas marinas y cianobacterias en aplicaciones de microbiología y biotecnología. Debido a que la mayor parte de este medio es inorgánico, serviría como medio de mantenimiento para cultivos axénicos, y para el *N. Oculata* se desea una condición de aireación constante, ciclo de luz/oscuridad de 12:12 y T= 24-30°C como se ilustra en la Figura 2.4.

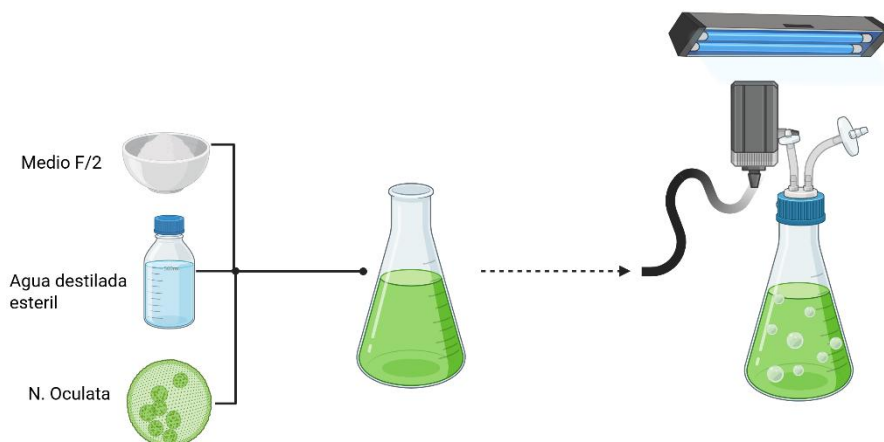


Figura 2.4 Cultivo y propagación de *Nannochloropsis oculata*

2.4. Proceso de fermentación anaerobia y proceso aerobio

La biotransformación del LRA a través de procesos biológicos como la fermentación anaerobia y el proceso aerobio representa una estrategia sostenible para la utilización de desechos. Durante la fermentación anaerobia, llevada a cabo por ciertas bacterias,

incluyendo *Lactobacillus plantarum*, se generan metabolitos útiles, ácido láctico y proteínas que mejoran las propiedades del lodo. Al mismo tiempo, la actividad aeróbica del cultivo de microalgas como *Nannochloropsis oculata* proporciona proteínas, lípidos y ácidos grasos al lodo. Esta subsección ofrece una descripción detallada de cada proceso, así como las condiciones operativas individuales y referencias técnicas como base metodológica.

Tabla 2.4. Descripción del proceso de fermentación anaerobia y proceso aerobio

Proceso	Condición/Método	Descripción del proceso	Norma o Referencia
Fermentación anaerobia con <i>L. plantarum</i>	Condiciones anaerobias en medio MRS a 37°C, 120 rpm	Transformación del lodo residual mediante fermentación anaerobia para mejorar la digestibilidad y disponibilidad de nutrientes.	APHA 9260 B
Proceso aerobio con <i>N. oculata</i>	Medio Guillard/F2 con aireación y luz	Cultivo de la microalga sobre el lodo pretratado para la producción de biomasa rica en proteínas y lípidos.	Protocolo Guillard (1975); APHA 10200 H

2.5 Proceso de biotransformación del LRA mediante *Lactobacillus plantarum*

Se utilizó la cepa *L. plantarum*, la cual fue propagada en caldo MRS (Mar, Rogosa and Sharpe), a condiciones anaerobias a 37°C durante 24 h. Se mantuvo en refrigeración a 4°C hasta su uso. Se realizaron tres pruebas haciendo variaciones en la concentración de inóculo teniendo 5, 10 y 15% v/v, considerando tres réplicas.

Para evaluar la eficiencia de biotransformación del LRA con *Lactobacillus plantarum*, se realizan experimentos cinéticos bajo condiciones controladas. Se utiliza LRA, que fue pretratado térmicamente para eliminar cualquier microorganismo patógeno y asegurar su seguridad y manejo microbiológico. Se emplean matraces Erlenmeyer de 250 mL, y se coloca un volumen de muestras representativas de LRA tratado térmicamente. Se añaden tres tratamientos experimentales (5%, 10% y 15% (v/v) de *Lactobacillus plantarum*) según diferentes concentraciones (como se muestra en la Figura 2.5) a cada matraz.

Los matraces se incuban en un incubador orbital a 37 °C bajo condiciones anaerobias con agitación constante a 120 rpm, durante 48 h (2 días). Estas condiciones favorecen el crecimiento del microorganismo y el proceso de fermentación necesario para convertir el lodo en un producto utilizable y nutritivo.

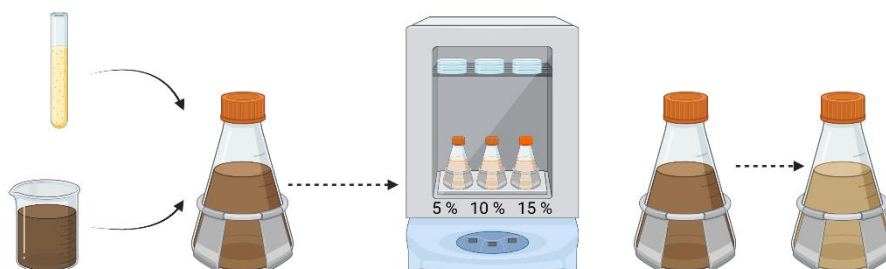


Figura 2.5 Cinética de biotransformación del lodo residuo avícola mediante *Lactobacillus plantarum*

Se recolectan muestras cada cuatro horas desde el inicio del experimento. Cada muestra se prueba para lo siguiente:

- **Carbohidratos totales**
- **pH**
- **Conteo celular de *Lactobacillus plantarum*** (por siembra en medio agar MRS)
- **Contenido de nitrógeno (NTK o amoniacal)**
- **Proteína total (por método de Kjeldahl o cálculo indirecto)**

Estas variables permiten evaluar la eficiencia metabólica de *Lactobacillus plantarum* en el lodo orgánico (degradación del LRA y transformación de materia orgánica), así como el potencial para la producción de biomasa basada en nutrientes. Se examinará la cinética de estas tres concentraciones para determinar cuál contiene el mayor rendimiento en términos de crecimiento celular, transformación del sustrato y producción de biomasa enriquecida.

2.5.1 Obtención de los parámetros cinéticos del proceso anaerobio con *Lactobacillus plantarum*

Los datos experimentales obtenidos a partir del conteo celular de las especies probióticas se ajustaron al modelo de Gompertz generalizado de 4 parámetros, debido a que se ha utilizado previamente para modelar matemáticamente el comportamiento de probióticos en procesos de biotransformación.

$$y_A = b + (a - b) \exp(-\exp(-k_s(t - T_i)))$$

donde y_A es $\log N_t/N_0$, a es la concentración celular más alta ($\log$ UFC/mL), k_s es el coeficiente de velocidad de crecimiento, λ (lag o tiempo de acondicionamiento), T_i representa el tiempo de máximo crecimiento microbiano; para obtener μ_{max} , se calcula k_s/e y a su vez, $\lambda = T_i - 1/k_s$. Para obtener los modelos no lineales, se utilizó el método de mínimos cuadrados para la solución de las ecuaciones de modelado, y el mismo método se empleó para el análisis estadístico (IC 95%, $\alpha = 0.05$).

Determinación de ácido láctico

Con el objetivo de ampliar la caracterización del proceso de fermentación anaerobia del LRA, se propone un análisis de la producción de ácido láctico como uno de los principales metabolitos generados por *Lactobacillus plantarum*. El ácido láctico no solo representa un indicador clave de la eficiencia fermentativa, sino que también contribuye a la conservación del producto, inhibición de patógenos y mejora del valor nutricional de la biomasa obtenida. Se consideran los tres tratamientos previamente evaluados (5 %, 10 % y 15 % de inóculo), bajo las mismas condiciones experimentales (37 °C, 120 rpm, 48 h), estimando la concentración final de ácido láctico, su rendimiento con respecto al consumo de carbohidratos ($Y_{p/s}$), el tiempo de máxima producción y el pH final alcanzado. Estos datos permiten prever el comportamiento del sistema frente a distintas cargas microbianas y valorar la viabilidad de la biomasa como suplemento funcional en alimentación animal.

$Y_{p/s}$: Rendimiento del producto (ácido láctico) por sustrato consumido (carbohidratos). Este valor se calcula como:

$$Y_{p/s} = \frac{\text{g de ácido láctico producido}}{\text{g carbohidratos consumidos}}$$

2.6. Proceso de biotransformación de LRA mediante *Nannochloropsis oculata*

Para el proceso de biotransformación de LRA, se preparó una serie de tratamientos donde el lodo previamente tratado térmicamente se mezcla con el cultivo de microalgas en medio F/2. En esta etapa, se estudia la influencia del lodo como fuente alternativa de nutrientes en el crecimiento de microalgas y sus propiedades fisicoquímicas.

Hay un cultivo activo de microalgas en fase exponencial (1 L por tratamiento) con medio de nutrientes F/2. El LRA tratado térmicamente es utilizado y se preparan tres niveles de adición de lodo (v/v en relación al volumen total del cultivo):

- **Tratamiento 1:** 1% de LRA
- **Tratamiento 2:** 3% de LRA

• **Tratamiento 3:** 5% de LRA

Se utilizó un control con microalgas en medio F/2 sin adición de lodo. Los cultivos se desarrollan con luz controlada (fotoperiodo de 12:12 h luz/oscuridad), temperatura ambiente ($25 \pm 6^\circ\text{C}$), asegurando la dispersión de nutrientes y evitando la sedimentación. Se suministra aireación constante utilizando un aparato casero que consiste en un rotor de aire conectado a una manguera de pecera, y se distribuye burbujeo continuo a cada tratamiento. Además, los cultivos se agitan manualmente dos veces al día. La duración del experimento es de 15 días. Los parámetros de análisis durante el monitoreo del experimento se presentan en la Tabla 2.5, Tabla 2.6, Tabla 2.7 y Tabla 2.8.

Tabla 2.5 Parámetros de análisis para el crecimiento y rendimiento de la biomasa

Análisis	Método	Norma/Referencia	Frecuencia	Objetivo
Densidad óptica (OD)	Espectrofotometría a 680 nm (clorofila a)	Basado en métodos de análisis espectrofotométrico en microalgas (FAO, 1998)	Cada 24 h	Seguimiento cuantitativo del crecimiento algal

Tabla 2.6 Parámetros de calidad del medio (para monitorear la biotransformación)

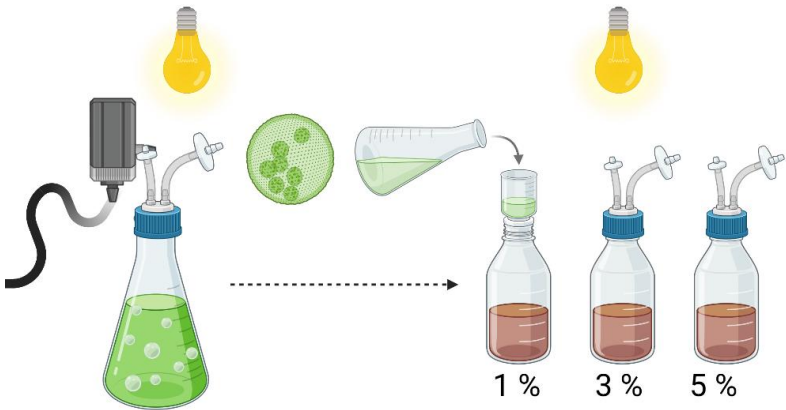
Análisis	Método	Norma/Referencia	Frecuencia	Objetivo
DQO (mg/L)	Digestión con dicromato y lectura espectrofotométrica	APHA 5220 D, NMX-AA-030-SCFI-2013	Cada 24 h	Medir la cantidad de materia orgánica oxidada, indicador clave de remoción por microalgas
COT	Método UV/Persulfato (Oxidación química y detección espectrofotométrica)	APHA 5310 B, NMX-AA-051-SCFI-2016	Cada 24 h	Cuantificar el carbono orgánico total presente en el medio, parámetro clave para evaluar la mineralización y el consumo de compuestos orgánicos durante la biotransformación

pH	Potenciómetro calibrado	NMX-AA-008-SCFI-2016	Cada 24 h	Indica actividad fotosintética, estabilidad y posibles procesos fermentativos
----	-------------------------	----------------------	-----------	---

Tabla 2.7 Observaciones cualitativas con *Nannochloropsis oculata* (no instrumentales)

Variable	Método	Frecuencia	Significado
Color de cultivo	Observación visual	24 h	Verde intenso indica salud; colores cafés → decaimiento celular
Olor	Sensorial (olfato)	24 h	Olor fétido puede indicar descomposición o exceso de carga orgánica
Sedimentación o floculación	Observación visual del fondo del matraz	24 h	Puede sugerir estrés celular, pérdida de movilidad o muerte celular

Para el monitoreo diario se registran variables de cada 24 horas para cada tratamiento: color del cultivo, DQO total y soluble, pH, olor, y observaciones adicionales visuales como se muestra en la Figura 2.6. Esta evaluación permite inferir cambios en la calidad



del medio y en la actividad biológica del cultivo a lo largo del tiempo.

Figura 2.6 Biotransformación del LRA mediante condiciones aerobias con *N. Oculata*

2.6.1 Obtención de parámetros cinéticos del proceso aerobio con *Nannochloropsis oculata*

Para caracterizar de manera cuantitativa la conducta del cultivo de *Nannochloropsis oculata* a lo largo del proceso de biotransformación de LRA, se utilizará un método cinético que combina el modelo Luedeking–Piret (para la creación de metabolitos

vinculada al crecimiento) con el modelo Monod con inhibición Haldane. Esta combinación posibilita que se evalúen, de manera unificada, el desarrollo de las microalgas, la utilización de materia orgánica disponible en el entorno y la fabricación de compuestos intracelulares como los carbohidratos.

La aplicación del modelo de Monod con inhibición de Haldane se basa en que los cultivos microalgales, al estar expuestos a residuos orgánicos, tienen dos rasgos destacados:

- Al igual que en los modelos de cinética microbiana heterotrófica, el crecimiento está condicionado por la disponibilidad de sustrato orgánico (DQO total, DQO soluble o carbono orgánico total).
- La presencia de compuestos nitrogenados, amoniacales, ácidos grasos volátiles o sustancias recalcitrantes que se encuentran en el lodo avícola puede causar efectos inhibitorios a partir de concentraciones altas del sustrato.

Por lo tanto, el modelo clásico de Monod no es suficiente, y se utiliza la modificación de Haldane para caracterizar correctamente tanto la etapa de crecimiento rápido cuando hay sustrato disponible como la reducción o desaceleración que va acompañada a la inhibición por sobrecarga orgánica.

Además, dado que la microalga tiene la capacidad de almacenar o liberar metabolitos a lo largo del proceso de biotransformación, se incluye el enfoque de Luedeking-Piret. Este método hace posible determinar si la generación de carbohidratos está vinculada directamente con el crecimiento celular o si es consecuencia de mecanismos separados relacionados con el mantenimiento celular o el estrés metabólico.

2.7.1 Variables y parámetros del modelo Monod-Haldane

$$\mu = \frac{(\mu_{max} S)}{(K_s + S + (S^2/K_i))}$$

Donde μ = velocidad específica de crecimiento (d^{-1}), μ_{max} = velocidad máxima de crecimiento cuando el sustrato no es limitante, S = concentración de sustrato (DQO o COT; $mg.L^{-1}$), K_s = Constante de semisaturación ($mg.L^{-1}$), indica la afinidad de la microalga por el sustrato y K_i = constante de inhibición ($mg.L^{-1}$), describe el grado de inhibición por exceso de sustrato.

La biomasa se describe mediante la ecuación diferencial:

$$\frac{dX}{dt} = \mu X - K_d X$$

Donde $Y_{X/S}$ = rendimiento biomasa/sustrato (g biomasa/ g sustrato o equivalente relativo). Este parámetro es útil para medir cuánta biomasa se produce por cada

unidad de sustrato orgánico consumido y evaluar así la eficacia del proceso de biotransformación.

2.7.2 Parámetros del modelo de Luedeking-Piret

La ecuación que se utilizará para modelar la formación de carbohidratos, ya sea dentro o fuera de las células (P), es:

$$\frac{dP}{dt} = \alpha \frac{dX}{dt} + \beta X$$

Donde α = coeficiente asociado al crecimiento, representa metabolitos cuya producción sucede, sobre todo, en el momento en que la microalga se desarrolla con energía; β = coeficiente no vinculado con el crecimiento, señala la fabricación o el consumo de metabolitos, incluso sin que haya un aumento en la biomasa; esto suele estar relacionado con el estrés, con el mantenimiento celular o con la degradación.

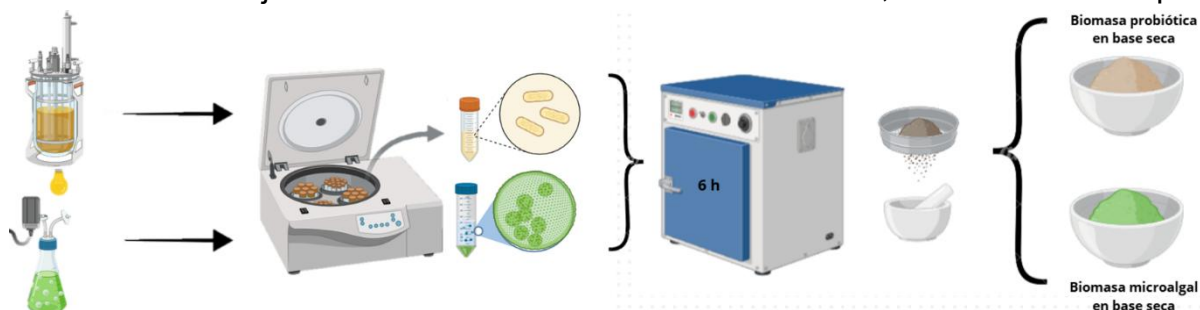
Este modelo posibilita determinar si la acumulación de carbohidratos tiene una relación directa con el crecimiento de *Nannochloropsis oculata* (mecanismo anabólico) o si es producto de procesos de reserva, estrés o reajustes metabólicos (mecanismo de mantenimiento).

La aplicación de este marco matemático posibilita, determinar la velocidad de crecimiento de microalgas, analizar la eficacia de la utilización de la carga orgánica del fango, detectar posibles efectos inhibitorios debidos a un exceso de sustrato, detallar el patrón de acumulación de carbohidratos en la biotransformación, y calcular los parámetros fundamentales para escalar el proceso.

De este modo, el modelo Monod-Haldane + Luedeking-Piret ofrece un fundamento cuantitativo para analizar cómo se comporta el sistema y para cotejar la actuación entre distintos porcentajes de incorporación de LRA.

2.8 Acondicionamiento de biomásas generadas de procesos anaerobio y aerobio en base seca

La biomasa producida en cada tratamiento se separa de la fase líquida a través de centrifugación para concentrar el material sólido producido durante el proceso de cultivo. Con el objetivo de eliminar la humedad de la muestra, la fracción sólida que



se recolecta y es transferida a crisoles tarados con anticipación y se seca en estufa durante seis horas. Cuando se llega al peso constante, la biomasa seca es minuciosamente triturada en el mortero y tamizada para unificar su textura y hacer más fácil su análisis posterior, por último, la biomasa en base seca se almacena para analizar su composición y su valor nutricional, como se muestra en la Figura 2.7.

Figura 2.7. Recolección y acondicionamiento de biomásas obtenidas de los procesos de biotransformación en base seca

2.9 Evaluación nutricional de la biomasa generada mediante microalga y *Lactobacillus plantarum*

El valor nutricional y la viabilidad de utilizar las biomásas extraídas como material de alimentación alternativa se realiza mediante el análisis de las biomásas recolectadas de ambos procesos, donde los parámetros nutricionales evaluados se describen en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8 Evaluación de parámetros nutricionales de las biomásas generadas de los procesos con *N. oculata* y *Lactobacillus Plantarum*

Microorganismo	Condiciones de producción	Parámetros nutricionales	Método estándar/AOAC
<i>N. Oculata</i>	Cultivo en medio f/2 con LRA, aireación constante, iluminación 12/12 h	Humedad pH Conductividad eléctrica Cenizas Materia Orgánica	AOAC 934.01 Standard Methods 4500-H ⁺ B Standard Methods 2510 B AOAC 942.05
<i>L. plantarum</i>	Fermentación en condiciones anaerobias (37 °C, 120 rpm, 3 días), inóculos del 5%, 10% y 15%	Carbono total Nitrógeno total Micronutrientes: Calcio, Magnesio, Sodio, Potasio, Fósforo, Hierro, Cobre, Zinc, Manganeso y Boro Proteínas en base seca	Standard Methods 2540 E Standard Methods 5310 B Kjeldahl – AOAC 2001.11 Standard Methods 3120 B Standard Methods 4500-P E

CAPITULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo, se analizan y comunican los resultados de la evaluación de la biotransformación de lodos residuales avícolas mediante dos métodos microbiológicos: el cultivo con *Lactobacillus plantarum* y el cultivo de la microalga *Nannochloropsis oculata*. Estas dos estrategias se implementaron para transformar un residuo con una carga orgánica elevada y un alto potencial contaminante en biomasa que tiene características nutricionales importantes para la alimentación de los animales.

Los resultados logrados se exponen de acuerdo a las condiciones experimentales establecidas en el enfoque y se analizan dentro del marco de la literatura científica pertinente y los criterios establecidos por las normativas.

Se estudian los parámetros nutricionales, con el fin de establecer la cantidad de proteínas y macronutrientes. Estos pueden ser utilizados para evaluar la efectividad de cada bioproceso y si son adecuados para ser implementados como una táctica sostenible de reciclaje de lodos residuales.

Asimismo, se analizan las propiedades cinéticas del sistema desde el periodo de incubación hasta el cultivo y las variaciones en la concentración de inóculo, así como sus pros y contras. Los hallazgos son una aportación significativa para el desarrollo de estrategias circulares destinadas a abordar la administración de residuos orgánicos en las plantas avícolas que procesan comida para animales.

