

Aplicar un Proceso Biotecnológico en la Estabilización de Plumas de Aves como Materia Prima para la Producción de un Abono Orgánico en el Municipio de San Vicente de Chucurí-Santander.

Dorly Soraya Jiménez Jaimes

Trabajo de Grado para Optar el Título de Administradora Agroindustrial

Director

Milton César Hernández Rivera

Especialista en Biotecnología Agroambiental

Universidad Industrial de Santander

Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia (IPRED)

Administración Agroindustrial

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

Primeramente, dedico este logro a Dios, fuente infinita de sabiduría, fortaleza y esperanza. Gracias por guiar cada paso de mi camino, por darme la serenidad en los momentos de incertidumbre y la fe necesaria para continuar cuando las fuerzas parecían agotarse. Sin Su presencia, este sueño no habría sido posible.

A mi mamá, mi mayor ejemplo de amor, entrega y perseverancia. Eres la razón que me impulsa a superarme día a día, el motor que me ha motivado a no rendirme y la voz que me recuerda que los sueños sí se pueden alcanzar con esfuerzo y determinación. Gracias por tus sacrificios, por tu apoyo incondicional, por tus palabras sabias y por estar presente en cada etapa de mi vida. Este logro también es tuyo, porque sin tu guía y tu amor nada de esto habría tenido sentido.

A mi pareja, quien ha estado a mi lado en cada desafío, dándome aliento cuando las dudas me invadían, mostrándome siempre el lado positivo de las cosas y recordándome que todo esfuerzo tiene su recompensa. Gracias por ser mi compañero, por creer en mí incluso cuando yo dudaba, y por convertirme en una persona más fuerte, optimista y perseverante.

A mi familia, quienes con su apoyo, comprensión y cariño me han acompañado a lo largo de este camino académico y personal. Gracias por estar presentes en los momentos más importantes, por su paciencia y por ser ese pilar que me sostiene cuando las cargas se vuelven pesadas. Cada palabra de ánimo y cada gesto de afecto me dieron el impulso necesario para continuar.

Extiendo también mi más sincero agradecimiento a la Universidad Industrial de Santander (UIS) y al Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia (IPRED), por abrirme sus puertas y brindarme una formación integral basada en el conocimiento, el compromiso y la

excelencia. Gracias a sus docentes y a toda la comunidad académica por compartir su saber, por fomentar en mí el pensamiento crítico y por fortalecer mis capacidades como profesional en el campo agroindustrial.

Este proyecto representa no solo la culminación de una etapa académica, sino también el reflejo del esfuerzo, la constancia y el apoyo de todas las personas que han creído en mí. A cada uno de ustedes, gracias por ser parte de esta historia, por acompañarme en el proceso y por hacer posible que hoy este sueño se convierta en una realidad.

Agradecimientos

Deseo expresar mi más profundo agradecimiento a las fuentes digitales y plataformas académicas que sirvieron como base y soporte para la construcción y sustentación de este proyecto de grado. Gracias a ellas, fue posible acceder a información científica, técnica y actualizada que enriqueció el proceso investigativo y permitió sustentar con rigor cada uno de los componentes del proyecto de investigación.

Agradezco especialmente a las páginas y repositorios web especializados en temas de biotecnología, microbiología, sostenibilidad y agricultura regenerativa, los cuales aportaron contenidos valiosos para la comprensión de los procesos de hidrólisis enzimática, el funcionamiento de los reactores tipo batch y la aplicación de enzimas *Bacillus subtilis* en la degradación de materia orgánica.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	13
1. Objetivos	15
1.1 Objetivo General.....	15
1.2 Objetivos Específicos.....	15
2. Cuerpo del Trabajo	16
2.1 Marco Referencial	16
2.1.1 Clasificación de los Biorreactores según el Modo de Operación.....	20
2.1.2 Clasificación según el Mecanismo de Mezcla y Aireación	21
2.1.3 Aplicaciones Agroindustriales de los Biorreactores	22
2.2 Método	41
2.2.1 Metodología y Control de Variables en el Proceso de Hidrólisis Enzimática.....	41
2.2.2 Muestreo y Medición de Parámetros.....	42
2.2.3 Tratamientos y Dosis de Inoculación.....	43
2.2.4 Control de Contaminantes (Variables Extrañas)	43
2.2.5 Configuración del Biorreactor	43
2.2.6 Condiciones Generales de Operación	44
2.2.7 Resultados.....	55
3. Conclusiones.....	70
4. Recomendaciones	72
Referencias Bibliográficas	74

Apéndice.....79

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Información Técnica de Bacillus subtilis (Abeer Hashem, 2019)	29
Tabla 2 Resumen de las Propiedades Bioquímicas de Algunas Queratinasas Microbianas Seleccionadas y sus Aplicaciones Potenciales.....	34
Tabla 3 Microorganismos de Estabilización Coadyuvantes en la Degradación de la Materia Prima.....	38
Tabla 4 Agrupando Variables	44
Tabla 5 Composición de cada uno de los Procesos de Producción en el Biorreactor	53
Tabla 6 Cantidad de Inoculante en Función del Tiempo y la Respuesta en Temperatura	61

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Proceso de la Estabilización Previa Resumido	47
Figura 2 Diseño del Reactor Fermentativo para Procesos Industriales.....	50
Figura 3 Diseño del Reactor Fermentativo Tipo Batch.....	51
Figura 4 Instalación del Contactor a la Termocupla, Pirómetro y Resistencia	52
Figura 5 Diseño del Biorreactor	55
Figura 6 Primera Estabilización en Función de pH, Temperatura, rpm y Cantidad de Inóculo...	56
Figura 7 Segunda Estabilización en Función de pH, Temperatura, rpm y Cantidad de Inóculo..	56
Figura 8 Tercera Estabilización en Función de pH, Temperatura, rpm y Cantidad de Inóculo ...	57
Figura 9 Cuarta Estabilización en Función de pH, Temperatura, rpm y Cantidad de Inóculo	57
Figura 10 Quinta Estabilización en Función de pH, Temperatura, rpm y Cantidad de Inóculo ..	58
Figura 11 Sexta Estabilización en Función de pH, Temperatura, rpm y Cantidad de Inóculo.....	58
Figura 12 Séptima Estabilización en Función de pH, Temperatura, rpm y Cantidad de Inóculo	59
Figura 13 Octava Estabilización en Función de pH, Temperatura, rpm y Cantidad de Inóculo ..	59
Figura 14 Tiempo de Proceso y en la Dosis de Inoculante que se Utilizó.....	60
Figura 15 Comportamiento de la Temperatura según la Cantidad de Inoculante y el Tiempo de Proceso	62
Figura 16 Tratamiento en Función del pH Promedio.....	63
Figura 17 Tratamiento en Función de la Temperatura Promedio.....	64
Figura 18 Biomasa Inicial Sobre Biomasa Final	66

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A El Biorreactor y sus Partes	79
Apéndice B Las Plumas de Aves-Materia Prima	80
Apéndice C Medición de pH.....	81
Apéndice D Biomasa del Proceso	82

Glosario

Abono: El uso de abonos orgánicos es esencial en la agricultura sostenible, ya que no solo mejora la calidad del suelo, sino que también promueve el crecimiento saludable de las plantas. Uno de los tipos de abono más efectivos es aquel elaborado a partir de plumas de aves, un recurso que muchas veces se desperdicia.

Biorreactor: Es un sistema diseñado para proporcionar las condiciones físicas, químicas y biológicas óptimas para el crecimiento de microorganismos o la catálisis enzimática, controlando variables como temperatura, pH, oxigenación y agitación

Hidrolisis enzimática: Consiste en la utilización de enzimas queratinolíticas que rompen selectivamente los enlaces peptídicos y disulfuro de la queratina, liberando aminoácidos y péptidos solubles. Este proceso se realiza en condiciones suaves de temperatura y pH, conservando la calidad nutricional del producto final.

Plumas: Las plumas son ricas en nitrógeno, un nutriente crucial para el desarrollo vegetal. Cuando se procesan adecuadamente, estas plumas se descomponen y liberan nutrientes esenciales que enriquecen el suelo, favoreciendo la actividad microbiana y mejorando su estructura. Esta acción no solo potencia la fertilidad del suelo, sino que también facilita la retención de agua y la aireación, creando un ambiente propicio para el crecimiento radicular.

Resumen

Título: Aplicar un proceso biotecnológico en la estabilización de las plumas de aves como materia prima para la producción de un abono orgánico en el municipio de San Vicente de Chucuri-Santander. *

Autor: Dorly Soraya Jiménez Jaimes. **

Palabras Clave: Plumas, biorreactor, estabilización, biomasa, hidrólisis

Descripción: El presente estudio se centra en la estandarización y optimización de la fase de estabilización previa de plumas de pollo, materia prima destinada a la obtención de un abono orgánico mediante hidrólisis enzimática. Este proceso emplea microorganismos del género *Bacillus subtilis*, reconocidos por su actividad queratinolítica. Esta fase inicial es crítica en el diseño del bioproceso, pues acondiciona el sustrato para su posterior y eficiente transformación. La estabilización se ejecutó en un biorreactor tipo batch, bajo condiciones operativas específicas:

- Temperatura: 45 - 50 °C
- pH: Neutro (7.0)
- Tiempo total de degradación: 120 horas

Estas condiciones fueron seleccionadas para maximizar la actividad enzimática y la solubilización de la queratina de las plumas. Durante el periodo de pretratamiento, se registró una reducción aproximada del 95 % de biomasa, confirmando la acción efectiva de las enzimas queratinolíticas y la disminución de la carga orgánica inicial. Este proceso generó la descomposición parcial de la matriz proteica, resultando en la liberación de compuestos nitrogenados y péptidos de bajo peso molecular. Estos productos intermedios son esenciales para mejorar la biodisponibilidad y asimilación de nutrientes en las etapas subsiguientes de compostaje y estabilización final. Adicionalmente, el control riguroso de las variables fisicoquímicas y la homogenización del material aseguraron un entorno óptimo para el desarrollo microbiano y la conversión eficiente del residuo en materia orgánica estabilizada. Los resultados obtenidos demuestran que la estabilización previa bajo las condiciones definidas, acelera significativamente los procesos de degradación convencionales, optimizando tanto los tiempos de fermentación como la calidad final del abono orgánico.

*Trabajo de grado.

**Instituto de Proyección Regional y -Educación a Distancia – IPRED. Administración Agroindustrial. Director: Milton César Hernández Rivera. Especialista en Biotecnología Agroambiental.

Abstract

Title: Apply a biotechnological process in the stabilization of bird feathers as raw material for the production of an organic fertilizer in the municipality of San Vicente de Chucuri-Santander.*

Author: Dorly Soraya Jiménez Jaimes.**

Key Words: Feathers, bioreactor, stabilization, biomass, hydrolysis

Description: This study focuses on the standardization and optimization of the pre-stabilization phase of chicken feathers, a raw material used to obtain organic fertilizer through enzymatic hydrolysis. This process employs microorganisms of the genus *Bacillus subtilis*, known for their keratinolytic activity. This initial phase is critical in the bioprocess design, as it conditions the substrate for its subsequent and efficient transformation. Stabilization was carried out in a batch bioreactor under specific operating conditions:

- Temperature: 45–50 °C
- pH: Neutral (7.0)
- Total degradation time: 120 hours

These conditions were selected to maximize enzymatic activity and the solubilization of feather keratin. During the pretreatment period, an approximate 95% reduction in biomass was recorded, confirming the effective action of the keratinolytic enzymes and the decrease in the initial organic load. This process generated the partial decomposition of the protein matrix, resulting in the release of nitrogenous compounds and low molecular weight peptides. These intermediate products are essential for improving nutrient bioavailability and assimilation in the subsequent composting and final stabilization stages. Additionally, rigorous control of physicochemical variables and homogenization of the material ensured an optimal environment for microbial growth and the efficient conversion of the residue into stabilized organic matter. The results obtained demonstrate that pre-stabilization under the defined conditions significantly accelerates conventional degradation processes, optimizing both fermentation times and the final quality of the organic fertilizer.

* Degree Work.

**Institute of Regional Projection and Distance Education-IPRED. Agro-industrial Administration. Director: Milton Cesar Hernandez Rivera. Specialist in Agro-environmental Biotechnology.

Introducción

La gestión de las plumas de pollo representa un desafío ambiental significativo dado el elevado volumen de este subproducto generado por la industria avícola mundial. Se estima que anualmente el descarte global de plumas supera los cinco millones de toneladas. La ausencia de un manejo y aprovechamiento adecuado convierte este residuo en una fuente considerable de contaminación. En el contexto nacional, las cifras de la Federación Nacional de Avicultores de Colombia (FENAVI) y el Ministerio de Salud indican que el faenado anual supera los 230 millones de aves. Esto resulta en la generación de volúmenes sustanciales de plumas, la mayoría de las cuales no se aprovechan de forma eficiente.

Aunque las plumas de pollo poseen una matriz proteica (queratina) con potencial de valorización en diversas aplicaciones incluyendo la producción de harina para alimentación animal, fertilizantes, materiales compuestos, biocombustibles y cosméticos una fracción considerable de este residuo permanece subutilizada.

Esta falta de aprovechamiento eficiente exacerba la problemática de disposición final y sostenibilidad ambiental. A nivel mundial, la investigación se enfoca activamente en desarrollar alternativas de transformación que permitan convertir este desecho en insumos de valor agregado, mitigando así su impacto ecológico negativo.

En el contexto local, el municipio de San Vicente de Chucurí experimenta una problemática análoga. La actividad de faenado asciende aproximadamente a cien mil aves sacrificadas anualmente, resultando en la generación de plumas que en su mayoría no son incorporadas en cadenas de valor más allá de prácticas de autoconsumo. Ante este panorama se identifica la necesidad perentoria de implementar estrategias innovadoras que permitan el

aprovechamiento sostenible de estos subproductos. Dicha valorización contribuiría directamente a la mitigación del impacto ambiental y al fortalecimiento de la economía rural local.

El proceso de estabilización de esta materia prima se postula como una alternativa biotecnológica viable y sustentable mediante la aplicación de la hidrólisis enzimática. Este proceso facilita la descomposición de la queratina presente en las plumas y su subsiguiente transformación en un abono orgánico de alto valor nutricional.

La implementación de esta tecnología persigue un doble objetivo:

1. Reducir la contaminación generada por los desechos avícolas.
2. Promover prácticas agrícolas regenerativas que redunden en la mejora de la calidad del suelo y el incremento de la productividad agrícola.

Además, se busca fomentar la adopción de fertilizantes orgánicos entre los agricultores, presentándolos como una opción más saludable, económica y ambientalmente responsable frente a los insumos convencionales.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Aplicar un proceso biotecnológico en la estabilización de las plumas de aves como materia prima para la producción de un abono orgánico en el municipio de San Vicente de Chucurí-Santander.

1.2 Objetivos Específicos

Implementar un equipo biorreactor para realizar las pruebas pilotos de estabilización del abono del material orgánico de las plumas de aves.

Evaluar el organismo *Bacillus subtilis* con el fin de acelerar el proceso de estabilización de las plumas de aves para la producción de un abono orgánico.

Establecer los tiempos de procesos adecuados para la estabilización de las plumas de aves mediante el uso de un biorreactor.

2. Cuerpo del Trabajo

2.1 Marco Referencial

La industria avícola es una de las actividades económicas más desarrolladas a nivel mundial debido a la alta demanda de carne de ave y productos derivados. Sin embargo, esta industria también genera grandes cantidades de residuos sólidos, entre los cuales las plumas representan una fracción considerable. Se estima que por cada ave procesada se generan entre 80 a 100 gramos de plumas, lo que se traduce en millones de toneladas de residuos anuales a nivel global. Estas plumas, si no se gestionan adecuadamente, se convierten en un problema ambiental. Su acumulación en vertederos genera contaminación visual, malos olores y riesgo de proliferación de microorganismos patógenos. Por tanto, es necesario desarrollar alternativas sostenibles que permitan transformar este residuo en un recurso útil para la agricultura o la industria.

La industria avícola genera una gran cantidad de residuos sólidos, entre ellos las plumas de pollo, que representan aproximadamente un 5–7% del peso total del ave. Las plumas están compuestas en un 90–95% por queratina, una proteína fibrosa rica en aminoácidos como cisteína, que forma enlaces disulfuro ($-S-S-$), confiriendo gran resistencia a la degradación por medios físicos, químicos y biológicos. Esta resistencia es la principal barrera para su aprovechamiento directo como fuente de nutrientes, pero también sugiere un alto potencial como materia prima para fertilizantes si se convierte adecuadamente (Gupta et al., 2012). Esta resistencia estructural ha sido durante mucho tiempo un obstáculo para el aprovechamiento de las plumas. Sin embargo, esta misma complejidad hace que la queratina sea una fuente rica en nitrógeno y otros nutrientes, con potencial aplicación como fertilizante orgánico o en la formulación de suplementos nutricionales para animales, además de ello se puede emplear como materia prima en la fabricación de diversos productos útiles como la preparación de crema para heridas, concentrados y productos agrícolas.

