



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE ÁLAMO TEMAPACHE

TESIS PROFESIONAL

NOMBRE DEL PROYECTO

**“DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE UN SISTEMA
PRODUCTIVO DE ALIMENTO PARA GANADO BOVINO.”**

PRESENTA

Raul Cruz Cardenas

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO INDUSTRIAL

ASESOR

M.I.I. Cenia Edith Hernandez San Juan

XOYOTITLA, ÁLAMO TEMAPACHE, VER. 28 Agosto 2026



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE ÁLAMO TEMAPACHE DEDICATORIA

En primer lugar, quiero dedicar este gran logro a Dios, porque fue quien me dio la calma y la paciencia para aguantar la exigencia de esta carrera. Agradezco esa perseverancia necesaria para no rendirme frente a los retos y los problemas que surgieron durante mi formación. Hubo momentos donde la presión parecía demasiada; sin embargo, nunca me di por vencido y logré corregir lo que estaba mal para poder sacar este proyecto adelante.

A mis padres. Ustedes fueron mi pilar durante estos años de universidad. Este logro no es solo un trámite, sino el resultado de su esfuerzo diario, de sus sacrificios silenciosos y de creer en mí cuando yo mismo dudaba. Gracias por enseñarme y por corregirme el rumbo cuando me equivocaba. Gracias por estar ahí, apoyándome y escuchándome cada noche en vela, cada corrección a la tesis y cada página escrita llevan sus consejos y su paciencia. Este título de ingeniería es tan suyo como mío.



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE ÁLAMO TEMAPACHE AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer primero a mi Dios, por darme la resistencia y la paciencia para no doblarme en el camino. Más que cumplir con una fórmula de cortesía, dedico esto a Él porque su apoyo se tradujo en la calma exacta que necesité para resolver los retos de la carrera y del día a día, permitiéndome cerrar esta etapa universitaria con paso firme.

Al Instituto Tecnológico Superior de Álamo Temapache. Gracias por ser el espacio donde dejé de ser estudiante para empezar a formarme como ingeniero. Valoro enormemente que la institución me haya permitido realizar mis residencias profesionales dentro de las mismas instalaciones; los laboratorios y áreas de trabajo dejaron de ser simples aulas y se convirtieron en el entorno real donde entendí el verdadero peso de la responsabilidad y el compromiso laboral.

Un agradecimiento profundo a mis asesores, la Ing. Cenía Edith Hernández San Juan y el Ing. Odilón Lara Hernández. Su guía fue el motor para que esta investigación tomara forma. Más allá de revisar documentos por cumplir, compartieron su experiencia con una paciencia y generosidad enormes. Cada una de sus correcciones me obligó a ser más meticuloso y a desarrollar un verdadero criterio analítico. Gracias por cuestionarme, por corregir el rumbo cuando los datos no cuadraban y por confiar en que tenía la capacidad

A mis padres, les dedico este logro con todo mi amor, respeto y admiración. Ustedes han sido mi soporte durante todos estos años de carrera; su sacrificio, sus consejos y su fe inquebrantable en mí son la razón por la que hoy puedo decir que he cumplido este objetivo. Gracias por enseñarme que con esfuerzo y dedicación todo es posible, y por ser el refugio seguro al que siempre pude volver tras las largas jornadas de estudio. Este título es tan suyo como mío.



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE ÁLAMO TEMAPACHE

RESUMEN

La ganadería en la región Huasteca de Veracruz experimento un serio problema de rentabilidad porque durante los últimos años de sequías se redujo la disponibilidad de forraje verde y aumentó el costo del alimento comercial. El objetivo de esta investigación fue estandarizar la producción del suplemento alimenticio bovino a base de nopal (*Opuntia ficus-indica*), maíz y gallinaza, mediante la distribución física de la planta, la alineación regulatoria y convertir la producción en Álamo Temapache, Veracruz, en un proyecto técnico e industrial. La metodología involucró la selección de los insumos regionales para su formulación (55% de nopal deshidratado, 25% de maíz molido y 20% de gallinaza), la caracterización operativa de sus procesos basada en un Diagrama de Operaciones de Proceso de 22 actividades de trabajo bajo ASME, y el diseño de una microplanta de procesamiento de 2,400 m² utilizando el enfoque de Planificación Sistemática de Distribución con el flujo unidireccional en U. Las pruebas de laboratorio del lote piloto confirmaron la calidad bromatológica del producto con un porcentaje de humedad del 11.74% (que está por debajo del nivel crítico del 12.00% para la estabilidad microbiológica), un pH de 8.59, cenizas al 12.57%, extracto etéreo al 0.59%, concentración mineral de 375 ppm de potasio y fosfato soluble, y una disminución de la absorbancia de azúcares de 1.134 por el método DNS (método DNS). También se aseguró la bioseguridad aislando el Área de Tratamiento de Residuos (156 m²) y cumpliendo con la NOM-012-SAG/ZOO-2020 para la contaminación cruzada y la NOM-060-ZOO-1999 para la bioseguridad.

Palabras Clave: Ganadería, suplemento, bovino, bromatológico, ASME, Layout, bioseguridad.



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE ÁLAMO TEMAPACHE

ABSTRACT

Cattle farming in the Huasteca region of Veracruz experienced a severe profitability crisis due to recent droughts that reduced green forage availability and increased commercial feed costs. The objective of this research was to standardize the production of a bovine nutritional supplement based on prickly pear cactus (*Opuntia ficus-indica*), corn, and poultry litter through physical plant layout and regulatory alignment, transforming production in Álamo Temapache, Veracruz, into a technical and industrial project. The methodology involved the selection of regional raw materials for its formulation (55% dehydrated prickly pear, 25% ground corn, and 20% poultry litter), the operational characterization of its processes based on an ASME-standard Process Operations Diagram comprising 22 work activities, and the design of a 2,400 m² processing microplant using the Systematic Layout Planning (SLP) approach with a U-shaped unidirectional flow. Pilot batch laboratory tests confirmed the bromatological quality of the product, yielding a moisture content of 11.74% (below the 12.00% critical threshold for microbiological stability), a pH of 8.59, 12.57% ash, 0.59% ether extract, a mineral concentration of 375 ppm of potassium and soluble phosphate, and a reducing sugar absorbance of 1.134 using the DNS method. Biosecurity was also ensured by isolating the Waste Treatment Area (156 m²) and complying with official standards NOM-012-SAG/ZOO-2020 for cross-contamination and NOM-060-ZOO-1999 for biosecurity.

Keywords: Cattle Farming, supplement, Cattle, proximate análisis, ASME, Layout, biosecurity.



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE ÁLAMO TEMAPACHE

ÍNDICE

DEDICATORIA.....	II
AGRADECIMIENTO	III
RESUMEN	IV
I. GENERALIDADES DEL PROYECTO	8
1.1 Introducción	8
1.2 Justificación	10
1.3 Hipótesis	10
1.4 Objetivos.....	11
II MARCO TEÓRICO.....	12
2.1. Dinámica nutricional del ganado bovino ante el estiaje regional	12
2.2. Contribución nutricional de las materias primas locales.	13
2.3. Ingeniería de plantas, diseño de distribución y marco regulatorio.	14
III. ESTADO DEL ARTE	16
3.1. Paradigmas de Resiliencia del Ganado ante la Variabilidad Climática.	16
3.1.1. Declive nutricional del pasto y su efecto en el balance energético.....	16
3.1.2 Valorización de Subproductos y Análisis de Ciclo de Vida (ACV).	16
3.2. Evaluación del nopal (<i>Opuntia spp.</i>) como materia prima para el procesamiento de alimentos.....	17
3.2.1. Dinámica de los biopolímeros y mucílagos en el rumen.	17
3.2.2. Regulación del estrés térmico y la salud de los tejidos en el ganado.	17
3.3. Sincronización metabólica: Nitrógeno No Proteico (NPN) y energía.	17
3.3.1. Cinética de Hidrólisis y Bioseguridad de las heces de pollo (Gallinaza).	17
3.3.2. Optimización mediante el uso de almidones de maíz molido.	18
3.4. Ingeniería de Planta y Optimización de Layout Industrial	18
3.4.1. Metodología SLP y Zonificación de Bioseguridad.....	18
3.4.2. Termodinámica del secado solar y cinética de deshidratación.	18
IV. METODOLOGÍA	19
4.1. Selección técnica y criterios para materias primas.	20
4.1.1. Dosificación y configuración del lote de muestra.	21
4.2. Ingeniería de Detalle y Caracterización Operativa del Proceso	25