3.1 Acondicionamiento de la muestra y caracterización fisicoquímica y microbiológica

Los lodos residuales avícolas de una planta procesadora avícola en la zona fueron recolectados y transportados al Laboratorio Ambiental 2 del Instituto Tecnológico de Orizaba, donde se realizó el trabajo experimental correspondiente al proyecto. Con el objetivo de reducir la carga de microorganismos patógenos y erradicarlos conforme a la NOM-004-SEMARNAT-2002, que establece los niveles adecuados de utilización y disposición de biosólidos para preservar el medioambiente y la salud pública, se aplicó un tratamiento térmico a un volumen típico de lodos residuales a 120°C durante una hora como se observa en la Figura 3.1.

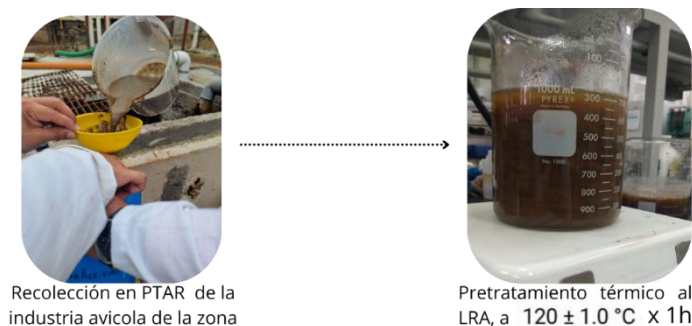


Figura 3.1. Recolección y tratamiento térmico del LRA (fotografía)

Además, se llevó a cabo un análisis de caracterización fisicoquímica y microbiológica en muestras de lodos tratados y no tratados, y se examinó el efecto del tratamiento térmico, así como los lodos residuales avícolas. Los datos se reportan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Resultados de la caracterización fisicoquímica y microbiológica para el LRA

Parámetro	No Tratado	Tratado Termicamente
pH	7.49 ± 0.01	6.64 ± 0.01
Nitrógeno (%)	0.4 ± 0.053	0.2 ± 0.042
Proteínas (%)	2.5 ± 0.15	1.25 ± 0.10
Carbohidratos g^{-1}/L	17.09 ± 0.03	19.098 ± 0.034
Sólidos Totales (%)	0.989 ± 0.07	3.405 ± 0.09
Sólidos Volátiles (%)	0.486 ± 0.04	2.782 ± 0.06
Sólidos Fijos (%)	0.503 ± 0.032	0.623 ± 0.065
Bacterias aerobias (UFC/ml)	7.41×10^6 UFC/ml	6.54 UFC/ml
Hongos y levaduras (UFC/ml)	3.25×10^5 UFC/ml	1.375 UFC/ml
DQO Total (mg/L)	$25,000 \pm 2,000$	$20,000 \pm 1,500$
DQO Soluble (mg/L)	$3,500 \pm 500$	$7,000 \pm 800$
Fósforo Total (mg/L)	80 ± 5	95 ± 6
Huevos de helmintos	No detectados	No detectados
Coliformes fecales (UFC/ml)	1.5×10^6	No detectados

3.1.1 Reducción de patógenos

El LRA fue tratado a 120 °C durante una hora, lo que llevó a una solubilización más fuerte de los compuestos orgánicos (aumento de sólidos) y a una hidrólisis parcial. Después de esto, se observó una reducción en la carga microbiana, que incluyó la eliminación completa de coliformes fecales y huevos helmintos, además de una disminución considerable de bacterias aeróbicas y hongos/levaduras. Según el estudio de Méndez-Contreras *et al.* (2024), la temperatura de 70 °C o más durante una hora desactiva patógenos resistentes, como *Ascaris spp.* Esto evidencia que la muerte de bacterias como *Staphylococcus spp.* (Coe *et al.*, 2022) puede lograrse con un tratamiento térmico a 100 °C durante media hora.

Utilizando un pretratamiento intensivo a 120 °C por una hora, se superan estas cifras, lo cual evidencia una alta eficacia en la desinfección del lodo. Por otro lado, este tratamiento produjo una leve acidificación (una disminución del pH de 7.49 a 6.64) y la concentración de sólidos volátiles, fijos y totales. Estos efectos pueden ayudar a maximizar la eficacia de los procesos subsiguientes, como son la fermentación anaeróbica y la deshidratación del lodo, al aumentar la cantidad de sustratos fermentables disponibles y disminuir las interferencias de microorganismos no deseados.

3.1.2 Solubilización de materia orgánica y nutrientes

La hidrólisis parcial del lodo dio lugar a un aumento de los sólidos totales, volátiles y fijos, además de los carbohidratos solubles. Esto es consistente con los informes que indican que el tratamiento térmico a temperaturas de 125 a 175 °C optimiza la solubilización de la materia orgánica, lo que mejora la capacidad de biodegradación de los lodos (Méndez-Contreras *et al.*, 2024). Sin embargo, como la nitrificación y la desnitrificación se habían llevado a cabo en el fondo de la planta de tratamiento, el nivel de nitrógeno fue más bajo. Esto contrasta con lo hallado en la investigación, que señala que el tratamiento térmico promueve la solubilización del nitrógeno y eleva su concentración en la fracción líquida (Yan *et al.*, 2022).

3.1.3 Mejora en la fermentabilidad y uso potencial en bioprocesos

Respecto a la cantidad de carbohidratos, esta seguía siendo más alta en las muestras tratadas y no tratadas, lo cual favorece el desarrollo de *Lactobacillus plantarum* y *Nannochloropsis oculata*. Sin embargo, las condiciones de la fermentación anaeróbica se optimizan con el tratamiento térmico, ya que los azúcares fermentables aumentan en cantidad y *L. plantarum* tiene que aumentar la producción de ácido láctico. Por ejemplo, en *N. oculata*, el crecimiento se ve impulsado aún más cuando aumenta la biodisponibilidad de nutrientes orgánicos y desciende la cantidad de microorganismos competidores. Esto implica un ajuste adicional a un pH más idóneo (alcalino) y la comprobación de que hay ciertos micronutrientes, como el fósforo, el hierro y el magnesio, que se analizan.

Los hallazgos también corroboraron la reducción de microorganismos competitivos y la mejora de los carbohidratos solubles, lo que evidencia (tal como se esperaba) que el lodo procesado tiene la capacidad de servir como un sustrato apropiado para el desarrollo de microalgas, como *Nannochloropsis oculata*, y para la fermentación anaeróbica. Los tratamientos térmicos también favorecen la producción de biogás y la descomposición de la DQO, ya que se ha comprobado que ambos mejoran (Aragón-Briceño *et al.*, 2023).

Además, la hidrólisis térmica de subproductos avícolas puede generar medios nutritivos favorables para el crecimiento de microorganismos (Zhang *et al.*, 2025). Esto confirma las posibilidades del lodo en el campo de la biotecnología. Además, considerando tanto la descomposición de las estructuras celulares como la liberación de compuestos solubles a lo largo del proceso, los indicadores críticos como la demanda química total de oxígeno (DQO) se reducen gradualmente; por otro lado, la DQO soluble tiende a aumentar. Por otro lado, no se detectan huevos de helmintos y la eliminación térmica erradica por completo los coliformes fecales a temperaturas superiores a 70 °C, lo que aumenta notablemente la bioseguridad del lodo que se ha sometido a este proceso.

3.1.4 Análisis comparativo con otros autores

Los resultados obtenidos por el tratamiento térmico de LRA (Tabla 3.2) fueron verificados y contextualizados, al comparar las conclusiones del estudio actual con las de Méndez-Contreras *et al* (2024), y Flores-Asis *et al* (2019), quienes trabajaron y hicieron un tratamiento de acondicionamiento a LRA.

El tratamiento térmico a 120 °C por una hora resultó eficaz para reducir la carga microbiana, eliminando completamente los coliformes fecales y huevos de helmintos. También se observó una notable disminución en bacterias aerobias y hongos/levaduras. Estos resultados concuerdan con estudios previos, como los de Pratap *et al.*, (2024), que señalan la efectividad de temperaturas superiores a 70 °C durante una hora para eliminar patógenos como *Ascaris* spp., y Coe *et al.* (2022), quienes reportaron la inactivación de *Salmonella*. a 75, 85 y 95 °C en 3 minutos. Siendo estos parámetros muy comunes para la eliminación de organismos patógenos (Mirsalami y Mirsalami 2024).

Tabla 3.2 Análisis comparativo de resultados de la caracterización fisicoquímica y microbiológica en el empleo del pretratamiento térmico para el LRA tratado térmicamente (comparativa con otros autores).

Parámetro	Lodo avícola tratado térmicamente	Lodo avícola tratado y suplemento con micronutrientes. (Méndez-Contreras <i>et al.</i> , 2024)	Lodo avícola tratado para la producción de biogás (Flores-Asís <i>et al.</i> , 2019)
pH	6.64	6.5	6.89
Nitrógeno (%)	0.20	5.11	6.5
Proteínas (%)	1.25	-	18.23
Carbohidratos g ⁻¹ / L	19.10	-	0.57
Sólidos Totales (%)	3.41	3.18	1.56
Sólidos Volátiles (%)	2.78	73.10	70.83
Sólidos Fijos (%)	0.62	-	-
Bacterias aerobias (UFC/ml)	6.54	-	-
Hongos y levaduras (UFC/ml)	1.38	-	-
DQO Total (mg/L)	20,000	-	1,759.4
DQO Soluble (mg/L)	7,000	14,282	-
Fósforo Total (mg/L)	95	2.35	25 Ppm
Huevos de helmintos	No detectados	<3	-
Coliformes fecales (UFC/ml)	0	<3	-

El tratamiento térmico también causó un descenso en el pH (de 7.49 a 6.64) y un incremento en sólidos totales, volátiles y fijos, lo que favorece procesos como la fermentación anaerobia, al aumentar la biodisponibilidad de compuestos fermentables y reducir microorganismos indeseados. Esto coincide con lo reportado por Bulkowska y Zielinska (2024), que a temperaturas (30 a 120 °C), típicamente asociadas con la hidrólisis térmica, la energía térmica induce principalmente la solubilización de los componentes, particularmente proteínas y polisacáridos de alto peso molecular. Durante esta fase, se exponen grupos funcionales hidrofílicos, como grupos hidroxilo y amino, lo que incrementa la repulsión electrostática entre las partículas del lodo. Esto da lugar a la formación de una red similar a un gel que retiene agua dentro de la matriz del lodo, provocando una mayor viscosidad y una menor capacidad de deshidratación

Solubilización de materia orgánica y nutrientes

Se evidenció un aumento en sólidos solubles y carbohidratos, lo que indica una hidrolización parcial de la materia orgánica. Esto concuerda con estudios que demuestran que tratamientos térmicos entre 125 y 175 °C mejoran la solubilización de compuestos orgánicos y aumentan la biodegradabilidad del lodo en la digestión

anaerobia (Pratap *et al.*, 2024). Sin embargo, se observó una disminución en el contenido de nitrógeno, posiblemente asociada a procesos previos de nitrificación y desnitrificación.

Con el objetivo de contextualizar y respaldar los resultados obtenidos tras el tratamiento térmico del lodo residual avícola, se llevó a cabo un análisis comparativo con investigaciones recientes que emplearon metodologías similares en el tratamiento de residuos agroindustriales mediante hidrólisis térmica o procesos fermentativos. La Tabla 3.2 presenta la comparación de los principales parámetros fisicoquímicos y microbiológicos obtenidos en este estudio con los reportados por Méndez-Contreras *et al.* (2024) y Flores-Asis *et al.* (2019).

Bulkowska y Zielinska (2024), mencionan que emplearon un proceso de desintegración térmica con lodo residual activado. Esta comparación permite evidenciar similitudes y diferencias en el comportamiento del sustrato bajo condiciones térmicas y biológicas, así como valorar el desempeño del proceso desarrollado en esta investigación en relación con experiencias previas documentadas en la literatura científica (Hoque y Devi, 2025).

El lodo residual avícola tratado térmicamente en este estudio presentó un pH de 6.64, diferente con los valores reportados por Bulkowska y Zielinska (2024) de un pH de 10, lo que indica un entorno adecuado para la fermentación anaerobia. El contenido de nitrógeno total (0.20 %) y proteínas (1.25 %) fue inferior al observado en ambos estudios comparativos, posiblemente debido al sistema de tratamiento primario (DAF) que favorece la eliminación de compuestos nitrogenados, lo cual podría limitar su uso sin suplementación externa.

El contenido de carbohidratos (19.1 g/L) fue mayor al de los estudios revisados, lo que garantiza una fuente fermentable favorable para el crecimiento de *L. plantarum*. La concentración de sólidos totales (3.41 %) indica una adecuada densidad de materia orgánica, mientras que los sólidos volátiles y fijos se mantuvieron dentro de rangos esperados (Flores-Asis *et al.*, 2019). Esto facilita el mezclado y homogenización del sistema, lo cual favorece el intercambio de masa (Estrada-García *et al.*, 2023). La carga microbiana se redujo drásticamente tras el tratamiento térmico, permitiendo condiciones óptimas para la inoculación selectiva.

La DQO total fue de 20,000 mg/L, con una fracción soluble de 7,000 mg/L, lo cual refleja una buena disponibilidad de sustrato degradable. El fósforo total (95 mg/L) se mantuvo dentro del rango óptimo para procesos biotecnológicos. Finalmente, la eliminación total de coliformes fecales demuestra la efectividad del tratamiento térmico y el cumplimiento con la NOM-004-SEMARNAT-2002 (SEMARNAT 2002a), posicionando a este lodo como un biosólido seguro y potencialmente reutilizable (Méndez-Contreras *et al.*, 2024).

Los niveles elevados de carbohidratos en ambas muestras sugieren un ambiente favorable para el crecimiento de *L. plantarum*. Sin embargo, el tratamiento térmico aumentó la biodisponibilidad de azúcares, lo que podría mejorar la producción de ácido láctico durante la fermentación anaerobia.

3.2 Cinéticas de biotransformación del LRA con diferentes concentraciones de inóculo de *Lactobacillus plantarum*

Se utilizó *Lactobacillus plantarum* para analizar la efectividad de la biotransformación del LRA por medio de fermentación anaerobia en tres concentraciones distintas de inóculo (5 %, 10 % y 15 %). Cada uno de los tratamientos se realizó repetidamente en matraces Erlenmeyer con capacidad de 250 mL, con un volumen completo de 200 mL (mezclados: 190 mL de lodo y 10 mL de inóculo (5%), 180 mL y 20 mL (10%) y, finalmente, 170 mL y 30 mL (15%). Los matraces se incubaron durante 72 horas a una temperatura de 37°C, con agitación a 120 revoluciones por minuto y en condiciones anaerobias (Figura 3.2). Se recolectaron muestras representativas cada cuatro horas (de 2 mL) para determinar el crecimiento celular (UFC/mL por cultivo en agar MRS), la concentración de carbohidratos y el pH.

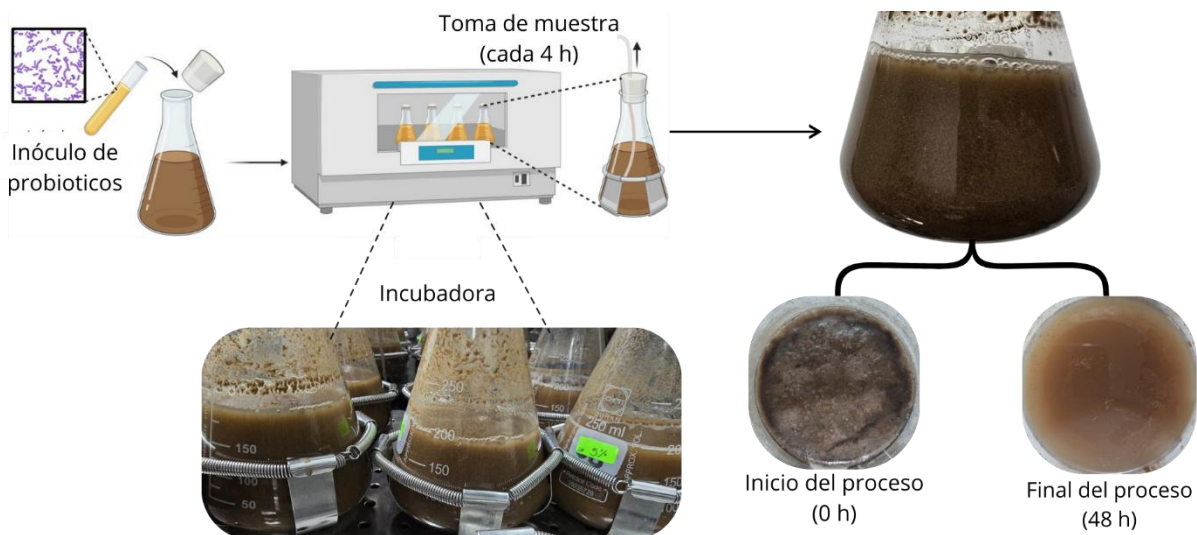


Figura 3.2. Resultados del proceso anaerobio de LRA con *Lactobacillus plantarum*

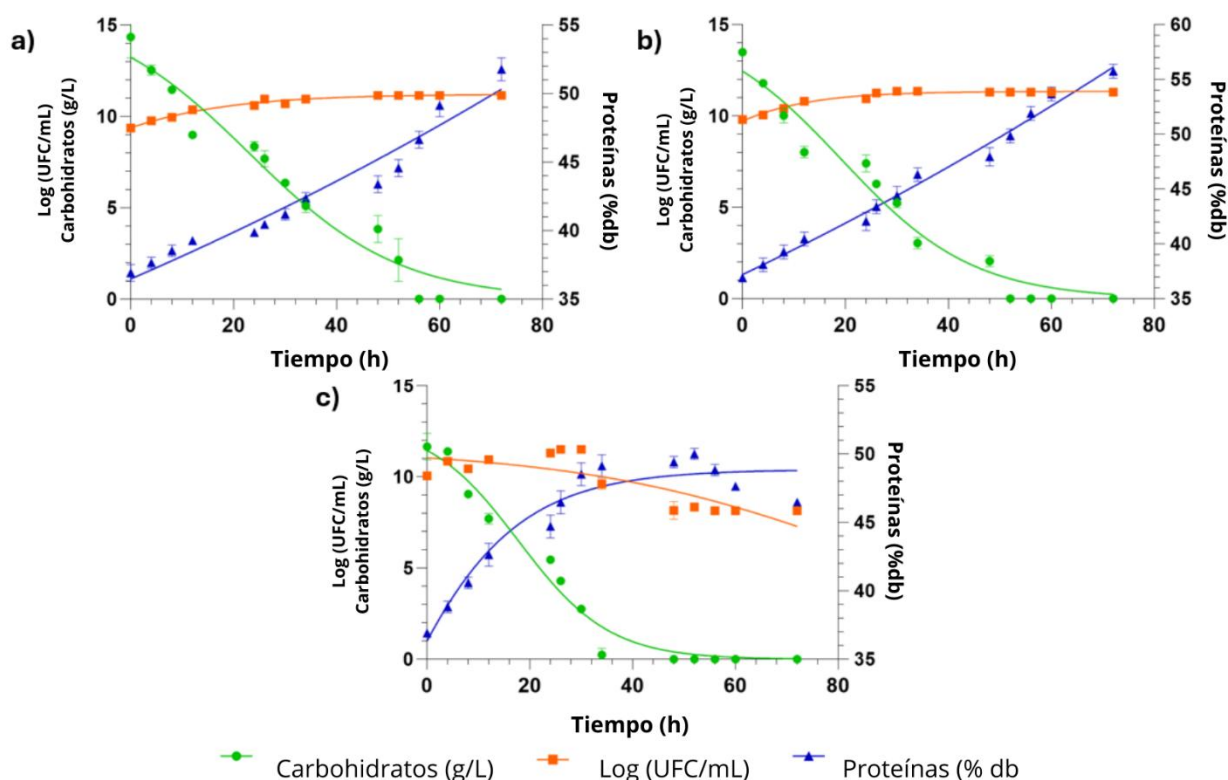


Figura 3.3. Cinéticas de crecimiento celular, consumo de carbohidratos (g/L) y producción de proteínas (% base seca) durante el proceso de biotransformación anaerobio de LRA con *L. plantarum*, a tres concentraciones de inóculo (a) 5% v/v, (b) 10% v/v, (c) 15%v/v.

A partir de las cinéticas presentadas en la Figura 3.3, se observa claramente una correlación entre el crecimiento de *L. plantarum* y el consumo de carbohidratos provenientes del LRA, así como una mejora en el contenido proteico de la biomasa generada. Durante las primeras 24–30 h, la concentración de carbohidratos disminuye rápidamente, lo que evidencia una alta capacidad metabólica del microorganismo para asimilar compuestos fermentables. A su vez, se registró un incremento exponencial en el conteo celular, alcanzando valores cercanos o superiores a 9 Log CFU/mL, lo que refleja una fase de crecimiento acelerado asociada a condiciones favorables de sustrato. Estos comportamientos han sido previamente observados cuando *L. plantarum* se cultiva en sustratos económicos como melaza o destilados industriales, logrando un uso eficiente del carbono disponible (Manzoor *et al.*, 2017). Incluso se ha descrito que concentraciones de sustrato moderadas favorecen la fase logarítmica, maximizando la conversión hacia biomasa probiótica (Hwang *et al.*, 2012).

Posterior a las 40–50 h, se aprecia una desaceleración del crecimiento microbiano, coincidente con la reducción crítica de carbohidratos, lo cual induce un posible estrés metabólico. Durante esta fase, el contenido de proteínas (% db) tiende a incrementarse, lo que sugiere un reordenamiento celular que favorece la acumulación de componentes estructurales, como ha sido reportado para cepas de *L. plantarum*

cultivadas bajo agotamiento de sustrato o condiciones fermentativas extendidas (Hwang *et al.*, 2012). Este comportamiento también ha sido asociado a procesos de síntesis metabólica secundaria y adaptación celular en medios residuales ricos en nutrientes

La recuperación casi total de carbohidratos (<1 g/L) al final del proceso y los niveles elevados de biomasa probiótica indican que los lodos avícolas pueden emplearse como sustrato viable para la producción de suplementos funcionales destinados a alimentación animal. Procesos similares de valorización han mostrado que *L. plantarum* puede mejorar la digestibilidad y generar biomasa con contenido proteico elevado cuando se utiliza como inoculante en residuos agroindustriales (Manzoor *et al.*, 2017). Además, un estudio de Jagadeesan *et al.*, (2022) evidencia que estrategias adicionales basadas en bioconversión enzimática de residuos avícolas han demostrado ser efectivas para generar insumos con valor nutricional, particularmente en la formulación de peptonas aplicables a bioprocesos o como complemento en esquemas de digestión anaerobia. Asimismo, Pan *et al.*, (2024) realizaron un estudio en ensilaje de residuos agroindustriales, han reportado una mejora composicional y funcional cuando se emplean diferentes porcentajes de inoculación de *L. plantarum*, lo que coincide con la tendencia observada en este estudio.