Se busca desarrollar un proceso de hidrólisis enzimática con el fin de obtener como subproducto un Abono L.A.J a partir de las plumas del pollo.

Las queratinas son la proteína estructural más abundante y son componentes de los tejidos epidérmico y esquelético. La queratinasa es una enzima proteolítica que ataca los puentes disulfuro (Los puentes disulfuro son enlaces covalentes fuertes que se forman entre dos átomos de azufre de cisteínas en proteínas, estabilizando su estructura tridimensional. Estos enlaces son cruciales para mantener la conformación correcta de proteínas, especialmente aquellas que funcionan en entornos extracelulares como enzimas y anticuerpos)(StudySmarter, s.f.) para convertir la queratina de formas complejas a formas simplificadas. Para el proceso de las plumas de pollo se requiere de hidrólisis enzimática, ya que las plumas en sus tejidos epidérmico y esquelético abunda la proteína estructural más abundante llamada queratina. Las queratinasas se usan en una amplia variedad de aplicaciones, como desollar pieles en la fabricación de cuero, fertilizantes o nutrientes animales en la industria agrícola, suplementos alimenticios en la industria alimentaria, procesamiento textil, detergentes y en las industrias biomédica y farmacéutica. Por lo tanto, las plumas de pollo se podrían utilizar como materia prima para producir enzimas queratinasas baratas, ya que contienen un alto contenido de proteínas, y la queratina es la materia prima de la queratinasa. (Gutierrez, 2018) Las queratinasas son enzimas proteolíticas especializadas en la degradación de queratina.

Estas enzimas pueden ser producidas por bacterias como *Bacillus subtilis*, *Bacillus licheniformis* y hongos como *Aspergillus flavus* o *Trichoderma spp.* Las condiciones óptimas para su actividad varían según el microorganismo, pero comúnmente trabajan mejor en un rango de pH de 7 a 9 y temperaturas de 30–60 °C (Friedrich & Antranikian, 1996). Existen diferentes métodos para la degradación de la queratina: térmicos, químicos y enzimáticos. Los procesos térmicos, como la hidrólisis con vapor a alta presión, requieren temperaturas elevadas que pueden

desnaturalizar la proteína y generar productos tóxicos o de baja calidad. Los procesos químicos, por su parte, utilizan sustancias corrosivas (como hidróxido de sodio o ácido sulfúrico) que pueden contaminar el producto final y requieren tratamientos adicionales para eliminar residuos tóxicos.

En contraste, la hidrólisis enzimática es un proceso biotecnológico más limpio y específico. Consiste en la utilización de enzimas queratinolíticas que rompen selectivamente los enlaces peptídicos y disulfuro de la queratina, liberando aminoácidos y péptidos solubles. Este proceso se realiza en condiciones suaves de temperatura y pH, conservando la calidad nutricional del producto final. Cuando se desechan en vertederos o en el entorno natural, pueden acumularse y alterar la composición del suelo. Esta acumulación puede afectar la calidad del suelo y su capacidad para sustentar vida vegetal. Además, las plumas pueden atraer a roedores e insectos, creando un hábitat propicio para la proliferación de enfermedades. Esto no solo afecta a la planta avícola, sino que también al medio ambiente al aumentar el riesgo de brotes de enfermedades zoonóticas.

La descomposición anaeróbica de las plumas en vertederos puede liberar metano, un gas de efecto invernadero que contribuye al cambio climático. Este aspecto es preocupante, ya que el metano es mucho más potente que el dióxido de carbono en términos de su capacidad para atrapar calor en la atmósfera. Cuando hablamos de abonos debemos tener presente la resolución 150 de 2003 (Orientar la comercialización y el uso y manejo adecuados y racionales de los fertilizantes y acondicionadores de suelos, tanto para prevenir y minimizar daños a la salud, a la sanidad agropecuaria y al ambiente bajo las condiciones autorizadas, como para facilitar el comercio internacional) (ICA, s.f.), La búsqueda de soluciones sostenibles en la agricultura ha llevado a la investigación y desarrollo de métodos innovadores para la producción de abonos orgánicos. Entre estos métodos, la hidrólisis y el uso de un hidrolizador de plumas se destacan como procesos clave en la transformación de materias primas como las plumas de pollo en abonos que mejoran la

calidad del suelo y fomentan el crecimiento saludable de las plantas (Ramnani, 2006); (Brandelli, SPRINGER NATURE Link, 2007); (Tamrat Tesfaye, 2017).

La hidrólisis es un proceso químico mediante el cual se descomponen compuestos complejos en sus componentes más simples a través del uso del agua. En el contexto de la elaboración de abonos, este proceso es esencial para transformar materiales orgánicos resistentes, como las plumas, que son ricas en queratina. La queratina es una proteína estructural que tiene una alta resistencia a la degradación natural, lo que hace que su descomposición sea un desafío. Al aplicar hidrólisis, se facilita la ruptura de los enlaces químicos presentes en estas proteínas, convirtiéndolas en nutrientes más asimilables por las plantas. El proceso de hidrólisis puede ser catalizado por enzimas específicas o mediante el uso de condiciones controladas de temperatura y pH. Esto permite no solo acelerar la descomposición, sino también optimizar el perfil nutricional del abono final. La liberación controlada de nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio es crucial para garantizar que el abono cumpla con las necesidades específicas del suelo y los cultivos.

En el siglo XXI, no es sostenible pensar en modelos económicos lineales, en los que lo fundamental es transformar la materia prima y finalmente desechar los residuos. Es factible repensar en una economía circular en la que se considere todo el ciclo de vida del producto, se dé un valor agregado a los residuos, se disminuya la generación de desechos y se contribuya a la sostenibilidad ambiental.

En la hidrólisis enzimática de plumas se pueden usar reactores de tipo batch (por lotes), que permiten un control preciso del tiempo de reacción y condiciones operativas. Estos reactores se caracterizan por su simplicidad y son ideales para procesos a escala laboratorio o piloto, en donde se introduce todo el material (plumas y enzima) al inicio del proceso y se deja reaccionar

durante un tiempo determinado. Estos sistemas son sencillos, fáciles de operar y permiten evaluar de forma precisa los efectos de diferentes variables sobre el rendimiento del proceso.

En el campo agroindustrial, los biorreactores constituyen herramientas fundamentales para el desarrollo de bioprocesos sostenibles orientados a la valorización de residuos, la obtención de biofertilizantes, biocombustibles, biogás, bioenzimas y otros productos derivados de la actividad microbiana. Un biorreactor es un sistema cerrado diseñado para proporcionar las condiciones físicas, químicas y biológicas óptimas para el crecimiento de microorganismos o la catálisis enzimática de sustratos orgánicos, controlando variables como temperatura, pH, oxigenación, agitación, presión y tiempo de residencia. El diseño del biorreactor depende de la naturaleza del proceso biotecnológico, el tipo de microorganismo utilizado y el objetivo de producción. En el contexto de la biotecnología agroindustrial, los biorreactores permiten transformar subproductos agrícolas o pecuarios como estiércol, plumas, sangre, cáscaras, residuos lignocelulósicos o aceites usados en productos de alto valor agregado mediante procesos de fermentación, hidrólisis, digestión anaerobia o compostaje controlado.

2.1.1 Clasificación de los Biorreactores según el Modo de Operación

Biorreactores Tipo Batch (Discontinuos) En este tipo de reactor, todos los componentes del proceso (sustrato, medio y microorganismo) se cargan al inicio del ciclo, y el sistema se deja funcionar durante un tiempo determinado sin incorporación ni retiro de material durante la reacción. Durante el proceso, el microorganismo consume los nutrientes y transforma el sustrato hasta alcanzar la fase estacionaria. Este tipo de operación es ideal para estudios experimentales, ensayos enzimáticos y procesos que requieren control de parámetros sin recirculación, como la hidrólisis de plumas con enzimas de *Bacillus subtilis*.

Su principal ventaja radica en el control del tiempo de reacción y las condiciones de homogeneidad, además de su bajo costo de operación y mantenimiento.

Biorreactores Tipo Fed-Batch (Semicontínuos) En estos sistemas se realiza la alimentación gradual del sustrato durante el proceso, lo que permite mantener concentraciones óptimas de nutrientes o controlar la producción de metabolitos. Se utiliza ampliamente en la producción de enzimas, antibióticos y biomasa microbiana a gran escala. Su ventaja principal es el control sobre el crecimiento celular y la prevención de inhibiciones metabólicas, aunque requiere sistemas más complejos de control automatizado.

Biorreactores Continuos (Chemostato o Turbidostato) En los sistemas continuos, se alimenta constantemente el sustrato fresco y se extrae el producto de forma simultánea. De esta manera, el sistema puede mantenerse en un estado estacionario durante largos períodos. Son usados en procesos industriales de gran escala como la producción de biogás, etanol o aminoácidos. Sin embargo, su operación es más delicada, ya que cualquier alteración en la tasa de flujo o en el equilibrio de nutrientes puede afectar el rendimiento del proceso.

2.1.2 Clasificación según el Mecanismo de Mezcla y Aireación

Biorreactores Agitados Mecánicamente (STR, Stirred Tank Reactor): Utilizan un eje central con impulsores (hélices, paletas o turbinas) que aseguran la mezcla homogénea y la transferencia de oxígeno. Son los más versátiles y usados en procesos enzimáticos y fermentativos.

Biorreactores Neumáticos (Airlift o Bubble Column): Emplean aire o gas inyectado en la base del reactor para generar agitación. Son útiles en cultivos sensibles al esfuerzo mecánico, como algas o bacterias fotosintéticas.

Biorreactores de Lecho Fijo o Fluidizado: El sustrato sólido (por ejemplo, residuos agrícolas o pellets) sirve de soporte para el crecimiento microbiano. Se utilizan en digestión anaerobia o tratamientos de efluentes.

Biorreactores de Membrana: Incorporan filtros o membranas semipermeables que separan células o productos, optimizando la recuperación y reutilización de biomasa o enzimas.

2.1.3 Aplicaciones Agroindustriales de los Biorreactores

En el ámbito agroindustrial, los biorreactores son esenciales para:

- **Producción de biofertilizantes y bioabonos:** mediante la descomposición de residuos orgánicos (estiércol, plumas, sangre, cáscaras, etc.) con microorganismos benéficos como *Bacillus subtilis*, *Trichoderma sp.* o *Azotobacter sp.*
- **Producción de enzimas industriales:** queratinasas, amilasas, proteasas o lipasas empleadas en la industria alimentaria y de piensos.
- **Obtención de biogás y bioetanol:** por digestión anaerobia o fermentación alcohólica controlada.
- **Tratamiento biológico de aguas residuales y efluentes agroindustriales.**
- **Transformación de subproductos pecuarios:** conversión de plumas, cuernos o sangre en proteínas hidrolizadas o suplementos agrícolas.

El proceso de hidrólisis enzimática de plumas de pollo requiere condiciones controladas, pero no necesariamente continuas, por lo cual el **biorreactor tipo batch** representa la mejor alternativa técnica y económica. Este tipo de reactor permite mantener un sistema cerrado, donde se introducen el sustrato (plumas), el medio nutritivo y el inoculante (*Bacillus subtilis*) al inicio, sin intercambios de masa durante la reacción.

Entre las razones principales que justifican su elección destacan:

1. **Control preciso del ambiente enzimático y microbiano:** En el sistema batch, las variables de temperatura, pH y agitación pueden ajustarse a los requerimientos óptimos de *Bacillus subtilis* (45–50 °C y pH 7–8), asegurando una hidrólisis eficiente y reproducible.
2. **Facilidad de operación y bajo costo:** No requiere bombas de alimentación ni extracción continua, lo cual simplifica el montaje experimental y reduce el riesgo de contaminación. Además, el consumo energético es bajo comparado con los sistemas continuos.
3. **Adecuado para procesos de investigación o lotes pequeños (6L–8L):** Permite evaluar el comportamiento enzimático en diferentes condiciones (tiempo, concentración, temperatura, pH) antes de escalar el proceso a nivel piloto o industrial.
4. **Optimización del tiempo de reacción:** La hidrólisis enzimática de plumas demanda períodos prolongados (72–120 h) para lograr la completa degradación de la queratina. El reactor batch permite mantener el sistema cerrado durante este tiempo sin pérdida de volumen ni de actividad microbiana.
5. **Homogeneidad en la mezcla y eficiencia en la transferencia de calor:** Mediante un impulsor de baja velocidad (50–60 rpm), se garantiza la dispersión uniforme del inoculante y la enzima en el medio, evitando zonas muertas y mejorando el contacto entre plumas y microorganismos.
6. **Compatibilidad con procesos de estabilización orgánica:** *Bacillus subtilis* es un microorganismo mesófilo que actúa también como **estabilizador de materia orgánica**, reduciendo olores, patógenos y compuestos volátiles. El sistema batch permite conservar estas propiedades hasta el final del proceso.

En comparación con los sistemas fed-batch o continuos, el biorreactor batch proporciona una mayor seguridad operativa, simplicidad técnica y reproducibilidad experimental, factores clave para un proceso de transferencia tecnológica en proyectos de estabilización previa.

El reactor tipo batch es una de las configuraciones más utilizadas en la industria química y biotecnológica, particularmente en procesos que requieren un control preciso de las condiciones de reacción. En el contexto de la hidrólisis enzimática, este tipo de reactor desempeña un papel crucial, ya que permite la conversión eficiente de plumas de pollo en productos valiosos mediante la acción de enzimas específicas como las producidas por *Bacillus subtilis*. Un reactor batch opera bajo un principio sencillo todos los reactivos se introducen al sistema al inicio del proceso, donde permanecen durante un tiempo determinado para facilitar la reacción. Este enfoque ofrece varias ventajas significativas. En primer lugar, la flexibilidad del sistema permite realizar diferentes tipos de reacciones con el mismo equipo, simplemente variando las condiciones operativas. Esto es especialmente beneficioso en la hidrólisis enzimática de plumas de pollo, donde diferentes condiciones pueden ser necesarias para optimizar la degradación queratínica. Otra ventaja del reactor tipo batch es su capacidad para proporcionar un control riguroso sobre las condiciones del proceso. La actividad enzimática es altamente dependiente del ambiente en el que se desarrolla; por lo tanto, mantener parámetros óptimos es fundamental para maximizar el rendimiento del producto. En este sentido, los reactores batch permiten ajustar fácilmente factores como la temperatura y el pH durante el proceso, asegurando que las enzimas mantengan su actividad máxima. Sin embargo, el uso de reactores batch también presenta desventajas. Una de las principales limitaciones es la eficiencia del proceso. Dado que hay tiempos de inactividad entre lotes, la producción continua puede verse afectada. Además, escalar un proceso batch a gran escala puede ser complicado debido a la necesidad de mantener condiciones homogéneas y controladas

durante todo el proceso. En la hidrólisis enzimática de plumas de pollo, este tipo de reactor se utiliza para descomponer la queratina presente en las plumas en componentes más simples que pueden ser aprovechados en diversas aplicaciones industriales. La elección adecuada del sustrato y de la enzima *Bacillus subtilis* es fundamental para optimizar el rendimiento del proceso. Por lo tanto, los parámetros operativos deben ser cuidadosamente considerados y ajustados según las características específicas del material a hidrolizar. La degradación de plumas de pollo, ricas en queratina, representa un desafío significativo debido a la resistencia de esta proteína a la digestión convencional. Sin embargo, *Bacillus subtilis* se ha identificado como un microorganismo eficaz para la bioconversión de plumas a través de la hidrólisis enzimática. En un reactor tipo batch, se inocula *Bacillus subtilis* en un medio adecuado que favorezca su crecimiento y producción de enzimas específicas. A medida que las bacterias proliferan, empiezan a secretar enzimas queratinolíticas, como queratinasa y proteasas. Estas enzimas actúan sobre los enlaces peptídicos presentes en las proteínas de las plumas, facilitando su descomposición.