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE ÁLAMO TEMAPACHE

4.2.1. Descripción Secuencial y Fundamentación de las Actividades	27
4.3. Diseño y Optimización del Layout de la Planta Procesadora	29
4.3.1. Análisis de la Tabla de Orden de Proximidad (Matriz de Relaciones).	29
4.3.2. Caracterización y estructura de la matriz de correlación SLP.	30
4.3.3. Análisis técnico del Diagrama de Relaciones de Actividad (Diagrama de Cuerdas).	32
4.3.4. Especificaciones Técnicas del Layout General de la Planta	34
4.4. Análisis de Impactos Operativos, Gestión de Residuos Sólidos y Cumplimiento Normativo de Bioseguridad	37
4.4.1. Gestión Integral de Residuos Sólidos y Protocolo de Bioseguridad	37
4.4.2. Verificación de Cumplimiento de la NOM-012-SAG/ZOO-2020	38
4.4.3. Verificación de Cumplimiento de la NOM-060-ZOO-1999	39
4.4.4. Impacto Operativo y Aseguramiento de la Inocuidad	39
V. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN.	40
VI. CONCLUSIONES	42
Bibliografía:	43

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Arquitectura metodológica del sistema productivo de alimento.	19
Figura 2. Diagrama de Operaciones del Proceso (DOP): Elaboración de Suplemento Alimenticio a base de Nopal, Maíz y Gallinaza.....	26
Figura 3. Matriz de correlación de proximidad.....	31
Figura 4. Diagrama de Hilos.....	32
Figura 5. Plano General de Planta de Producción.	35

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Matriz Multicriterio de Selección Binaria para la Inclusión de Insumos.	20
Tabla 2. Dosificación Porcentual y Ponderación en Masa del Lote Piloto Experimental. ..	22
Tabla 3. Resumen de Actividades de Manufactura (Norma ASME).	27
Tabla 4. Simbología de orden de Proximidad.	30
Tabla 5. Matriz de Impacto Operativo y Aseguramiento de la Inocuidad.	39



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE ÁLAMO TEMAPACHE

I. GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.1 Introducción

La producción e industrialización de alimentos balanceados para especies ganaderas es una parte importante de la seguridad alimentaria y la estabilidad económica de la industria ganadera. En la ingeniería industrial, la conversión de subproductos agrícolas en insumos nutricionales mediante el uso de procesos estandarizados, balance de materiales y diseños de plantas es una solución tecnológica importante para optimizar la cadena de valor agroindustrial. En este sentido, la producción y formulación de raciones forrajeras de cladodios de nopal (*Opuntia ficus-indica*), grano de maíz (*Zea mays L.*) y estiércol de aves tratado térmicamente (*Gallinaza*) es una estrategia completa que combina alimento ganadero de valor agregado con el suministro alimenticio y metabólico del rebaño.

La estandarización del proceso permite equilibrar el componente energético y el contenido de nitrógeno no proteico (NPN), asegurando que sea seguro y sanitario y pueda mantenerse en línea con la seguridad alimentaria y el control de calidad. En la región de la Huasteca Baja de Veracruz, en el municipio de Álamo Temapache, la ganadería de doble propósito experimenta largos períodos de sequía y variabilidad climática.

En esta época del año, la biomasa del pasto está completamente agotada y el forraje envejece más rápido debido a la lignificación, lo que resulta en una drástica reducción del valor nutricional y la digestibilidad durante la temporada seca. En el período de escasez de agua, los productores ganaderos experimentan un déficit energético para el ganado, lo que lleva a la pérdida de peso en los animales, reducción de la productividad y pérdidas económicas significativas.

El enfoque convencional de comprar concentrados comerciales no es factible para los productores locales debido al alto costo. Sin una línea de producción industrial para procesar insumos locales, no hay opción para producir raciones estables, uniformes y seguras que garanticen la bioseguridad de los animales. Este problema es abordado por la presente investigación, que proporciona un suplemento alimenticio de bajo costo hecho con recursos abundantes en la región.



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE ÁLAMO TEMAPACHE

Desde la perspectiva de la ingeniería industrial, el trabajo se basa en el diseño detallado del sistema de producción, balance de masa y distribución física de la microplanta de procesamiento a través de la metodología de Planificación Sistemática de Distribución (SLP). Esto asegurará el flujo unidireccional de materiales, la reducción de tiempos de operación y el estricto cumplimiento de las normas NOM-012-SAG/ZOO-2020 y NOM-060-ZOO-1999 para la protección contra la contaminación cruzada. Por lo tanto, el objetivo general de este trabajo de investigación es estandarizar la fabricación de un suplemento alimenticio bovino a través de la distribución física de la planta y la alineación con las condiciones regulatorias pertinentes, asegurando la viabilidad técnica e industrial del proyecto.

Para lograr este objetivo, hemos dividido la tesis en seis capítulos. Capítulo I: Visión General del Proyecto. En este capítulo, presentamos la investigación, su justificación, objetivos e hipótesis. Capítulo II: Marco Teórico. La dinámica nutricional del ganado durante la sequía, los insumos locales y los principios de la ingeniería de plantas se presentan en este capítulo. Capítulo III: Estado del Arte. Se discuten los paradigmas de resiliencia ganadera, la valorización de subproductos y las técnicas de secado solar. Capítulo IV: Metodología. Se describe la selección del insumo en el modelo multicriterio, junto con la dosificación del lote piloto de 500 g, las pruebas bromatológicas de laboratorio y el diagrama de procesos realizado de acuerdo con las normas ASME (22 actividades), y el diseño de la distribución de 2,400 m² utilizando el método SLP. Finalmente, Capítulo V: Análisis y Discusión.



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE ÁLAMO TEMAPACHE

1.2 Justificación

La ganadería es el pilar de las familias rurales en México y previene la migración rural según Rodríguez Mejía et al. (2018). Pero en áreas como la Huasteca, el sector está pasando por tiempos muy difíciles. La constante falta de lluvia ha afectado la rentabilidad de los ranchos locales (Melo Cuervo et al., 2025). Welsh Rodríguez et al. (2022) sugieren alternativas de subsistencia ganadera basadas en insumos regionales, con el nopal como recurso clave.

Cuando el pasto se seca y el forraje verde desaparece, la suplementación es necesaria para aprovechar los residuos de cultivos, como argumenta Santiago-Hernández (2026). Pero la tuna no es solo un complemento nutricional, sino una herramienta financiera para estas raciones. Castro Angulo (2024) afirma que alimentar al ganado con esta solución podría reducir los costos operativos en casi una cuarta parte en comparación con los concentrados comerciales. De esta manera, el animal mantiene su equilibrio metabólico sin que el productor tenga que descapitalizarse para pasar la temporada seca.

Para llevar los beneficios económicos y nutricionales de este suplemento a una escala real, la fórmula necesita cambiarse a un proceso de fabricación uniforme. La molienda y la mezcla están muy controladas en este campo para que la cantidad de nutrientes no varíe de un lote a otro (Sánchez-Santillán et al., 2016). No es suficiente con solo tomar la materia prima y procesarla. El producto final también necesita análisis fisicoquímicos periódicos para asegurarse de que sea estable durante el almacenamiento, como lo reportan Castañeda-Franco et al. (2021). Aquí es donde la ingeniería detallada y el diseño de plantas toman importancia práctica: más allá de la eficiencia, el diseño físico es esencial para garantizar la seguridad y cumplir con las normas NOM-012-SAG/ZOO-2020 y NOM-060-ZOO-1999.

1.3 Hipótesis

H1:

La estandarización del proceso de manufactura (mediante un Diagrama de Operaciones que consta de un Proceso de 22 actividades bajo norma ASME) y el diseño de una distribución de planta unidireccional en "U" (aplicando la metodología SLP en $2,400\text{ m}^2$) permiten obtener un suplemento alimenticio bovino (55% nopal, 25% maíz y 20% gallinaza) que



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE ÁLAMO TEMAPACHE

cumple de forma estable con los parámetros de calidad bromatológica (humedad $\leq 12\%$, pH 8.59 ± 0.2) e inocuidad sanitaria estipulados en las normas NOM-012-SAG/ZOO-2020 y NOM-060-ZOO-1999.

H0:

La estandarización del proceso de manufactura y el diseño del layout industrial no garantizan el cumplimiento de los parámetros de estabilidad bromatológica ni de las barreras de bioseguridad requeridas por la normatividad pecuaria vigente.

1.4 Objetivos

General:

Estandarizar el proceso de manufactura de un suplemento alimenticio bovino mediante la distribución física de la planta y la alineación normativa, garantizando la factibilidad técnica e industrial del proyecto.

Objetivos Específicos:

- Establecer la formulación balanceada y las propiedades fisicoquímicas del suplemento mediante análisis bromatológicos de laboratorio, validando su calidad nutricional y estabilidad para el mantenimiento de peso en ganado bovino.
- Desarrollar la ingeniería de detalle a través de la elaboración de diagramas de flujo de proceso (ANSI/ASME) y balances de materia y energía.
- Diseñar el layout de la microplanta procesadora mediante planos de distribución de planta, aplicando metodologías de flujo de materiales para optimizar el aprovechamiento del espacio y reducir tiempos de operación.
- Analizar los impactos operativos del proyecto mediante la gestión de residuos sólidos y la verificación del cumplimiento de las normas NOM-012-SAG/ZOO-2020 y NOM-060-ZOO-1999, asegurando la inocuidad alimentaria y la bioseguridad del proceso.