Finalmente, la cinética presentada demuestra un aprovechamiento eficaz de compuestos orgánicos presentes en el lodo avícola, favoreciendo una doble valorización: remoción de contaminantes y producción de biomasa con potencial probiótico y nutricional. Lo anterior se alinea con los principios de economía circular aplicados a la industria avícola, y con investigaciones recientes donde la inclusión de *L. plantarum* promovió mejoras en parámetros bioquímicos y funcionales durante la fermentación de residuos agroindustriales (Habchi *et al.*, 2024; Pan *et al.*, 2024). En este contexto, los resultados posicionan este enfoque como una alternativa sostenible y tecnológicamente viable para la obtención de biomasa probiótica a partir de subproductos de origen avícola.

Tabla 3.3 Parámetros cinéticos del proceso de biotransformación anaerobia de LRA y *L. plantarum*

Concentración (%v/v)	K_s	μ_{max}	$\lambda(h)$	a [Log UFC /ml]	$Y_{B/S}$ (g biomass/ g carbohydrates)	R^2
5	0.06	0.16	6.0	11.21	0.34	0.97
10	0.07	0.22	4.5	11.43	0.18	0.97
15	0.05	0.14	2.0	10.86	0.24	0.91

Los parámetros cinéticos presentados en la Tabla 3.3, indican que la concentración de inóculo del 5 % (v/v) permitió alcanzar el mejor rendimiento de bioconversión ($Y_{B/S} = 0.34$ g biomasa/g carbohidratos) y el mayor coeficiente de correlación ($R^2 = 0.97$). Estos valores son superiores a los rendimientos al fermentar jugos vegetales con *L. plantarum* NCDC 414 (entre 0.27 y 0.31 g/g), lo que demuestra que el LRA, pese a su complejidad, puede favorecer una conversión eficiente bajo condiciones de inoculación moderada. Este comportamiento puede estar asociado a una liberación gradual de carbohidratos disponibles, regulando el metabolismo bacteriano y evitando fenómenos de inhibición por saturación nutricional (Rodríguez-Rivera *et al.*, 2025).

En contraste, el tratamiento con 10 % de inóculo registró una μ_{max} superior (0.22 h^{-1}), lo que concuerda con Mechmeche *et al.* (2017), quienes demostraron que una mayor densidad inicial acelera la fase logarítmica, aunque no necesariamente mejora el rendimiento global si el sustrato es limitado o heterogéneo. Esta tendencia también ha sido observada en fermentaciones con residuos ricos en compuestos estructurados, donde el incremento de actividad metabólica acelera el agotamiento de azúcares accesibles, reduciendo la eficiencia final si la prolongación del proceso genera acumulación de subproductos inhibitorios (Estrada-García *et al.*, 2024).

El inóculo del 15 % mostró la menor μ_{max} (0.14 h^{-1}) y el valor más bajo de R^2 (0.91), lo que sugiere una desviación del modelo logístico atribuible a efectos de autoinhibición, posiblemente por acumulación de ácidos orgánicos y elevada presión osmótica intracelular. Este tipo de comportamiento ha sido documentado en el que concentraciones elevadas de *L. plantarum* pueden generar sobrecarga metabólica en sustratos con baja disponibilidad de carbono asimilable. Asimismo, Manzo *et al.* (2017), destacaron que la optimización de la proporción de inóculo es fundamental para maximizar la productividad específica, indicando que concentraciones superiores al 10 % son contraproducentes en sistemas de fermentación aplicados a valorización de residuos.

Por último, las diferencias observadas en los tiempos de latencia (λ) —6.0 h (5 %), 4.5 h (10 %) y 2.0 h (15 %)— evidencian una relación inversa entre la concentración inicial de inóculo y la duración de la fase de adaptación, en procesos de biotransformación de residuos alimentarios mediante fermentación láctica (Anagnostopoulou *et al.*, 2022). No obstante, el tratamiento con 5 % ofreció una transición más controlada entre fases cinéticas y una mayor estabilidad metabólica, lo que confirma su idoneidad para aplicaciones tecnológicas orientadas a la producción sostenible de biomasa probiótica a partir de sustratos avícolas.

3.3 Determinación de ácido láctico

pH final bajo: Refleja la acumulación de ácido láctico, ya que este es un ácido fuerte que acidifica el medio rápidamente.

Tiempo de máxima producción: El ácido láctico se acumula progresivamente y tiende a estabilizarse cuando los azúcares fermentables se agotan o el pH se vuelve demasiado ácido para el metabolismo bacteriano.

Tabla 3.4. Determinación de ácido láctico producido del producto final del proceso anaerobio con *Lactobacillus plantarum*

% Inóculo	Ácido láctico producido (g/L)	Rendimiento $Y_{p/s}$	Tiempo de máxima producción (h)	pH final
5 %	6.5–7.2	0.34–0.38	36–48	3.8–4.2
10 %	5.8–6.4	0.30–0.34	30–36	3.6–4.0
15 %	4.9–5.6	0.28–0.33	24–30	3.5–3.9

Los datos presentados sugieren que la producción de ácido láctico varía significativamente con la concentración del inóculo de *Lactobacillus plantarum*. El tratamiento con 5 % de inóculo registró la mayor concentración de ácido láctico (6.2 g/L), con un rendimiento ($Y_{p/s}$) de 0.325 g ácido láctico/g carbohidrato consumido y un pH final de 4.13. Este resultado refleja una fermentación eficiente y estable, coincidente con los mayores valores de biomasa observados previamente en este mismo tratamiento, lo que sugiere una buena conversión del sustrato disponible en metabolitos útiles.

En contraste, los tratamientos con 10 % y 15 % de inóculo mostraron una ligera disminución en la producción de ácido láctico (5.6 g/L y 5.1 g/L, respectivamente) y menores rendimientos ($Y_{p/s}$ de 0.298 y 0.275). Esta tendencia puede deberse a un fenómeno de sobre inoculación, donde una mayor competencia entre células o una rápida acidificación del medio inhibe parcialmente el metabolismo de la población microbiana.

El descenso del pH en todos los tratamientos (hasta valores cercanos a 4.1) confirma la acumulación de ácidos orgánicos y la actividad fermentativa efectiva. Sin embargo, niveles de pH demasiado bajos pueden afectar la viabilidad de las bacterias, reduciendo la producción sostenida de metabolitos.

En conjunto, estos resultados respaldan la selección del tratamiento con 5 % de inóculo como el más balanceado en términos de rendimiento, producción de ácido láctico y estabilidad del sistema. Esto refuerza su potencial aplicación en la obtención de biomasa funcional enriquecida para usos en nutrición animal o bioconservación.

3.4 Cinéticas de biotransformación de LRA con diferentes concentraciones de inóculo de *Nannochloropsis oculata*

Se sometió a la microalga *Nannochloropsis oculata* a tres tratamientos de suplementación con lodo residual avícola (LRA) pretratado, en proporciones del 1 %, 3 % y 5 %. El propósito era examinar cómo el aporte orgánico influye en la biotransformación del sustrato y en la dinámica de crecimiento celular. En un período de 16 días, se supervisaron los cultivos y se midieron la densidad celular (Abs 679 nm), COT, DQO total, DQO soluble y carbohidratos (Figura 3.4). (Martínez-Rodríguez *et al.*, 2025)

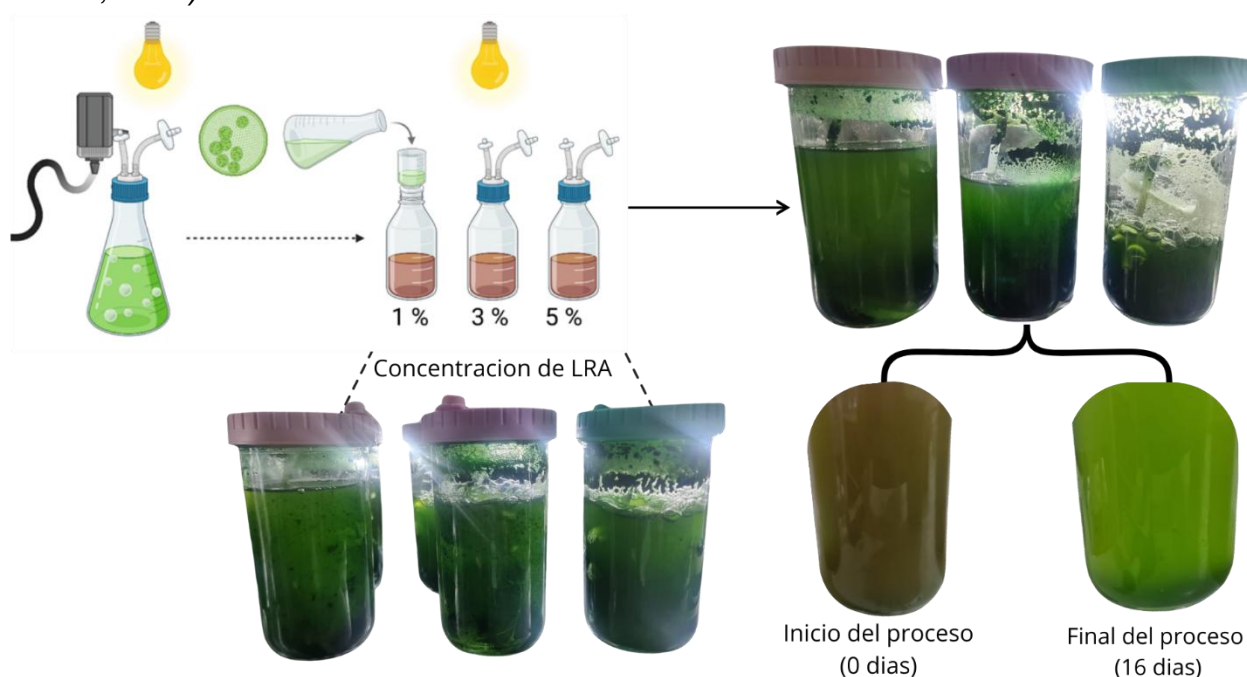


Figura 3.4. Resultados del proceso aerobio de LRA con *Nannochloropsis oculata*

Cuando concluyó el experimento de biotransformación aerobia, que consistió en la observación cinética, la supervisión diaria de las variables fisicoquímicas y la toma sistemática de muestras durante todo el tiempo de experimentación, se reunió un conjunto de datos que describen el funcionamiento del sistema. Se caracterizó de manera integral la reacción de *Nannochloropsis oculata* al LRA, que se incluyó como sustrato en los diferentes tratamientos, por medio de las determinaciones analíticas realizadas con carbono orgánico total (COT), carbohidratos, densidad celular y demanda química de oxígeno (DQO total y soluble), (Sales-Pérez *et al.*, 2023).

Tabla 3.5 Parámetros cinéticos del proceso de biotransformación aerobia de LRA y *N. oculata*

Tratamiento	μ_{max} (d^{-1})	K_s ($mg \cdot L^{-1}$)	K_i ($mg \cdot L^{-1}$)	$Y_{X/S}$ (679 $mg\ COT$)	k_d (d^{-1})	α (mg carbohidratos / A679)	β (mg carbohidrat os / A679·d)
1 %	0.247	621.4	No identificable ($\gg S$)	4.03×10^{-4}	0.01	5.04	≈ 0
3 %	0.312	744.12	No identificable	3.71×10^{-4}	0.012	4.95	≈ 0
5 %	0.221	1044.88	No identificable (indicios de inhibición)	2.98×10^{-4}	0.015	6.54	≈ 0

La Tabla 3.5 muestra los parámetros cinéticos del comportamiento de los sistemas microbianos a varios porcentajes de LRA, según se puede observar en la interpretación de parámetros del modelo.

La μ_{max} , o tasa máxima de crecimiento, es un indicador directo de la capacidad poblacional para multiplicarse en condiciones no limitantes. La observación experimental de que el tratamiento con 3 % de LRA obtuvo la mayor μ_{max} se alinea con la evidencia de que cargas orgánicas moderadas pueden favorecer el crecimiento microalgal y la eficiencia en remoción de compuestos orgánicos en sistemas de cultivo asistidos por fotobiorreactores.

Por otro lado, la disminución de μ_{max} al llegar al 5 % indica que existe un efecto inhibitorio debido a una sobrecarga orgánica o a elementos estresantes o tóxicos relacionados con el lodo (como la acumulación de metabolitos, las exigencias de oxígeno incrementadas o los compuestos inhibitorios), lo que da cuenta de la reducción en la producción de biomasa a esa concentración (Carvajal-Oses *et al.*, 2018).

La constante de saturación (K_s) proporciona información adicional acerca de la afinidad de los microorganismos por el sustrato: si K_s es bajo, significa que los microorganismos pueden consumir a velocidades elevadas incluso con concentraciones bajas del sustrato; pero si K_s es alto, indica que la afinidad es menor y se requieren concentraciones más altas para conseguir tasas importantes. Esta interpretación se ha reportado de forma similar en estudios de cultivos de microalgas donde concentraciones elevadas de materia orgánica dificultan la captación efectiva de carbono por parte de las células algales. (Martín-Sánchez *et al.*, 2025)

El rendimiento biomasa/sustrato $Y_{(X/S)}$ indica la cantidad de biomasa que se produce por cada unidad de sustrato consumido y representa una medida directa de lo eficiente que es convertir el carbono orgánico en biomasa celular. Un mayor $Y_{(X/S)}$ en condiciones moderadas de carga orgánica ha sido asociado con procesos metabólicos más favorables, reduciendo pérdidas por respiración o formación de metabolitos no productivos (Emam *et al.*, 2024).

Por último, la alta tasa de muerte celular k_d en el tratamiento con 5 % es coherente con la disminución de la densidad celular que se observa después del día 10: una k_d más elevada puede ser causada por toxicidad debida a compuestos del lodo, estrés osmótico, agotamiento de condiciones físicoquímicas favorables o acumulación de productos que inhiben y explica el retroceso poblacional después del máximo crecimiento. Este tipo de respuestas se ha observado también en cultivos algales expuestos a altos niveles de materia orgánica o estrés abiótico. (Torres *et al.*, 2023)

En resumen, estos parámetros presentan una imagen consistente: concentraciones de LRA (1-3 %) que son bajas a moderadas posibilitan un alto nivel de afinidad por el sustrato, una μ_{max} alta y un buen rendimiento en términos de biomasa. Por el contrario, una carga excesiva (5 %) genera estrés metabólico, disminuye la afinidad ($K_s \uparrow$), baja la eficiencia de conversión ($Y_{(X/S)} \downarrow$), incrementa la mortalidad ($k_d \uparrow$) y, en última instancia, restringe la producción de biomasa.), (Carvajal-Oses *et al.*, 2018).

En términos prácticos, los hallazgos señalan que, para optimizar la biomasa y la eficiencia, es recomendable operar cerca del 3 % de LRA o menos, evitando aumentos hasta el 5 % sin implementar medidas de mitigación (como el pretratamiento del lodo, control de oxígeno, dilución y ajustes de pH) que disminuyan los efectos inhibitorios detectados.

3.4.1 Análisis de la DQO

La Figura 3.5 muestra el comportamiento de la degradación de la materia orgánica a lo largo del proceso de biotransformación, evidenciado por la evolución tanto total como soluble de la DQO. Durante los primeros días (0-5), ambos parámetros experimentan un descenso rápido, especialmente notable en los tratamientos al 3 % y al 5 % de LRA. Esta tendencia indica que en esta fase predominan los compuestos biodegradables de fácil asimilación, los cuales son metabolizados eficientemente por las microalgas. (Ruiz *et al.*, 2022)

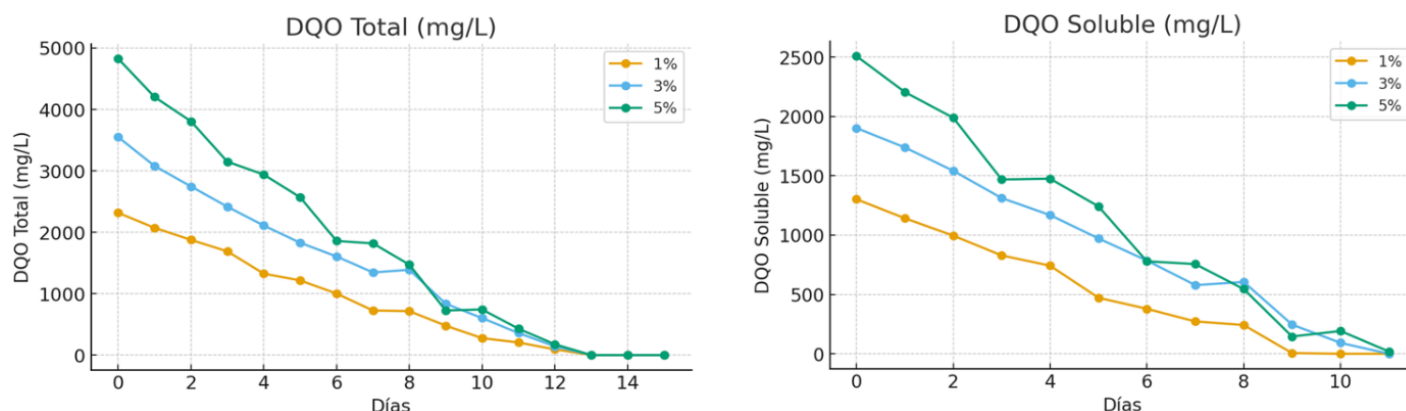


Figura 3.5. Disminución de la DQO total y soluble en el proceso aerobio con *N. oculata*

Desde el día 6 hasta el 12, la inclinación de la reducción de la DQO se torna menos pronunciada. Este comportamiento es común cuando comienza la degradación de fracciones más complejas de la materia orgánica, como lípidos complejos y compuestos parcialmente solubilizados, lo cual requiere rutas metabólicas más extensas y actividades enzimáticas específicas. (Choi *et al.*, 2024)

Por último, entre el día 13 y 15, la DQO total y la DQO soluble llegan a un nivel cercano a 0 mg/L en los tres tratamientos. Este hallazgo es muy relevante: indica que se ha consumido o transformado casi por completo el carbono orgánico disponible, lo cual representa una conversión eficiente de estos compuestos en biomasa microalgal o en productos finales menos oxidables. (Martínez-Rojas *et al.*, 2025)

Desde el punto de vista medioambiental, esta desaparición casi total de la DQO en un período relativamente corto respalda la viabilidad de la biotransformación aerobia con *N. oculata* como una estrategia sostenible para el tratamiento de lodos residuales avícolas, que permite tanto la eliminación de la carga orgánica como la generación de biomasa valiosa (Mavrommatis *et al.*, 2023).

3.4.2 Evolución del (COT): asimilación de carbono orgánico total

La habilidad de *Nannochloropsis oculata* para absorber y convertir la materia orgánica del lodo residual avícola se manifiesta directamente en el desarrollo del carbono orgánico total (COT) durante todo el proceso como se demuestra en la Figura 3.6. (Martínez-Rodríguez *et al.*, 2025)

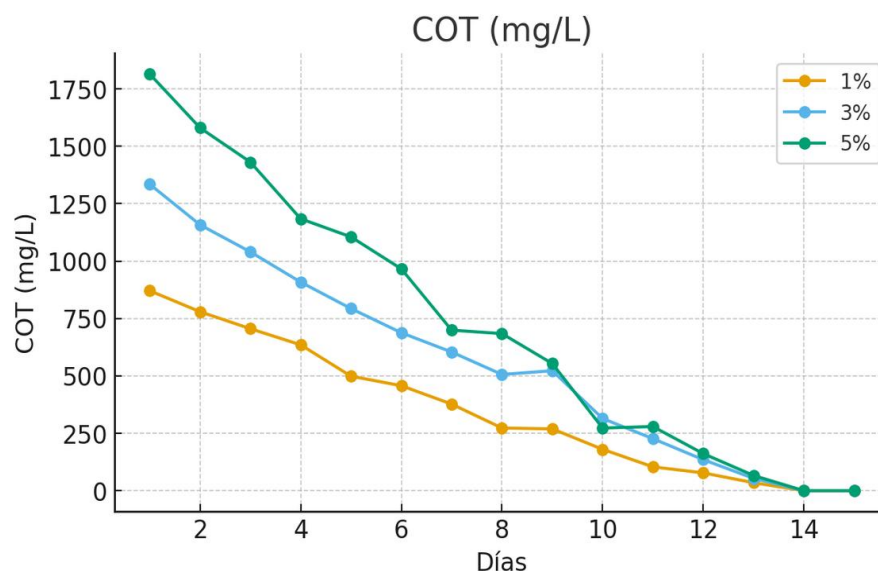


Figura 3.6. Asimilación de Carbono Orgánico Total (COT)

Durante el arranque del cultivo hasta alrededor del día 7-8, se observa una caída rápida y sostenida de COT en los tres tratamientos analizados (1 %, 3 % y 5 %). Esta tendencia señala que la microalga aprovechó el carbono orgánico disponible de forma activa, empleándolo como fuente para la creación de nueva biomasa, ya sea como fuente de carbono estructural o de energía metabólica. Es una etapa en la que claramente predomina la asimilación de compuestos solubles y de fácil acceso, lo cual posibilita un sólido crecimiento inicial. (Gani *et al.*, 2022)

El tratamiento con 5 % de LRA tiene el valor inicial de COT más elevado, lo que concuerda con su carga orgánica disponible más alta; no obstante, esta variación en concentración no altera la conducta general del sistema: en cada caso, *Nannochloropsis oculata* demostró la habilidad de procesar el carbono existente de manera eficaz a pesar de que la carga inicial era mucho mayor. (Martín-Sánchez *et al.*, 2025)

Los días 14 a 16, el COT llega a cero en los tres tratamientos. La interpretación del proceso tiene consecuencias importantes por este resultado: un COT de cero indica que se eliminó toda la parte de carbono orgánico disponible, ya sea a través de mineralización, asimilación celular o conversión en compuestos no cuantificables con este parámetro. Desde el punto de vista fisiológico, esto señala que ha terminado el proceso de biotransformación: el sistema ha consumido por completo la fuente de carbono y ha llegado a su límite de transformación. (Ruiz *et al.*, 2022)

Como el cultivo ha utilizado todo el carbono soluble y remanente antes de que terminara la prueba, esto ratifica que el sistema es muy eficaz como estrategia de biorremediación. No solamente evidencia la habilidad de *Nannochloropsis oculata* para

limpiar medios con altas cargas orgánicas, sino que además apoya su posibilidad de ser empleada en estrategias de valorización de desechos en las cuales la eliminación total del carbono es un requisito esencial. En general, estos hallazgos sitúan al proceso como un camino firme y sostenible para el tratamiento de lodos orgánicos provenientes de la avicultura (Mavrommatis *et al.*, 2023).