El proceso inicia con la adsorción de las enzimas a la superficie de las plumas, donde las queratinasas rompen los enlaces disulfuro y peptídicos, descomponiendo la estructura tridimensional de la queratina. Esto permite que las proteasas continúen el proceso, hidrolizando la proteína en fragmentos más pequeños y aminoácidos libres. El uso de reactores tipo batch permite el control preciso de parámetros como temperatura, pH y tiempo de residencia, optimizando así la actividad enzimática. Generalmente, el proceso puede durar entre 24 y 72 horas, dependiendo de las condiciones específicas del reactor y la concentración inicial de plumas. Los productos finales del proceso son aminoácidos y péptidos que pueden ser utilizados como nutrientes para otros microorganismos o incorporados en formulaciones alimenticias. Esta bioconversión no solo proporciona una solución sostenible para el manejo de residuos avícolas,

sino que también genera bioproductos valiosos que pueden ser aprovechados en diversas industrias.

Los productos resultantes de esta degradación son aminoácidos y péptidos que pueden ser utilizados como fertilizantes orgánicos. Este abono resultante es rico en nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y azufre, lo que lo convierte en un excelente mejorador del suelo. La conversión de plumas en abono reduce los residuos avícolas y proporciona una alternativa ecológica al uso de fertilizantes químicos. Además de ellos el abono producido contiene nutrientes que mejoran la calidad del suelo y fomentan el crecimiento vegetal. Permitiendo el uso de reactores tipo batch optimizar las condiciones del proceso (temperatura, pH, tiempo) para maximizar la producción enzimática y la degradación efectiva de las plumas de pollo. Durante el proceso de inoculación se deben tener presente las condiciones óptimas de temperatura, tiempo y pH lo cual permita un resultado significativo. Generalmente, la temperatura óptima para la actividad de *Bacillus subtilis* y sus enzimas es entre 30°C y 50°C. A temperaturas más bajas (por debajo de 30°C), la actividad enzimática puede ser insuficiente para descomponer efectivamente la queratina de las plumas. Por otro lado, temperaturas superiores a los 50°C pueden desnaturalizar las enzimas, disminuyendo su actividad. Sin embargo, muchos estudios reportan que alrededor de 37°C es ideal para maximizar la producción enzimática.

El tiempo de incubación puede variar, pero típicamente oscila entre 24 a 96 horas. En muchos casos, se observa que una incubación de 48 horas suele ser suficiente para alcanzar una degradación significativa de las plumas, es recomendable realizar análisis periódicos durante el proceso para evaluar la progresión de la degradación y ajustar las condiciones si es necesario. El pH óptimo para la actividad de las enzimas producidas por *Bacillus subtilis* generalmente se encuentra entre 7 y 9, con un pH neutro (aproximadamente 7.5) siendo muy común en los estudios.

La transformación de plumas de pollo en abono orgánico a través de la hidrólisis enzimática con *Bacillus subtilis* genera un fertilizante rico en diversos componentes nutricionales esenciales para las plantas, entre los cuales se encuentran:

Nitrógeno (N): Es un componente fundamental de aminoácidos, proteínas y ácidos nucleicos, el nitrógeno es crucial para el crecimiento vegetativo de las plantas. Proviene de la degradación de las proteínas presentes en las plumas y su conversión a formas asimilables como amonio (NH_4^+) y nitratos (NO_3^-).

Fósforo (P): Es esencial para la fotosíntesis, la transferencia de energía y el desarrollo de raíces. Ayuda en la formación de flores y frutos. Se libera durante la descomposición de estructuras celulares y compuestos asociados a las plumas.

Potasio (K): Regula procesos como la apertura y cierre de estomas, contribuye a la resistencia a enfermedades y mejora la calidad de los frutos.

Calcio (Ca): Fortalece las paredes celulares y contribuye al desarrollo radicular y a la absorción de otros nutrientes. Puede derivarse del medio utilizado para el cultivo o ser parte de los componentes celulares degradados.

Magnesio (Mg): Es un componente central de la clorofila, esencial para la fotosíntesis, y también actúa como cofactor en muchas reacciones enzimáticas.

Azufre (S): Es esencial para la síntesis de ciertos aminoácidos y proteínas. Proviene del contenido proteico y se libera durante la hidrólisis enzimática.

Aminoácidos: La hidrólisis enzimática también libera aminoácidos libres que son fácilmente asimilables por las plantas, lo que puede mejorar su crecimiento y desarrollo.

Micronutrientes: Además de los macronutrientes mencionados, el abono puede contener varios micronutrientes esenciales como hierro (Fe), manganeso (Mn), zinc (Zn), cobre (Cu), boro

(B) y molibdeno (Mo). Estos son necesarios en cantidades pequeñas, pero son vitales para diversas funciones metabólicas en las plantas.

Para el desarrollo del proceso de estabilización, cuyo propósito es obtener un abono orgánico a partir de la hidrólisis enzimática de plumas de pollo, se seleccionó un reactor fermentativo tipo batch con agitación y control de parámetros. La elección de este modelo se fundamenta en criterios técnicos, biotecnológicos y de escalabilidad que aseguran la viabilidad del proceso.

En primer lugar, este tipo de reactor permite el control preciso de variables críticas como la temperatura y el pH, que son determinantes para la estabilidad y eficiencia en la actividad enzimática de *Bacillus subtilis*. Diversos estudios han demostrado que la hidrólisis de queratina requiere condiciones controladas, con rangos de temperatura entre 40 °C y 55 °C y un pH cercano a la neutralidad para maximizar la degradación de la fibra proteica (Brandelli, 2008).

En segundo lugar, la presencia de un sistema de agitación interna favorece la homogeneidad del medio de reacción, evitando la formación de zonas muertas y garantizando que el oxígeno, los nutrientes y el inóculo se distribuyan de manera uniforme. Esta característica resulta esencial dado que el sustrato sólido las plumas de pollo tiende a compactarse, lo cual podría limitar la acción enzimática sin una adecuada mezcla (Gupta & Ramnani, 2006).

Otro aspecto relevante es la posibilidad de realizar procesos de esterilización previos en el medio y en el aire de entrada, lo cual minimiza riesgos de contaminación microbiológica que podrían competir con el microorganismo inoculado o disminuir la calidad del producto final. De esta manera, se asegura un proceso limpio, seguro y reproducible (Madigan, Bender, Buckley, Sattley, & Stahl, 2019).

Asimismo, este modelo de reactor ofrece una alta versatilidad para la transferencia tecnológica, ya que facilita el escalado desde la fase de laboratorio hacia la fase industrial manteniendo condiciones de operación similares. Esto resulta estratégico para el proceso de estabilización, en tanto se busca promover un modelo de producción sostenible, escalable y orientado a la economía circular.

Finalmente, la configuración del reactor permite separar con mayor eficiencia los productos principales (biofertilizante líquido), subproductos (péptidos, aminoácidos, biomasa) y residuos. De esta manera, se aprovechan integralmente los materiales, alineándose con los principios de cero residuos y negocios verdes, en coherencia con los lineamientos de la agricultura regenerativa y la bioeconomía (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2021).

El uso de *Bacillus subtilis* en el proceso de estabilización responde a la necesidad de transformar residuos agroindustriales, como plumas de pollo, estiércol bovino, cáscara de cacao, sangre, ceniza y hueso calcinado, en productos estables y de valor agregado para la agricultura. Este microorganismo es ampliamente reconocido en la biotecnología agrícola por su capacidad de degradar compuestos complejos y promover la estabilidad de la materia orgánica.

Tabla 1

Información Técnica de Bacillus subtilis (Abeer Hashem, 2019)

Aspecto	Descripción técnica
Nombre científico	<i>Bacillus subtilis</i> (Ehrenberg, 1835)

Aspecto	Descripción técnica
Clasificación taxonómica	Dominio: Bacteria Reino: Bacillati Filo: Bacillota Clase: Bacilli Orden: Bacillales Familia: Bacillaceae Género: <i>Bacillus</i> Especie: <i>subtilis</i> (NCBI Taxonomy Browser, 2025)
Morfología	Bacteria Gram positiva , con forma bacilar (varilla). Tamaño aproximado de 0,7–0,8 μm de diámetro y 2–3 μm de longitud . Forma esporas endógenas resistentes al calor, la radiación y la desecación.
Metabolismo	Aerobio facultativo con alta versatilidad metabólica; puede crecer en una amplia gama de sustratos orgánicos.
Condiciones óptimas de crecimiento	Temperatura: 30–40 °C pH: 6,5–7,5
Capacidad enzimática	Produce proteasas, queratinasas, lipasas, amilasas, celulasas y xylanasas . Estas enzimas degradan proteínas, lípidos y carbohidratos complejos, facilitando la bioconversión de residuos orgánicos.
Función biotecnológica	Degradación de materiales orgánicos complejos (plumas, estiércol, cáscaras vegetales). Estabilización del medio por control de microorganismos indeseados. Producción de metabolitos antimicrobianos y fitohormonas (auxinas y giberelinas).

Aspecto	Descripción técnica
Seguridad	Clasificado como GRAS (Generally Recognized As Safe) por la FDA.
biológica	No patógeno. Apto para uso en biofertilizantes, alimentos y productos agrícolas.

Nota: La tabla describe los aspectos técnicos aplicados en el proceso de estabilización:

El género *Bacillus* es secretor de proteínas y metabolitos eficientes para el control de plagas y enfermedades, promueve el crecimiento vegetal a través de la solubilización de fósforo y la producción de reguladores de crecimiento como el ácido indol acético; así mismo participa en la fijación de nitrógeno cuando hace parte de consorcios microbianos. Como biofertilizante es una opción amigable para el suelo y el ambiente que da respuesta a la necesidad de implementar la agricultura sostenible. (Lucía Constanza Corrales-Ramírez MSc, 2017). La formulación y el uso de biofertilizantes es una opción que está tomando especial importancia para el mejoramiento de la disponibilidad de nutrientes cuando se aplica a los cultivos (Corrales LC, 2014), por cuanto facilita la fijación biológica de nitrógeno y la solubilización de fosfato, reemplazando positivamente la fertilización química y brindando protección al medio ambiente.

Las plumas están compuestas por más del 90 % de proteína y se generan en grandes cantidades como residuo del procesamiento avícola a nivel mundial. La acumulación de plumas provoca contaminación ambiental y desperdicio de proteína (Onifade et al., 1998 ; Gousterova et al., 2005). Los métodos tradicionales para degradar las plumas, como la hidrólisis alcalina y la cocción a presión con vapor, no solo destruyen los aminoácidos, sino que también consumen grandes cantidades de energía. La biodegradación de las plumas mediante keratinasa de microorganismos podría ser una alternativa viable. Se ha demostrado previamente que

Bacillus (Williams et al., [1990](#) ; Riffel et al., [2003](#) ; Manczinger et al., [2003](#) ; El-Refai et al., [2005](#)), hongos (Gradišar et al., [2000](#) ; Friedrich et al., [2005](#)) y actinomicetos (Ignatova et al., [1999](#) ; Gousterova et al., [2005](#)) son capaces de producir queratinasas que degradan las plumas. El objetivo de este estudio fue identificar una cepa bacteriana degradadora de plumas recientemente aislada, caracterizar la producción de keratinasa y la degradación de queratina en plumas, pelo y seda mediante una cepa mutagénica de N -metil- N' -nitro- N- nitrosoguanidina (MNNG) con actividad keratinolítica mejorada, y optimizar las condiciones para la producción de keratinasa en sustratos de plumas. (Cheng-gang Cai, 2008).

La cepa Bacillus sp. CN2 mostró una potente actividad de degradación de la queratina de las plumas, capaz de degradar eficientemente plumas nativas, lo que resultó en una pérdida de peso del 86,70 % en 24 h. Además, produjo $195,05 \pm 6,65$ U/mL de keratinasas a las 48 h y liberó 0,40 mg/mL de proteínas solubles a las 60 h. El consorcio de proteasas extracelulares presentó una amplia especificidad de sustrato y una excelente biodegradabilidad tanto para proteínas solubles como insolubles. Cabe destacar que el análisis del proteoma extracelular reveló la presencia de un sistema de degradación de queratina altamente eficiente (Yuhong Lai, 2023).

Previamente identificamos una cepa proteolítica, Bacillus sp. CN2, que exhibía un potente sistema de degradación de proteínas [[30](#)]. En este estudio, se evaluó el potencial queratinolítico de la cepa CN2 utilizando residuos de plumas como única fuente de nitrógeno. Se investigaron el consorcio enzimático funcional, la especificidad del sustrato, los productos de degradación de la queratina y el modo de degradación de la queratina de las plumas por esta cepa. Nuestros datos indican que la actividad queratinasa de la cepa CN2 es significativamente mayor que la de la mayoría de los demás microorganismos analizados, como B. licheniformis ALW1 [[31](#)], B. cereus B5esz [[32](#)] y B. subtilis MBF11 [[33](#)]. Por lo tanto, se trata de un candidato prometedor como productor de

queratinasas eficaces en tecnologías para el procesamiento queratinolítico de residuos queratinosos. (Yuhong Lai, 2023).

Las enzimas microbianas tienen un papel destacado en el ámbito bioeconómico, y las proteasas representan aproximadamente el sesenta por ciento del mercado total de enzimas. Las keratinasas microbianas son proteasas versátiles que están cobrando cada vez más importancia en biotecnología debido a su eficaz bioconversión de residuos recalcitrantes ricos en queratina y a la implementación sostenible de una producción más limpia. La biodegradación de materiales queratinosos asistida por keratinasas ha revitalizado las perspectivas de utilización de residuos agroindustriales rentables, como sustratos fácilmente disponibles, para la producción de productos de alto valor, incluidos aminoácidos y péptidos bioactivos. Esta revisión presenta una visión general de la complejidad estructural de la queratina, el mecanismo potencial de su biodegradación y el impacto ambiental de los residuos queratinosos. Asimismo, se analiza la keratinasa microbiana en cuanto a sus fuentes, producción y propiedades funcionales, con especial énfasis en las implicaciones ecológicas de los microorganismos productores y las estrategias para mejorar su actividad catalítica. También se describen las aplicaciones de la keratinasa y su potencial uso en sectores de alta gama, como el procesamiento de pieles de animales, la formulación de detergentes, cosméticos, piensos y la producción de fertilizantes orgánicos. (Nonso E Nnolim, 2020).

Tabla 2

Resumen de las Propiedades Bioquímicas de Algunas Queratinasas Microbianas Seleccionadas y sus Aplicaciones Potenciales

Fuente microbiana	tipo de proteasa	Sustrato de actividad	Temperatura óptima (°C)	pH óptimo	# Estabilizador /Promotor	*PM (kDa)	Solicitud	Referencias
Fuente bacteriana								
<i>Actinomadura keratinilítica C pt29</i>	Serina	azul queratina	70	10	Mn ²⁺	29.23	degradación de las plumas	Habbeche y otros, 2014
<i>Bacillus circulans DZ10 0</i>	Serina	azul queratina	85	12.5	Ca ²⁺ , Mn ²⁺ y Mg ²⁺	32.02	Degradación de la queratina, formulación de detergente	Benkiar y otros, 2013
<i>Bacillus tequilensis hsT KB2</i>	Serina	azul queratina	70	10.5	Tolueno, Mn ²⁺	59.89	Formulación de detergente	Paul y otros, 2014c
<i>Bacillus pseudofirmus F A30-01</i>	Serina	Azokeratina	60	8.8–10.3	Mg ²⁺ , Co ²⁺ y Zn ²⁺	29.29	degradación de las plumas	Kojima y otros, 2006
<i>Bacillus licheniformis</i>	Serina	azul queratina	60	8.5	Mn ²⁺ , Al ³⁺ y Ca ²⁺	35	hidrólisis de queratina	Suntornsuk y otros, 2005

<i>Bacillus licheniformis</i> E R-15	Serina	Pluma	70	11	β -ME	58	Degradación de las plumas, depilación de pieles	<u>Tiway y Gupta, 2010</u>
<i>Bacillus subtilis</i> PF1	—	Caseína	60	9	Ca ²⁺ , Triton X-100, DMSO	—	Formulación de detergente	<u>Bhange y otros, 2016</u>
<i>Bacillus</i> sp. CL18	Serina	Azocaseína	55	8	Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Trición X-100, DMSO	—	hidrólisis de queratina	<u>Rieger y otros, 2017</u>
<i>Bacillus</i> sp. AD-W	Serina	azul queratina	50	10	Mn ²⁺ , DTT	39	hidrólisis de queratina	<u>Gegeckas y otros, 2018</u>
<i>Bacillus</i> sp. AD-AA3	Serina	azul queratina	50	8	DTT, β -ME	29	hidrólisis de queratina	<u>Gegeckas y otros, 2018</u>
<i>Bacillus subtilis</i> FTC02 PR1	Serina	Azokeratina	60	6–11	SDS, Mn ²⁺	30	degradación de las plumas	<u>Ferrareze y otros, 2016</u>
<i>Bacillus licheniformis</i> A LW1	—	Bordillo	65	8	—	—	degradación de las plumas	<u>Abdel-Fattah y otros, 2018</u>
<i>Bacillus haynesii</i> ALW2	—	Bordillo	70	8–9	—	—	Depilación de pieles	<u>Emran y otros, 2020</u>