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE ÁLAMO TEMAPACHE

II MARCO TEÓRICO

2.1. Dinámica nutricional del ganado bovino ante el estiaje regional

La comprensión de la fisiología nutricional del ganado bovino en periodos de escasez hídrica es fundamental para el diseño de sistemas de suplementación eficientes en la región de Álamo Temapache. Durante el estiaje, el animal enfrenta un desafío metabólico donde la tasa de degradación del forraje disponible no logra cubrir los requerimientos de mantenimiento definidos por la National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine [NASEM] (2016). Estos requerimientos representan el estado de equilibrio termodinámico donde el ingreso de energía metabolizable es igual al gasto por calor y funciones vitales; sin embargo, en ecosistemas tropicales bajo estrés, este balance se vuelve negativo, forzando al bovino a una movilización catabólica de sus reservas de tejido adiposo y muscular, lo que desde una perspectiva de ingeniería industrial representa una depreciación crítica de los activos biológicos del sistema productivo.

Este fenómeno de desbalance se origina principalmente por la lignificación acelerada de las gramíneas regionales ante la falta de precipitación. Según la teoría de fraccionamiento de fibras de Van Soest et al. (1991), el incremento en las fracciones de Fibra Detergente Neutra (FDN) y Fibra Detergente Ácida (FDA) reduce drásticamente el espacio volumétrico disponible en el rumen para la fermentación microbiana. La presencia de polímeros complejos como la lignina actúa como una barrera física que impide el acceso de las enzimas bacterianas a la celulosa y hemicelulosa, provocando lo que Ørskov (1982) define como una limitación por llenado físico. En este estado, aunque el animal mantenga el consumo voluntario, la eficiencia de pasaje ruminal disminuye, resultando en un estancamiento del flujo de nutrientes hacia el abomaso y una consecuente caída en la síntesis de proteína microbiana.

Para eliminar esta estancación digestiva, es esencial abordar la falta de Nitrógeno No Proteico (NPN) que caracteriza a los forrajes secos en el norte de Veracruz. Leng (1990) y trabajos actuales en paisajes semiáridos por Nefzaoui et al. (2014) muestran que cuando la proteína cruda en la dieta está por debajo del 7%, la población de bacterias celulolíticas se destruye debido a la falta de amoníaco. Este ciclo de nitrógeno ruminal interrumpido ralentiza la digestión de la fibra residual, y ha sido necesario introducir fuentes externas de



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE ÁLAMO TEMAPACHE

nitrógeno, como la cama de aves, para restaurar la presión osmótica y la actividad enzimática del ecosistema ruminal. Pero la microbiota ruminal solo puede procesar este nitrógeno si tiene acceso a carbohidratos de rápida degradación. Son estos azúcares los que proporcionan los esqueletos de carbono necesarios para que se sinteticen los aminoácidos.

Ahí es donde entra en juego la tuna (*Opuntia ficus-indica*), no solo por la humedad sino también para asegurar la disponibilidad de carbohidratos, para estar en el proceso de preparación. Su presencia de cenizas y mucílagos hace que las mezclas secas sean apetecibles y es vital para los microorganismos en el rumen (Ben Salem y Abidi, 2009). Esto ayuda a compensar el déficit energético del maíz durante la sequía. Con este cambio en la ración, el ganado puede digerir el nitrógeno de la gallinaza sin la amenaza de intoxicación por amonio y producir carne y leche cuando el pastoreo ya no es posible.

2.2. Contribución nutricional de las materias primas locales.

Esta sinergia entre los insumos locales tiene sentido al considerar la fermentación ruminal: el nopal (*Opuntia ficus-indica*), la gallinaza y el maíz molido convierten los excedentes regionales en un equilibrio del sistema digestivo. La mezcla no solo es una estrategia de ahorro de costos, sino también una forma de mantener el entorno del animal en equilibrio. Aquí el nopal actúa como regulador. Sus mucílagos y azúcares fácilmente disponibles proporcionan energía inmediata y aportan humedad en el rumen, lo que ayuda al movimiento bacteriano en períodos de sequía (Morales-Martínez et al., 2022). Mantener este nivel de agua es importante porque permite que la gallinaza y el maíz se hidraten al mismo tiempo y que la superficie de las enzimas digestivas se expanda.

Cuando la preparación está suficientemente hidratada, el papel del suplemento se convierte en un factor metabólico: la capacidad del rumen para cosechar el nitrógeno disponible. La cama de aves es una fuente extremadamente económica de nitrógeno no proteico (NPN), pero los microorganismos solo la utilizarán si la ración está compuesta de almidones de degradación intermedia (Camacho-Morales et al., 2023). Lo que marca la diferencia es el maíz molido, que proporciona ácidos cetó a la cama de aves en el momento exacto en que se libera amoníaco a la cama de aves, que es lo que las bacterias necesitan para construir si quieren ser capaces de generar proteínas. Si esto no está en camino, este amoníaco libre fluirá a través de la pared del rumen y encontrará su camino hacia el hígado y se convertirá



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE ÁLAMO TEMAPACHE

en urea. Este desvío resulta en un gasto de energía innecesario y aumenta la probabilidad de intoxicación en el rebaño. Como la tasa de descomposición del maíz es similar a la degradación del NPN aviar, se puede formar proteína microbiana para proporcionar aminoácidos de alto valor para el ganado (Vargas-Rodríguez et al., 2024). Además de esta captura eficiente de nitrógeno, la mezcla necesita estabilidad química para no cambiar el pH del rumen ni degradarse cuando se almacena. Aquí es donde ocurre una respuesta importante: la alcalinidad de la cama de aves se compensa con la acidez orgánica de la tuna. Por lo tanto, dicha neutralización actúa como un amortiguador para la acidosis ruminal, que se minimiza al alimentar al ganado (Alonso-Díaz et al., 2021).

Este control químico extiende la vida útil del alimento. De manera similar, la compra en la región evita el transporte desde lugares lejanos, lo que reduce la huella de carbono y los costos de flete. La fórmula es una solución a las deficiencias nutricionales del rebaño, así como un método limpio y sostenible para fabricar a nivel local.

2.3. Ingeniería de plantas, diseño de distribución y marco regulatorio.

Pasar de una fórmula química a una línea de producción real es una receta y este proceso es cómo convertirla en una situación funcional. Si vamos a cambiar la configuración de la maquinaria para hacerla más eficiente, entonces estamos perdiendo tiempo, y por eso Muther y Hales (2024) proponen estructurar la planta de acuerdo con la Planificación Sistemática de Distribución (SLP). El proceso utiliza Diagramas de Relación de Actividades (ARC) para determinar la proximidad óptima entre estaciones basándose en el flujo de materiales, bioseguridad y servicios requeridos. En este punto, la logística marca el ritmo. Debido a que el cactus fresco tiene un volumen y humedad tan altos, la distribución necesita acortar las transferencias internas para acelerar la deshidratación y evitar cuellos de botella entre la trituration y el secado solar.

Además de la logística del procesamiento de materiales, el diseño de la planta necesita ser sanitario: una carga microbiológica de las heces de pollo. Para garantizar la seguridad del alimento, se deben eliminar las llamadas “zonas sucias” donde se reciben y tratan las heces y las “zonas limpias”, donde se mezcla la tuna y luego se incorpora al suplemento. En este



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE ÁLAMO TEMAPACHE

punto, Lohmann Breeders (2026) y Hendrix Genetics (2023) afirman que la única manera de prevenir la contaminación cruzada es permitir que fluyan en un solo sentido a través de barreras físicas.

Es en este punto donde la estructura de bioseguridad determina cuál es el proceso. Por lo tanto, la disposición del tráfico interno no permitirá que personas o equipos entren en contacto con las heces de pollo crudo porque no será sanitario. Esta separación entre áreas y el control de flujos están en línea con las regulaciones del sector. La Norma Oficial Mexicana NOM-012-SAG/ZOO-2020 establece parámetros estrictos para la producción de alimentos para animales y hace obligatorio el establecimiento e identificación de espacios independientes para la recepción, muestreo, producción, cuarentena y almacenamiento. Esta norma se extiende también a la infraestructura física. La ley es bastante clara en que todas las materias primas de un producto, incluidas aquellas de tipo crucial como las heces de pollo y el maíz, deben contar con un certificado de análisis de calidad emitido por el proveedor. Es la planta la que está protegida por esto. No solo la norma evita la sanción administrativa, sino que también asegura un alimento seguro para el ganado y evita riesgos graves para la salud como la contaminación por *Salmonella* spp.

Después de asegurar el cumplimiento normativo en la recepción de materias primas, la eficiencia de la planta se transfiere a operaciones de transformación unitaria donde el secado solar se vuelve vital. En esta etapa, Nefzaoui et al. (2025) señalan que los sistemas de secado híbrido reducen el tiempo de procesamiento hasta en un 40% en comparación con el enfoque tradicional al aire libre. La planta debe diseñarse para cuidar la temperatura y la inclinación de los colectores en Álamo (para obtener la máxima irradiancia). La vida útil se determina controlando el agua. Es fundamental mantener la humedad por debajo del 12% para prevenir el crecimiento de hongos y conservar los alimentos lo más frescos posible cuando se almacenan. El diseño de la planta del proyecto así aumenta la viabilidad técnica y económica del proyecto, y los recursos locales se convierten de una amenaza a un suplemento seguro y de alta calidad.