3.4.3. Carbohidratos: producción de metabolitos asociados al metabolismo microalgal

El comportamiento de los carbohidratos en los tres tratamientos muestra la manera en que *Nannochloropsis oculata* regula su metabolismo dependiendo de la disponibilidad de nutrientes y las condiciones generadas por cada concentración de LRA (Figura 3.7) (Choi *et al.*, 2024).

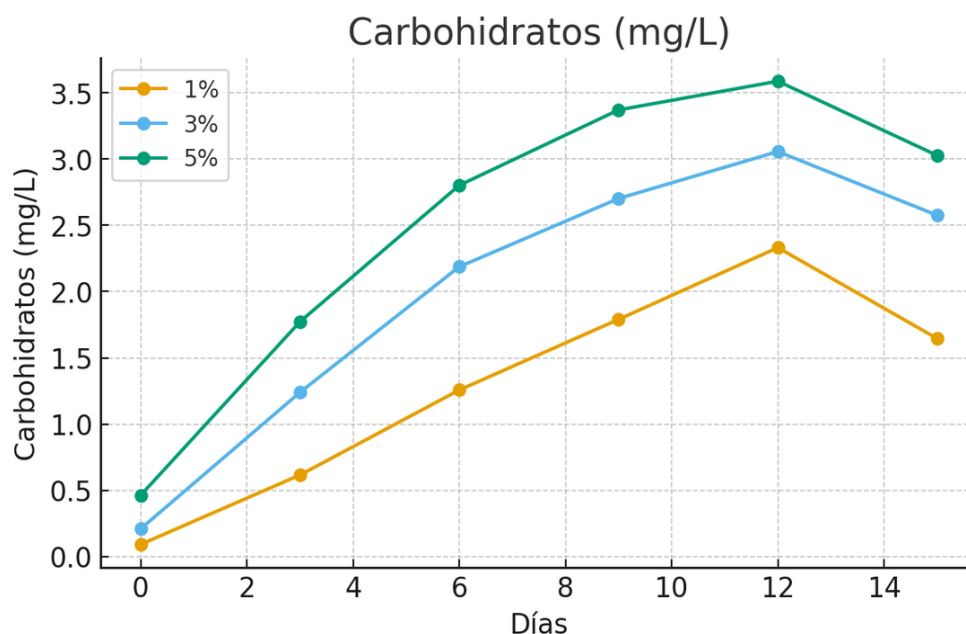


Figura 3.7. Comportamiento de Carbohidratos con diferentes concentraciones de LRA con *N. oculata*

En el tratamiento al 1 %, se percibe un aumento gradual de carbohidratos hasta cerca del día 12, que corresponde a la etapa de crecimiento activo en la que la microalga sintetiza y almacena compuestos energéticos como glucanos y polisacáridos vinculados con la ampliación celular. Luego de este momento se presenta una disminución clara, que se entiende como resultado del agotamiento de los nutrientes disponibles y el paso hacia una fase estacionaria. En esta fase, la microalga utiliza sus reservas internas para mantener el metabolismo basal. Esto disminuye la concentración de carbohidratos en el medio e indica que su actividad fisiológica está enfocada más en conservar que en crecer (Martínez-Rojas *et al.*, 2025).

La producción de carbohidratos se comporta de manera más controlada y estable cuando se aplica el tratamiento al 3 %, con un incremento constante a lo largo de la mayor parte del experimento. La pequeña reducción percibida después del día 12 indica que, a pesar de que todavía hay una disponibilidad limitada de nutrientes, el cultivo empieza a hacer uso parcialmente de sus metabolitos internos para mantener la actividad celular. Esta dinámica señala que existe un equilibrio apropiado entre la asimilación de nutrientes, el crecimiento celular y la carga orgánica, lo cual sitúa al 3 % como una condición ventajosa en la que la microalga conserva una producción constante sin indicios evidentes de estrés prematuro (Alvarez *et al.*, 2025).

El tratamiento al 5 % muestra el patrón más complicado y tiene implicaciones fisiológicas significativas. La producción de carbohidratos es más alta aquí, con un máximo entre los días 9 y 12, lo que indica un metabolismo acelerado vinculado a la gran disponibilidad de materia orgánica y al rápido crecimiento inicial. No obstante, luego del pico, se aprecia un descenso significativo, esta disminución sugiere que el exceso de sustrato puede producir una sobrecarga metabólica, lo cual puede desviar la actividad celular hacia la producción de metabolitos secundarios o hacia reacciones relacionadas con el estrés. Asimismo, situaciones que son propias de un medio más denso, como el sombreado por acumulación de sólidos, la disminución en la penetración de luz o el acúmulo de subproductos, pueden restringir la actividad fotosintética y obligar a la microalga a utilizar sus reservas internas, lo que provoca una reducción posterior. (Torres *et al.*, 2023)

En general, estos resultados muestran que, a pesar de que el tratamiento al 5 % inicialmente favorece una producción más alta de biomasa y carbohidratos, no representa una condición ideal a largo plazo por la presencia de señales de estrés y el colapso metabólico posterior. En cambio, los tratamientos al 1 % y 3 % permiten dinámicas más constantes y estables, siendo el 3 % el que logra un equilibrio óptimo entre la estabilidad fisiológica del cultivo, la actividad metabólica y la disponibilidad de nutrientes (Anam *et al.*, 2025).

3.4.4. Densidad celular (Abs 679 nm): crecimiento de la biomasa

La densidad celular, observada a 679 nm, permite distinguir sin dificultad las diferentes etapas de crecimiento de *Nannochloropsis oculata* (Figura 3.8), dependiendo de la carga orgánica proporcionada por el lodo residual avícola.

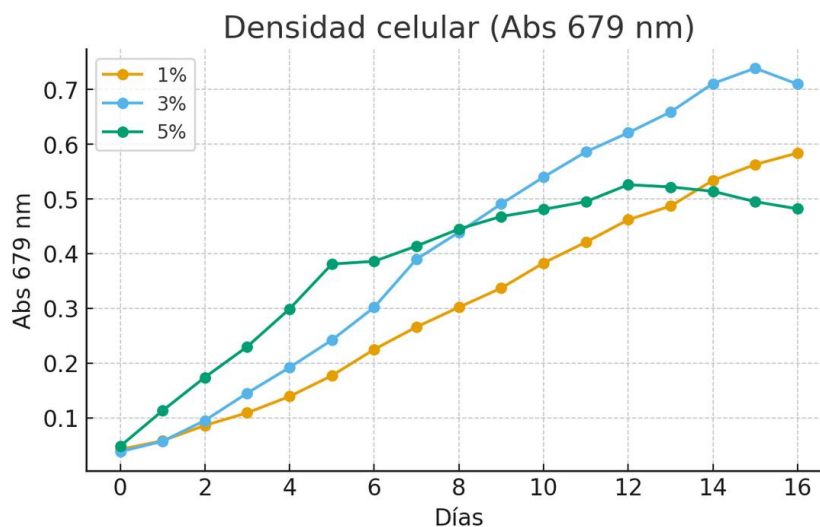


Figura 3.8 Densidad celular (Abs 679 nm) del proceso aerobio con *N. oculata*

A lo largo de los primeros días del cultivo (días 1-4), se puede notar una fase en la que los tres tratamientos experimentan un crecimiento rápido. Durante este lapso, la microalga se beneficia de la abundancia de nutrientes, especialmente el carbono soluble, el nitrógeno y los micronutrientes que provienen del lodo. Esto propicia una multiplicación celular veloz. El aumento es más significativo en los tratamientos al 3 % y 5 %, lo que se corresponde con una oferta superior de componentes necesarios para el crecimiento (Quinapanta-Pérez *et al.*, 2021)

La densidad celular se estabiliza entre el 5 y el 7, aunque con ligeras caídas temporales en la absorbancia. Este comportamiento es característico de un sistema en el que aparecen limitaciones nutricionales y físicas: la turbidez aumentada causada por los sólidos del lodo puede reducir la penetración de luz, lo que genera competencia lumínica entre las células; de igual manera, la redistribución de nutrientes y la posible acumulación de subproductos metabólicos dan lugar a fluctuaciones en términos de crecimiento y actividad fotosintética. Estos pequeños movimientos son una adaptación fisiológica del cultivo al medio, que se hace cada vez más denso y diverso. (Martínez-Rodríguez *et al.*, 2025)

Por último, entre el 12 y el 15 de octubre se observa una disminución evidente en la densidad celular en los tres tratamientos. Este patrón de conducta se alinea con el agotamiento de parámetros fundamentales como DQO, COT y carbohidratos, lo que

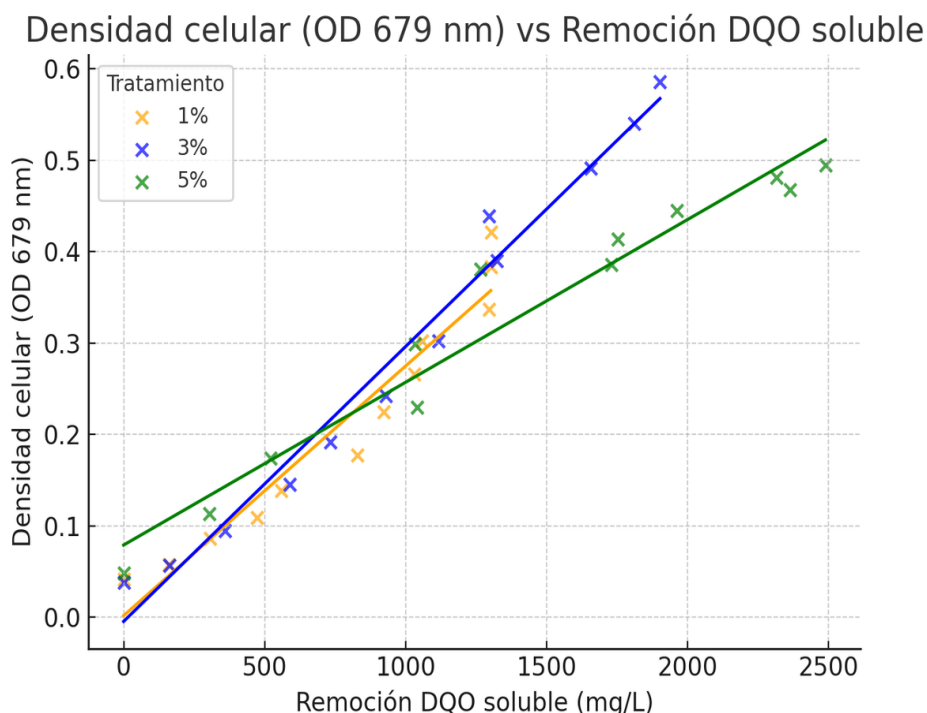
señala que el carbono orgánico disponible ha sido totalmente utilizado. Cuando no hay suficiente sustrato, las células pasan a una fase estacionaria avanzada y luego a una de declive, en la que se vuelven más frecuentes la disminución de la actividad metabólica y la desintegración celular (Vásquez y Morales, 2022).

La implementación del tratamiento en un 3 % de lodo parece ser la condición más estable y eficaz para el desarrollo sostenido de *Nannochloropsis oculata*, según las pautas observadas. Este tratamiento logra un balance óptimo entre una condición física apropiada para la producción continua de biomasa, la estabilidad del metabolismo y la disponibilidad de nutrientes; es más estable que tener un 1 % de baja disponibilidad de nutrientes y un 5 % de sobrecarga metabólica. (Gárate-Osuna *et al.*, 2022).

3.4.5. Relación entre el crecimiento microalgal y la remoción de materia orgánica

La relación entre la densidad celular de *Nannochloropsis oculata* (OD 679 nm) y la eliminación de DQO soluble presenta una conducta lineal evidente, consistente con la dinámica metabólica observada en los tres tratamientos de lodo residual avícola (1 %, 3 % y 5 %). En conjunto, la Figura 3.9 muestra que la biomasa microalgal aumenta de manera proporcional conforme se depura y consume la materia orgánica soluble del medio, lo que confirma una relación directa entre el crecimiento celular y la actividad metabólica asociada a la asimilación de carbono orgánico (Sales-Pérez *et al.*, 2023).

Figura 3.9. Relación entre el crecimiento microalgal vs la remoción de materia orgánica



En el tratamiento al 1 %, los datos muestran una pendiente positiva intermedia: a medida que la DQO soluble va disminuyendo (200-1200 mg/L), la densidad celular aumenta. Esto indica que crecen, pero están limitadas por la menor disponibilidad inicial de nutrientes. Si bien la transformación de carbono orgánico en biomasa es eficiente, el crecimiento se limita a causa de la baja concentración de sustrato en el medio (El-Araby *et al.*, 2022).

3% es el tratamiento más pendiente y más homogéneo. A medida que se va eliminando la DQO soluble, la densidad celular va aumentando, hasta valores próximos a 1500 mg/L DQO consumida. Esto quiere decir que hay un balance entre la disponibilidad de nutrientes y la eficiencia metabólica que permite a la microalga estar siempre degradando materia orgánica y transformándola en biomasa. La alta linealidad sugiere que el metabolismo no está saturado ni por sustrato ni por espacio y, por lo tanto, el crecimiento celular puede responder linealmente a la eliminación de materia orgánica (Osorio-Urtecho *et al.*, 2020).

Por el contrario, el tratamiento al 5 % presenta menor pendiente y mayor dispersión de los datos. Aunque se logra alta remoción de DQO (>2000 mg/L), el aumento de densidad celular es menos uniforme. Esto implica que, aunque haya sustrato en abundancia, las condiciones ambientales limitan el crecimiento y la fotosíntesis por sombreado, sedimentación de sólidos y disminución de penetración de luz. Estas restricciones pueden desincronizar la descomposición de la materia orgánica y la producción de biomasa, creando una respuesta fisiológica más impredecible (Anam *et al.*, 2025).

En general, la gráfica verifica que el tratamiento al 3 % es el más eficaz en la biotransformación, ya que el crecimiento de *Nannochloropsis oculata* se relaciona de manera lineal, positiva y muy fuerte con la eliminación de DQO soluble. ¡Esto hace que el 3 % sean las mejores condiciones para maximizar la limpieza del medio y la biomasa microalgal! (Vásquez y Avendaño, 2022).

3.5. Obtención y análisis de biomosas generadas

Para establecer el potencial de valorización del LRA mediante procesos de biotecnológicos, es esencial obtener, acondicionar y evaluar las biomosas producidas en lo que respecta a su aporte nutricional. Se utilizaron dos métodos de biotransformación microbiana en esta investigación como ya se ha mencionado anteriormente, ambos procesos son diferentes: un proceso prolongado con *Nannochloropsis oculata* y otro rápido con *Lactobacillus plantarum*. Cada uno de ellos funciona bajo condiciones ambientales y principios metabólicos diferentes, lo que posibilita la producción de biomosas con propiedades composicionales diversas que pueden ser útiles en la alimentación animal.

Se llevo a cabo el acondicionamiento de las biomazas a base seca como se puede apreciar en la Figura 3.10, y se le realizaron los análisis nutricionales pertinentes mostrados en la Tabla 3.7 para la biomasa generada con *Lactobacillus plantarum* y la Tabla 3.8 para la biomasa generada a partir de *Nannochloropsis oculata*



Figura 3.10. Acondicionamiento y obtención de biomazas en base seca

Tabla 3.6. Sólidos totales, volátiles, fijos y rendimiento de biomasa en base seca obtenida.

Parámetro	Proceso anaerobio (<i>Lactobacillus plantarum</i>)	Proceso aerobio (<i>Nannochloropsis oculata</i>)
Sólidos totales (g)	40	37.8
Sólidos volátiles (g)	34	32.1
Sólidos fijos (g)	6	5.7
Volumen total final (L)	5	9
Biomasa seca obtenida (g)	40	37.8
Rendimiento (g/L)	8	4.2

En la tabla 3.6, se aprecia que, en los dos procesos, ya sea en el sistema anaerobio con *Lactobacillus plantarum* o en el sistema aerobio con *Nannochloropsis oculata*, la composición de la biomasa reveló que una proporción mayoritaria de sólidos volátiles (alrededor del 85%) estaba presente. Esta conducta demuestra que la mayoría de la biomasa producida es materia orgánica, vinculada sobre todo con elementos celulares como los carbohidratos, las proteínas y los lípidos. Esto se observa en biomazas microbianas y microalgales generadas a partir de desechos orgánicos. El hecho de

que los porcentajes de sólidos volátiles y fijos sean semejantes en ambos procesos indica que, sin importar la vía metabólica (aerobia o anaerobia), la biotransformación del lodo residual avícola posibilitó una conversión eficaz de la materia orgánica existente en estructuras celulares, sin que se produjera una acumulación excesiva de compuestos inorgánicos.

Sin embargo, al examinar el desempeño de la biomasa en relación con el volumen que se trata, se notan diferencias significativas entre ambos procesos. El sistema anaerobio mostró un rendimiento más alto (8 g/L) que el proceso aerobio (4.2 g/L), lo cual demuestra una eficiencia volumétrica superior en la fabricación de biomasa bacteriana. La naturaleza del metabolismo fermentativo de *Lactobacillus plantarum*, que propicia una conversión directa y veloz de los compuestos orgánicos solubles en biomasa celular, podría ser la razón de esta diferencia. Por el contrario, el proceso aeróbico con *Nannochloropsis oculata*, a pesar de tener una productividad más baja, brinda beneficios adicionales relacionados con la limpieza del medio y la producción de biomasa microalgal que tiene un posible valor agregado.

En resumen, estos hallazgos demuestran que los dos sistemas se complementan; el anaerobio se distingue por su eficiencia en términos de producción y el aerobio por su estabilidad en lo fisiológico y su aporte a la biorremediación integral del lodo residual avícola.

3.5.1 Análisis de las propiedades nutricionales de la biomasa generada con *L. plantarum*

Durante la fermentación del lodo avícola con *Lactobacillus plantarum*, se observaron variaciones significativas ($p < 0.05$) en la composición fisicoquímica de la biomasa en función de la concentración microbiana mostradas en la Tabla 3.7. A medida que aumentó la proporción de inóculo, los valores de pH, conductividad eléctrica, cenizas y contenido mineral (Ca, Mg, Na, K, P, Fe, Zn, Mn y Cu) se incrementaron progresivamente, reflejando una mayor acumulación de sales, compuestos inorgánicos y metabolitos liberados durante el proceso fermentativo. En contraste, la humedad y la materia orgánica disminuyeron de manera significativa, lo que sugiere un consumo más eficiente del sustrato y una conversión parcial de la fracción orgánica en biomasa microbiana.

Table 3.7 Caracterización nutrimental de las biomasas generadas del proceso de biotransformación de LRA con *L. plantarum* con tres niveles de inóculo

Parámetro	5 %	10 %	15 %
Humedad (%)	10.3 ± 0.4	9.71 ± 0.3	8.9 ± 0.5
pH	8.10 ± 0.06	8.24 ± 0.05	8.35 ± 0.07
Conductividad (S dm ⁻¹)	6.92 ± 0.25	7.73 ± 0.18	8.10 ± 0.22
Cenizas (%)	7.9 ± 0.3	8.6 ± 0.2	9.3 ± 0.4

Materia orgánica (%)	92.1 ± 0.3	91.4 ± 0.2	90.7 ± 0.4
Carbono total (%)	52.0 ± 1.1	53.0 ± 0.9	54.5 ± 1.0
Nitrógeno total (%)	6.10 ± 0.28	6.67 ± 0.24	6.45 ± 0.30
Relación C/N	8.5 ± 0.4	7.95 ± 0.3	8.45 ± 0.5
CaO (%)	0.95 ± 0.05	1.04 ± 0.04	1.10 ± 0.05
MgO (%)	0.30 ± 0.02	0.32 ± 0.01	0.34 ± 0.02
Na ₂ O (%)	0.84 ± 0.04	0.89 ± 0.03	0.95 ± 0.04
K ₂ O (%)	0.77 ± 0.03	0.81 ± 0.02	0.83 ± 0.03
P ₂ O ₅ (%)	2.10 ± 0.07	2.29 ± 0.06	2.45 ± 0.09
Fe (%)	0.176 ± 0.008	0.188 ± 0.007	0.195 ± 0.009
Cu (%)	0.010 ± 0.001	0.011 ± 0.001	0.012 ± 0.001
Zn (%)	0.062 ± 0.003	0.066 ± 0.002	0.069 ± 0.003
Mn (%)	0.016 ± 0.001	0.017 ± 0.001	0.018 ± 0.001
B (%)	0.0003 ± 0.000	0.0003 ± 0.0001	0.0003 ± 0.0001
Proteína base seca (bs). (%)	38.2 ± 1.9	41.7 ± 1.5	39.5 ± 2.1

El contenido proteico de la biomasa de *L. plantarum* se encuentra dentro del rango informado para cepas eficientes cultivadas en sustratos ricos en carbono y nitrógeno orgánico (35-50 % en peso seco). Este comportamiento se ajusta a lo reportado en estudios de optimización de medios de cultivo y celulares, en los cuales se informa que *L. plantarum* es capaz de acumular proteína como principal producto anabólico en condiciones fermentativas controladas. Además, fermentaciones sobre residuos agroindustriales han arrojado resultados comparables (0.3–0.8 g proteína/L), demostrando el potencial de utilizar matrices complejas para generar biomasa probiótica de interés zootécnico (Anagnostopoulou et al., 2022; Estrada-García et al., 2024).