<i>Bacilo amyloliquefacie ns S13</i>	Serina	azul queratina	50	6.5	Ca ²⁺ , Mg ²⁺ y Zn ²⁺	28	Degradació n del plumaje, depilación de la piel	<u>Hamiche y otros, 2019</u>
<i>Bacilo amyloliquefacie ns S13</i>	Serina	azul queratina	60	8	Ca ²⁺ , Mg ²⁺ y Mn ²⁺	47	Degradació n del plumaje, depilación de la piel	<u>Hamiche y otros, 2019</u>
<i>Bacillus thuringiensis M T1</i>	Metallo	Bordillo	50	9	Ba ²⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ y Mn ²⁺	80	degradación del cabello	<u>Hassan et al., 2020b</u>
<i>Bacillus subtilis SCK6</i>	Serina	Bordillo	60	10	Cu ²⁺ , Co ²⁺	30,95	Depilación de la piel	<u>Tian y otros, 2019</u>
<i>Brevibacillus brevis US575</i>	Serina	azul queratina	40	8	Ca ²⁺	29.12	Depilación de pieles	<u>Jaouadi y otros, 2013</u>
<i>Brevibacillus parabrevis</i>	Serina	Bordillo	60	8	Na ⁺ , Ca ²⁺ , Tritón X-100, Tween-40	28	Depilación de pieles	<u>Zhang y otros, 2016</u>
<i>Brevibacterium luteolum</i>	—	azul queratina	30	10	—	—	degradación del cabello	<u>Thankas wamy y otros, 2018</u>

<i>Caldicoproba</i> <i>er algeriensis</i>	Serina	azul queratina	50	7	Sn ²⁺ , Ba ²⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ y Mn ²⁺	33,25	Depilación de pieles	<u>Bouacem</u> y otros, <u>2016</u>
<i>Chryseobacteri</i> <i>um</i> L99 sp. nov.	Serina	azul queratina	40	8	K ⁺ , Zn ²⁺ y Co ²⁺	33	Tratamiento de la lana	<u>Lv y</u> otros, <u>2010</u>
<i>Fervidobacteri</i> <i>um islandicum</i>	Metallo	—	80	7	Co ²⁺	—	degradación de las plumas	<u>Lee y</u> otros, <u>2015</u>
<i>Fervidobacteri</i> <i>um</i> <i>pennavorans</i>	Serina	Caseína	80	10	—	130	degradación de las plumas	<u>Friedrich</u> y <u>Antraniki</u> an, 1996
<i>Meiothermus</i> sp . 140	Serina	azul queratina	70	8	Etanol, DMSO	76	degradación de las plumas	<u>Kuo y</u> otros, <u>2012</u>
<i>Meiothermus</i> <i>taiwanensis</i> W R-220	—	Pluma de pollo	65	10	—	30	degradación de las plumas	<u>Wu y</u> otros, <u>2017</u>
<i>Microbacteria</i> <i>sp. kr10</i>	Metallo	Azocaseína	50	7.5	Zn ²⁺ y Mg ²⁺	42	degradación de las plumas	<u>Thys y</u> <u>Brandelli,</u> <u>2006</u>
<i>Serratia</i> <i>marcescens</i> P3	Metallo	Azokeratina	40–45	6.5	—	53	Depilación de la piel	<u>Bach y</u> otros, <u>2012</u>
<i>Streptomyces</i> s p.AB1	Serina	azul queratina	75	11.5	Mg ²⁺	29,85	degradación de las plumas	<u>Jaouadi y</u> otros, <u>2010</u>

<i>Streptomyces</i> s p. SK 1 - 02	Serina-metal	azul queratina	70	10	Ca ²⁺ y Mg ²⁺	—	hidrólisis de queratina	<u>Letournea u y otros, 1998</u>
<i>Streptomyces</i> s p. S7	Serina-metal	azul queratina	45	11	Ca ²⁺	44	—	<u>Tatineni y otros, 2008</u>
<i>Streptomyces aureofaciens</i> K 13	Serina-metal	Bordillo queratina	75	12	Cu ²⁺ , Mn ²⁺ y SDS	46	Hidrólisis de queratina, formulación de detergente	<u>Gong y otros, 2015</u>

Nota: Propiedades bioquímicas de algunas queratinasas. Tomado de: (Nonso E Nnolim, 2020).

Los microorganismos fijadores de nitrógeno y solubilizadores de fosfato han sido objeto de estudio en la microbiología del suelo y en el desarrollo de productos biológicos comerciales de uso agrícola como los biofertilizantes (D, 2016); por tanto, el interés por determinar qué microorganismos contienen las enzimas fitasas y nitrogenasas es vital para la producción agrícola.

Tabla 3

Microorganismos de Estabilización Coadyuvantes en la Degradación de la Materia Prima

Microorganismo	Tipo	Función principal en la estabilización	Aplicación específica en el proceso de estabilización
<i>Bacillus subtilis</i>	Bacteria Gram positiva	Producción de queratinasas y proteasas . Degradación de proteínas complejas (queratina). Inhibe microorganismos patógenos.	Hidrólisis enzimática de plumas de pollo y estabilización del medio.

Microorganismo	Tipo	Función principal en la estabilización	Aplicación específica en el proceso de estabilización
Bacillus licheniformis	Bacteria Gram positiva	Productor de queratinasas y amilasas . Mejora la descomposición de residuos ricos en proteínas y almidones.	Complementa a <i>B. subtilis</i> en la degradación de plumas y sangre; aumenta la eficiencia enzimática.
Bacillus megaterium	Bacteria Gram positiva	Solubiliza fosfatos minerales y produce fitohormonas.	Enriquece el abono con fósforo disponible para las plantas.
Aspergillus niger	Hongo filamentoso	Secreta celulasas, pectinasas y xylanases ; descompone materiales lignocelulósicos como cáscaras y residuos vegetales.	Facilita la degradación de la cáscara de cacao y restos ligninosos del abono.
Trichoderma harzianum	Hongo filamentoso	Produce enzimas hidrolíticas (quitinasas, glucanasas) y compuestos antifúngicos. Estabiliza el material y actúa como biocontrolador .	Favorece la maduración del abono y previene hongos contaminantes.
Lactobacillus plantarum	Bacteria ácido-láctica	Promueve la fermentación láctica , reduce el pH y limita la proliferación de microorganismos patógenos.	Mejora la estabilidad microbiológica y acelera la fermentación inicial del abono.
Pseudomonas fluorescens	Bacteria Gram negativa	Produce sideróforos y antibióticos naturales ; inhibe patógenos del suelo.	Incrementa la bioseguridad del abono y mejora la disponibilidad de hierro.
Saccharomyces cerevisiae	Levadura	Fermenta carbohidratos, produce vitaminas del complejo B y promueve el crecimiento de microorganismos benéficos.	Mejora el equilibrio microbiológico y la calidad final del abono líquido.

Nota: Se describen los microorganismos de estabilización. Tomado de: (Brandelli, ScienceDirect, 2007).

La importancia de los biofertilizantes en la industria agrícola se sustenta también en que son una opción amigable para el suelo, ya que el uso excesivo de las tierras fértiles para cultivo y el manejo indiscriminado de fertilizantes químicos desgasta este recurso, y en este caso, los

biofertilizantes contribuyen a mitigar el problema de deterioro y/o contaminación ambiental (Flores A, 2009) y de esta forma se contribuye con el objetivo número quince de los propuestos para el milenio "proteger, restablecer y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras y detener la pérdida de biodiversidad" (ONU, 2015).

En los últimos años, instituciones en Colombia han estudiado y evaluado la acción biofertilizante de microorganismos eficientes que participan en la fijación de nitrógeno y la solubilización de fosfatos. El Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) define "un inoculante biológico" como un producto elaborado a partir de una o más cepas de microorganismos benéficos que al aplicarse al suelo o a las semillas promueven el crecimiento vegetal o favorecen el aprovechamiento de los nutrientes (ICA, 2004). De otro lado, estudios como los realizados por la Pontificia Universidad Católica de Chile han demostrado que del 100% del nitrógeno aplicado en los cultivos, solo del 10% al 50% es absorbido por las plantas y del 50% al 90% terminan en las aguas subterráneas y superficiales (H, 2016).

De los beneficios que el *Bacillus subtilis* aporta a la agricultura se encuentra su aportación a aumento del crecimiento vegetativo, porque secreta compuestos bioactivos como hormonas de crecimiento, enzimas y ácido indolacético que estimulan el desarrollo de las raíces y el crecimiento vegetal en general.

También facilita la absorción de nutrientes, mejorando la eficiencia de la fertilización y contribuyendo a una mayor producción de biomasa. En cuanto su aportación como control biológico de patógenos, produce una variedad de antibióticos y péptidos antimicrobianos que inhiben el crecimiento de patógenos del suelo y las plantas. Por otra parte, actúa como competencia por espacio y nutrientes con patógenos perjudiciales, reduciendo su impacto en los cultivos.

También participa en una inducción de resistencia sistémica, ya que estimula el sistema de defensa natural de las plantas, aumentando la tolerancia de las plantas al estrés abiótico y biótico. Otro factor a destacar es contribución a la biofertilización mejorando la salud del suelo y su estructura, al liberar enzimas que descomponen la materia orgánica.

Así, con el uso de formulados a base de *Bacillus subtilis*, además de los aspectos beneficiosos mencionados, también se reduce la necesidad de productos químicos agrícolas al promover un equilibrio biológico en el ecosistema agrícola. (Bioestimulantes agrícolas, s.f.)

2.2 Método

2.2.1 Metodología y Control de Variables en el Proceso de Hidrólisis Enzimática

El proceso de hidrólisis enzimática de las plumas de pollo se llevó a cabo en un biorreactor tipo batch diseñado para mantener condiciones controladas de temperatura, agitación, inoculación y muestreo. Para garantizar la reproducibilidad y estabilidad del proceso, se estableció un sistema de control de variables que permitió monitorear de manera continua los parámetros fisicoquímicos que influyen en la degradación de la queratina por acción de *Bacillus subtilis*.

Control de temperatura

La temperatura del biorreactor se reguló mediante un sistema compuesto por un **termostato digital EBCHQ 58008**, una **termocupla tipo K**, un **contactor CHINT NC1-3210** y una **resistencia eléctrica en cobre de 110 V**. El termostato se programó para operar en un rango de 45 °C a 50 °C, temperatura óptima de actividad enzimática para *Bacillus subtilis* y para favorecer la ruptura de enlaces disulfuro de la queratina. La termocupla registraba la temperatura interna del reactor, enviando la señal al termostato, el cual activaba o desactivaba el contactor para

controlar la resistencia eléctrica. Adicionalmente, la temperatura fue verificada durante cada muestreo utilizando un pirómetro introducido en la parte superior del reactor. Este sistema permitió mantener un control térmico preciso a lo largo de todo el proceso, evitando variaciones bruscas que pudieran afectar la actividad microbiana.

Control de agitación y revoluciones

La agitación se realizó mediante un motor eléctrico de 110 V, configurado para operar a 60 rpm, velocidad adecuada para mantener la mezcla homogénea sin causar ruptura mecánica excesiva de la biomasa. Las revoluciones por minuto (rpm) se verificaron cada 12 horas como parte del protocolo de muestreo, permitiendo confirmar la estabilidad del sistema mecánico durante los tiempos de reacción (72–120 horas).

2.2.2 Muestreo y Medición de Parámetros

Las muestras se tomaron cada 12 horas en volúmenes de 5 mL, extraídas en un vaso precipitado estéril. En cada muestra se determinaron las variables:

- **pH:** medido con tiras reactivas MQuant®,
- **temperatura interna,**
- **rpm,**
- **tiempo de proceso,**
- **cantidad de biomasa final** después de filtración.

Para la determinación de biomasa residual, las muestras fueron filtradas mediante papel filtro, y el residuo sólido se pesó en una **gramera digital SF-400** con precisión de dos dígitos. Los valores obtenidos permitieron elaborar las curvas de transformación del proceso en función del pH, temperatura e inoculación.

2.2.3 Tratamientos y Dosis de Inoculación

Se realizaron ocho tratamientos (T1–T8) variando la cantidad de inóculo según la siguiente matriz:

- **T1:** 50 mL / 72 h
- **T2:** 62.5 mL / 72 h
- **T3:** 75 mL / 72 h
- **T4:** 87.5 mL / 72 h
- **T5:** 100 mL / 84 h
- **T6:** 100 mL / 96 h
- **T7:** 100 mL / 108 h
- **T8:** 100 mL / 120 h

Cada volumen se midió en un vaso precipitado antes de ser adicionado al reactor.

2.2.4 Control de Contaminantes (Variables Extrañas)

Para evitar interferencias microbianas externas, las plumas fueron sometidas a un pretratamiento de desinfección, consistente en:

- Inmersión en Clorox al 1%,
- Enjuague con agua destilada,
- Aplicación final de alcohol al 96%.

Este pretratamiento eliminó microorganismos competidores y aseguró que la hidrólisis fuera atribuible únicamente a la acción de *Bacillus subtilis*.

2.2.5 Configuración del Biorreactor

El diseño del biorreactor consistió en:

- Tanque de llenado con capacidad útil de 8 L, pero solamente se trabajo con 6 L debido al momento de la fermentación y calentamiento de la mezcla se produce una espuma y debido al total llenado podría derramarse el líquido.
- Motor y eje de agitación.
- Hélice mezcladora interna.
- Tapa sellada.
- Válvula de descarga.
- Resistencia eléctrica.
- Termómetro digital y medidor de pH auxiliar.

Durante el proceso, el volumen se redujo de 6 L a aproximadamente 3 L, producto de la hidrólisis, evaporación controlada y transformación de la pluma en lixiviado.

2.2.6 Condiciones Generales de Operación

- Voltaje: 110 V
- Agitación: 60 rpm
- Tiempo de operación: 72–120 horas
- Temperatura controlada: 45–50 °C
- Volumen total procesado: 6 L

Tabla 4

Agrupando Variables

Categoría	Variable	Tipo	Técnica de medición / control
Independiente	Cantidad de inóculo	Cuantitativa	Medida en vaso precipitado (50–100 mL)
Independiente	Tiempo de proceso	Cuantitativa	Registro cada 12 h

Categoría	Variable	Tipo	Técnica de medición / control
Independiente	Temperatura	Cuantitativa	Termostato EBCHQ 58008 + pirómetro
Independiente	RPM	Cuantitativa	Lectura motor cada 12 h
Independiente	Volumen inicial	Cuantitativa	6 L (reducción a 3 L)
Dependiente	pH	Cuantitativa	Tiras MQuant®, 5 mL/12 h
Dependiente	Biomasa final	Cuantitativa	Balanza SF-400
Dependiente	Cambios sensoriales	Cualitativa	Observación directa
Interviniente	Contaminación	Controlada	Pretratamiento químico
Interviniente	Condiciones externas	Controlada	Tapa sellada y reactor cerrado

Nota: Tabla agrupando variables del proceso de estabilización.

El proceso de estabilización se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, de tipo aplicado y experimental, ya que se validó el proceso de hidrólisis enzimática para la estabilización de plumas de aves. El diseño experimental consideró factores como tiempo, pH, temperatura, dosis de inóculo y carga de material orgánico. Se utilizó un reactor batch de 8 L con un volumen de llenado del 85% equipado con impulsor, control de agitación, resistencia de calentamiento y puerto de muestreo. Se efectuó la sanitización del equipo antes de cada prueba. Posteriormente, se cargaron las plumas previamente lavadas y cortadas, el pH se ajustó de acuerdo con el nivel definido en cada tratamiento, se estabilizó la temperatura y se adicionó la enzima de *Bacillus subtilis* en la concentración establecida. El reactor se operó con agitación constante durante 72 a 120 horas con el objetivo de aumentar el tiempo ya que no se logró estabilizar el material orgánico en estas 72 horas, y se realizaron muestreos periódicos durante el proceso cada 12 horas.

Durante el proceso de estabilización previa se registraron parámetros de proceso como tiempo, pH, temperatura, viscosidad, olor, biomasa y producto final. El seguimiento se llevó a cabo en intervalos de cada 12 horas. Se emplearon equipos como termómetro, motor, ejes, aspas,

tiras indicadoras de pH, etc. Los datos recolectados fueron tabulados para determinar el efecto de los factores principales (tiempo, pH, temperatura, y dosis de inoculante microbiológico).