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE ÁLAMO TEMAPACHE

III. ESTADO DEL ARTE

3.1. Paradigmas de Resiliencia del Ganado ante la Variabilidad Climática.

Una vez que se resuelven los problemas operativos y de salud de la planta, el problema es la vulnerabilidad del rebaño al clima. Hoy en día, la suplementación no solo se ve como una solución temporal durante la temporada seca, sino como una medida preventiva para proteger los activos ganaderos. La temporada seca exige previsión. En lugares con sequías recurrentes como el norte de Veracruz, la continuidad de las unidades de producción ya no depende de insumos externos a altos costos, sino de esquemas de economía circular que utilizan recursos locales para mantener una reserva nutricional constante.

3.1.1. Declive nutricional del pasto y su efecto en el balance energético.

Este declive en la digestibilidad es consecuencia de un cambio fisicoquímico severo en el pasto que ocurre durante la sequía. Navarrete-Méndez et al. (2024) y García-Morales et al. (2025) explican que el estrés hídrico acelera el envejecimiento del forraje tropical, aumentando la Fibra Detergente Neutra (FDN) hasta en un 30% y reduciendo la tasa de paso ruminal. El alimento permanece en el sistema digestivo. Smith y Miller (2024) encuentran que la falta de energía disponible afecta la respuesta enzimática del animal, lo que significa desarrollar un suplemento que responda a la microbiota ruminal y evite que el ganado cebú movilice su masa muscular para sobrevivir.

3.1.2 Valorización de Subproductos y Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

Wang et al. (2023) han demostrado a través del análisis de huella de carbono el uso de recursos locales. Para superar este desgaste muscular sin comprometer la salud financiera del rancho, se necesita reemplazar los alimentos comerciales con formulaciones regionales. López-García et al. (2023) y Hernández-Sánchez (2025) muestran que reemplazar el alimento concentrado con mezclas orgánicas locales basadas en cactus y subproductos avícolas reduce los costos de producción en un 22% y las emisiones de metano entérico en un 15%. La rentabilidad y la sostenibilidad se mueven en la misma dirección. Estos ahorros operativos muestran que los insumos locales no solo proporcionan liquidez al ganadero, sino que también son importantes para la operación del rebaño durante la temporada seca.



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE ÁLAMO TEMAPACHE

3.2. Evaluación del nopal (*Opuntia spp.*) como materia prima para el procesamiento de alimentos

No solo es un recurso de alimento de emergencia, sino una fuente de agua y energía fácilmente fermentable, lo cual mantiene el rumen saludable. Por lo tanto, al mantener una hidratación continua y regular el pH digestivo, el cactus evita trastornos metabólicos y mantiene al ganado en el ciclo respecto a la fibra durante la sequía.

3.2.1. Dinámica de los biopolímeros y mucílagos en el rumen.

En la parte soluble de la tuna, los mucílagos desempeñan un papel protector crucial en el sistema digestivo. Al-Huqail et al. (2024) y Nefzaoui et al. (2023) discuten este comportamiento. Revelan que estos polisacáridos retienen agua y protegen a la microbiota ruminal del estrés por deshidratación. Este gel mucilaginoso es importante para la actividad bacteriana. Dutra et al. (2023) también muestran que la viscosidad causada por la *Opuntia* ralentiza el paso de los almidones de maíz, lo cual es beneficioso para la hidrólisis enzimática y permite la absorción de nutrientes en tiempos de escasez de agua.

3.2.2. Regulación del estrés térmico y la salud de los tejidos en el ganado.

Al equilibrar el rumen, la tuna está protegida a nivel celular para minimizar el desgaste del animal bajo estrés térmico. En este punto, Mayer-Zubiri (2026) y Morales-Martínez (2022) señalan que los flavonoides en el cladodio previenen la peroxidación lipídica bajo estrés térmico. Las membranas celulares son sólidas. Al mismo tiempo, Vargas-Rodríguez et al. (2024) también muestran que el suministro de calcio y magnesio en la penca autorregula la presión osmótica del licor ruminal, de modo que la síntesis de proteínas no se interrumpe incluso durante las horas de mayor radiación solar.

3.3. Sincronización metabólica: Nitrógeno No Proteico (NPN) y energía.

La eficiencia de un suplemento orgánico se debe a la coincidencia en el tiempo de la liberación de amoníaco con los esqueletos de carbono.

3.3.1. Cinética de Hidrólisis y Bioseguridad de las heces de pollo (Gallinaza).

El uso de excretas de aves como fuente de nitrógeno implica procedimientos de seguridad rigurosos. SADER (2025) y la FDA (2024) enfatizan que los procesos de deshidratación controlada eliminan patógenos sin volatilizar el nitrógeno. Gómez-Vázquez et al. (2024)



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE ÁLAMO TEMAPACHE

sugieren que el tratamiento térmico solar es el método de ingeniería más eficiente para estabilizar este insumo y permitir que el amoníaco sea controlado en el rumen (Zhu et al., 2022).

3.3.2. Optimización mediante el uso de almidones de maíz molido.

Para producir proteína microbiana de manera eficiente, es importante que esté bien sincronizada con el maíz molido (Camacho-Morales, 2023; Chen y Thompson, 2025). Se selecciono un tamaño de 2.5 mm para permitir una buena superficie de contacto con las amilasas bacterianas y se produce un proceso que es adecuado en el tiempo y, por lo tanto, no produce picos de amoníaco. Ayuda a utilizar la energía del maíz y a "capturar" el nitrógeno en la cama de aves para los aminoácidos (Valadares et al., 2021; Nocek, 2022)

3.4. Ingeniería de Planta y Optimización de Layout Industrial

Este apartado fundamenta el diseño técnico de la unidad productiva desde la perspectiva de la eficiencia y la normatividad.

3.4.1. Metodología SLP y Zonificación de Bioseguridad.

El enfoque tradicional es la Planificación Sistemática de Distribución (SLP) para minimizar los costos de manejo de materiales. Muther y Hales (2024) y Rodríguez-Pérez (2026) señalan que el flujo unidireccional es crítico para la bioseguridad. El diseño de la distribución debe estructurarse de manera que las “Zonas de Riesgo Biológico” (recepción de estiércol) estén bien separadas de las “Zonas Seguras” (empaquetado) para cumplir con la NOM-012-SAG/ZOO-2020 y optimizar los tiempos del ciclo operativo (Meyers, 2022).

3.4.2. Termodinámica del secado solar y cinética de deshidratación.

La eficiencia de la planta está vinculada a la capacidad de deshidratación del nopal. Akash y Gupta (2025) y Casalino (2022) han desarrollado modelos que muestran que un diseño que favorece el flujo de aire laminar reduce la humedad final al 11% en 48 horas. Esta precisión térmica es esencial para prevenir la proliferación de aflatoxinas y asegurar una vida útil de hasta 6 meses sin conservantes químicos artificiales.



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE ÁLAMO TEMAPACHE

IV. METODOLOGÍA

El proyecto fue construido de manera sistémica en ingeniería y cada orientación operativa se integró con las herramientas técnicas para su validación industrial. La Figura 1 muestra el sistema productivo que está organizado en cuatro pasos y en una secuencia de pasos complementarios. La primera fase determinará los criterios de selección y formulación utilizando herramientas multicriterio y análisis bromatológico de laboratorio, y la segunda etapa implicará el diseño detallado de la planta utilizando un diseño ASME y luego una arquitectura SLP. Finalmente, la cuarta etapa garantizará la viabilidad legal y la seguridad del proceso y la bioseguridad con las especificaciones NOM-012-SAG/ZOO-2020 y NOM-060-ZOO-1999.