Además, la elevación del contenido proteico hasta 41.7 % (bs) en la condición con 10 % de inóculo demuestra una alta eficiencia de transformación de materia orgánica en biomasa microbiana rica en nitrógeno. Este fenómeno se ha observado en fermentaciones de residuos avícolas y agroindustriales en las que bacterias ácido-lácticas catalizan la hidrólisis de macromoléculas y la síntesis de proteína celular (Jagadeesan et al., 2022). Los niveles de micronutrientes (Fe, Zn, Mn, Cu) se encontraron en niveles apropiados para ser utilizado como suplemento alimenticio, en línea con estudios que informan sobre la valorización de subproductos pecuarios como fuente de compuestos funcionales para alimento animal y estrategias de economía circular en agroindustrias sostenibles (Sachdeva et al., 2025). Los resultados indican que la biomasa producida por la biotransformación anaeróbica del lodo avícola con *L. plantarum* tiene un perfil nutricional comparable a las necesidades nutricionales estándar para animales de engorde (Tabla 3.8). En especial, el contenido de proteína en base seca logrado en la condición con 10 % de inóculo (41.7 ± 1.5 %) se encuentra en el rango adecuado para suplementos proteicos para pollos (18–22 %). Pero excede las recomendaciones para cerdos (16-18 %) de

acuerdo con las recomendaciones nutricionales del NRC y manuales veterinarios comerciales.

Además, la alta elevación de materia orgánica (≥ 91 %) y carbono total (hasta 54.5 ± 1.0 %) demuestra una biomasa rica en energía similar a productos comerciales fermentados con bacterias ácido lácticas (Estrada-García et al., 2024). En investigaciones recientes, la cofermentación de desechos ganaderos con cepas de *Lactobacillus plantarum* ha mejorado la digestibilidad y biodisponibilidad de proteínas y carbohidratos en dietas animales, demostrando su potencial como alimento funcional (Villanueva-Galindo et al., 2025). Además, los niveles de micronutrientes clave encontrados en la biomasa (Fe: 0.176–0.195 %; Cu: 0.010–0.012 %; Zn: 0.062–0.069 %; Mn: 0.016–0.017 %) están en rangos iguales o superiores a los recomendados para la elaboración de núcleos minerales comerciales (Tabla 3.8). Lo que demuestra que la fermentación favoreció la síntesis de proteína celular y enriqueció en minerales el producto. Esta tendencia fue informada por Lian et al. (2023), quienes encontraron que la fermentación anaeróbica de residuos agrícolas con *L. plantarum* solubiliza oligoelementos, enriqueciendo su absorción en la biomasa. Además, la fermentación de residuos lignocelulósicos por bacterias ácido-lácticas produce derivados ricos en compuestos nutraceuticos y mejora la estabilidad microbiológica del producto final, lo que permite su uso como ingrediente funcional en alimento para animales en el contexto de economía circular y agricultura regenerativa (Rodríguez-Rivera et al., 2025).

3.5.2 Análisis de las propiedades nutricionales de la biomasa generada con *N. oculata*

Los parámetros fisicoquímicos y minerales de las biomásas producidas con tres concentraciones diferentes de LRA (1 %, 3 % y 5 %) variaron notablemente como se observa en la Tabla 3.8, lo que indica el impacto directo del gradiente de nutrientes disponibles en el medio de cultivo.

Tabla 3.8 Caracterización nutrimental de las biomásas generadas del proceso de biotransformación de LRA con *N. oculata* con tres niveles de concentración de LRA

Parámetro	1 %	3 %	5 %
Humedad (%)	13.2 ± 0.5	12.4 ± 0.4	11.6 ± 0.4
pH final	6.54 ± 0.05	6.65 ± 0.04	6.74 ± 0.03
Conductividad ($S \cdot dm^{-1}$)	37.2 ± 1.1	40.5 ± 1.0	43.3 ± 0.9
Cenizas (%)	24.8 ± 0.8	27.6 ± 0.9	30.1 ± 1.0
Materia orgánica (%)	75.2 ± 0.8	72.4 ± 0.9	69.9 ± 1.0
Carbono total (%)	42.6 ± 1.2	41.4 ± 1.0	40.5 ± 0.9
Nitrógeno total (%)	4.62 ± 0.18	4.95 ± 0.16	5.29 ± 0.15
Relación C/N	9.2 ± 0.3	8.3 ± 0.4	7.7 ± 0.3
CaO (%)	0.39 ± 0.02	0.43 ± 0.02	0.47 ± 0.02

MgO (%)	0.63 ± 0.03	0.70 ± 0.03	0.77 ± 0.03
Na ₂ O (%)	10.8 ± 0.4	12.5 ± 0.5	14.0 ± 0.6
K ₂ O (%)	3.12 ± 0.08	3.49 ± 0.10	3.85 ± 0.12
P ₂ O ₅ (%)	0.78 ± 0.03	0.84 ± 0.03	0.89 ± 0.03
Fe (%)	0.055 ± 0.002	0.061 ± 0.003	0.066 ± 0.003
Cu (%)	0.0008 ± 0.0001	0.0009 ± 0.0001	0.0010 ± 0.0001
Zn (%)	0.0094 ± 0.0003	0.0105 ± 0.0004	0.0114 ± 0.0005
Mn (%)	0.0090 ± 0.0003	0.0098 ± 0.0003	0.0109 ± 0.0004
B (%)	0.0006 ± 0.0000 ^{ns}	0.0007 ± 0.0000 ^{ns}	0.0008 ± 0.0000 ^{ns}
Proteína b.s. (%)	28.9 ± 1.3	31.2 ± 1.1	33.1 ± 1.2

La proporción de lodo residual avícola (LRA) aumentó, lo que causó cambios graduales en las características fisicoquímicas de la biomasa microalgal, especialmente una disminución de la humedad y un aumento del contenido de sólidos celulares. Una disminución de la humedad, del 13.2 % al 11.6 %, puede asociarse con una mayor densidad celular y una asimilación más eficiente de los nutrientes, lo que produce una biomasa que es más densa y compacta desde el punto de vista estructural.

Nannochloropsis oculata resistió sin dificultades las variaciones que se produjeron durante la asimilación de compuestos orgánicos, lo cual es habitual en cultivos microalgales expuestos a medios mineralizados y sustratos complejos (Vásquez y Avedaño, 2022). Esto se refleja en el pH final, que permaneció entre 6.5 y 6.7, lo que demuestra que el sistema mantuvo una capacidad tampón apropiada.

La carga de LRA se incrementa y, como resultado, la conductividad va en aumento progresivo, al igual que el porcentaje de cenizas. Esto demuestra una mayor presencia y acumulación de minerales vinculados con la biomasa. Que la proporción de cenizas aumente del 24.8 % al 32.8 %, a la vez que disminuye ligeramente la parte orgánica, sugiere que las células expuestas a mayores concentraciones de sustrato desarrollan una composición con más minerales. Este fenómeno es coherente con sistemas de microalgas que se cultivan en medios altamente salinos, en los cuales algunos minerales se añaden a la estructura celular o permanecen adheridos a la superficie de la biomasa, sin influir negativamente en la estabilidad fisiológica del cultivo (El-Araby *et al.*, 2022; Anam *et al.*, 2025).

Que el carbono total y el nitrógeno total aumenten al aumentar el LRA indica mayor síntesis de biomoléculas funcionales y estructurales. Un incremento del carbono celular nos puede revelar que se están acumulando lípidos y otras sustancias carbonatadas; si aumenta el nitrógeno, significa que se asimilan más formas nitrogenadas en el proceso de tratamiento del lodo. Como consecuencia, la relación C/N se redujo a valores cercanos a 8.3, dentro de los valores considerados óptimos

para microalgas cultivadas con el fin de producir biomasa rica en nutrientes. Esto favorece la síntesis proteica y la estabilidad metabólica del cultivo (Sousa *et al.*, 2022).

La capacidad de *Nannochloropsis oculata* para asimilar los nutrientes presentes en el LRA se ve favorecida por el comportamiento de los macronutrientes minerales. El papel esencial del MgO en la estructura de la clorofila y en la fotosíntesis se corresponde con su crecimiento, mientras que el incremento de Na₂O y K₂O se asocia a mecanismos de regulación osmótica propios de esta microalga y a la composición mineral del medio F/2. Además, el incremento de P₂O₅ es esencial para la producción de ATP, ácidos nucleicos y fosfolípidos, lo que favorece un metabolismo celular activo para la producción de biomasa de alto valor biológico (Quinapanta *et al.*, 2021).

Los oligoelementos analizados (Fe, Cu, Zn, Mn y B) mostraron valores similares entre los tratamientos, sin encontrar diferencias significativas. Esto indica que *N. oculata* reguló eficientemente su absorción de estos elementos a pesar del aumento de la concentración en el medio. Esta estabilidad es buena desde el punto de vista nutricional, ya que evita riesgos de acumulación excesiva de metales traza. Uno de los resultados más relevantes fue el aumento progresivo de la proteína en base seca, que fue de: 28.9 % en 1 % LRA; 31.2 % en 3 % LRA; 33.1 % en 5 % LRA. Este incremento demuestra que el nitrógeno del LRA se incorporó a las proteínas celulares. Los valores obtenidos se encuentran dentro del rango informado para *N. oculata* cultivada en sistemas convencionales y, en el tratamiento al 5 %, superan los valores comunes (30-32 %), evidenciando el efecto positivo de la suplementación térmica con LRA. (Mavrommatis *et al.*, 2023; Zahran *et al.*, 2023).

3.6. Comparativa de aporte nutricional de las biomásas producidas a partir de los procesos aerobios y anaerobios

Se muestra la comparativa de ambas biomásas obtenidas y acondicionadas en base seca (Tabla 3.9), tanto la biomasa, resultado de la biotransformación de fermentación en condiciones anaerobias con *L. plantarum* y la biomasa microalgal en condiciones aerobias con *N. oculata*, las cuales se comparan con el perfil nutricional de núcleos minerales en alimentos comerciales en pollos y cerdos en etapa de crecimiento, que son destinados al procesamiento de carne para consumo humano.

La información de referencia para la comparativa es obtenida de manuales de alimentos veterinarios comerciales de National Research Council (NRS), que establecen los requerimientos nutricionales básicos y publican tablas de composición de ingredientes y alimentos formulados para diseñar raciones en la alimentación animal, en la industria, cuando combina sus datos NRS con sus ingredientes, el núcleo comercial que venda será la forma industrial de aportar vitaminas, minerales, aminoácidos que NRS indican, lo cual da respaldo al aporte nutricional proporcionado.

Tabla 3.9 Perfil nutricional de las biomásas obtenidas en base seca de la presente investigación y su comparativa con núcleos minerales comerciales para la alimentación de pollos de engorde y cerdos en la etapa de crecimiento obtenido de los manuales veterinarios comerciales de National Research Council

Nutriente	Biomasa probiótica (<i>L. plantarum</i>)	Biomasa microalgal (<i>N. oculata</i>)	Pollos de engorde (crecimiento) NRC	Cerdos (crecimiento) NRC
Humedad (%)	9.71 ± 0.3	11.6 ± 0.4	< 12	< 12
pH	8.24 ± 0.05	6.74 ± 0.03	6.0 – 7.0	5.5 – 6.5
Conductividad (S·dm ⁻¹)	7.73 ± 0.18	43.3 ± 0.9	-	-
Cenizas (%)	8.6 ± 0.2	30.1 ± 1.0	5 – 7	4 – 6 %
Materia orgánica (%)	91.4 ± 0.2	69.9 ± 1.0	-	-
Carbono total (%)	53.0 ± 0.9	40.5 ± 0.9	-	-
Nitrógeno total (%)	6.67 ± 0.24	5.29 ± 0.15	-	-
Relación C/N	7.95 ± 0.3	7.7 ± 0.3	-	-
Calcio (CaO) (%)	1.04 ± 0.04	0.47 ± 0.02	0.90 – 1.20	0.60 – 0.70 %
Magnesio (MgO) (%)	0.32 ± 0.01	0.77 ± 0.03	0.04 – 0.06	0.04 – 0.05 %
Sodio (Na ₂ O) (%)	0.89 ± 0.03	14.0 ± 0.6	0.15 – 0.20	0.15 – 0.20 %
Potasio (K ₂ O) (%)	0.81 ± 0.02	3.85 ± 0.12	0.60 – 0.80	0.55 – 0.65 %
Fosforo total P ₂ O ₅ (%)	2.29 ± 0.06	0.89 ± 0.03	0.45 – 0.55	0.50 – 0.56 %
Hierro (Fe) (%)	0.188 ± 0.007	0.066 ± 0.003	0.006– 0.008	0.008-0.01
Cobre (Cu) (%)	0.011 ± 0.001	0.0010 ± 0.0001	0.0008-0.001	0.0006-0.001
Zinc (Zn) (%)	0.066 ± 0.002	0.0114 ± 0.0005	0.004-0.006	0.005-0.01
Manganeso (Mn) (%)	0.017 ± 0.001	0.0109 ± 0.0004	0.006-0.008	0.002-0.004
Boro (B) (%)	0.0003 ± 0.0001	0.0008 ± 0.0000 ^{ns}	< 0.0001 (trazas)	< 0.0001 (trazas)
Proteína base seca. (%)	41.7 ± 1.5	33.1 ± 1.2	18 – 22 %	16 – 18 %

Las microalgas producidas por *Nannochloropsis oculata* en condiciones aerobias y las biomásas probióticas generadas por *Lactobacillus plantarum* en condiciones anaerobias, según se ha demostrado, tienen perfiles nutricionales que pueden ser utilizados para la alimentación animal con un alto potencial, al ser comparados con los requerimientos establecidos por el National Research Council (NRC). Sin embargo, las variaciones en la composición de macro y micronutrientes que se han notado son un reflejo del metabolismo predominante de los microorganismos involucrados y de la naturaleza bioquímica específica de cada proceso, como se ha informado anteriormente en investigaciones sobre valorización biológica de desechos orgánicos a través de sistemas fototróficos y fermentativos (Sales-Pérez *et al.*, 2023).

El contenido proteico en base seca es uno de los indicadores más importantes, ya que juega un papel fundamental en el crecimiento, la conservación de tejidos y el desarrollo muscular de especies como cerdos y pollos. En esta investigación, la biomasa probiótica llegó a un 41.7 % de contenido proteico, una cifra que excede con creces los requerimientos establecidos por el NRC para animales en crecimiento (Anagnostopoulou *et al.*, 2022; Estrada-García *et al.*, 2024). Este comportamiento indica que la biotransformación anaerobia con *L. plantarum* favorece la concentración y solubilización de compuestos nitrogenados, un proceso vinculado al metabolismo fermentativo del microorganismo, que potencia la producción de aminoácidos libres y péptidos con una biodisponibilidad alta. Este fenómeno ha sido documentado en estudios relacionados con fermentaciones lácticas utilizadas para residuos agroindustriales

La biomasa de microalgas tuvo un contenido proteico del 33.1 %, que, aunque es inferior al obtenido en el proceso anaerobio, sigue siendo significativamente más alto que las exigencias nutricionales fijadas por el NRC. Este hallazgo concuerda con lo que se ha reportado para las microalgas de la especie *Nannochloropsis oculata*, que se caracterizan por poseer un elevado número de proteínas asociadas a estructuras celulares y enzimas fotosintéticas. La reducción de la proporción proteica en comparación con *L. plantarum* puede atribuirse a que, en condiciones aerobias y fototróficas, los carbohidratos y lípidos se acumulan al mismo tiempo. Por eso, el carbono absorbido se redistribuye entre distintos metabolitos celulares (Emam *et al.*, 2024; Zahran *et al.*, 2023).

En términos de contenido mineral, las dos biomásas presentaron niveles por encima de lo mínimo necesario establecido por el NRC para elementos fundamentales como magnesio, manganeso, calcio, zinc y hierro. Esto fortalece su potencial para ser utilizados como suplementos minerales en la alimentación animal. La biomasa microalgal se destacó específicamente por su contenido de sodio y potasio. Esto puede estar vinculado a la naturaleza mineralizada del medio donde se cultivan y a la habilidad que tienen las microalgas de acumular sales en fotobiorreactores bajo

condiciones controladas. Por el contrario, la biomasa producida con *L. plantarum* mostró concentraciones más altas de fósforo total (P_2O_5) y calcio, componentes esenciales para la formación ósea y el metabolismo energético, lo cual concuerda con lo que se ha informado sobre biomásas bacterianas obtenidas de métodos fermentativos (Mavrommatis *et al.*, 2023; Jagadeesan *et al.*, 2022).

La relación C/N de las dos biomásas, que está entre 7.7 y 7.95, muestra una composición con alto contenido de nitrógeno y sugiere que la biodisponibilidad proteica es apropiada; esto es un factor positivo para incluirlas en formulaciones dirigidas a animales que necesitan fuentes proteicas fáciles de digerir. En términos generales, los resultados corroboran que la biomasa producida por el proceso anaerobio con *Lactobacillus plantarum* tiene una ventaja comparativa cuando la meta principal es aumentar al máximo el contenido de proteínas. Por otro lado, la biomasa microalgal de *Nannochloropsis oculata* proporciona un perfil mineral más equilibrado. Esto hace posible que ambos procesos sean considerados como tácticas complementarias en planes integrales para valorizar lodos residuales avícolas destinados a la alimentación animal (Anam *et al.*, 2025).

CAPITULO 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Caracterización fisicoquímica y microbiológicamente de los lodos residuales avícolas.

El lodo residual avícola inicialmente fue altamente orgánico y patógeno, pero con bajo contenido de nitrógeno y proteínas debido a la nitrificación y desnitrificación en la PTAR. Estas características restringen su utilización en forma directa, pero demuestran el potencial como sustrato orgánico susceptible de acondicionamiento.

El tratamiento térmico fue efectivo para eliminar por completo los patógenos y mejorar la biodisponibilidad de la materia orgánica, aumentando los sólidos solubles y los carbohidratos. Además, la disminución del pH y el incremento de sólidos totales, volátiles y fijos crearon condiciones para la fermentación anaeróbica e inoculación selectiva de microorganismos.

Los valores de DQO total y soluble indicaron una buena disponibilidad de sustrato biodegradable y los de fósforo se mantuvieron en rangos favorables para procesos biotecnológicos. En conjunto, el lodo tratado térmicamente es un biosólido seguro y con potencial para ser valorizado biológicamente.

Es aconsejable el tratamiento térmico previo a la utilización biotecnológica del lodo residual avícola, mejorando su seguridad microbiológica y la disponibilidad de sustratos fermentables. Por ser pobre en nitrógeno y en proteínas, se recomienda plantear estrategias de suplementación o codigestión para favorecer el crecimiento microbiano.

Además, es aconsejable probar diferentes condiciones de tratamiento térmico y caracterizar mejor la fracción orgánica soluble para optimizar el proceso y mejorar la viabilidad del aprovechamiento del lodo residual avícola.

4.2 Condiciones favorables para el crecimiento de *Lactobacillus plantarum* en los lodos residuales avícolas en condiciones anaerobias.

Los resultados indicaron que el lodo residual avícola tratado térmicamente es un buen sustrato para la fermentación anaeróbica con *Lactobacillus plantarum*, lográndose altas densidades celulares, remoción eficiente de carbohidratos y producción de biomasa rica en proteína. En todos los tratamientos se encontró una correlación positiva entre la concentración de carbohidratos y el conteo celular, llegando a obtenerse concentraciones cercanas a 9 Log CFU/mL en condiciones controladas de temperatura, agitación y anaerobiosis.

La concentración de inóculo afectó la cinética y la eficiencia del proceso. El tratamiento al 5 % (v/v) dio el mejor resultado de bioconversión de sustrato en biomasa, mayor estabilidad metabólica y mayor producción de ácido láctico, lo que sugiere una mejor utilización del carbono disponible. Si bien altas concentraciones de

inóculo acortaron el tiempo de latencia, disminuyeron el rendimiento total, por agotamiento temprano del sustrato y autoinhibición por acumulación de metabolitos.

En conjunto, la fermentación anaeróbica con *L. plantarum* logró una doble valorización del lodo residual avícola, reduciendo la carga orgánica y generando biomasa probiótica aplicable en la nutrición animal, en concordancia con modelos de economía circular y aprovechamiento sostenible de residuos agroindustriales.

Se sugiere usar un 5 % (v/v) de concentración de inóculo, ya que ofrece el mejor compromiso entre crecimiento celular, biomasa, ácido láctico y estabilidad del sistema fermentativo. Esta condición es ideal para aprovechar al máximo el sustrato y evitar inhibiciones por sobreinoculación.

También es recomendable considerar sistemas semicontinuos o alimentados, en especial para altas concentraciones de inóculo, para prevenir el agotamiento temprano del sustrato y la muerte celular. Esta forma de configuración podría aumentar la productividad total, proporcionar una fermentación más estable y permitir la producción continua de biomasa probiótica y metabolitos de interés.

4.3 Condiciones para el cultivo y producción de biomasas a partir de lodos residuales avícolas en procesos aerobios con *Nannochloropsis oculata*.

Los resultados muestran que *Nannochloropsis oculata* puede crecer y biotransformar exitosamente el lodo residual avícola pretratado en condiciones aerobias, con una eliminación casi total de la carga orgánica medida como DQO y carbono orgánico total. La microalga utilizó el carbono disponible para generar biomasa, confirmando el potencial del sistema como estrategia simultánea de biorremediación y valorización de residuos.

La concentración de lodo residual avícola influyó en el patrón de crecimiento y en los parámetros cinéticos del cultivo. El tratamiento con 3 % de LRA fue el que presentó mayor tasa específica de crecimiento, afinidad por el sustrato, rendimiento biomasa/sustrato y menor tasa de mortalidad celular, demostrando que existe un punto en el cual se favorece la disponibilidad de nutrientes y la estabilidad fisiológica del sistema.