La investigación se ejecutó en el municipio de San Vicente de Chucurí y tuvo una duración de cuatro meses:

- **Mes 1:** montaje del reactor y pruebas.
- **Meses 2 y 3:** pruebas experimentales y muestreos.
- **Mes 4:** Interpretación estadística y elaboración del informe final.

El presente estudio corresponde a una investigación de tipo aplicada con enfoque cualitativo y experimental, orientada a evaluar la eficiencia de la hidrólisis enzimática de plumas de pollo y la estabilización previa del material orgánico en la producción de un abono orgánico continuando con el proceso a uno convencional. El proceso se llevó a cabo en un reactor fermentativo tipo batch fabricado en un tubo de 6", con capacidad de ocho litros, provisto de sistema de agitación mecánica, control de temperatura, válvula de muestreo y sensor de pH, condiciones que permitieron mantener la homogeneidad del medio y garantizar la reproducibilidad del proceso. El material orgánico utilizado estuvo compuesto por plumas de pollo, estiércol bovino, cáscara de cacao, sangre, ceniza y hueso calcinado molido, todos seleccionados por su alto contenido de nitrógeno, fósforo, potasio y compuestos orgánicos. Las plumas de pollo fueron previamente lavadas, desinfectadas y trituradas en fragmentos de uno a dos centímetros para favorecer la acción enzimática. Posteriormente, los materiales fueron pesados de acuerdo con la formulación establecida y lavados con agua destilada, alcohol al 96% y clorox al 1%.

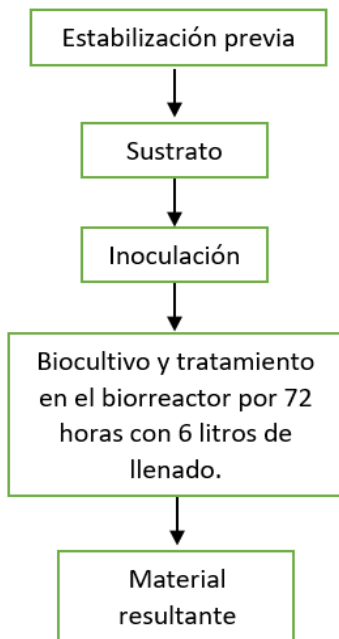
El microorganismo empleado fue *Bacillus subtilis*, una bacteria de tipo GRAS, ampliamente utilizada en procesos biotecnológicos por su alta capacidad queratinolítica y proteolítica. Este microorganismo produce la enzima queratinasa, la cual tiene la capacidad de

romper los enlaces disulfuro de la queratina, transformando las plumas en compuestos más simples como péptidos y aminoácidos solubles, fundamentales para mejorar la calidad del abono orgánico (Brandelli, 2008). El inóculo utilizado presentó una concentración de 1×10^{11} unidades formadoras de colonia por mililitro (UFC/mL), correspondiente al 10 % del volumen total del reactor, con el fin de asegurar una colonización eficiente del medio y acelerar la degradación del sustrato.

Antes de la inoculación, se hace la mezcla del medio con el agua para agregarla al biorreactor. Posteriormente, el pH estaba en el valor que corresponde al óptimo crecimiento de *Bacillus subtilis* y la máxima actividad de la enzima queratinasa. El proceso se desarrolló bajo condiciones controladas de temperatura de 45°C a 50°C y agitación constante de 60 revoluciones por minuto (rpm), lo que permitió mantener una adecuada oxigenación y homogeneidad del medio de reacción.

Figura 1

Proceso de la Estabilización Previa Resumido



Nota: Etapas del proceso de producción.

La fermentación se llevó a cabo durante 8 procesos de producción diferentes de intervalos de tiempo de 72, 84, 96, 108 y 120 horas, con el fin de evaluar la evolución del proceso en función de la degradación del material orgánico, la formación de espuma, el cambio de olor y la textura del medio. Durante este periodo, se realizaron muestreos periódicos cada doce horas para determinar el comportamiento del pH, la viscosidad, el color, y el olor. Al finalizar las 120 horas, el producto resultante se filtró y se tomaron las muestras. Como aún no es un abono orgánico sino es la estabilización previa del material orgánico, este lixiviado podría tornarse como un grave contaminante al medio ya que iniciaría con la putrefacción presentando malos olores, es por ello que para evitar esta contaminación se buscó solución a ello. Como es un material líquido lo que se obtuvo es decir un lixiviado, con este material ya desintegrado se puede utilizar como alimentación de camas de compostaje al no ser un material sólido y grande va a ser absorbido por el material del compostaje y fácilmente se hará el proceso para que todo este material se incorpore junto con la cantidad de plumas restantes.

Durante el proceso de hidrólisis y estabilización se observaron transformaciones notables en el material orgánico. Se registró una disminución progresiva del olor amoniacal, una reducción en la viscosidad y un cambio de color hacia tonos marrones oscuros, lo cual evidenció la descomposición parcial de las proteínas y el avance de la hidrólisis enzimática. Asimismo, el pH tendió a estabilizarse hacia valores neutros, indicando la reducción de compuestos volátiles y la actividad metabólica sostenida de *Bacillus subtilis*.

El reactor fermentativo tipo batch demostró ser adecuado para este tipo de procesos, ya que permitió controlar de manera precisa los parámetros de operación y facilitó el muestreo sin interferir con la fermentación. Además, su diseño cerrado evitó pérdidas de humedad y minimizó riesgos de contaminación externa, garantizando la pureza del cultivo y la estabilidad del producto

final. La combinación del control de temperatura, pH y agitación mecánica permitió optimizar la acción de la queratinasa, favoreciendo una hidrólisis eficiente y una estabilización microbiológica adecuada de los materiales orgánicos.

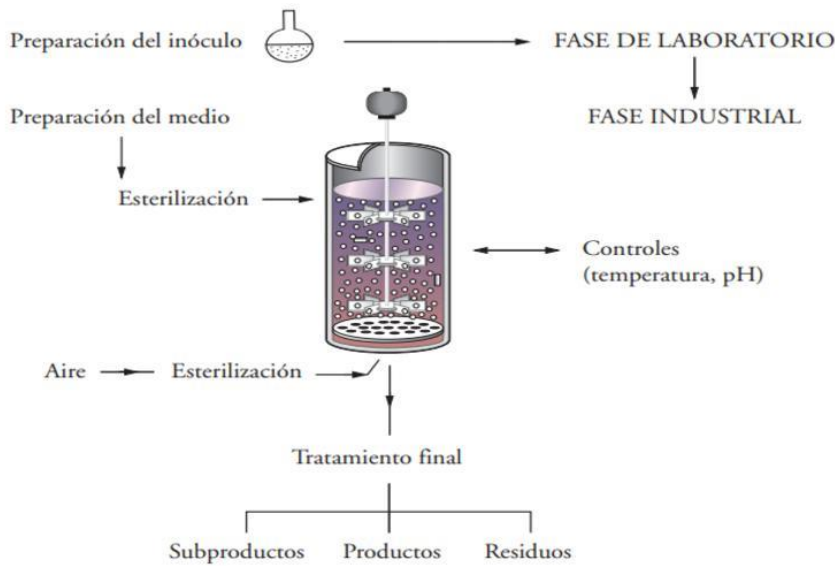
El resultado final fue un lixiviado estabilizado con alto contenido de aminoácidos, péptidos y nutrientes esenciales, cuya composición evidencia la acción sinérgica de la enzima queratinasa y la actividad metabólica de *Bacillus subtilis*. Este proceso no solo representa una alternativa sostenible para el aprovechamiento de residuos agroindustriales, sino también una contribución a la economía circular mediante la transformación de desechos orgánicos en productos de valor agregado, de acuerdo con los principios de sostenibilidad y bioeconomía promovidos por la FAO (2021).

Mes 1. Montaje del reactor y pruebas

Un proceso fermentativo comienza con la elección del agente biológico adecuado (microorganismo o enzima), continúa con la transformación de la materia prima, en condiciones que pueden exigir esterilización, aireación y control del proceso (pH, temperatura, etc.), y finaliza con la separación y purificación del producto final (Figura 2).

Figura 2

Diseño del Reactor Fermentativo para Procesos Industriales

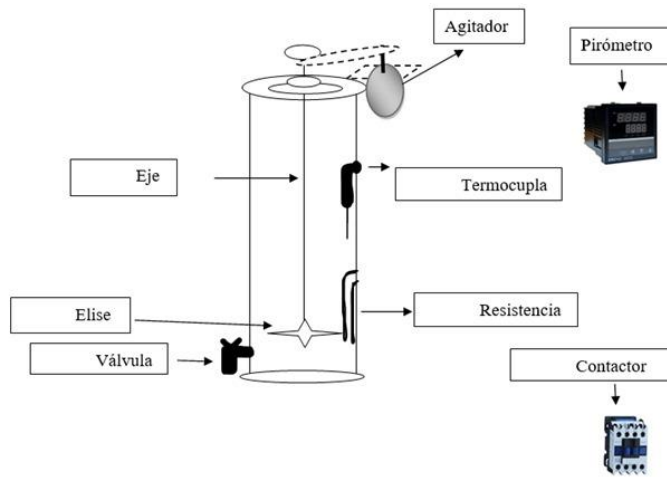


Nota: Tomado de: (Malajovich, 2012).

Durante el proceso de estabilización el reactor realizado como prueba piloto funciono con enzimas *Bacillus Subtilis* con una concentración de 1×10^{11} UFC variables/ml , siguiendo con la desinfección de la materia prima (plumas de pollo previamente lavadas con agua, clorox al 1%, agua destilada y alcohol puro al 96%), seguidamente pasamos a la preparación del medio el cual es el proceso donde se mezclan las materias primas y adiciones en cuanto a sustratos y sales, una vez listo el medio y a una temperatura de 45°C se procede a hacer la inoculación de la enzima ya que en este rango de temperatura la enzima trabaja con más fluidez y perfección, desarrollándose así en su medio. Durante este proceso de fermentación e inoculación se toman muestras para saber el pH sobre el cual se está manejando en un (rango de 6 a 7), Temperaturas de 45°C a 50°C, y en un tiempo mínimo de 48 horas; máximo de 72 a 120 horas. A continuación, se presenta el modelo de reactor fermentativo para prueba piloto.

Figura 3

Diseño del Reactor Fermentativo Tipo Batch

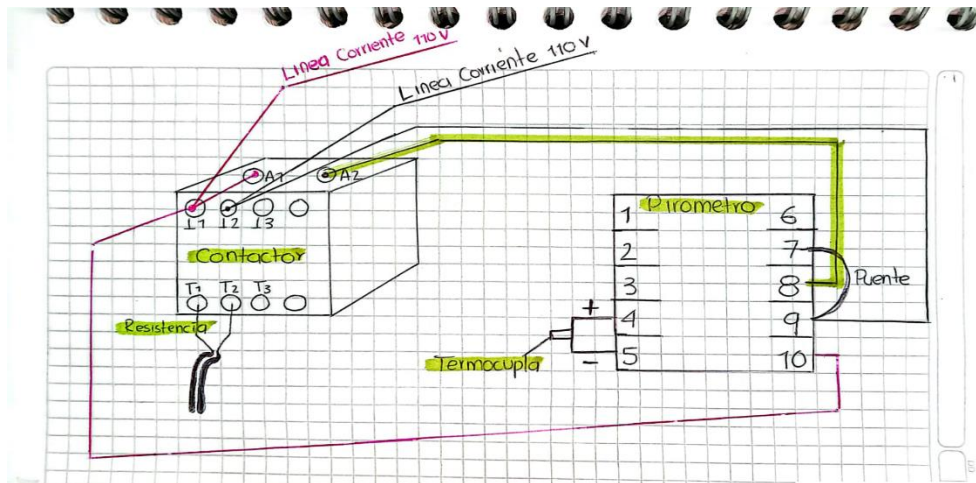


Nota: Reactor fermentativo tipo Batch que se utilizó durante el proceso de estabilización.

El proceso del diseño para la estabilización previa de las materias primas inició consiguiendo un tubo de 6” como base y unas platinas de 8” como tapas, se soldó hasta obtener una forma cilíndrica. Una vez ya lista la base se tomaron medidas para saber dónde hacer los orificios correspondientes en donde se iba a ubicar la termocupla, llave de descarga, motor con eje agitador, resistencia, etc. Una vez listo orificios se adaptaron e instalaron, se procede al siguiente paso el cual era conseguir un motor que me resistiera el tiempo de las 72 a 120 horas, se hizo el respectivo montaje en la figura 2 se muestra cómo queda, se adquiere el contactor, el pirómetro para medir la temperatura y cada uno de los demás cables que se requerían para hacerlo funcionar. Durante el proceso de instalación del pirómetro y del contactor se debe hacer el siguiente montaje para el funcionamiento completo de la resistencia:

Figura 4

Instalación del Contactor a la Termocupla, Pirómetro y Resistencia



Nota: Diagrama de la instalación.

Para medir el pH, se hace a través de las tiras medidoras de pH retirando una muestra en un vaso medidor y posteriormente introduciendo la tira para poder tomar el dato en cuanto se encuentra el pH, si hay que ajustarlo a si se encuentra en su normalidad. Cabe recalcar que al momento de hacer el montaje dentro del tubo debe estar el eje y la Elise, la cual me va a ayudar con el movimiento, la activación de las enzimas para descomposición de las plumas. Antes de iniciar con el pretratamiento las plumas ya deben estar cortadas de 1 a 2cm para que al momento del proceso sea más fácil su descomposición.

Una vez ya está todo listo y preparado se inicia con el pretratamiento de las plumas de pollo lavándolas en 6 litros de agua a una temperatura de 55°C con el 1% de clorox (peso de plumas * 1%), se dejan reposar por 20 minutos para que ella suelte las impurezas, una vez cumplido el tiempo se deben enjuagar con abundante agua hasta retirar las impurezas, añadimos agua

nuevamente pero al clima con alcohol al 96% (peso de plumas *96%), se dejan reposar 10 minutos y finalmente se lava con agua destilada (cantidad aproximada del alcohol). Se escurren y se dejan secar un poco el grado de humedad de las plumas debe ser de 60%, ya que no nos sirve ni muy secas ni muy húmedas.

Se añaden los 5 litros de agua al recipiente, y se inicia la preparación del medio el cual son las plumas, con la cantidad de cascara de cacao, estiércol bovino, sangre, hueso calcinado y ceniza.

Tabla 5

Composición de cada uno de los Procesos de Producción en el Biorreactor

Materia prima	Cantidad %	Cantidad en gr
Plumas de pollo	60%	1000 gr
Cascara de cacao	20%	200 gr
Hueso calcinado	5%	50 gr
Estiércol bovino	8%	80 gr
Sangre	5%	50 gr
Ceniza	5%	50 gr

Una vez listo el medio lo agregamos a los 5 litros de agua sellamos y encendemos la resistencia hasta que alcance una temperatura de 45°C, mientras en 1 litro de agua disolvemos 50 ml de Biosubtilis con una concentración de 1×10^{11} UFC viables/ml lo dejamos activar por 30

minutos. Una vez pasado el tiempo se retira una rosca para poder verter en el reactor el litro de enzimas ya activado, sellamos y solo queda iniciar a tomar tiempo, temperatura, y pH. Se monitorea cada 8 a 12 horas el pH, el motor debe estar entre 50 a 60 rpm. Se estima que en las siguientes producciones se va aumentando el contenido de la enzima en una proporcionalidad de 12,5 con el fin de indagar si a mayor enzima obtenemos menor tiempo de descomposición de las plumas, es decir el menor tiempo posible añadiendo más *Bacillus*.

Meses 2 y 3: Pruebas experimentales y muestreos

Se realizaron 8 pruebas experimentales o procesos de producción en los cuales se tomó evidencia de la biomasa, hora, pH, tiempo, temperatura, cantidad de inóculo, y rpm, durante la primera fase se trabajo con un tiempo de 72 horas y una cantidad de inóculo de 50 ml, donde se aumento una proporcionalidad de 12,5 en la cantidad de enzima hasta llegar a 100 ml con el fin de indagar si a mayor cantidad de inóculo se reducía el tiempo de producción ya que se lograba observar que el contenido de biomasa al final era superior al 50%. Durante la segunda fase se observó que le hacía falta tiempo al proceso de estabilización así que se aumentó el tiempo, pero no la cantidad de inóculo, el tiempo se extendió hasta 120 horas dándonos un resultado final de biomasa del 5%, es decir el 95% de biomasa se transformó.

Los diferentes tratamientos se realizaron sin réplica buscando encontrar la mejor relación en transformación del material empleado en función de la dosis de microorganismo y el tiempo de estabilización en el reactor. Se tomaron como registros los datos de cada tratamiento durante su proceso, pero no tuvieron replicación. El trabajo no cuenta con un análisis estadístico de varianza por las dificultades del tiempo del montaje en cuanto a diseño y experimentación, seguido del tiempo así mismo el costo para hacer 2 o 3 biorreactores en línea para hacer las respectivas réplicas.