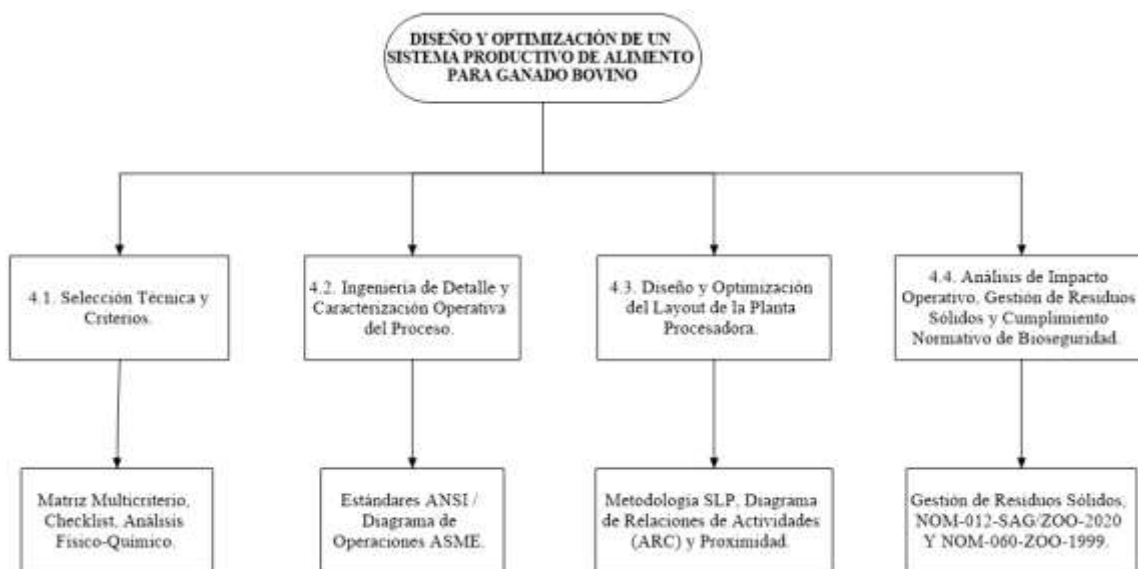


Figura 1. Arquitectura metodológica del sistema productivo de alimento.



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE ÁLAMO TEMAPACHE

4.1. Selección técnica y criterios para materias primas.

Para alcanzar el primero de los objetivos de este estudio, evaluar la calidad y disponibilidad de los insumos regionales, se diseñó e implementó el modelo de selección multicriterio, utilizando la lógica binaria de inclusión-exclusión. Esto se hizo con el fin de asegurar la viabilidad técnica, el suministro constante y la rentabilidad económica del suplemento dietético completo antes de proceder al acondicionamiento físico de las mezclas a escala piloto.

La evaluación técnica de las posibles materias primas se basó en los cuatro parámetros operativos clave:

- Viabilidad económica: Insumo de bajo costo para reducir los costos de las operaciones de fabricación.
- Disponibilidad regional: El suministro está disponible para el municipio de Álamo Temapache, Veracruz de manera oportuna y continua.
- Facilidad logística: El transporte, recolección y manejo de materiales es más sencillo en una sola unidad.
- Estabilidad física: El insumo es resistente a la degradación biológica y a la fermentación acelerada espontánea en almacenamiento.

A continuación, se presenta la matriz de selección para las soluciones agroindustriales preseleccionadas en la Región Huasteca de Veracruz.

Tabla 1. Matriz Multicriterio de Selección Binaria para la Inclusión de Insumos.

Materia Prima Potencial	Viabilidad Económica	Disponibilidad Regional	Facilidad Logística	Estabilidad Física	Dictamen Final
Nopal (<i>Opuntia ficus-india</i>)	1	1	1	1	Aceptado
Maíz (<i>Zea mays</i> L.)	1	1	1	1	Aceptado
Gallinaza	1	1	1	1	Aceptado
Melaza	0	0	0	0	Rechazado
Cascara de Naranja	0	1	0	0	Rechazado

Nota. Escala de asignación booleana:

1 = Cumple satisfactoriamente con el criterio técnico.

0 = No cumple con el criterio o representa un riesgo operativo crítico.



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE ÁLAMO TEMAPACHE

Basado en los resultados consolidados en la Tabla 1, se identificó que el nopal deshidratado, el grano de maíz molido y la gallinaza tratados térmicamente son aceptados por el sistema y todos tienen una calificación de cumplimiento perfecta. El nopal forrajero proporciona una base estructural resistente y carbohidratos solubles digestibles; el maíz actúa como el catalizador de densidad energética; y el estiércol de aves es una fuente eficiente de NPN para fomentar la fermentación de la microbiota ruminal.

Por el contrario, la melaza y las cáscaras de cítricos fueron descartadas porque son extremadamente difíciles y dependen física y logísticamente. La melaza fue rechazada debido a su complejidad en el manejo de fluidos viscosos a pequeña escala y su toxicidad microbiológica a altas temperaturas. Las cáscaras de naranja y los cítricos húmedos también fueron rechazados debido al alto contenido de agua libre en su composición basal, los costos de transporte y la tasa de descomposición orgánica debido al crecimiento de hongos, lo que afecta negativamente la vida útil del producto terminado.

4.1.1. Dosificación y configuración del lote de muestra.

Una vez seleccionadas las entradas óptimas obtenidas de multicriterio, se determinaron las proporciones de mezcla para un lote piloto experimental. El objetivo principal de esta dosificación es establecer un sistema de suplementación basal que asegure el suministro adecuado de fibra efectiva, carbohidratos no estructurales y nitrógeno no proteico (NPN) para el bienestar fisiológico del ganado adulto en la temporada seca.

Para confirmar la consistencia física de la mezcla, la uniformidad de la granulometría y la interacción mecánica de los materiales sin desperdicio de reactivos químicos en los procesos de análisis posteriores, se estableció un tamaño de lote piloto único con una masa total de $M_T = 500\text{g}$. La masa de cada componente biológico se determinó utilizando la ecuación general de balance de masa:

$$M_T = m_{\text{Nopal}} + m_{\text{Maíz}} + m_{\text{Gallinaza}}$$



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE ÁLAMO TEMAPACHE

Donde la masa de cada variable de inclusión de materia prima (m_i) se calculó de forma independiente multiplicando la masa total del lote por la fracción porcentual asignada (P_i), mediante la siguiente fórmula estequiométrica:

$$m_i = (M_T) \left(\frac{P_i}{100} \right)$$

La configuración porcentual y ponderada en masa para la elaboración del prototipo basal único se detalla en la Tabla 2:

Tabla 2. Dosificación Porcentual y Ponderación en Masa del Lote Piloto Experimental.

Insumo Biológico Seleccionado	Proporción Asignada (P_i)	Masa Requerida (m_i)	Función Técnica en la Dieta Rumiante
Nopal deshidratado (Opuntia ficus-indica)	55%	275 g	Fuente mayoritaria de forraje, mucilagos y agua metabólica.
Maíz Molido (Zean mays L.)	25%	125 g	Concentrado catalizador de energía y almidones solubles.
Gallinaza Procesada	20%	100g	Suplemento de nitrógeno no proteico para síntesis microbiana.
Masa Total del Prototipo (M_T)	100%	500g	Bloque de suplementos basal de mantenimiento.

Nota. Los valores de masa son el peso seco y acondicionado de los ingredientes antes de la operación unitaria de homogeneización mecánica.

Se preparó una formulación estequiométrica de 55% de nopal deshidratado (Opuntia ficus-indica), 25% de maíz molido y 20% de estiércol de ave tratado térmicamente como prueba de concepto para situaciones de emergencia climática. Cabe destacar que este lote no tiene como objetivo un esquema factorial multivariable ni la optimización zootécnica para acelerar el aumento de peso, sino una línea de control analítico. Esta dosificación fija es la entrada al sistema de producción y permite evaluar las propiedades bromatológicas iniciales de una ración uniforme y segura para el rebaño de rumiantes.

4.1.2. Pruebas fisicoquímicas y bromatológicas del suplemento.

Para probar el contenido nutricional y las propiedades físicas del suplemento formulado, se realizó un experimento en el Laboratorio de Postcosecha. Todas las operaciones se llevaron a cabo de manera estandarizada a partir del lote piloto, siguiendo las secuencias operativas:

Determinación del potencial de hidrógeno (pH): Esta prueba se realizó para evaluar la acidez o alcalinidad del producto terminado. El primer paso consistió en pesar 10 g de muestras secas y homogeneizadas en una balanza analítica de precisión y colocarlas en un vaso de precipitados de 100 ml. Se añadieron 50 ml de agua destilada con un cilindro



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE ÁLAMO TEMAPACHE

graduado y la mezcla se agitó manualmente hasta alcanzar una suspensión homogénea, es decir, disociación iónica. La medición final se realizó mediante la inmersión del electrodo de un potenciómetro digital y se registró el valor nominal siempre que la pantalla digital del dispositivo estuviera estable.

Medición gravimétrica de la humedad: Para medir el porcentaje de agua libre en el suplemento con el fin de predecir la estabilidad de almacenamiento. Se utilizó una termobalanza automatizada con una temperatura de transferencia térmica constante de 130 °C para cada prueba. Se colocó una muestra homogénea con una masa inicial de alrededor de 5 g (P_i) en la bandeja de aluminio del equipo. La termobalanza secó la muestra en 7-11 minutos y se detuvo si se detectaba la estabilidad de la masa (pérdida de peso P_p). El porcentaje de humedad se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$H(\%) = \left(\frac{P_p}{P_i} \right) (100)$$

Determinación de cenizas (materia inorgánica): Proceso destructivo por calcinación para determinar el contenido mineral total del suplemento. Se registró el peso de las cápsulas de porcelana limpias y secas en una balanza semianalítica (W_1). Después de eso, se insertó la muestra y se pesó la cápsula y el alimento (W_2). La cápsula se introdujo en una mufla de alta temperatura y se programó para aumentar la temperatura hasta 550 °C y luego se continuó con esta operación durante 60 minutos para asegurar una carbonización total de la fracción orgánica.