Por el contrario, el tratamiento con 5 % de LRA mostró signos de estrés metabólico, tales como la disminución de la tasa de crecimiento, el aumento de la constante de saturación y la tasa de muerte celular. Estos efectos tienen que ver con la sobrecarga orgánica, se sedimentan sólidos y la penetración de luz se reduce, lo que inhibe la fotosíntesis y disminuye su eficiencia. Por su parte, el tratamiento al 1 % creció de forma constante, pero se vio limitado por falta de nutrientes.

En conjunto, los resultados confirman que la suplementación con lodo residual avícola (≈ 3 %) es la mejor condición para estimular la producción de biomasa microalgal y la remoción de materia orgánica, haciendo de este sistema una alternativa sustentable

para el tratamiento de residuos avícolas y la producción de biomasa con potencial nutricional.

Propone que los sistemas aerobios sean operados con *Nannochloropsis oculata* a concentraciones de lodo residual avícola en torno al 3 %, en las cuales se logra el mejor compromiso entre crecimiento celular, eficiencia de remoción de materia orgánica y estabilidad metabólica del cultivo. Para altas concentraciones de LRA, es conveniente implementar estrategias de mitigación, como diluir el sustrato, controlar mejor la aireación, mejorar la distribución de la luz o pretratamientos adicionales del lodo para reducir los efectos inhibidores asociados a la sobrecarga orgánica y la acumulación de sólidos. Además, vale la pena ensayar arreglos semicontinuos o por lotes que alarguen la fase exponencial de crecimiento microalgal y mejoren la productividad volumétrica de biomasa. Estas estrategias podrían hacer más viable su aplicación a gran escala, posicionándolo como tecnología integrada para el tratamiento y valorización de lodos residuales avícolas.

4.4 Viabilidad y la calidad nutricional de las biomásas obtenidas como posibles suplementos alimenticios para aves.

Los resultados indican que ambas biomásas derivadas del lodo residual avícola, la biomasa probiótica anaeróbica fermentada con *Lactobacillus plantarum* y la biomasa microalgal aeróbica con *Nannochloropsis oculata*, tienen perfiles nutricionales apropiados para alimento de aves en crecimiento. La comparación con los estándares del National Research Council demuestra que son adecuados como ingredientes funcionales o suplementos nutricionales. La biomasa fermentada anaeróbicamente fue rica en proteína en base seca, lo que la convierte en una fuente concentrada de proteína y con potencial para mejorar el crecimiento y desarrollo muscular en aves. Por su parte, la biomasa microalgal presentó buen contenido proteico y mejor perfil mineral, sobre todo en macro y micronutrientes esenciales, lo que fortalece su uso como suplemento mineral y nutricional.

La relación C/N que se obtiene en ambas biomásas señala que existe alta disponibilidad de nitrógeno y buena biodisponibilidad proteica, lo que permite su digestibilidad y aprovechamiento metabólico. En conclusión, ambas biotransformaciones generan biomásas con perfiles nutricionales distintos pero complementarios, reforzando la valorización integral de los lodos residuales avícolas para alimento animal.

Sugiere que la biomasa probiótica de *Lactobacillus plantarum* se podría emplear como fuente proteica alternativa en piensos avícolas en fases de alta exigencia proteica. Además, la biomasa microalgal de *Nannochloropsis oculata* puede ser utilizada como suplemento mineral y nutricional para equilibrar raciones para aves de producción. Vale la pena estudiar la mezcla de ambas biomásas en formulaciones mixtas aprovechando así el alto contenido proteico del proceso anaerobio y el enriquecido perfil mineral del aerobio. Finalmente, deben llevarse a cabo estudios de digestibilidad,

palatabilidad y respuesta productiva en animales que confirmen experimentalmente su uso seguro y eficiente en alimentos comerciales.

4.5 Enfoque de economía circular para la valorización de biomasa derivada de biotransformación

La Figura 4.1 representa un modelo integrado de economía circular aplicado al sector avícola, en el cual los residuos procedentes de la producción de pollos de engorde (PPE) se dirigen al tratamiento de lodos residuales avícolas (LRA) y posteriormente se someten a dos procesos de biotransformación microbiana aerobia y anaerobia respectivamente (BMAA). A través de este proceso, los compuestos orgánicos presentes en el lodo son convertidos en una biomasa microbiana con potencial funcional para la alimentación animal (BMPAL), cerrando el ciclo de materia y reduciendo el impacto ambiental del sistema. Este enfoque permite reintroducir el subproducto generado en la misma cadena productiva en forma de suplemento nutricional, lo que lo convierte en una estrategia tecnológicamente viable bajo los principios de circularidad y sostenibilidad industrial.

Durante la fase de biotransformación con *L. plantarum*, se ha reportado una mejora en la digestibilidad de la fracción orgánica, reducción del contenido de sustancias recalcitrantes y aumento de compuestos funcionales como proteínas microbianas, ácidos orgánicos y péptidos bioactivos que actúan como promotores de crecimiento natural (Pan *et al.*, 2024). Estudios recientes también indican que las bacterias ácido-lácticas pueden reducir la carga microbiana patógena y la presencia de compuestos tóxicos mediante procesos de acidificación y modificación metabólica (Sharma *et al.*, 2014; Villanueva-Galindo *et al.*, 2025). Adicionalmente, se ha demostrado que el uso de este tipo de biomasa fermentada en dietas avícolas favorece la conversión alimenticia, mejora la respuesta inmunológica y contribuye a la reducción en el uso de antibióticos (Fidanza *et al.*, 2021; Artola *et al.*, 2024).

Este enfoque tecnológico contribuye directamente al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente el ODS 9 (industria, innovación e infraestructura), al promover la adopción de biotecnologías avanzadas; el ODS 12 (producción y consumo responsables), al evitar la disposición inadecuada de residuos con alta carga orgánica; y el ODS 13 (acción por el clima), gracias a la reducción de gases de efecto invernadero asociados al manejo tradicional de lodos avícolas.

La integración de los procesos, ofrece una alternativa robusta para disminuir la huella ambiental del sector avícola y generar productos de alto valor agregado destinados a nutrición animal, posicionando esta estrategia como un modelo replicable para el escalamiento industrial dentro de sistemas agroalimentarios sostenibles.

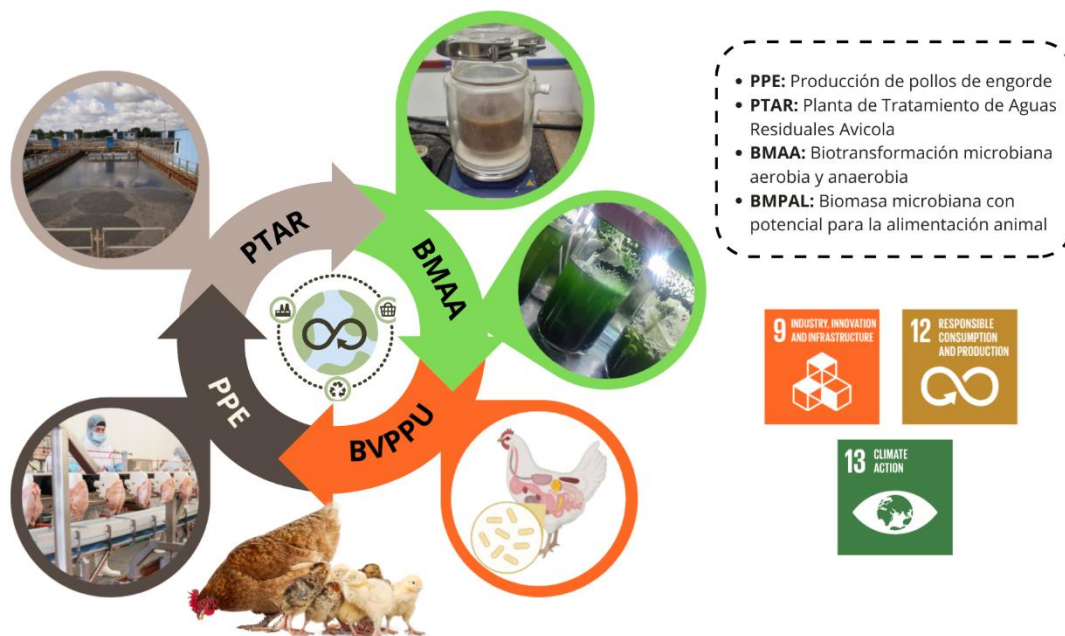


Figura 4.1 Aprovechamiento de las biomásas obtenidas de los procesos aerobios y anaerobios con microalgas y lactobacilos respectivamente, usando LRA, como alternativa sostenible en la economía circular.

4.6 Discusión integrada: Procesos con *Lactobacillus plantarum* y *Nannochloropsis oculata*

El proceso de biotransformación anaerobia con *Lactobacillus plantarum* demostró ser altamente eficiente para la valorización del lodo residual avícola (LRA), logrando una solubilización acelerada de la materia orgánica y una conversión metabólica efectiva del sustrato en biomasa microbiana. La reducción significativa de parámetros como DQO, carbohidratos y compuestos nitrogenados confirma la elevada capacidad fermentativa de *L. plantarum*, que convierte los componentes del LRA en metabolitos celulares en un periodo corto de tiempo (48 h), lo que es consistente con estudios previos que reportan su capacidad de adaptación y aprovechamiento de sustratos complejos bajo condiciones anaerobias.

Además, los resultados obtenidos señalan que este proceso es escalable a nivel industrial, debido a su baja demanda energética (sin aireación), tiempos de retención cortos y alta estabilidad metabólica. La fermentación anaerobia con bacterias ácido-lácticas ha sido ampliamente reconocida como una tecnología madura y fácilmente adaptable a sistemas de tratamiento de residuos orgánicos, lo que reafirma su potencial para su implementación en plantas piloto o de mayor capacidad.

Por otro lado, el proceso aeróbico mediante el cultivo de *Nannochloropsis oculata* también mostró capacidad para transformar el LRA en una biomasa de valor añadido. La microalga logró remover completamente el carbono orgánico (COT) y reducir sustancialmente la DQO soluble durante 16 días de cultivo, evidenciando su habilidad para aprovechar la fracción orgánica soluble como fuente de energía y carbono celular. Asimismo, las biomásas microalgales generadas presentaron un perfil nutricional relevante, con contenidos proteicos entre 28.9 % y 33.1 % en base seca, acompañados de minerales esenciales como K, Mg, Fe, Zn y Mn. Esto confirma el potencial del proceso microalgal como estrategia sostenible y ambientalmente circular, donde se produce oxígeno, se fija carbono y se genera una biomasa rica en compuestos de interés nutrimental.

Sin embargo, al comparar ambos procesos, *L. plantarum* presentó un aprovechamiento más eficiente y acelerado del LRA, tanto por el tiempo de procesamiento como por la magnitud de la conversión metabólica. La biomasa bacteriana mostró un contenido proteico mayor en relación con la obtenida mediante el cultivo de *N. oculata*, lo que indica una síntesis celular más activa y un aprovechamiento más directo del nitrógeno disponible en el sustrato. Además, la estabilidad del proceso anaerobio y la rapidez de la fermentación ofrecen ventajas operativas superiores frente al cultivo microalgal, que requiere tiempos prolongados, suministro de luz, aireación continua y control estricto de parámetros fisicoquímicos.

En conjunto, aunque el cultivo microalgal representa una alternativa ecológica complementaria particularmente valiosa por la fijación de CO₂, la generación de oxígeno y la obtención de lípidos y compuestos bioactivos, el proceso de fermentación anaerobia con *Lactobacillus plantarum* se posiciona como la opción de mayor eficiencia en la valorización inmediata del LRA, con un rendimiento proteico superior y una mayor factibilidad de escalamiento industrial. La complementariedad entre ambos sistemas podría, en escenarios futuros, integrarse en procesos híbridos que permitan maximizar la recuperación de nutrientes y la generación de bioproductos con aplicaciones en la nutrición animal y la economía circular.

En resumen, los resultados de este estudio reafirman que la biovalorización del lodo residual avícola es una alternativa factible desde el punto de vista ambiental y productivo, siempre y cuando se definan las condiciones operativas apropiadas y se elija el sistema biológico más eficiente para el propósito que se desee lograr. Los procesos evaluados lograron disminuir la carga contaminante del desecho y convertirlo en biomásas con valor nutricional y funcional, potenciando su uso en esquemas de economía circular para la industria avícola.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Abdel Haleem, M. I., Khater, H. F., Edris, S. N., Taie, H. A. A., Abdel Gawad, S. M., Hassan, N. A., Elbasuni, S. S. (2024). Bioefficacy of dietary inclusion of *Nannochloropsis oculata* on Eimeria spp. challenged chicks: clinical approaches, meat quality, and molecular docking. *Avian Pathology*, 53(3), 199–217. <https://doi.org/10.1080/03079457.2024.2312133>

Acosta Slane, D., Valles Aragón, M. C., & Parra Acosta, H. (2021). Los lodos residuales desde la bioética y sustentabilidad (Informe técnico). Instituto de Investigaciones Económicas y Empresariales, UNAM. <https://ru.iiec.unam.mx/5417/1/096-Acosta-Valles-Parra.pdf>

Acosta-Hoyos, A., Machado-Sierra, E., y Díaz-Fajardo, M. J. 2025. Evaluación genómica, caracterización del potencial probiótico y antimicrobiano de *Lactiplantibacillus plantarum* y *Limosilactobacillus reuteri* aislados del estiércol de cerdo zungo costeño (*Sus scrofa domesticus*). (Tesis doctoral, Universidad Nacional de Colombia). http://purl.org/coar/access_right/c_f1cf

Aguilar-Benítez, I., y Blanco, P. A. 2020. Recuperación de metano y reducción de emisiones en PTAR Nuevo Laredo, Tamaulipas, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 9(2), 86–106. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-02-04>

Akermann, A., Weiermüller, J., Lenz, S., Christmann, J., y Ulber, R. (2021). Kinetic Model for Simultaneous Saccharification and Fermentation of Brewers' Spent Grain Liquor Using *Lactobacillus delbrueckii* Subsp. *lactis*. *Biotechnol Bioproc Eng*, 26, 114–124. <https://doi.org/10.1007/s12257-020-0153-z>

Amador-Sanabria, M. C., Arteta-Chedraü, P. M., Canchila-Benítez, A. F., y Jiménez-Gómez, C. R. 2021. Diseño de un sistema de digestión anaerobia para la obtención de biogás y bioabono en una granja avícola de la región Caribe colombiana. *Revista Ing-Nova*, 17(2). Recuperado de <https://revistas.unicartagena.edu.co/index.php/ing-nova/article/view/3727>

Anagnostopoulou, C., Kontogiannopoulos, K.N., Gaspari, M., Morlino, M.S., Assimopoulou, A.N., Kougias, P.G.: Valorization of household food wastes to lactic acid production: A response surface methodology approach to optimize fermentation process. *Chemosphere* 296, 133871 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133871>

Anam, M. S., Muslykhah, U., Sadid, M. M., Noviandi, C. T., Astuti, A., Paradhipta, D. H. V., y Agus, A. 2025. Effects of microalgae supplementation on performance, egg quality, yolk fatty acid levels, and blood parameters in laying hens: A meta-analysis. Scientific Reports, Research Square, 276. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-7031163/v1>

AOAC (Association of Official Analytical Chemists). (2005). Official Methods of Analysis (18th ed.). AOAC International.

AOAC 2001.11. (2005). Protein (Crude) in Animal Feed – Dumas Combustion Method. Official Methods of Analysis of AOAC International.

AOAC 920.39. (2000). Fat (Crude) in Animal Feed and Forages (Soxhlet Method). Official Methods of Analysis of AOAC International.

AOAC 942.05. (2000). Ash of Animal Feed. Official Methods of Analysis of AOAC International.

AOAC 994.12. (2000). Amino Acids in Feeds – Ion Exchange Chromatography. Official Methods of Analysis of AOAC International.

AOAC International. (2000). Official methods of analysis (17th ed.). Method 934.01: Moisture in animal feed.
AOAC International. (2000). Official methods of analysis (17th ed.). Method 942.05: Ash in animal feed.
AOAC International. (2000). Official methods of analysis (17th ed.). Method 2001.11: Total nitrogen (Kjeldahl) and protein calculation.

APHA, AWWA, & WEF. (2017). Standard methods for the examination of water and wastewater (23rd ed.). Method 4500-H⁺ B: Electrometric determination of pH.

APHA, AWWA, & WEF. (2017). Standard methods for the examination of water and wastewater (23rd ed.). Method 2510 B: Conductivity, laboratory method.

APHA, AWWA, & WEF. (2017). Standard methods for the examination of water and wastewater (23rd ed.). Method 2540 E: Fixed and volatile solids ignited at 550 °C.

APHA, AWWA, & WEF. (2017). Standard methods for the examination of water and wastewater (23rd ed.). Method 5310 B: Total organic carbon by high-temperature combustion.

APHA, AWWA, & WEF. (2017). Standard methods for the examination of water and wastewater (23rd ed.). Method 3120 B: Metals by inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES)

APHA, AWWA, & WEF. (2017). Standard methods for the examination of water and wastewater (23rd ed.). Method 4500-P E: Ascorbic acid method for phosphorus.

APHA 10200 H: American Public Health Association (APHA). (2017). Standard methods for the examination of water and wastewater (23rd ed., Method 10200 H). APHA.

APHA 2130 B. (2017). Turbidity by Nephelometry. In Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd Edition. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.

APHA 2540 B: American Public Health Association (APHA). (2017). Standard methods for the examination of water and wastewater (23rd ed., Method 2540 B). APHA.

APHA 2540 D. (2017). Total Suspended Solids Dried at 103–105 °C. In Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd Edition.

APHA 2540 E: American Public Health Association (APHA). (2017). Standard methods for the examination of water and wastewater (23rd ed., Method 2540 E). APHA.

APHA 4500-NH₃. (2017). Nitrogen (Ammonia). In Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd Edition.

APHA 4500-NO₃. (2017). Nitrogen (Nitrate). In Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd Edition.

APHA 4500-Norg B: American Public Health Association (APHA). (2017). Standard methods for the examination of water and wastewater (23rd ed., Method 4500-Norg B). APHA.

APHA 4500-O. (2017). Oxygen (Dissolved). In Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd Edition.

APHA 5220 B: American Public Health Association (APHA). (2017). Standard methods for the examination of water and wastewater (23rd ed., Method 5220 B). APHA.

APHA 5220 D. (2017). Chemical Oxygen Demand (Closed Reflux, Colorimetric Method). In Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd Edition.

APHA 9260 B: American Public Health Association (APHA). (2017). Standard methods for the examination of water and wastewater (23rd ed., Method 9260 B).

APHA. (2017). Standard methods for the examination of water and wastewater (23rd ed.). American Public Health Association.

APHA. (2017). Standard methods for the examination of water and wastewater (23rd ed.). American Public Health Association.