2.2.7 Resultados.

Durante el proceso de estabilización de la materia realizada en un biorreactor tipo batch de 6 L.

Figura 5

Diseño del Biorreactor



Nota: Diseño del Biorreactor utilizado para llevar a cabo el proceso de estabilización.

Se evaluó la influencia del tiempo y de la cantidad de inóculo (*Bacillus subtilis*) sobre los parámetros de pH, temperatura y velocidad de agitación (rpm). Los ensayos se ejecutaron durante un período de 120 h, con mediciones a intervalos de 24 h (24, 36, 48, 72, 84, 96, 108 y 120 h).

Figura 6

Primera Estabilización en Función de pH, Temperatura, rpm y Cantidad de Inóculo

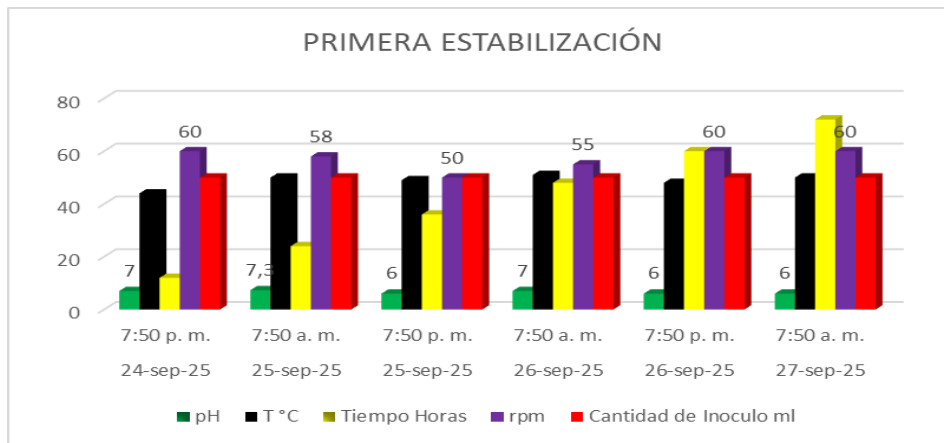


Figura 7

Segunda Estabilización en Función de pH, Temperatura, rpm y Cantidad de Inóculo

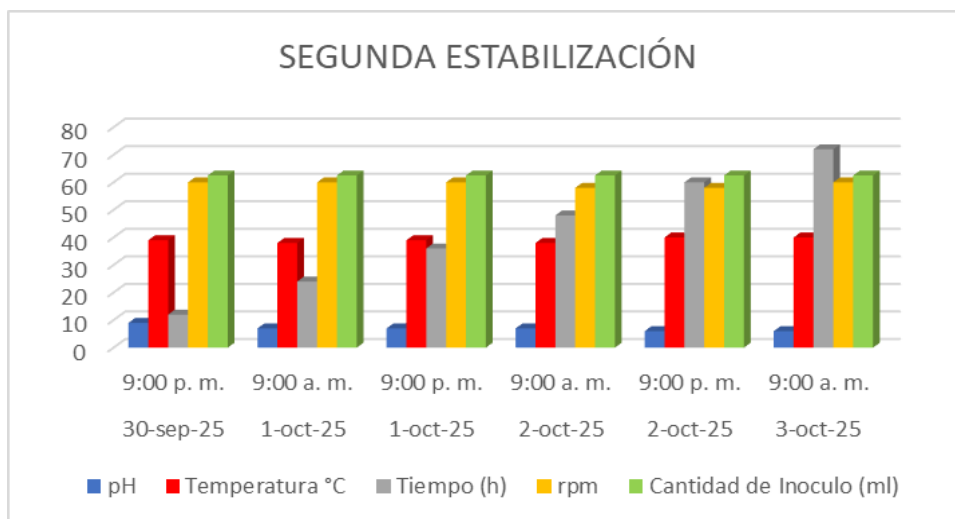


Figura 8

Tercera Estabilización en Función de pH, Temperatura, rpm y Cantidad de Inóculo

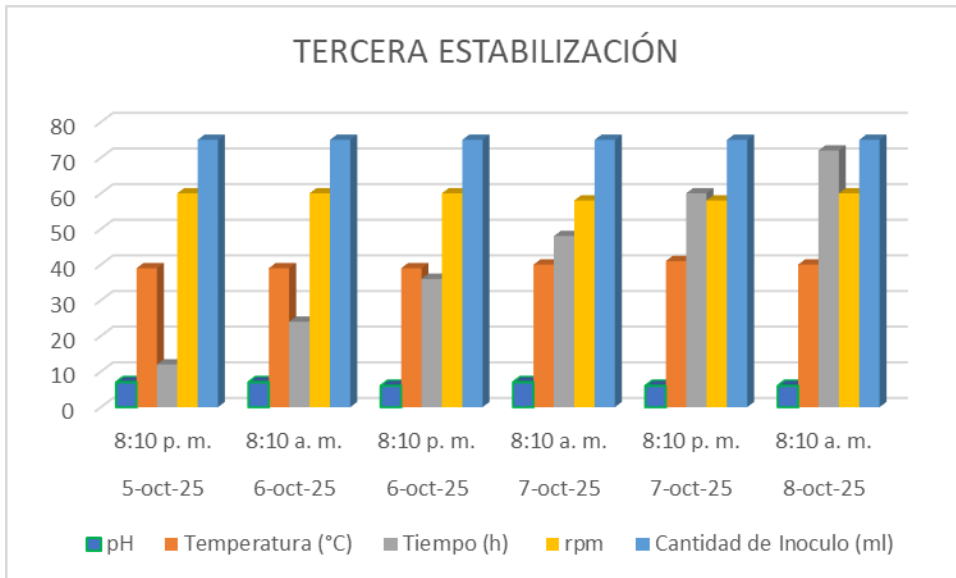


Figura 9

Cuarta Estabilización en Función de pH, Temperatura, rpm y Cantidad de Inóculo

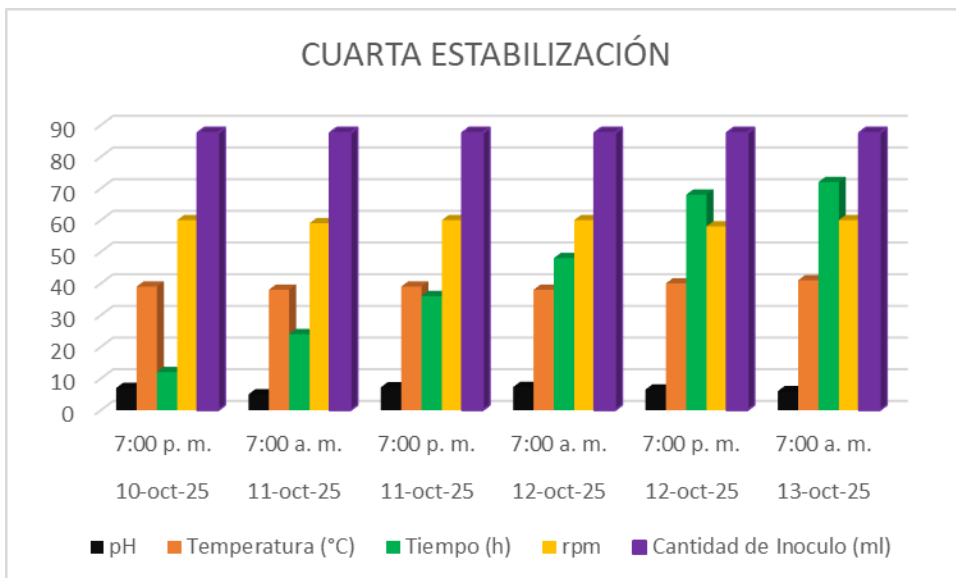


Figura 10

Quinta Estabilización en Función de pH, Temperatura, rpm y Cantidad de Inóculo

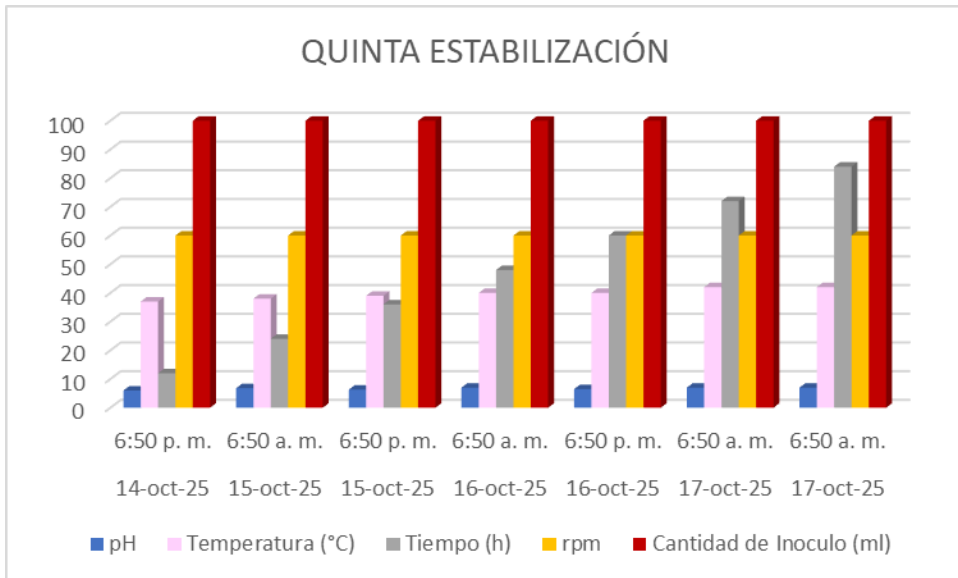


Figura 11

Sexta Estabilización en Función de pH, Temperatura, rpm y Cantidad de Inóculo

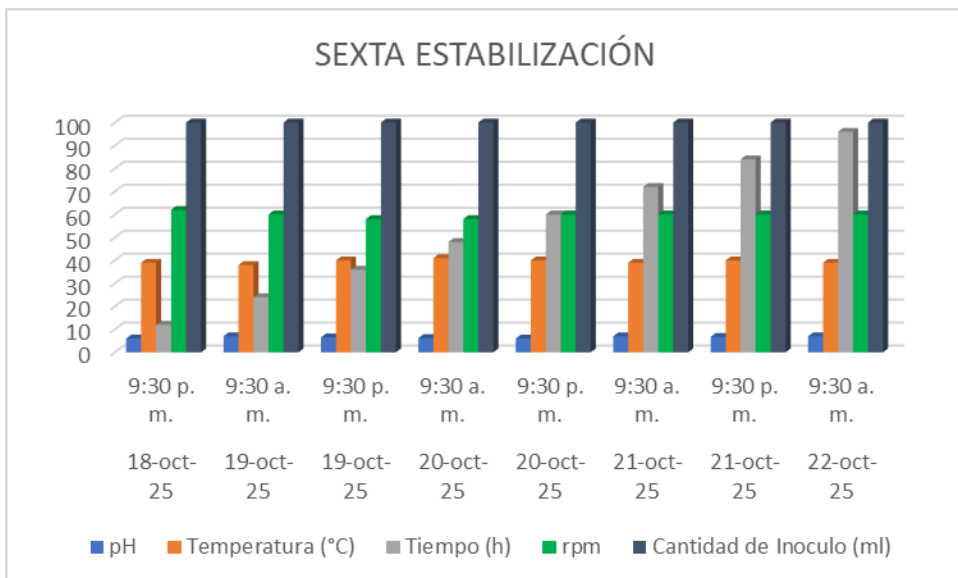


Figura 12

Séptima Estabilización en Función de pH, Temperatura, rpm y Cantidad de Inóculo

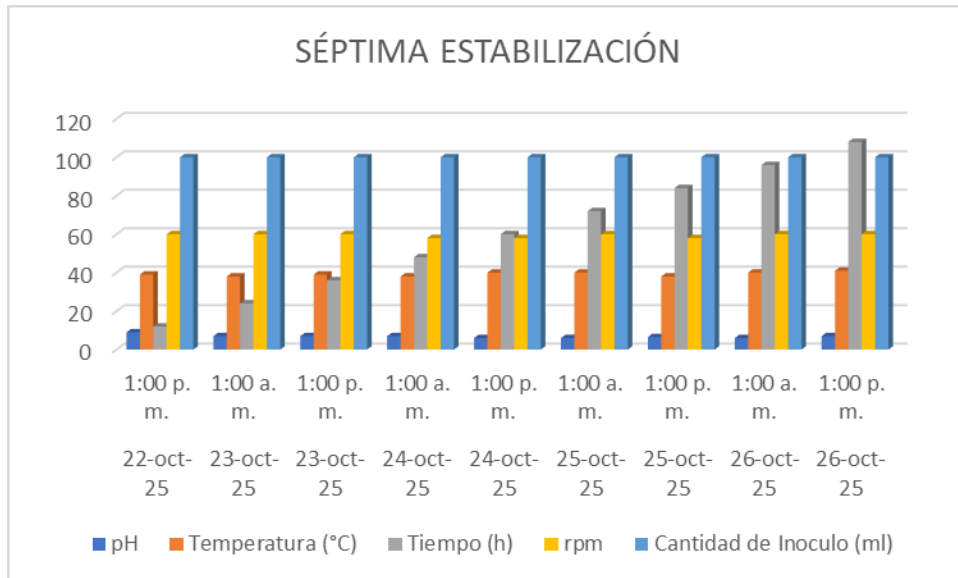
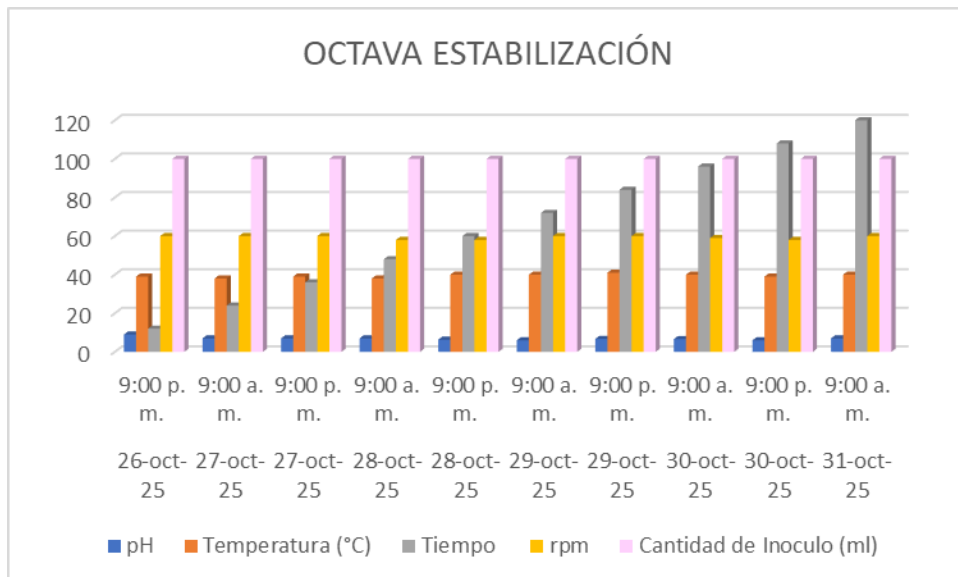


Figura 13

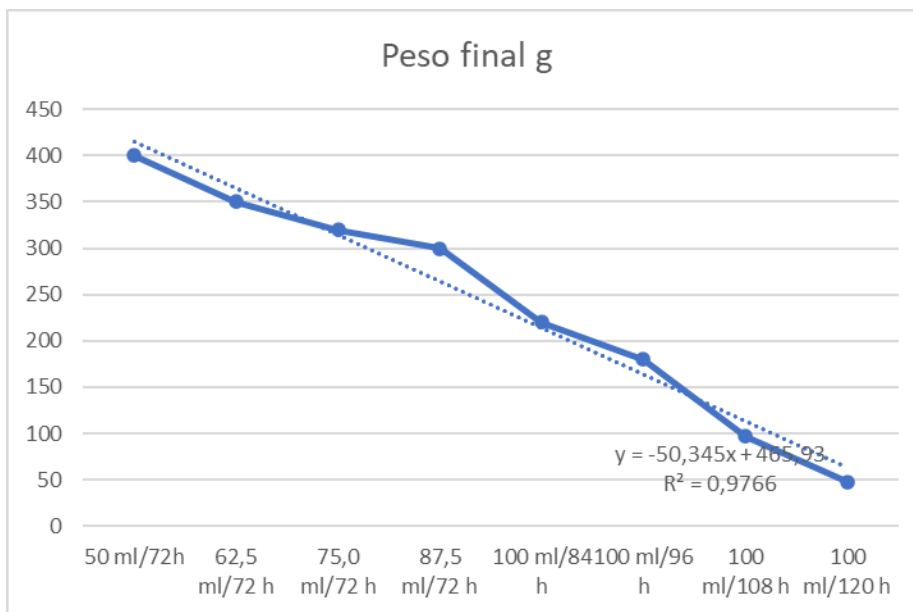
Octava Estabilización en Función de pH, Temperatura, rpm y Cantidad de Inóculo



Dado las anteriores gráficas se concluye que a cierta cantidad de materia prima con una inoculación destinada de 50 ml a 100 ml se logra obtener una estabilización de producto final del 90 al 95% con un margen de error del 5% de biomasa. Al subirle el tratamiento en tiempo se logra observar que a mayor tiempo degrada mas la materia prima y que al subirle la dosis de inoculación a 100 ml en función de tiempo no es mucho lo que logra estabilizar, se prevé que se estabiliza mejor a mayor tiempo y no a mayor inóculo. La siguiente figura muestra el nivel de reducción en función de tratamiento sobre peso final.