Una vez completado esto, las cápsulas se trasladaron a un desecador hermético para enfriarse sin perder humedad y se pesaron para obtener el último residuo inorgánico (W_3). Esto se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Cenizas} = \left(\frac{W_3 - W_1}{W_2 - W_1} \right) (100)$$

Proceso de Extracción Mineral Acuosa: Dado que los análisis colorimétricos y ópticos requieren una fase líquida libre de sólidos para evitar interferencias, se estandarizó una técnica de pre-lixiviación. Para este propósito, se suspendieron 10 g de suplemento dietético en 50 ml de agua destilada en un vaso de precipitados. Esta mezcla se dejó reposar



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE ÁLAMO TEMAPACHE

y luego se pasó a través de un sistema de filtración por gravedad con papel de filtro cualitativo de velocidad media y un embudo. Este proceso de separación física tomó 60 minutos, y se recuperó un extracto líquido claro para la lectura posterior.

Cuantificación de Potasio (K^+) por Turbidimetría: El contenido de potasio (K^+) se midió con un colorímetro digital LaMotte SMART3. Se pipetearon 2 ml de la alícuota del extracto acuoso clarificado en el vial de vidrio y se añadieron cuatro gotas de solución de hidróxido de sodio para alcalinizar el medio, y luego se añadió una medida calibrada de 0,05 g de polvo de tetrafenilborato. Después de agitar el vial, se formó una turbidez blanca. La muestra se dejó reposar durante 5 minutos y se introdujo en el lector digital bajo el Código de Operación 085. El valor en la pantalla se multiplicó por un factor volumétrico de 50 para registrar la concentración real en partes por millón (ppm).

Cuantificación de Fosfato (PO) por Colorimetría: Para determinar la presencia de fósforo soluble, se utilizó el método de reducción colorimétrica en el equipo SMART3. Se dosificó 1 ml del extracto acuoso lixiviado en un vial de lectura y se diluyó con 9 ml de agua destilada. Posteriormente, se adicionó 1 ml de reactivo de ácido fosfórico y una medida de 0.1 g de agente reductor a base de ácido ascórbico, provocando un viraje gradual hacia color azul. Tras un tiempo de espera de 5 minutos para estabilizar la reacción química, el vial se colocó en el colorímetro seleccionando el Código operativo 081. La lectura obtenida en el display se multiplicó por el factor de ajuste de 32 para fijar el resultado final en ppm.

Determinación de Lípidos (Extracto Etéreo) por Sistema Soxhlet: Método de extracción sólido-líquido semicontinuo para aislar la grasa de la ración. Se pesó una muestra seca en la balanza analítica (M) y se confinó dentro de un cartucho de papel filtro poroso. El cartucho se introdujo en la cámara de extracción del equipo Soxhlet y se vertieron 50 ml de n-Hexano puro en el matraz de ebullición de la base. El sistema se conectó a una placa calefactora regulada a 120 °C y a un condensador refrigerado por recirculación de agua helada en circuito cerrado, manteniendo el reflujo térmico constante durante 2 horas consecutivas. Al finalizar el lavado químico, el extracto concentrado se transfirió a tubos



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE ÁLAMO TEMAPACHE

Eppendorf y se centrifugó a 10,000 rpm durante 10 minutos para separar cualquier impureza microscópica. Los tubos permanecieron abiertos en campana de extracción por 16 horas para evaporar el solvente residual antes del pesaje final.

Determinación de Carbohidratos (Azúcares Reductores) por el Método del DNS: Análisis espectrofotométrico cuantitativo para medir azúcares solubles. El procedimiento consistió en tomar 1 ml del extracto clarificado original y mezclarlo con 1 ml de reactivo DNS (Ácido 3,5-dinitrosalicílico) dentro de un tubo de ensayo, homogeneizándolo en un agitador de vórtex. Los tubos se sometieron a una reacción por choque térmico en baño maría sobre una parrilla eléctrica a ebullición durante 15 minutos, deteniendo la cinética química sumergiendo los tubos en un baño de agua con hielo por 5 minutos. Las lecturas de densidad óptica se llevaron a cabo en un espectrofotómetro digital midiendo los valores de absorbancia lumínica. Para garantizar la precisión del equipo, se preparó y procesó un "blanco" analítico instrumental (1 ml de agua destilada con 1 ml de reactivo DNS) configurando la calibración a cero absorbancia antes de leer las muestras del suplemento.

4.2. Ingeniería de Detalle y Caracterización Operativa del Proceso

Para la formalización del sistema manufacturero orientado a la elaboración del lote de 500g del suplemento alimenticio, se implementó una metodología de mapeo de procesos basada en los estándares de la American Society of Mechanical Engineers (ASME).



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE ÁLAMO TEMAPACHE

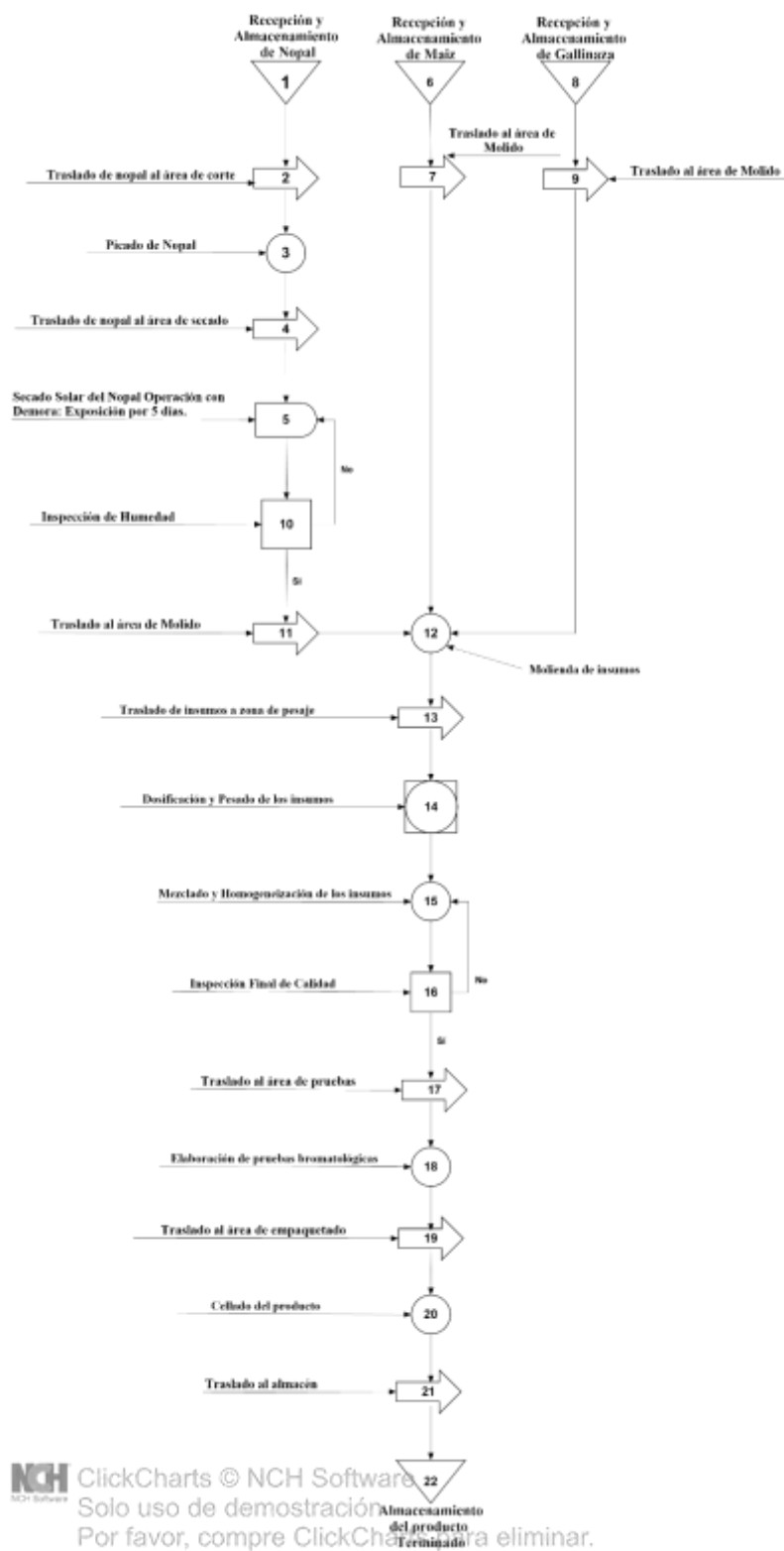


Figura 2. Diagrama de Operaciones del Proceso (DOP): Elaboración de Suplemento Alimenticio a base de Nopal, Maíz y Gallinaza.



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE ÁLAMO TEMAPACHE

En la siguiente tabla se muestra el resumen de las actividades realizadas en el diagrama de proceso.