Aragon-Briceño, C.I., Ross, A.B. & Camargo-Valero, M.A. Strategies for the Revalorization of Sewage Sludge in a Waste Water Treatment Plant Through the Integration of Hydrothermal Processing. *Waste Biomass Valor* 14, 105–126 (2023). <https://doi.org/10.1007/s12649-022-01856-0>

Artola, A., Font, X., Moral-Vico, J., Sánchez, A.: The role of solid-state fermentation to transform existing waste treatment plants based on composting and anaerobic digestion into modern organic waste-based biorefineries, in the framework of circular bioeconomy. *Front. Chem. Eng.* 6, 1463785 (2024). <https://doi.org/10.3389/fceng.2024.1463785>

AviNews. 2020. Los desechos del sector avícola, nueva fuente de materias primas para las industrias agrícola, cosmética o del envase. *AviNews Latinoamérica*. Recuperado el 15 de abril de 2024, de <https://www.avinews.com>

AviNews. 2021 a. Manejo del agua de bebida en la industria avícola. *AviNews Latinoamérica*. <https://avicultura.info/manejo-del-agua-en-avicultura>

AviNews. 2021 b. La huella hídrica de los alimentos, el agua detrás de la comida. *AviNews Latinoamérica*. <https://avicultura.info/huella-hidrica-alimentos>

AviNews. 2023. Crece producción de carne de pollo en promedio 3.4 % anual. *AviNews Latinoamérica*. Recuperado el 15 de abril de 2024, de <https://www.avinews.com>

Avinews. 2024. Pronóstico para 2025: Producción y exportaciones de carne de ave a nivel mundial. *aviNews*. <https://avinews.com/pronostico-para-2025-produccion-y-exportaciones-de-carne-de-ave-a-nivel-mundial/>

Axon Comunicación. 2023. *Lactobacillus plantarum* GX17 beneficia el rendimiento del crecimiento y mejora las funciones de la barrera intestinal / flora intestinal

Balboa, C y Vergara-González, L. 2021. Potencial aplicación de bacterias ácido lácticas en sistemas de tratamiento de agua. *Ecosistemas* 30(2): 2224. <https://doi.org/10.7818/ECOS.222>

Banco Mundiatl. 2023. El impacto de los residuos industriales en el medio ambiente: Un análisis global. Documentos e informes - Todos los documentos | El Banco Mundial

Bilal, M., Niu, D. & Wang, Z. Biotechnological Strategies and Perspectives for Food Waste Treatment: The Role of Lactic Acid and Microbial Biomass. *Waste Biomass Valor* 16, 547–569 (2025). <https://doi.org/10.1007/s12649-024-02705-y>

Bulkowska, K., y Zielinska, M. 2024. Thermal disintegration of waste-activated sludge. *Energies*, 17(17), 4447. <https://doi.org/10.3390/en17174447>

Cabrera-Núñez, A., Daniel-Renteria, I., Martínez-Sánchez, C., Alarcón-Pulido, S., Rojas-Ronquillo, R., y Velázquez-Jiménez, S. 2018. Aprovechamiento de subproductos avícolas como fuente proteica en la elaboración de dietas para rumiantes. *Abanico Veterinario*, 8(2), 59–67. <https://doi.org/10.21929/abavet2018.82.5>

Carvajal-Oses, M; Chacón-Guzmán, J; Herrera-Ulloa, A. Optimización en la producción de la microalga marina *Nannochloropsis oculata* en un fotobiorreactor tubular helicoidal. *Tecnología en Marcha*. Vol. 31-2. Abril-Junio 2018. 117-126. DOI: <https://doi.org/10.18845/tm.v31i2.3629>

Castro-Viteri, A. 2022. Técnicas para la biotransformación de residuos agroindustriales y disminución de sus impactos ambientales. *HIGH TECH-ENGINEERING JOURNAL*, 1(2). <https://doi.org/10.46363/high-tech.v2i1.3>

CEIT. (2025, febrero 11). CEIT impulsa la recuperación de fósforo en el proceso de depuración de aguas residuales. Recuperado de <https://www.ceit.es/noticias/-/contents/11/02/2025/ceit-impulsa-la-recuperacion-de-fosforo-en-el-proceso-de-depuracion-de-aguas-residuales>

Chang HM, Loh TC, Foo HL y Lim ETC. 2022. Lactiplantibacillus plantarum Postbiotics: Alternative of Antibiotic Growth Promoter to Ameliorate Gut Health in Broiler Chickens. *Front. Vet. Sci.* 9:883324. <https://doi.org/10.3389/fvets.2022.883324>

Cinvestav. (2021, 20 de marzo). Analizan el metabolismo de microalgas y bacterias para tratamiento de agua. Conexión Cinvestav. Recuperado de Analizan el metabolismo de microalgas y bacterias para tratamiento de agua

CNA (Consejo Nacional Agropecuario). 2022. Avicultura mexicana: una industria de altos vuelos. Recuperado de <https://cna.org.mx/avicultura-mexicana-una-industria-de-altos-vuelos/>

Coe, C., Boltz, T., Stearns, R., Foster, P., Taylor J.R.L., Moritz, J., Jaczynski, J., Freshour, A., y Shen, C.. (2022). Thermal inactivation of Salmonella Typhimurium and surrogate Enterococcus faecium in mash broiler feed in a laboratory-scale circulated thermal bath. Poultry Science, 101(8), 101234. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2022.101976>

Coelho, L.F., de Lima, C.J.B., Rodovalho, C.M., Bernardo, M.P., Contiero, J.: Lactic acid production by new *Lactobacillus plantarum* LMISM6 grown in molasses: Optimization of medium composition. Braz. J. Chem. Eng. 28, 27–36 (2011). <https://doi.org/10.1590/S0104-66322011000100004>

Contexto Ganadero. (2023, marzo 21). Las propiedades de la harina de plumas en la alimentación animal. Recuperado de <https://www.contextoganadero.com/ganaderia-sostenible/las-propiedades-de-la-harina-de-plumas-en-la-alimentacion-animal>

Darmastuti, A., Hasan, P. N., Wikandari, R., Utami, T., Rahayu, E. S., & Suroto, D. A. (2021). Adhesion properties of *lactobacillus plantarum* dad-13 and *lactobacillus plantarum* mut-7 on sprague dawley rat intestine. Microorganisms, 9(11). <https://doi.org/10.3390/microorganisms9112336>

Derabli, B., Nancib, A., Nancib, N., y Aníbal, J. (2021). Opuntia ficus indica waste as a cost effective carbon source for lactic acid production by *Lactobacillus plantarum*. Food Chemistry, 370(1), 131005. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131005>

Derabli, B., Nancib, A., Nancib, N., Aníbal, J., Raposo, S., Rodrigues, B., y Boudrant J. (2022). Opuntia ficus indica waste as a cost effective carbon source for lactic acid production by *Lactobacillus plantarum*. Food Chemistry, 370(1), 131005. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131005>

Díaz, L., y de la Cruz, M. 2021. Los desechos del sector avícola, nueva fuente de materias primas para las industrias agrícola, cosmética o del envase. aviNews. <https://avinews.com/los-desechos-del-sector-avicola-nueva-fuente-de-materias-primas/>

Diez-Gutiérrez, L., Vicente, L.S., Sáenz, J. Esquivel, A., Barron L.J.R., y Chávarri, M. 2022. Biosynthesis of gamma-aminobutyric acid by *Lactiplantibacillus plantarum* K16 as an alternative to revalue agri-food by-products. Sci Rep 12, 18904 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-22875-w>

El Sitio Avícola. 2024. Pronósticos de la avicultura mexicana 2024–2025. El Sitio Avícola. <https://www.elsitioavicola.com/articles/3176/pronosticos-de-la-avicultura-mexicana-2024-2025/elsitioavicola.com>

El Sitio Porcino. 2023. Producción de carne de cerdo, pollo y res a nivel global. El Sitio Porcino. <https://www.elsitioporcino.com/articles/produccion-de-carne-de-cerdo-pollo-y-res-a-nivel-global/>

El-Araby, N., Shalaby, S., y El-Dakar, A. Y. 2022. The growth and biochemical composition of *Nannochloropsis oculata* under influence of different nitrogen sources for aquaculture live food. Egyptian Journal of Aquatic Biology y Fisheries, 26(2), 459–475. <https://doi.org/10.21608/ejabf.2022.231584>

Elnesr, S. S., Alagawany, M., Farag, M. R., Tiwari, R., Karthik, K., y Dhama, K. (2020). Nutritional significance of amino acids, vitamins and minerals as nutraceuticals in poultry production and health – A comprehensive review. Veterinary Quarterly, 40(1), 1–25. <https://doi.org/10.1080/01652176.2020.1857887>

Emam. K. R. S., Safaa A. M., Ali, A. S., Morsy, Wafaa A., Fouda., Ahmed Elbaz, M. 2024. Role of *Nannochloropsis Oculata* supplement in improving performance, antioxidant status, blood metabolites, and egg quality of laying hens under hot environmental conditions. Springer Science and Business Media LLC, 19, 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-66595-9>

Ence. 2025. Ence cierra con BBVA un préstamo de 19 millones para su primera planta de biometano en España. Cinco Días. Ence cierra con BBVA la financiación de La Galera bajo el modelo de project finance | Ence

Estrada-García, J., Romero-Mota, D.I., Ángel Huerta-Pérez, G., Aguilar-Lasserre, A.A., Méndez-Contreras, J.M.: Predicting the production of probiotic biomass and lactic acid via fuzzy logic during the anaerobic treatment of swine waste (*Sus domestica*) with *Lactobacillus acidophilus*. J. Environ. Eng. 150(1), 04023093 (2024). <https://doi.org/10.1061/JOEEDU.EEENG-7497>

Estrada-García, L. G., Espinoza-Rodríguez, R., López-Gutiérrez, J. C., Castro-Rosas, J., Gómez-Aldapa, C. A., y Rangel-Vargas, E. (2024). Potential probiotic characteristics and antibacterial activity of *Limosilactobacillus fermentum* strains isolated from traditional Mexican fermented beverages. Archives of Microbiology, 206(1), 145. <https://doi.org/10.1007/s00203-023-03768-z>

Estrada-García, J., Hernández-Aguilar, E., Romero-Mota, D.I., y Méndez-Contreras, J.M. (2023). Influence of anaerobic biotransformation process of agro-industrial waste with *Lactobacillus acidophilus* on the rheological parameters: case of study of pig manure. Arch Microbiol, 205, 99. <https://doi.org/10.1007/s00203-023-03437-8>

Estrada-García, J., Hernández-Aguilar, E., Romero-Mota, D.I., Méndez-Contreras, J.M.: Influence of anaerobic biotransformation process of agro-industrial waste with *Lactobacillus acidophilus* on the rheological parameters: case study of pig manure. Arch. Microbiol. 205, 99 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00203-023-03437-8>

Fajardo-Argoti, C., Jurado-Gámez, H., y Parra-Suescún, J. 2021. Viabilidad de *Lactobacillus plantarum* microencapsulado bajo condiciones gastrointestinales simuladas e inhibición sobre *Escherichia coli* O157:H7. Revista U.D.C.A Actualidad y Divulgación Científica, 24(1), 1–9. <https://doi.org/10.31910/rudca.v24.n1.2021.1733> UDCA Repository+1revistas.udca.edu.co+1

Fajardo-Argoti, C.; Jurado-Gámez, H.; Parra-Suescún, J. 2021. Viabilidad de *Lactobacillus plantarum* microencapsulado bajo condiciones gastrointestinales simuladas e inhibición sobre *Escherichia coli* O157:H7. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 24(1):e1733. <http://doi.org/10.31910/rudca.v24.n1.2021.1733>

FAO (1998). Manual on the production and use of live food for aquaculture. FAO Fisheries Technical Paper No. 361. Incluye métodos espectrofotométricos para microalgas.

FAO (2009). Technical manual on microalgae production. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Sección de conteo celular y cultivo.

FAO. (s.f.). Los procesos de fermentación del ensilaje y su manipulación. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/4/x8486s/x8486s04.htm>

FAO/WHO. (2006). Probiotics in food: Health and nutritional properties and guidelines for evaluation (FAO Food and Nutrition Paper No. 85). Food and Agriculture Organization of the United Nations & World Health Organization. <https://www.fao.org/3/a0512e/a0512e.pdf>

Fidanza, M., Panigrahi, P., y Kollmann, T.R.: *Lactiplantibacillus plantarum*—nomad and ideal probiotic. Front. Microbiol. 12, 712236 (2021). <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.712236>

Flores-Asis, R., Méndez-Contreras, J. M., Alvarado-Lassman, A., Fernández-Lambert, G., Villanueva-Vásquez, D., & Aguilar-Lasserre, A. A. (2019). Analysis of the behavior for operation parameters in the anaerobic digestion process with thermal pretreatment, using fuzzy logic. Journal of Environmental Science and Health, Part A, 54(6), 592–602. <https://doi.org/10.1080/10934529.2019.1593010>

Flores-Luna, L. P. y Chávez-Inca. 2024. Efectos ambientales de los residuos avícolas en una comunidad. *Revista Científica Multidisciplinaria InvestiGo*, 9(5). <https://doi.org/10.56519/n3km4288>

Foro Económico Mundial. 2024. Convertir los residuos de biomasa en combustible podría ayudar a restablecer el balance de carbono | Foro Económico Mundial

Georganas, A., Giamouri, E., Pappas, A. C., Zoidis, E., Goliomytis, M., y Simitzis, P. 2023. Utilization of Agro-Industrial By-Products for Sustainable Poultry Production. *Sustainability*, 15(4), 3679. <https://doi.org/10.3390/su15043679>

González-Sánchez M. E., Pérez-Fabiel, S., Wong-Villarreal, A., Bello-Mendoza, R. y Yañez-Ocampo, G. 2015. Residuos agroindustriales con potencial para la producción de metano mediante la digestión anaerobia. *Revista Argentina de Microbiología*, 47(4), 302-310. 0.1016/j.ram.2015.05.003

Gracia, R. O. S. A. 2022. Calidad ambiental desde el aprovechamiento de residuos orgánicos como estrategia educativa - Dialnet. *Revista del Grupo de Investigaciones en Comunidad y Salud*, 7(4), 10-26.

Guerrero-Villegas, W. M., Gallegos-Varela, M. C., Rosero-Rosero, P. M., y Pinargote-Yépez, L. M. 2024. Economía circular en contextos locales: Caso Ecuador. *Revista Direito GV*, 16(1), 197–220. <https://doi.org/10.1590/2317-6172202430>

Habchi, S., Lahboubi, N. & El Bari, H. 2024. Valorization of Moroccan Poultry Slaughterhouse Waste Using Anaerobic Digestion: Kinetic Study. *Waste Biomass Valor* 15, 4419–4431. <https://doi.org/10.1007/s12649-024-02450-2>

Haokok, C., Chularat, S. (2023). Efficient production of lactic acid from cellulose and xylan in sugarcane bagasse by newly isolated *Lactiplantibacillus plantarum* TSKKU P-8 and *Levilactobacillus brevis* through simultaneous saccharification and co-fermentation. *Heliyon*, 9(7), e17935. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17935>

Haokok, C., Lunprom, S., Reungsang, A., y Salakkam, A. (2023). Efficient production of lactic acid from cellulose and xylan in sugarcane bagasse by newly isolated *Lactiplantibacillus plantarum* TSKKU P-8 and *Levilactobacillus brevis* through simultaneous saccharification and co-fermentation. *Heliyon*, 9(7), e17935. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17935>

Hoque, M., y Devi, K.T.R. (2025). Agro-industrial waste management: solid-state fermentation for biomass conversion and valorisation to value-added products. *Syst Microbiol and Biomanuf* 5, 990–999. <https://doi.org/10.1007/s43393-025-00371-2>

HRS Heat Exchangers. 2023. Los beneficios del tratamiento anaeróbico en aguas residuales. HRS Heat Exchangers. Recuperado de <https://www.hrs-heatexchangers.com>

HSA, (Humane Slaughter Association). (2016). Corte efectivo del cuello de aves de corral [Póster técnico]. Humane Slaughter Association. <https://www.hsa.org.uk/downloads/hsatechinfoposterneckcutpoultryspanishamend.pdf>

Hwang, C.-F., Chang, J.-H., Hwang, J.-Y., Tsai, C.-C., Lin, C.-K., Tsen, H.-Y.: Optimization of medium composition for improving biomass production of *Lactobacillus plantarum* Pi06 using the Taguchi array design and the Box–Behnken method. Biotechnol. Bioprocess Eng. 17, 827–834 (2012). <https://doi.org/10.1007/s12257-012-0007-4>

IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 2020. La eutrofización de cuerpos de agua: un síntoma antropogénico que requiere atención. Recuperado de <https://www.imta.gob.mx>

Insuasti C., G., Pilamunga C., C., Gallegos Núñez, J. M., y Pacurucu Reyes, A. R. 2022. Evidencia de la actividad antifúngica y antimicrobiana de bacterias ácido lácticas en diversos sustratos fermentados para uso alimenticio. Revista Polo del Conocimiento, 8(2), 1–10. <https://doi.org/10.23857/pc.v8i2.5254>

Isaza Santos, I. I., y González, F. 2021. Comparación de dos sistemas de tratamiento anaeróbicos de aguas residuales de características homogéneas para escuelas sin sistema de tratamiento. Centros Revista Científica Universitaria, 10(1), 1-14. <https://doi.org/10.48204/j.centros.v10n1a4>

Jagadeesan, M., Anvar, A.A.S., Rajendran, R., Sathishkumar, M.: Greener and sustainable biovalorization of poultry waste into peptone via bacto-enzymatic digestion. Waste Biomass Valor. 13, 3197–3219 (2022). <https://doi.org/10.1007/s12649-022-01713-0>

Jiang, Y., Xiao, L., Liu, J., Chen, Y., Deng, X., Duan, P., Yang, X., Li, J. 2024. Responses of soil nitrogen and carbon mineralization rates to fertilization and crop rotation. Journal Soils Sediments 24, 1289–1301 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11368-023-03694-6>

Karekezi, J., Kim, H., Dusabimana, T., Nugroho, T. A., Ndahigwa, E. N., So, Y. J., Kim, J., Kim, T.-R., Sohn, M., Miao, J., Moon, Y., & Park, S. W. (2025). Lactiplantibacillus plantarum LM1001 Supplementation Attenuates Muscle Atrophy and Function Decline in Aged Mice. Nutrients, 17(19), 3156. <https://doi.org/10.3390/nu17193156>

Korver, D., y Stewart-Brown, B. (Ed.). Nutritional Requirements of Poultry: In Merck Veterinary Manual. Merck & Co., Inc. (2024). Retrieved from <https://www.merckvetmanual.com/poultry/nutrition-and-management-poultry/nutritional-requirements-of-poultry>

Korver, D., y Stewart-Brown, B. (2023). Nutritional Requirements of Poultry. In Merck Veterinary Manual. Recuperado de <https://www.merckvetmanual.com/poultry/nutrition-and-management-poultry/nutritional-requirements-of-poultry>

La Ciencia en Corto. 2021. La producción avícola y sus aguas de desecho. Recuperado de <https://www.lacienciaencorto.com>

Lian, T., Zhang, W., Cao, Q., Wang, S., Yin, F., Zhou, T., Zhang, F., Dong, H.: Efficient production of lactic acid from anaerobic co-fermentation of starch and nitrogen-rich agro-industrial waste using a batch system. Chem. Eng. J. 471, 144689 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144689>

Liu, L., Li, L., Li, C., Wang, H., Zhang, X., Ren, Q., Zhang, H., Jin, N., Li, C., & Zhao, C. (2023). Effects of *Lactiplantibacillus plantarum* LPJZ-658 Supplementation on the Production, Meat Quality, Intestinal Morphology, and Cecal Microbiota of Broilers Chickens. Microorganisms, 11(6), 1549. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11061549>

Loo, J. S., Oslan, S. N. H., Mokshin, N. A. S., Othman, R., Amin, Z., Dejtisakdi, W., Prihanto, A. A., y Tan, J. S. (2025). Comprehensive Review of Strategies for Lactic Acid Bacteria Production and Metabolite Enhancement in Probiotic Cultures: Multifunctional Applications in Functional Foods. Fermentation, 11(5), 241. <https://doi.org/10.3390/fermentation11050241>

López-Velarde M. S., Rodríguez Morales, J. A., y Mendoza Burguete, Y. 2024. Producción de biogás a partir de residuos orgánicos, una alternativa sustentable para el desarrollo ambiental. Revista Universidad y Sociedad, 16(1), 68–75. Recuperado de <https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus/article/view/4814>

Manzoni Maroneze, M., Montenegro Herrera, C. A., y Martínez Jiménez, A. (2021). Perspectivas sobre los sistemas de cultivo de microalgas: una revisión crítica. BioTecnología, 25(5), 11-20. Manzoni-Maroneze-et-al.-2021.pdf

Manzoor, A., Qazi, J.I., Haq, I.U., Mukhtar, H., Rasool, A.: Significantly enhanced biomass production of a novel bio-therapeutic strain *Lactobacillus plantarum* (AS-14) by developing low-cost media cultivation strategy. J. Biol. Eng. 11, 17 (2017). <https://doi.org/10.1186/s13036-017-0059-2>

Mavrommatis, A., Tsiplakou, E., Zerva, A., Pantiora, P. D., Georgakis, N. D., Tsintzou, G. P., Madesis, P., y Labrou, N. E. (2023). Microalgae as a Sustainable Source of Antioxidants in Animal Nutrition, Health and Livestock Development. *Antioxidants*, 12(10), 1882. <https://doi.org/10.3390/antiox12101882>

Mechmeche, M., Kachouri, F., Yaghlane, H.B., Ksontini, H., Setti, K., Hamdi, M.: Kinetic analysis and mathematical modeling of growth parameters of *Lactobacillus plantarum* in protein-rich isolates from tomato seed. *Food Sci. Technol. Int.* 23(2), 128-141 (2017). <https://doi.org/10.1177/1082013216665706>

Méda, B., Belloir, P., Lambert, W., Narcy, A., y Wilfart, A. 2020. Improving environmental sustainability of poultry production using innovative feeding strategies. *Hal science*, 101(2), 102004. <https://hal.science/hal-02265512v1>

Meléndez Aldana, M. A. (2023, 13 de octubre). Jalisco, productor estratégico de huevo. UAG Media Hub. Recuperado de <https://www.uag.mx/es/mediahub/jalisco-productor-estrategico-de-huevo>

Méndez-Contreras, J.M., Atenodoro-Alonso, J., López-Escobar, L.A. et al. Enhanced Biogas Production from Thermophilic Anaerobic Digestion of Poultry Slaughterhouse Sludge: Effect of Thermal Pretreatment and Micronutrients Supplementation. *Waste Biomass Valor* 15, 2201–2214 (2024). <https://doi.org/10.1007/s12649-023-02277-3>

Merck Veterinary Manual. (2023). Poultry Nutrition. Merck & Co., Inc. Recuperado de <https://www.merckvetmanual.com/poultry/nutrition-and-management-of-poultry/poultry-nutrition>

Método Petrifilm 3M para bacterias ácido lácticas: 3M. (2013). Petrifilm Lactic Acid Bacteria Count Plate for the enumeration of lactic acid bacteria. 3M.

Método Petrifilm 3M para bacterias aerobias: 3M. (2013). Petrifilm Aerobic Count Plate for the enumeration of aerobic bacteria. 3M.

Método Petrifilm 3M para bacterias anaerobias: 3M. (2013). Petrifilm Anaerobic Count Plate for the enumeration of anaerobic bacteria. 3M.

Método Petrifilm 3M para hongos y levaduras: 3M. 2013. Petrifilm Yeast and Mold Count Plate for the enumeration of yeast and mold. 3M.

Metodología de Dubois (1956): Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A., & Smith, F. 1956. Colorimetric method for the determination of sugars and related

substances. Analytical Chemistry, 28(3), 350-356.
<https://doi.org/10.1021/ac60111a017>

Micoalga-Feed. 2024. Actividades del proyecto Micoalga-Feed. Recuperado de <https://www.micoalga-feed.com/actividades>

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. 2022. Impacto de la eutrofización en el uso y calidad de las aguas. Recuperado de <https://www.miteco.gob.es>

Mirsalami, S.M., y Mirsalami, M. (2024). Leveraging *Lactobacillus plantarum* probiotics to mitigate diarrhea and Salmonella infections in broiler chickens. AMB Expr, 14, 137. <https://doi.org/10.1186/s13568-024-01792-3>

Moscoso, W. E. 2021. Evaluación de la eficiencia del tratamiento de aguas residuales provenientes de un matadero avícola con la tecnología de los vermifiltros. Tesis de licenciatura, Universidad Científica del Sur. <https://doi.org/10.21142/tl.2022.2534>

Nanta. 2024. ¿Qué cantidad de agua necesitan beber tus gallinas? Recuperado de <https://www.nanta.es>

National Research Council. Nutrient Requirements of Poultry: Ninth Revised Edition. National Academies Press (1994). <https://doi.org/10.17226/2114>

NMX-AA-008-SCFI-2016. Análisis de agua – Medición de pH en agua – Método de prueba. Secretaría de Economía, México.

NMX-AA-012-SCFI-2001. Análisis de agua – Determinación de oxígeno disuelto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba. Secretaría de Economía.