Figura 14

Tiempo de Proceso y en la Dosis de Inoculante que se Utilizó



El comportamiento que presenta el material estabilizado con los diferentes tratamientos se observa que es económicamente viable para mi proceso de estabilización previa con un valor de $R^2 = 0,9766$ significa que es muy bueno ósea que al repetir este tratamiento con este mismo material esa línea de tendencia va a ser la misma y muestra que la desviación de esos datos es casi perfecta

ya que el ideal es 1, así mismo se puede apreciar que el costo del tiempo de operaciones del biorreactor avanzando a 5 días continuos de producción en estabilizar el material en 120 horas.

El volumen del reactor disminuyó a 3 L de mezcla total, con una agitación controlada de 60 rpm y un rango de temperatura entre 45 y 50 °C, dependiendo del comportamiento metabólico de las bacterias. Se establecieron ocho tratamientos según la cantidad de inoculante en función del tiempo:

T1 = 50 mL/72 h

T2 = 62.5 mL/72 h

T3 = 75 mL/72h/72h

T4 = 87.5 mL/72h

T5 = 100 mL/84h

T6 = 100 mL/96h

T7 = 100 mL/108h

T8 = 100 mL/120h

Tabla 6

Cantidad de Inoculante en Función del Tiempo y la Respuesta en Temperatura

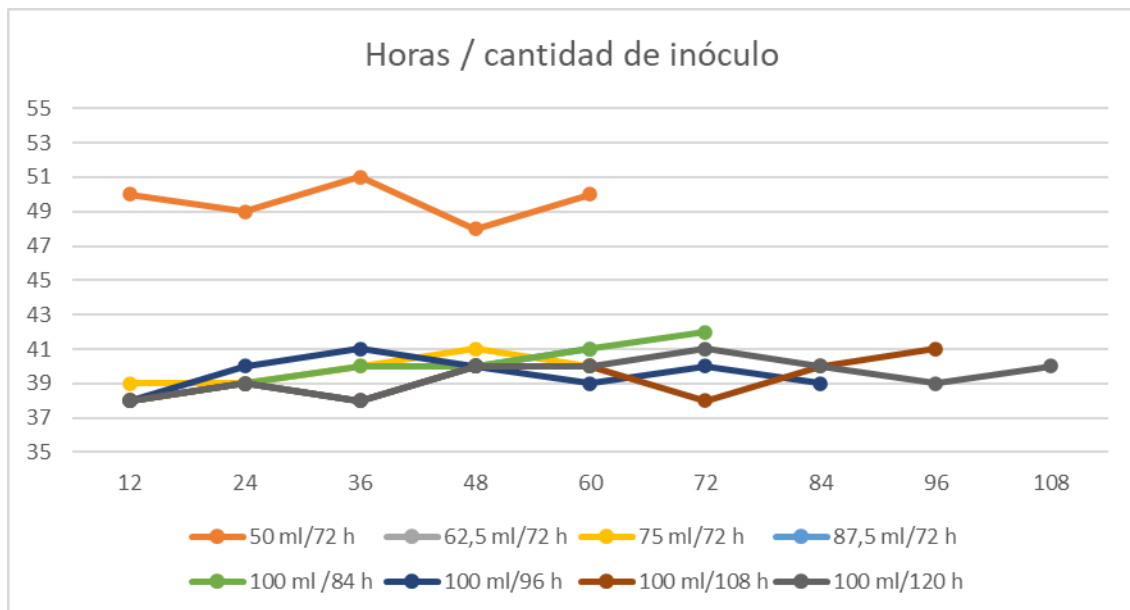
Horas	50 ml/72 h	62,5 ml/72 h	75 ml/72 h	87,5 ml/72 h	100 ml /84 h	100 ml/96 h	100 ml/108 h	100 ml/120 h
12	44	39	39	39	37	39	39	39
24	50	38	39	38	38	38	38	38
36	49	39	39	39	39	40	39	39
48	51	38	40	38	40	41	38	38
60	48	40	41	40	40	40	40	40

Horas	50 ml/72 h	62,5 ml/72 h	75 ml/72 h	87,5 ml/72 h	100 ml /84 h	100 ml/96 h	100 ml/108 h	100 ml/120 h
72	50	40	40	41	41	39	40	40
84					42	40	38	41
96						39	40	40
108							41	39
120								40
Prom	48	39	39,66	39,16	39,57	39,5	39,2	39,4

El mayor pH se obtuvo a las 24 horas del proceso de tratamiento 1 con una revolución de 60 rpm promedio de 57,16 para máximos resultados y en una temperatura promedio de 48°C en función horas sobre cantidad de inóculo.

Figura 15

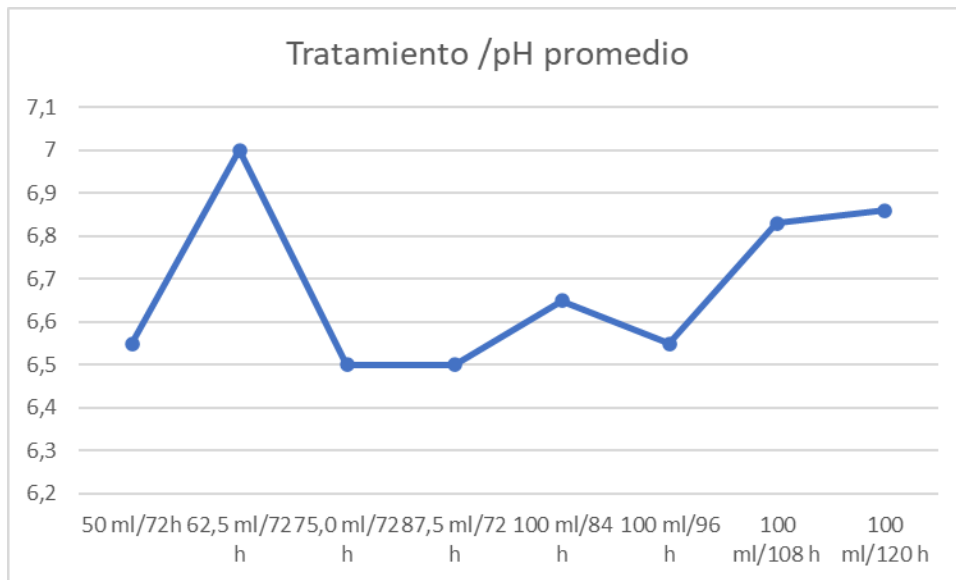
Comportamiento de la Temperatura según la Cantidad de Inoculante y el Tiempo de Proceso



Las curvas obtenidas mostraron una tendencia general de **disminución del pH** durante las primeras 48–72 h, lo que indica una etapa activa de descomposición proteica y liberación de aminoácidos. Posteriormente, el pH tendió a estabilizarse en torno a valores neutros (6.8 – 7.2) debido al equilibrio entre la actividad enzimática y la formación de compuestos amoniacales por parte de *Bacillus subtilis*.

Figura 16

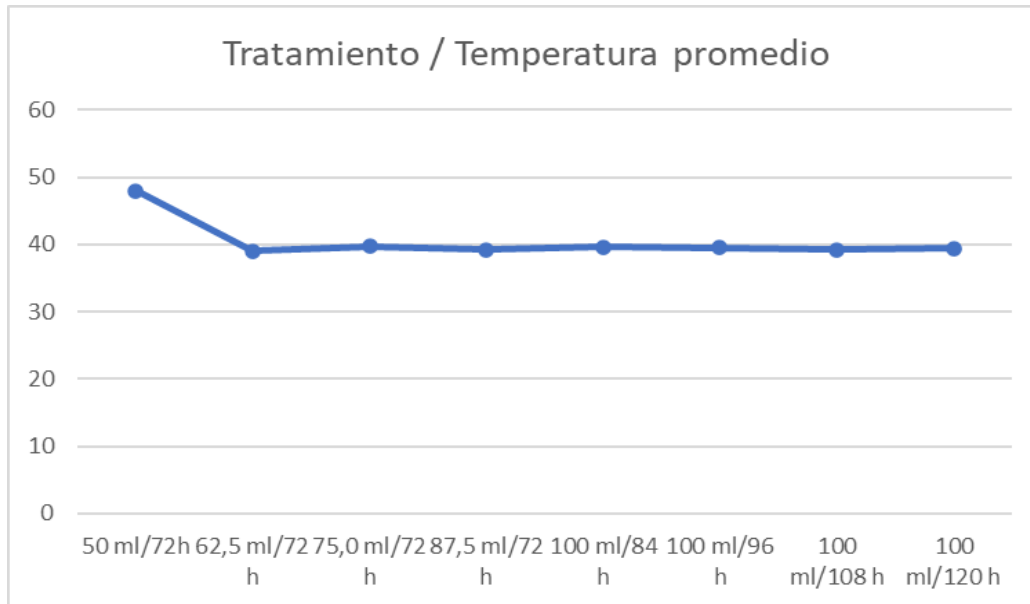
Tratamiento en Función del pH Promedio



En cuanto a la **temperatura**, se observó un aumento moderado durante las primeras 72 h, alcanzando el rango óptimo de reacción (50–52 °C), seguido de una ligera disminución y estabilización hacia las 72 h, correspondiente al punto de máxima actividad enzimática y de hidrólisis visible de las plumas.

Figura 17

Tratamiento en Función de la Temperatura Promedio



El tratamiento con **100 ml/120h (T8)** y con un promedio de **39,4** mostró los mejores resultados en cuanto a eficiencia de degradación y homogeneidad del lixiviado resultante, con una reducción significativa de la textura fibrosa del 95% de biomasa y aumento de la turbidez, lo que evidencia una mayor liberación de proteínas solubles.

Para evaluar la eficiencia del proceso de hidrólisis enzimática de las plumas de pollo utilizando *Bacillus subtilis*, se realizó el registro de la biomasa final obtenida en cada tratamiento, partiendo siempre de una **biomasa inicial constante de 1 kg de plumas** como materia prima. Esta masa correspondió exclusivamente al sustrato proteico de origen aviar, independiente del resto de los componentes orgánicos secundarios que, en conjunto, sumaban 1430 g. Sin embargo, la degradación registrada correspondió exclusivamente a la fracción de plumas sometida al proceso de descomposición biotecnológica dentro del biorreactor.

El seguimiento de la biomasa permitió establecer el grado de degradación asociada al crecimiento metabólico de *Bacillus subtilis*. La cuantificación de la biomasa remanente se llevó a cabo al finalizar cada uno de los tratamientos, posterior al proceso de filtración del material por medio de papel filtro, donde se separaron los sólidos residuales del lixiviado. Las mediciones se realizaron empleando una gramera digital SF-400, con una precisión de dos dígitos, garantizando confiabilidad en los datos obtenidos.

Los resultados evidenciaron que el proceso de hidrólisis enzimática generó reducciones significativas en la masa de plumas, lo que confirma la acción queratinolítica del microorganismo y la eficacia del sistema controlado dentro del biorreactor. Los valores finales de biomasa obtenidos para cada tratamiento fueron los siguientes:

- **Tratamiento 1:** la biomasa se redujo de 1 kg a **400 g**.
- **Tratamiento 2:** la biomasa pasó de 1 kg a **350 g**.
- **Tratamiento 3:** la biomasa descendió a **320 g**.
- **Tratamiento 4:** se obtuvo una biomasa final de **300 g**.
- **Tratamiento 5:** la masa residual fue de **220 g**.
- **Tratamiento 6:** se registraron **180 g** de biomasa final.
- **Tratamiento 7:** la biomasa disminuyó notablemente hasta **97 g**.
- **Tratamiento 8:** se alcanzó el mayor nivel de degradación, con un residual de solo **48 g**.
-

Estos valores demuestran la relación directa entre el tiempo de tratamiento, la dosis de inóculo y la eficiencia de degradación, observándose una tendencia decreciente en la biomasa final conforme aumentaba el tiempo del proceso y la disponibilidad enzimática efectiva. De esta manera, la metodología permitió establecer con precisión los niveles de reducción de la materia

prima, aportando información clave para la determinación de la capacidad hidrolítica del sistema y para la optimización de futuros procesos de estabilización de plumas mediante biotecnología aplicada.

Finalmente presentaremos el resultado final de lo que inició de materia orgánica y lo que quedó de biomasa final.

Figura 18

Biomasa Inicial Sobre Biomasa Final



Nota: Peso de la biomasa inicial y biomasa final.

2.2.7.1 Discusión.

Durante la fase experimental del proceso de hidrólisis enzimática de plumas de pollo utilizando *Bacillus subtilis*, se decidió no llenar completamente el reactor (capacidad total de 8 litros), sino trabajar con un volumen útil de 6 litros. Esta decisión responde a criterios técnicos y

de seguridad operacional propios de los sistemas tipo batch. En primer lugar, dejar un espacio libre equivalente al 20–25% del volumen total del reactor permite un mejor control del proceso biotecnológico, ya que:

1. **Evita el sobrellenado y posibles desbordamientos.**

Durante la agitación mecánica y la generación de gases (por actividad microbiana o reacción química), el medio puede aumentar su volumen o producir espuma. El espacio libre evita derrames y protege los componentes eléctricos (motor, eje y sensores).

2. **Facilita una mezcla más homogénea.**

Al no trabajar al 100% de la capacidad, el impulsor puede mantener una distribución eficiente de la temperatura y la enzima, garantizando un contacto uniforme entre las plumas, el medio líquido y el biocatalizador.

3. **Mejora la transferencia de oxígeno y la aireación.**

Aunque el proceso es principalmente enzimático, la presencia de *Bacillus subtilis* requiere un mínimo de oxígeno disuelto para mantener su metabolismo activo. El espacio libre permite una mejor circulación del aire dentro del reactor.

4. **Permite la expansión térmica del líquido.**

Al alcanzar temperaturas de 45–55 °C, el líquido tiende a expandirse; si el reactor está completamente lleno, podría generar sobrepresión o afectar los sensores de temperatura y pH.

Por estas razones, el volumen operativo óptimo para este sistema se determinó en 6 litros, lo cual representa el equilibrio entre la eficiencia de mezcla, la estabilidad térmica, la seguridad del equipo y el correcto desarrollo del proceso de hidrólisis. El llenado parcial del reactor no limita

la capacidad productiva, sino que optimiza las condiciones de operación, asegurando un desempeño estable y confiable del proceso enzimático.

El proceso de estabilización previo de la materia prima en este caso, las plumas de pollo constituyen una etapa fundamental dentro de la producción del abono orgánico. Las plumas representan un residuo agroindustrial con alto contenido de queratina (alrededor del 90 % de su estructura proteica), cuya degradación natural es lenta debido a la rigidez de sus enlaces disulfuro. En este sentido, la aplicación de un proceso biotecnológico mediante hidrólisis enzimática con *Bacillus subtilis* permitió acelerar la descomposición del material, transformándolo en un sustrato orgánico más estable, rico en nitrógeno y fácilmente asimilable para los cultivos.

Durante la fase de estabilización, se observó que la efectividad del proceso estuvo determinada por el tiempo de reacción, la temperatura de operación, el pH del medio y la cantidad de inóculo empleado. En los tratamientos realizados entre 72 y 120 horas, el material mostró una degradación progresiva, evidenciada por el cambio de color de blanco a marrón terroso, disminución del volumen de biomasa y reducción de la presencia de plumas intactas. A medida que el tiempo de operación aumentó, la acción de las enzimas queratinasas liberadas por *Bacillus subtilis* intensificó la ruptura de las cadenas polipeptídicas, favoreciendo la obtención de una biomasa homogénea y sin olor putrefacto, lo que indicó una adecuada estabilización del sustrato.

El biorreactor tipo batch empleado resultó idóneo para controlar las variables del proceso, permitiendo la inoculación de cepas bajo condiciones de temperatura y agitación constantes, lo que mejoró la eficiencia del contacto entre el microorganismo y la materia orgánica. Este tipo de reactor, además de su simplicidad operativa y bajo costo, facilitó la toma de muestras periódicas para la evaluación de los parámetros de pH, temperatura y contenido de biomasa. En comparación

con otros sistemas continuos, el batch garantizó una mayor trazabilidad del proceso, indispensable en etapas piloto de investigación aplicada.

3. Conclusiones

El proceso biotecnológico de estabilización implementado mediante la cepa de *Bacillus subtilis* demostró ser una alternativa altamente eficiente para la degradación controlada de la queratina de las plumas de pollo. El resultado fue la generación de un lixiviado con características fisicoquímicas idóneas para su posterior aplicación agrícola, validando la continuidad del proceso con técnicas de compostaje convencional.

El biorreactor tipo batch se estableció como un modelo operativo viable para la producción a pequeña y mediana escala facilitando la determinación y el control de las condiciones óptimas de operación.

La inoculación de *Bacillus subtilis* a una concentración de 1×10^{11} UFC viables/ml fue crítica para la eficiencia del proceso de estabilización. Esta concentración permitió alcanzar una transformación del material para alcanzar una transformación de biomasa del 95%, resultando en una biomasa final residual de solo el 5%.

Los tiempos de estabilización en el rango de 96 a 120 horas evidenciaron la máxima transformación del material, logrando una biomasa homogénea, libre de olores objetables y con una coloración terrosa que indica la adecuada estabilización del producto.

La incorporación estratégica de subproductos vegetales y animales al sustrato inicial fortaleció la composición nutricional del producto final, promoviendo la valorización integral de residuos agroindustriales locales. El modelo de pretratamiento biotecnológico (estabilización) en continuidad con un proceso de compostaje convencional implementado en San Vicente de Chucurí, representa un modelo replicable de economía circular. Este integra eficazmente la

innovación biotecnológica, el aprovechamiento sostenible de residuos y el fortalecimiento del sector agroindustrial local.

4. Recomendaciones

El material resultante del pretratamiento biotecnológico, al poseer aun altos niveles de proteína residual, requiere una estabilización secundaria para mitigar la potencial liberación de impuestos volátiles y olores objetables, garantizando la seguridad ambiental del proceso. Para ello se justifica la continuidad del proceso convencional de compostaje implementando una estructura de troja.

En procesos convencionales de degradación biológica el tiempo de estabilización suele oscilar entre 60 y 120 días variando en función de las condiciones operativas. Durante esta etapa, la materia orgánica experimenta una pérdida gradual de masa y humedad, concurrente con un incremento en la concentración de nutrientes disponibles (N, P, K). La estabilización se considera completa cuando el material alcanza las siguientes características: color oscuro y uniforme, olor a tierra húmeda (terroso), temperatura similar a la del ambiente y ausencia de compuestos volátiles o amoniacales.

Para validar la significancia estadística de los tratamientos más promisorios, se recomienda aplicar un análisis de varianza (ANOVA). Específicamente los tratamientos T7 y T8, identificados como los más eficientes, deben ser replicados mínimamente 3 o 4 veces. Esta replicación es esencial para garantizar la robustez de los resultados, verificar su efectividad, y determinar las diferencias significativas a nivel estadístico en el desempeño del proceso.

Finalmente, es imperativo realizar pruebas de madurez y calidad agronómica del producto final, utilizando parámetros estandarizados como la relación Carbono/Nitrógeno (C/N), el pH, la conductividad eléctrica (CE) y el contenido de nutrientes (macro y micronutrientes).

Un abono orgánico de calidad y estabilidad comprobada debe cumplir con:

- Relación C/N inferior a 20
- pH neutro o ligeramente alcalino
- Niveles equilibrados de nutrientes.

Adicionalmente se debe asegurar que el producto esté exento de metales pesados, fitotoxinas y agentes patógenos, lo cual es fundamental para garantizar para asegurar su uso seguro y sostenible en sistemas agrícolas.

La aplicación rigurosa de estas recomendaciones permite optimizar la eficiencia del proceso de estabilización, mejorar la calidad agronómica del abono y promover la valorización integral de residuos agroindustriales. Este enfoque se alinea con los principios de economía circular, sostenibilidad ambiental y agricultura regenerativa, consolidando un modelo viable para el aprovechamiento de las plumas de pollo.

Referencias Bibliográficas

- Abeer Hashem, B. T. (septiembre de 2019). *ScienceDirect*. Obtenido de ScienceDirect:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1319562X19300890?via%3Dihub>
- Agronet*. (20 de Abril de 2020). Obtenido de Agronet:
<https://www.agronet.gov.co/Noticias/Paginas/Plumas-de-pollo,-alternativa-para-alimentar-animales.aspx>
- Agronet*. (24 de Enero de 2022). Obtenido de Agronet:
<https://www.agronet.gov.co/Noticias/Paginas/Abonos-org%C3%A1nicos,-aliados-de-la-agricultura-sostenible.aspx>
- Agrosavia*. (2018). Obtenido de Agrosavia: <https://www.agrosavia.co/productos-y-servicios/oferta-tecnol%C3%B3gica/1%C3%ADnea-agr%C3%ADcola/cultivos-transitorios-y-agroindustriales/servicios-de-laboratorio/360-an%C3%A1lisis-microbiol%C3%B3gico-de-abonos-org%C3%A1nicos>
- Bioestimulantes agrícolas*. (s.f.). Obtenido de Bioestimulantes agrícolas:
<https://www.bioestimulantesagricolas.net/el-bacillus-subtilis-en-biofertilizacion/>
- Brandelli, A. (29 de septiembre de 2007). *ScienceDirect*. Obtenido de <https://link.springer.com/article/10.1007/s11947-007-0025-y>
- Brandelli, A. (29 de Septiembre de 2007). *SPRINGER NATURE Link*. Obtenido de SPRINGER NATURE Link: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11947-007-0025-y>
- Brandelli, A. (29 de Septiembre de 2008). Queratinasas bacterianas: enzimas útiles para el bioprocesamiento de residuos agroindustriales y más allá. *SPRINGER NATURE LINK*, págs. 105-116.

Cheng-gang Cai, B.-g. L.-d. (9 de Enero de 2008). *NIH National Library of Medicine*. Obtenido de NIH National Library of Medicine: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC2170470/>

Corrales LC, A. Z. (2014). Solubilización de fosfatos: una función microbiana importante en el desarrollo vegetal. *ESTRELLA NUEVA*, págs. 67-79.

D, J. (23 de febrero de 2016). *Pontificia Universidad Javeriana*. Obtenido de Pontificia Universidad Javeriana: <http://www.javeriana.edu.co/biblos/tesis/ciencias/tesis14.pdf>

FAO. (s.f.). Producción de desechos de matanza en los mataderos colombianos. *Tratamiento y Utilización de Residuo de Origen Animal, Pesquero y Alimenticio en la Alimentación Animal*, 82- 265.

Flores A, R. R. (2009). *Rev Ciencia cierta*. Obtenido de Rev Ciencia cierta: <http://www.posgradoeinvestigacion.uadec.mx/cienciacierta/CC19>

Geanina, M.-L. B.-C.-G.-R. (15). Queratina a partir de la hidrólisis enzimática de harina de plumas de pollo, utilizando queratinasas producidas por *Bacillus subtilis*. *Ciencia UNEMI*, 2-10.

grupoIñesta. (2024). Obtenido de grupoIñesta: <https://grupoinesta.com/abonos-para/platanos/#:~:text=El%20mejor%20abono%20de%20pl%C3%A1tano,la%20primera%20etapa%20del%20desarrollo.>

H, U. (25 de febrero de 2016). Beneficios de la Fijación Simbiótica de Nitrógeno en Chile. págs. 133-150.

Hena, S. (2018). Capítulo seis - Biorreactor de membrana para la eliminación de productos farmacéuticos y de cuidado personal de aguas residuales. *ELSEVIER*.

ICA. (2004). Obtenido de ICA.

Investiga Agencia CyT UNLP. (s.f.). Obtenido de *Investiga Agencia CyT UNLP*:
<https://unlp.edu.ar/investiga/cienciaenaccion/con-desechos-de-plumas-de-la-industria-avicola-buscan-crear-detergentes-para-ropa-17523-22523/>

Investiga Agencia CyT UNLP. (s.f.). Obtenido de
<https://unlp.edu.ar/investiga/cienciaenaccion/con-desechos-de-plumas-de-la-industria-avicola-buscan-crear-detergentes-para-ropa-17523-22523/>

Lilibeth Viloría Sierra¹, M. P. (2019). EVALUACIÓN DE LA HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA DE PLUMAS DE POLLO PARA LA OBTENCIÓN DE QUERATINA. *Revistas el poli.*

Lucas André Dedavid e Silva, A. J. (Diciembre de 2014). *ResearchGate*. Obtenido de ResearchGate:
https://www.researchgate.net/publication/272977897_Production_of_keratinase_by_Bacillus_subtilis_S14

Lucía Constanza Corrales-Ramírez MSc, L. C.-L.-M.-R.-T. (Junio de 2017). *SCIELO*. Obtenido de SCIELO: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-24702017000100046

M. Ramakrishna Reddy, K. S. (2017). Degradación efectiva de plumas y producción de queratinasas por *Bacillus pumilus* GRK para su aplicación como aditivo biodetergente. *ScienceDirect.*

Mlajovich, M. A. (2012). *Biotecnología*. Bernal: Universidad Nacional de Quilmes.

Mohamed A. Hassan, D. A.-F. (2020). Conocimientos completos sobre las queratinasas microbianas y su implicación en diversos sectores biotecnológicos e industriales: una revisión. *ScienceDirect.*

NCBI Taxonomy Browser. (18 de Noviembre de 2025). Obtenido de NCBI Taxonomy Browser:

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/Taxonomy/Browser/wwwtax.cgi?id=1423>

Nonso E Nnolim, C. C. (18 de Diciembre de 2020). *NIH National Library of Medicine*. Obtenido

de NIH National Library of Medicine:

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7775373/>

Nonso E Nnolim+, C. C. (18 de Diciembre de 2020). Obtenido de

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7775373/>

Nutrientes necesarios en la producción de cacao. (2021). *GRANDSUR, ecuador*.

ONU. (septiembre de 2015). Obtenido de ONU: <http://www.scielo.org.co/http.www.un.org>

por Nely de Almeida Pedrosa, C. J. (2022). Hidrólisis secuencial de plumas de pollo mediante

ultrasonidos y pasos enzimáticos: una fuente de proteína mejorada con péptidos bioactivos.

MDPI.

Ramnani, R. G. (2006). *Sprinkger Nature Link*. Obtenido de Sprinkger Nature Link:

<https://doi.org/10.1007/s00253-005-0239-8>

Reactor de membrana. (s.f.). *ScienceDirect*.

Romero L, F. E. (s.f.). Obtenido de chrome-

extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://smbb.mx/congresos%20smbb/vera

cruz01/TRABAJOS/AREA_V/CV-38.pdf

Salazar-Posada, C. L.-P.-S. (2012). Scielo. *Revista Lasallista de Investigación*. Obtenido de

Scielo.

Stanbury, P. F. (2017). *ScienceDirect*. Obtenido de

[https://www.sciencedirect.com/book/9780080999531/principles-of-fermentation-](https://www.sciencedirect.com/book/9780080999531/principles-of-fermentation-technology)

[technology](https://www.sciencedirect.com/book/9780080999531/principles-of-fermentation-technology)

Taha I. Zaghoul, A. M. (2011). Biodegradación de residuos de plumas de pollo dirigida por células recombinantes de *Bacillus subtilis* : Ampliación en un fermentador a escala de laboratorio. *ScienceDirect*.

Taha I. Zaghoul, A. M. (2011). Biodegradación de residuos de plumas de pollo dirigida por células recombinantes de *Bacillus subtilis* : Ampliación en un fermentador a escala de laboratorio. *ScienceDirect*.

Tamrat Tesfaye, B. S. (20 de Octubre de 2017). *SPRINGER NATURE Link*. Obtenido de SPRINGER NATURE Link: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10098-017-1443-9>
Taxonomy Browser. (18 de Noviembre de 2025). Obtenido de Taxonomy Browser: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/Taxonomy/Browser/wwwtax.cgi?id=1423>

Yuhong Lai, X. W. (4 de Abril de 2023). *NIH National Library of Medicine*. Obtenido de NIH National Library of Medicine: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10071666/>

Apéndice

Apéndice A

El Biorreactor y sus Partes



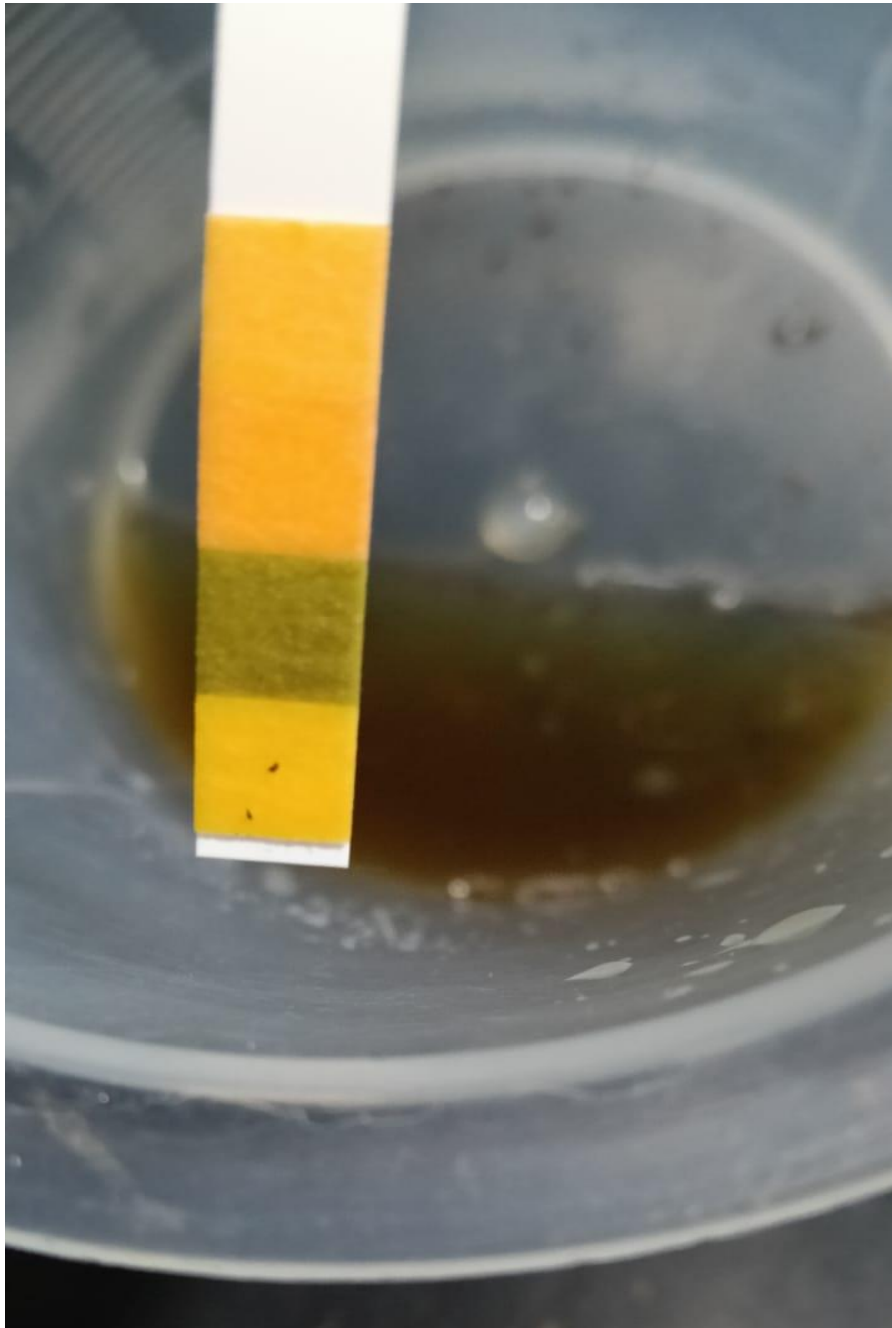
Apéndice B

Las Plumas de Aves-Materia Prima



Apéndice C

Medición de pH



Apéndice D

Biomasa del Proceso