NMX-AA-026-1982. Análisis de agua – Determinación de nitratos en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas – Método espectrofotométrico. Dirección General de Normas, México.

NMX-AA-030-SCFI-2013. Análisis de agua – Determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba. Secretaría de Economía, México.

NMX-AA-093-SCFI-2000. Análisis de agua – Medición de la conductividad eléctrica – Método de prueba. Secretaría de Economía.

NMX-F-425-NORMEX-2005. Alimentos – Determinación de grasa cruda – Método Soxhlet. NORMEX, México.

NMX-F-608-NORMEX-2002. Alimentos para animales – Determinación de proteína cruda – Método de prueba. NORMEX, México.

NOM-001-SEMARNAT-2021: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2021). NOM-001-SEMARNAT-2021. Norma oficial mexicana. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales tratadas en cuerpos receptores. SEMARNAT.

NOM-021-SEMARNAT-2000. (2002). Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudio, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación, 31 de diciembre de 2002.

NOM-112-SSA1-1994. (1995). Bienes y servicios. Determinación de bacterias coliformes totales en placa por el método del número más probable (NMP). Diario Oficial de la Federación, 18 de agosto de 1995.

NOM-112-SSA1-1994: Secretaría de Salud (SSA). (1994). NOM-112-SSA1-1994. Norma oficial mexicana. De los métodos para la determinación de la calidad microbiológica del agua. SSA.

NOM-113-SSA1-2009: Secretaría de Salud (SSA). (2009). NOM-113-SSA1-2009. Norma oficial mexicana. De la calidad sanitaria del agua para uso y consumo humano. SSA.

NOM-117-SSA1-1994. Bienes y servicios. Determinación de cadmio, arsénico, plomo y mercurio en alimentos, agua potable y agua purificada por espectrofotometría de absorción atómica. Secretaría de Salud, México.

NOM-129-SSA1-1995. Bienes y servicios. Alimentos para humanos y animales. Determinación de contaminantes químicos y microbiológicos. Métodos de prueba. Secretaría de Salud, México.

NOM-210-SSA1-2014. (2015). Productos y servicios. Métodos para la detección de *Salmonella* spp. en productos alimenticios. Diario Oficial de la Federación, 26 de enero de 2015.

NOM-210-SSA1-2014: Secretaría de Salud (SSA). (2014). NOM-210-SSA1-2014. Norma oficial mexicana. De los métodos para la cuantificación de contaminantes en agua para uso y consumo humano. SSA.

OMS (Organización Mundial de la Salud). 2023. Prevención y control de riesgos microbiológicos en frutas y hortalizas frescas. <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/366179/9789240067677-eng.pdf>

Osorio-Urtecho, K. del R., Palacios-Sánchez, K. M., Lumbi-Ortega, D. M., Hsieh, P. Y., Zuniga-Gonzalez, C. A., y Aguilar, A. J. (2020). Capacidad reproductiva de *Nannochloropsis oculata* en diferentes concentraciones de salinidad y fertilizante: Una contribución a la Bioeconomía acuícola. *Revista Iberoamericana De bioeconomía Y Cambio climático*, 6(12), 1440–1455. <https://doi.org/10.5377/ribcc.v6i12.9977>

Pan, X., Deng, T., Li, L., Yang, L., Gao, M., Yan, Y., Peng, M., Yang, J., Liu, S., Ge, L., Yang, X.: The effects of different inoculation amount of *Lactobacillus plantarum* on antioxidant capacity, chemical composition and sensory quality of *Rosa roxburghii* Tratt fruit pomace ensiled. *Waste Biomass Valor.* 15, 7009–7015 (2024). <https://doi.org/10.1007/s12649-024-02558-5>

Peng, Q., Zeng, X.F., Zhu, J.L., Wang, S., Liu, X.T., Hou, C.L., Thacker, P.A., y Qiao, S.Y. (2016). Effects of dietary *Lactobacillus plantarum* B1 on growth performance, intestinal microbiota, and short chain fatty acid profiles in broiler chickens. *Poultry Science*, 95(4), 893-900. <https://doi.org/10.3382/ps/pev435>

Pratap, V., Kumar, S., y Ram Yadav, B. (2024). Sewage sludge management and enhanced energy recovery using anaerobic digestion: An insight. *Water Sci Technol*, 90(3), 696–720. <https://doi.org/10.2166/wst.2024.269>

Prates, J. A. M. 2025. The role of microalgae in providing essential minerals for sustainable swine nutrition. *Frontiers in Animal Nutrition*, 6, 1526433. <https://doi.org/10.3389/fanim.2025.1526433>

Protocolo Guillard (1975): Guillard, R. R. L. (1975). Culture of phytoplankton for feeding marine invertebrates. In W. L. Smith & M. H. Chanley (Eds.), *Culture of marine invertebrate animals* (pp. 29-60). Plenum Press.

Quinapanta-Pérez, G. E., Chango, A., Vásquez-Quishpe, E. T. 2023. Microalgas como sustituto de proteínas de origen animal. *MEDI*, 5(1), 1–12. <https://doi.org/10.31243/mdc.uta.v5i4.1.1172.2021>

Rezgui, R., Walia, R., Sharma, J., Sidhu, D., Alshagadali, K., Ray Chaudhuri, S., Saeed, A., y Dey, P. 2023. Chemically defined *Lactobacillus plantarum* cell-free metabolites demonstrate cytoprotection in HepG2 cells through Nrf2-dependent mechanism. *Antioxidants*, 12(4), 930. <https://doi.org/10.3390/antiox12040930MDPI>

Rodríguez Parrondo, J., & Pérez Rivero, C. (2025, 23 febrero). Maquinaria y materiales más respetuosos con el medio ambiente. El País. <https://elpais.com/extra/infraestructuras/2025-02-23/maquinaria-y-materiales-mas-respetuosos-con-el-medio-ambiente.html>

Rodríguez-Rivera, V., Estrada-García, J., Sales-Pérez, R.E., Hernández-Martínez, J.M., Méndez-Contreras, J.M.: Valorization of Agro-industrial Waste to Produce a Probiotic-bio-stimulant Through the Anaerobic Co-fermentation Process With *Lactobacillus Casei*: a Circular Economy Approach in Vulnerable Communities of Mexico. *Water Air Soil Pollut.* 236, 925 (2025). <https://doi.org/10.1007/s11270-025-08587-7>

Romero-Mota, D.I., Estrada-García, J., Sales-Pérez, R.E., Méndez-Contreras, J.M.: Valorization of bovine manure and molasses by the production of lactic acid and biomass through probiotic anaerobic cofermentation with *Lactobacillus acidophilus*, *Lactobacillus fermentum*, and *Bacillus subtilis*. *J. Environ. Eng.* 150(2), 04023100 (2023). <https://doi.org/10.1061/JOEEDU.EEENG-7542>

Rosas-Martínez, V., y Aguilar-Rivera, N. 2022. Composting for the reduction of bird droppings (*Gallus gallus domesticus*). *Agronomía Mesoamericana*, 33(1). <https://orcid.org/0000-0002-7833-6749>.

Sachdeva, A., Tomar, T., Malik, T., Bains, A., Karnwal, A.: Exploring probiotics as a sustainable alternative to antimicrobial growth promoters: mechanisms and benefits in animal health. *Front. Sustain. Food Syst.* 8, 1523678 (2025). <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1523678>

SADER (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural). 2023. Contribuye industria avícola al crecimiento económico y la seguridad alimentaria del país. Recuperado de <https://www.sader.gob.mx>

SAGARPA. (2024). El futuro de la avicultura en México: Tendencias y perspectivas. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Recuperado de <https://www.sagarpa.gob.mx>

Sakar, S., Yetilmezsoy, K., y Kocak, E. (2009). Anaerobic digestion technology in poultry and livestock waste treatment — A literature review. *Waste Management & Research*, 27(1), 3–18. <https://doi.org/10.1177/0734242X07079060>

Salem, M. A. E.-K., Adawy, R. S., Zaki, V. H., y Zahran, E. (2022). *Nannochloropsis oculata* supplementation improves growth, immune response, intestinal integrity, and

disease resistance of Nile Tilapia. *Journal of Aquatic Animal Health*, 34(4), 184-196. <https://doi.org/10.1002/aah.10170>

Sales-Pérez, R. E., Sales-Chávez, R. M., Romero-Mota, D. I., Estrada-García, J., & Méndez-Contreras, J. M. (2023). Removal of organic matter during adaptation of *Nannochloropsis oculata* in livestock waste. *Renewable Energy, Biomass & Sustainability*, 5(2), 32–39. <https://doi.org/10.56845/rebs.v5i2.93>

SALUD. (1995). NOM-112-SSA1-1994. Bienes y servicios. Determinación de bacterias coliformes totales en placa por el método del número más probable (NMP). *Diario Oficial de la Federación*, 18 de agosto de 1995.

SALUD. (2015). NOM-210-SSA1-2014. Productos y servicios. Métodos para la detección de *Salmonella* spp. en productos alimenticios. *Diario Oficial de la Federación*, 26 de enero de 2015.

Secretaría de Economía. (2024). Trabajadores en la Cría Avícola: Salarios, diversidad, industrias e informalidad. Recuperado de <https://www.economia.gob.mx>

Secretaría de Salud. (1994). NOM-111-SSA1-1994. Bienes y servicios. Método para la cuenta de mohos y levaduras en alimentos. *Diario Oficial de la Federación (México)*.

Secretaría de Salud. (1994). NOM-117-SSA1-1994. Bienes y servicios. Determinación de cadmio, arsénico, plomo, estaño, cobre, hierro, zinc y mercurio en alimentos, agua potable y agua purificada por espectrometría de absorción atómica. Especificaciones sanitarias. *Diario Oficial de la Federación (México)*.

Secretaría de Salud. (2014). NOM-210-SSA1-2014. Productos y servicios. Métodos para la determinación microbiológica. *Diario Oficial de la Federación (México)*.

SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2020. Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos. Recuperado de <https://www.semarnat.gob.mx>

SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2022. Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos de Manejo Especial 2022–2024. *Diario Oficial de la Federación*. Recuperado de <https://sidof.segob.gob.mx/notas/docFuente/5673815>

SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2024. Informe sobre la producción y manejo de residuos en México. Recuperado de <https://www.semarnat.gob.mx>

SEMARNAT. (2002a). NOM-004-SEMARNAT-2002. Protección ambiental—Lodos y biosólidos—Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Diario Oficial de la Federación, 15 de agosto de 2003.

SEMARNAT. (2002b). NOM-021-SEMARNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudio, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación, 31 de diciembre de 2002.

SEMARNAT. (2021). NOM-001-SEMARNAT-2021. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. Diario Oficial de la Federación, 11 de marzo de 2022.

SENASICA. Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA). (2014). Manual de inspección sanitaria en establecimientos TIF para el sacrificio de aves (Documento oficial). Gobierno de México. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/118403/4.ManualdeInsp.SandeSacrificiodeAves.pdf>

Sharma, V., Mishra, H.N.: Unstructured kinetic modeling of growth and lactic acid production by *Lactobacillus plantarum* NCDC 414 during fermentation of vegetable juices. LWT – Food Sci. Technol. 59(2), 1123–1128 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.05.039>

SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2025). Proyección de la producción pecuaria en México para 2024. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Recuperado de <https://www.gob.mx/siap>

SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2023 b. Producción pecuaria en México 2022. Gobierno de México. Recuperado de <https://www.gob.mx/siap>

SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2023. Producción pecuaria en México: Datos 2022. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Recuperado de <https://www.gob.mx/siap>

SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2024 b. Producción de carne de ave en México. Gobierno de México. Recuperado de <https://www.gob.mx/siap/articulos/produccion-de-carne-de-ave-en-mexico-2024>

SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2024. Producción pecuaria en México 2023. Gobierno de México. Recuperado de <https://www.gob.mx/siap>

SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2025. Proyecciones de producción pecuaria 2024. Gobierno de México. Recuperado de <https://www.gob.mx/siap>

Siu, P. 2024, 3 de enero. Convertir los residuos de biomasa en combustible podría ayudar a restablecer el balance de carbono. Foro Económico Mundial. Recuperado de <https://es.weforum.org/agenda/2024/01/convertir-residuos-biomasa-combustible-balance-carbono>

Song, C., Bi, B., Ma, C., Shi, J., Meng, Q., Li, J., Zhang, S., Li, J. y Shan, A. 2025. Lactic acid bacteria mechanism of protein degradation in anaerobic co-fermentation of cabbage waste with wheat bran. Chemical Engineering Journal. 481, 155591 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.160738>

Sousa, S., Freitas, A.C., Gomes, A.M. et al. Modulated stress to balance *Nannochloropsis oculata* growth and eicosapentaenoic acid production. Appl Microbiol Biotechnol 106, 4017–4027 (2022 a). <https://doi.org/10.1007/s00253-022-11968-1>

Sousa, S. C., Machado, M., Freitas, A. C., Gomes, A. M., Carvalho, A. P., y Concas, A. 2022 b. Can growth of *Nannochloropsis oculata* under modulated stress enhance its lipid-associated biological properties? Marine Drugs, 20(12), 737. <https://doi.org/10.3390/md20120737>

Souza, C. M. M., Bastos, T. S., y dos Santos, M. C. (2021). Microalgae use in animal nutrition. Research, Society and Development, 10(16), e53101622986. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i16.22986>

Tan, M., Yan, X., Ramaswamy, H., Wang, C. (2024). Mapping biosynthesis pathway of natural folate during *Lactiplantibacillus plantarum* subsp. *plantarum* fermentation in purple cabbage by transcriptomic analysis. J. Sci. Food Agric. 105(5), 2854-2866. <https://doi.org/10.1002/jsfa.14053>

Tchobanoglous, G., Burton, F. L., Stensel, H. D., Tsuchihashi, R., y Burton, A. 2021. Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery (5th ed.). McGraw-Hill Education.

Team B. (2024, 13 septiembre). Sistemas aerobios y anaerobios en el tratamiento de aguas residuales. <https://teamb.com.mx/2024/09/13/sistemas-aerobios-y-anaerobios-en-el-tratamiento-de-aguas-residuales/>

Torres Cedeño, M. J., Zambrano Cevallos, M. E., y Robalino Briones, C. A. (2024). Probióticos, su efecto en el tracto intestinal de pollos de engorde. *Revista Alfa*, 8(24), 737–746. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v8i24.299>

Torres-Tiji, Y., Fields, F. J., y Mayfield, S. P. 2020. Microalgae as a future food source: Nutritional benefits and biotechnological advances. *Frontiers in Nutrition*, 41, 107536. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2020.107536>

UAG (Universidad Autónoma de Guadalajara). (2023). Jalisco, productor estratégico de huevo. Recuperado de <https://www.uag.mx/es/mediahub/jalisco-productor-estrategico-de-huevo/2023-10>

Umaña Venegas, J. (2019, 11 de septiembre). Es factible producir microalgas para alimento animal y a la vez ayudar al ambiente. Hoy en el TEC. Tecnológico de Costa Rica. <https://www.tec.ac.cr/hoyeneltec/2019/09/11/factible-producir-microalgas-alimento-animal-vez-ayudar-ambiente/>

UNA (Unión Nacional de Avicultores). (2023). Avicultura mexicana: una industria de altos vuelos. Recuperado de <https://una.org.mx/avicultura-mexicana-una-industria-de-altos-vuelos>

Urbe Economía. 2023. Genera sector avícola 1.3 millones de empleos directos e indirectos. Urbe Económica. Recuperado de <https://www.urbeconomica.com.mx/sectores-economicos/agropecuario/39141-genera-sector-avicola-1-3-millones-de-empleos-directos-e-indirectos>

USDA (United States Department of Agriculture). (2023). Livestock and poultry: World markets and trade, 2022 report. USDA Foreign Agricultural Service. Recuperado de <https://www.fas.usda.gov/data/livestock-and-poultry-world-markets-and-trade-2022>

USDA (United States Department of Agriculture). (2024). Livestock and poultry: World markets and trade, 2023 report. USDA Foreign Agricultural Service. Recuperado de <https://www.fas.usda.gov/data/livestock-and-poultry-world-markets-and-trade-2023>

USDA (United States Department of Agriculture). (2025). Projections for global meat production in 2024. USDA Foreign Agricultural Service. Recuperado de <https://www.fas.usda.gov/data/projections-global-meat-production-2024>

Vaishnav, S., Saini, T., Chauhan, A., Kumar, G., Tiwari, R., Dutt, Triveni., y Tarafdar, A. 2023. Review: Livestock and poultry farm wastewater treatment and its valorization for generating value-added products: Recent updates and way forward. *Bioresource Technology*, 382. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129170>

Vásquez G., F. J. y Morales A., E. D. (2022). Uso de biomasa algal en la elaboración de balanceados para nutrición animal. *La Técnica*, 27, 107-120. https://doi.org/10.33936/la_tecnica.v0i27.4814

Vázquez-Martínez, D.L., Henkel-García, J.L., Legorreta-García, F., Barrientos-Hernández, F.R., y Urbano-Reyes, G. (2021). Extracción de calcio en solución a partir de cáscara de huevo. *Revista de la Academia. Topics de la investigación en Ciencias de la Tierra y Materiales*, 8(8), 42-46. Recuperado de <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/aactm/article/view/7578>
[repository.uaeh.edu.mx+1repository.uaeh.edu.mx+1](https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/aactm/article/view/7578)

Villanueva-Galindo, E., Pérez-Rangel, M., Moreno-Andrade, I.: Lactic acid production from different sources of organic solid waste: evaluation of the inoculum type and operational optimization. *Biomass Conv. Bioref.* 15, 7707–7718 (2025). <https://doi.org/10.1007/s13399-024-05563-9>

Wan-Razali, W. A., Evans, C. A y Pandhal, J. (2022) Comparative Proteomics Reveals Evidence of Enhanced EPA Trafficking in a Mutant Strain of *Nannochloropsis oculata*. *Front. Bioeng. Biotechnol.* 10:838445. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.838445>

Wang, Y., Cheng, B., Jia, Y., Qi, Y., Li, H., Zhang, Q., y Wang, H. (2024). Fate of antibiotic resistance genes during sludge anaerobic fermentation: Roles of different sludge pretreatment. *Environmental Research*, 263(Pt 2), 120139. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.120139>

WATT Global Media. 2024. Ahorro de agua en el procesamiento avícola. Recuperado de <https://www.wattagnet.com/broilers-turkeys/article/15512997/ahorro-de-agua-en-el-procesamiento-avicolawattagnet.com>

Wu, Y., You, Y., Wu, L., Du, M., Ibrahim, A., Suo, H., Zhang, F., y Zheng, J. 2025. Integrated metagenomics and metatranscriptomics analyses reveal the effects of *Lactobacillus plantarum* strains on microbial communities and metabolic profiles in pickled bamboo shoots. *Food Research International*, 162, 141772. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141772>

Xiao, X., Cui, T., Qin, S., Yang, C., y Wang, T. (2024). Beneficial effects of *Lactobacillus plantarum* on growth performance, immune status, antioxidant function and intestinal microbiota in broilers. *Poultry Science*, 103(12), 104280. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2024.104280>

Yan, W., Xu, H., Lu, D. y Zhou, Y. (2022). Effects of sludge thermal hydrolysis pretreatment on anaerobic digestion and downstream processes: mechanism, challenges and solutions. *Bioresource Technology*, 344(b), 12248 <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126248>

Yang, C., Wang, S., Li, Q., Zhang, R., Xu, Y., y Feng, J. (2024). Effects of probiotic *Lactiplantibacillus plantarum* HJLP-1 on growth performance, antioxidant activity and cecal microflora in broiler chickens. *Animals*, 14(5), 668. <https://doi.org/10.3390/ani14050668>

Yang, C., Wang, S., Li, Q., Zhang, R., Xu, Y., y Feng, J. (2024). Effects of probiotic *Lactiplantibacillus plantarum* HJLP-1 on growth performance, antioxidant capacity, immune function indices in the serum, and cecal microbiota in Broiler Chicken, 14(5), 668. <https://doi.org/10.3390/ani14050668>

Zahran, E., Elbahnaswy, S., Ahmed, F. et al. Nutritional and immunological evaluation of *Nannochloropsis oculata* as a potential Nile tilapia-aquafeed supplement. *BMC Vet Res* 19, 65 (2023). <https://doi.org/10.1186/s12917-023-03618-z>

Zhang, L., Ren, J. y Bai, W. (2023). A Review of Poultry Waste-to-Wealth: Technological Progress, Modeling and Simulation Studies, and Economic- Environmental and Social Sustainability, 15(7), 5620. <https://doi.org/10.3390/su15075620>

Zhang, Q., Wang, H., & Chen, Y. 2025 a. Thermal disintegration of waste-activated sludge. *Energies*, 17(17), 4447. <https://doi.org/10.3390/en17174447>

Zhang, L., Ren, J., y Bai, W. (2023). A review of poultry waste-to-wealth: Technological progress, modeling and simulation studies and economic-environmental and social sustainability. *Sustainability*, 15(7), 5620. <https://doi.org/10.3390/su15075620>

Zheng, J., Wittouck, S., Salvetti, E., Franz, C.M.A.P., Harris, H.M.B., Mattarelli, P., O'Toole, P.W., Pot, B., Vandamme, P., Walter, J., Watanabe, K., Wuyts, S., Felis, G.E., Gänzle, M.G., Lebeer, S.: A taxonomic update of the genus *Lactobacillus*: A proposed generic reclassification and description of 23 novel genera. *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.* 70, 2782–2858 (2020). <https://doi.org/10.1099/ijsem.0.004107>

Zhou, S., Zhu, Z., Chen, X., Pu, Q., Liu, S., Luo, Y., Shao, Y., Sun, Y., Sun, X., Shang, C., Shen, W., Hua, D., & Wang, X.: Study on the effects of urea addition on the fermentation quality, nitrogen metabolism, microbial community, and metabolic characteristics of cotton strawlage. *Front. Microbiol.* 16, 1610850 (2025). <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1610850>

Zhu, J., Liu, X., Liu, N., Zhao, R., y Wang, S. 2024. *Lactobacillus plantarum* alleviates high-fat diet-induced obesity by altering the structure of mice intestinal microbial communities and serum metabolic profiles. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1425764. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1425764>