Tabla 3. Resumen de Actividades de Manufactura (Norma ASME).

Simbología ASME	Tipo de Actividad	Cantidad Detectada
	Operación	5
	Trasladó o Transporte	9
	Inspección	2
	Almacén	4
	Operación con Demora	1
	Operación Doble	1
Total de Actividades		22

4.2.1. Descripción Secuencial y Fundamentación de las Actividades

A continuación, se describen de manera breve cada una de las 22 actividades existentes en el diagrama de flujo, detallando las tareas desarrolladas en el sistema:

- **Recepción y Almacenamiento de Nopal (Almacenamiento 1):** Ingreso de las pencas de nopal fresco al área de materias primas para su posterior procesamiento.
- **Traslado de nopal al área de corte (Transporte 1):** Movimiento físico de la penca fresca hacia la mesa de trabajo asignada para ser procesado.
- **Picado de Nopal (Operación 1):** Corte de la materia prima en rodajas delgadas para facilitar la posterior pérdida de agua.
- **Traslado de nopal al área de secado (Transporte 2):** Desplazamiento de las rodajas de nopal hacia la zona exterior habilitada para la deshidratación.
- **Secado Solar del Nopal (Operación con Demora 2):** Exposición directa del nopal al sol durante un periodo continuo de 5 días.



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE ÁLAMO TEMAPACHE

- **Recepción y Almacenamiento de Maíz (Almacenamiento 2):** Ingreso y resguardo del grano de maíz seco en el almacén correspondiente para asegurar su suministro.
- **Traslado al área de Molido - Maíz (Transporte 3):** Movimiento del grano de maíz desde su contenedor hasta la estación del molino.
- **Recepción y Almacenamiento de Gallinaza (Almacenamiento 3):** Recepción y acopio del subproducto avícola en una zona delimitada para evitar contaminación cruzada.
- **Traslado al área de Molido - Gallinaza (Transporte 4):** Desplazamiento de la gallinaza hacia la zona de molienda.
- **Inspección de Humedad (Inspección 1):** Verificación visual y táctil del nopal; si no cumple con la rigidez necesaria, retorna al secado solar (Paso 5).
- **Traslado al área de Molido - Nopal (Transporte 5):** Movimiento de las rodajas de nopal completamente secas y quebradizas hacia el equipo de molienda.
- **Molienda de insumos (Operación 3):** Reducción de tamaño del nopal deshidratado, el maíz y la gallinaza, procesando cada ingrediente por separado en el molino.
- **Traslado de insumos a zona de pesaje (Transporte 6):** Movimiento de las tres harinas obtenidas hacia la mesa donde se ubica la balanza.
- **Dosificación y Pesado de los insumos (Actividad Combinada 1):** Medición pesada de las porciones exactas establecidas en la formulación: 55% nopal, 25% maíz y 20% gallinaza.
- **Mezclado y Homogeneización de los insumos (Operación 4):** Incorporación física y gradual de los tres ingredientes molidos en un contenedor limpio hasta unificar la mezcla.
- **Inspección Final de Calidad (Inspección 2):** Control de calidad visual para comprobar la uniformidad del alimento; si presenta grumos, regresa al mezclado (Paso 15).
- **Traslado al área de pruebas (Transporte 7):** Movimiento de una porción representativa del lote hacia la zona de análisis de laboratorio.
- **Elaboración de pruebas bromatológicas (Operación 5):** Ejecución de los análisis fisicoquímicos para determinar los nutrientes reales del suplemento.



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE ÁLAMO TEMAPACHE

- **Traslado al área de empaquetado (Transporte 8):** Desplazamiento del suplemento aprobado hacia la zona de envasado final.
- **Sellado del producto (Operación 6):** Cierre térmico o mecánico de las bolsas plásticas contenedoras para asegurar el aislamiento del producto.
- **Traslado al almacén (Transporte 9):** Movimiento de las unidades selladas hacia la zona de almacenamiento temporal.
- **Almacenamiento del producto Terminado (Almacenamiento 4):** Resguardo del suplemento forrajero final en un lugar seco y fresco, listo para su distribución al ganado bovino.

4.3. Diseño y Optimización del Layout de la Planta Procesadora

Para dar cumplimiento al tercer objetivo específico de la investigación, se aplicó la metodología de Planeación Sistemática de la Distribución (SLP, por sus siglas en inglés). Esta herramienta de ingeniería permite organizar físicamente los departamentos, maquinaria y áreas de servicios de un sistema productivo, asegurando un flujo continuo de materiales, minimizando los tiempos de traslado y garantizando las barreras higiénicas de inocuidad exigidas en la manufactura de raciones pecuarias.

El enfoque SLP comienza con el análisis de actividades en relación unas con otras y cuantifica cuán conveniente es tener dos áreas a corta distancia. Para este propósito se utiliza una escala estándar de prioridad de proximidad en forma de códigos de letras y valores de línea.

4.3.1. Análisis de la Tabla de Orden de Proximidad (Matriz de Relaciones).

La primera fase del diseño fue desarrollar la matriz de relaciones de proximidad para las diez áreas del complejo agroindustrial. En la Tabla 4 (o el número secuencial correspondiente), se puede ver la escala de evaluación técnica para las relaciones de las estaciones:

A (Absolutamente Necesario): La máxima prioridad de proximidad se debe a un gran flujo crítico o secuencial de materiales o personal.

E (Especialmente Necesario) e I (Importante): La alta y media proximidad se debe a la supervisión, uso del mismo equipo u otros flujos secundarios.



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE ÁLAMO TEMAPACHE

O (Ordinario o Normal) y U (Sin Importancia): Reflejan interacciones normales o nulas donde la distancia no afecta la eficiencia del sistema.

X (Indeseable) y XX (Muy Indeseable): Colocan una restricción de separación física debido a riesgos de seguridad, ruido, polvo o los peligros de la contaminación cruzada.

Tabla 4. Simbología de orden de Proximidad.

LETRA	ORDEN DE PROXIMIDAD	VALOR EN LÍNEAS
A	Absolutamente Necesario	
E	Especialmente Necesario	
I	Importante	
O	Ordinaria o Normal	
U	Unimportant (Sin Importancia)	
X	Indeseable	
XX	Muy Indeseable	

4.3.2. Caracterización y estructura de la matriz de correlación SLP.

La Matriz de Relación de Actividades (o diagrama de diamante) es una herramienta cualitativa fundamental de SLP para evaluar la conveniencia de la proximidad entre estaciones de trabajo. La Matriz de Relación de Actividades define las diez áreas operativas del complejo agroindustrial de una manera que permite identificar la atracción logística y determinar las restricciones de aislamiento higiénico o de bioseguridad mediante un código de letras uniforme.

[illegible]

Vectores de Entrada (Filas Angulares): En el eje lateral izquierdo se listan en orden secuencial las diez áreas que componen el sistema, abarcando desde el ingreso de insumos hasta las zonas de servicios y soporte logístico: 1. Recepción y Almacén de Materia Prima, 2. Producción, 3. Laboratorio de Pruebas, 4. Área de (Calidad, Producción), 5. Almacén de Producto Terminado, 6. Áreas Verdes, 7. Área de Tratamiento de Residuos, 8. Baños, 9. Comedor y 10. Estacionamiento.

Códigos de Valoración Operativa: Las intersecciones emplean las vocales tradicionales del método SLP para denotar la prioridad: A para las cercanías críticas de alto flujo; E e I para



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE ÁLAMO TEMAPACHE

niveles de conveniencia alta y media; O para relaciones ordinarias; y U para estaciones que no guardan ninguna interacción operativa.

Códigos de Restricción Sanitaria y de Confort: Las letras X (Indeseable) y XX (Muy Indeseable) se utilizan como restricciones de diseño para resaltar los límites entre áreas donde es necesario romperlos para evitar la contaminación cruzada, la propagación de polvo de molienda o ruido a regiones limpias y de descanso

4.3.3. Análisis técnico del Diagrama de Relaciones de Actividad (Diagrama de Cuerdas).

En el diagrama de hilos y nodos, la distribución espacial libre de la planta de procesamiento se representó mediante una serie de nodos. También representamos las intensidades de flujo y las interacciones en la matriz con la densidad de líneas o cuerdas conductoras. A continuación, se describen el comportamiento de proximidad operativa y las restricciones de aislamiento para cada una de las diez áreas del sistema:

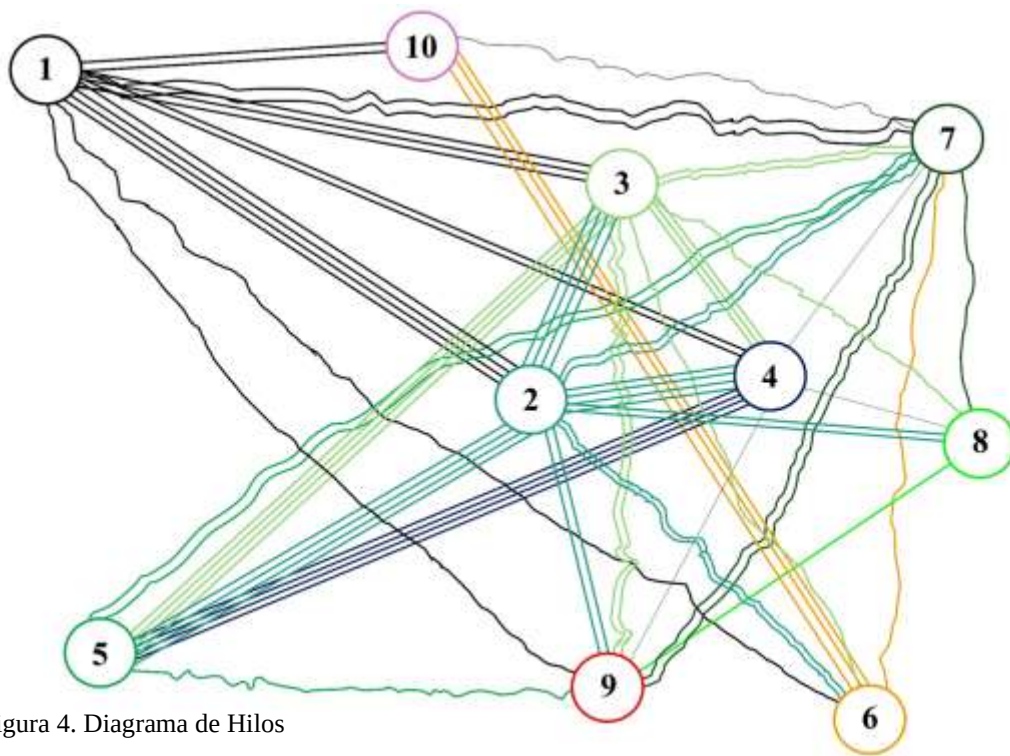


Figura 4. Diagrama de Hilos



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE ÁLAMO TEMAPACHE

Área 1. Almacén de Materia Prima: Debe mantener una cercanía crítica e inmediata con el Área 2 (4 hilos) debido al flujo masivo de insumos hacia la molienda. Mantiene relaciones secundarias de control con las Áreas 3, 4 y 10 (2 hilos). No guarda relación operativa con las Áreas 5 y 8 (ausencia de hilos), y se encuentra rígidamente separada de las Áreas 6, 7 y 9 por restricciones sanitarias de riesgo biológico.

Área 2. Producción: Se posiciona como el núcleo geométrico central de la planta. Debe estar rodeada con la máxima cercanía física por las Áreas 1, 3, 4 y 5 (4 hilos por nodo) para asegurar el flujo continuo del nopal y maíz. No requiere relación con las Áreas 8 y 10, pero se le aplica un aislamiento perimetral estricto (separación máxima) con las Áreas 6, 7 y 9 para contener ruidos y polvos.

Área 3. Laboratorio de Pruebas: Debe estar estrechamente vinculada al núcleo limpio, mostrando cercanía crítica con el Área 2 y el Área 5 (4 hilos) para la toma expedita de muestras, y con el Área 4 (3 hilos) para la entrega de dictámenes. Mantiene relaciones normales con las Áreas 1, 8 y 10 (1 y 2 hilos), y no debe relacionarse ni colindar con las Áreas 6, 7 y 9 por peligro de contaminación de los equipos de lectura.

Área 4. Área de (Calidad, Definición): Exige una localización central contigua a las Áreas 2, 5 (4 hilos) y 3 (3 hilos) para la supervisión técnica en tiempo real. Conserva líneas normales con las Áreas 1, 7 y 9 (1 y 2 hilos), mientras que se mantiene sin relación operativa con las Áreas 6, 8 y 10.

Área 5. Almacén de Producto Terminado: Debe estar conectada de forma directa y crítica al final de la línea de Producción (2) y bajo la custodia de Calidad (4) y el Laboratorio (3) (4 hilos por nodo). Mantiene una relación ordinaria con el Área 9, y no tiene ninguna vinculación operativa con las Áreas 1, 7, 8 y 10. Por seguridad física contra humedad, se le prohíbe colindar con el Área 6 (Áreas Verdes).

Área 6. Áreas Verdes: Solo posee relaciones de proximidad normal de tipo perimetral con el Área 7 y el Área 9 (1 hilo) para funciones de paisajismo. No guarda ninguna relación operacional con las Áreas 4, 8 y 10, y debe estar estrictamente alejada de los almacenes (1, 5) y zonas de proceso (2, 3) para evitar humedad exterior.



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE ÁLAMO TEMAPACHE

Área 7. Área de Tratamiento de Residuos: Registra una relación de control ordinaria con el Área 4 y Área 6 (1 hilo). No tiene relación con las Áreas 5, 8 y 10. Por bioseguridad, se le restringe y aleja por completo de las zonas limpias de la nave: Área 1, Área 2, Área 3 y Área 9, impidiendo que los lixiviados comprometan la inocuidad.

Área 8. Baños: Exige una cercanía de servicio importante con el Área 3 (2 hilos) y especialmente necesaria con el Área 9 (3 hilos) para la sanitización obligatoria del personal. No tiene relación con las Áreas 1, 5, 6 y 7, y se mantiene alejada por diseño de las Áreas 4 y 10.

Área 9. Comedor: Debe estar ligada de forma directa a los servicios higiénicos del Área 8 (3 hilos) y con cercanía normal a las Áreas 4, 5 y 6 (1 hilo). No guarda relación con el Área 10 y se le aísla rígidamente (sin colindancia) de las fuentes de contaminación y ruido de las Áreas 1, 2, 3 y 7.

Área 10. Estacionamiento: Conserva una relación logística de entrada con el Área 1 (2 hilos) para el suministro de granos y rastrojos, y una línea ordinaria con el Área 3 (1 hilo). No tiene relación operativa con las Áreas 2, 4, 5, 6, 7 y 9, y se aleja por diseño del Área 8.

4.3.4. Especificaciones Técnicas del Layout General de la Planta

La etapa final de la metodología SLP consistió en la conversión de las relaciones espaciales abstractas en un plano constructivo a escala, delimitando una nave industrial y complejo logístico de 60.00 metros de longitud por 40.00 metros de latitud, consolidando una superficie total de 2,400.00 m². Este diseño materializa las agrupaciones de nodos críticos del diagrama de hilos, asignando a cada una de las diez áreas su dimensionamiento físico, la maquinaria tecnológica necesaria y el personal operativo asignado para garantizar la continuidad del flujo productivo en "U".



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE ÁLAMO TEMAPACHE

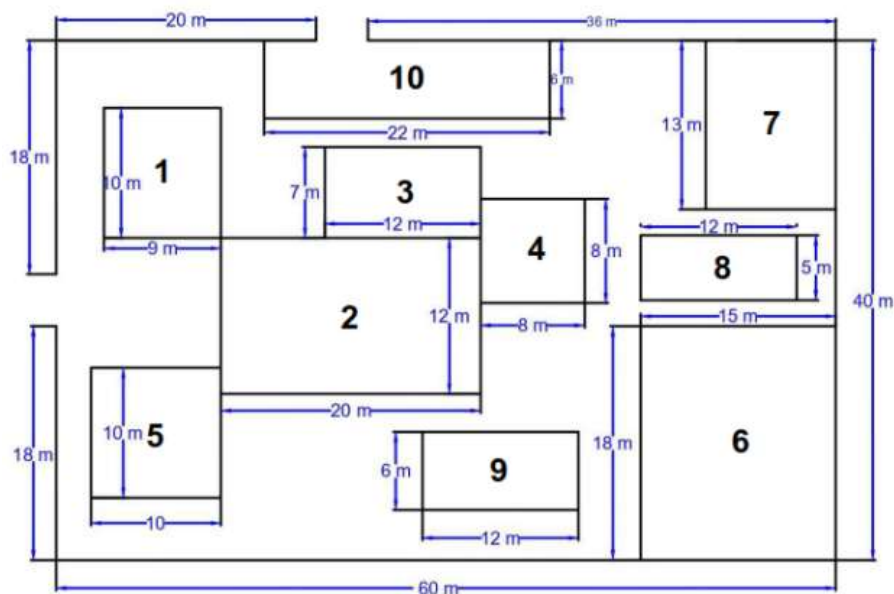


Figura 5. Plano General de Planta de Producción.

Las actividades de la planta inician en la esquina superior izquierda con el Área 1, correspondiente al Almacén de Materia Prima, el cual posee dimensiones netas de 10.00 metros de largo por 9.00 metros de ancho, un área superficial de 90.00 m² y un perímetro de cerramiento de 38.00 metros. En esta zona, el personal a cargo ejecuta el ingreso, la descarga y el acopio de los insumos, disponiendo de recipientes independientes y secos para resguardar de forma separada los lotes de nopal fresco, grano de maíz y gallinaza. Conectado de forma contigua mediante un haz de cuatro hilos de flujo crítico se localiza al centro el Área 2, destinada a Producción, la cual está configurada en el plano con un largo de 20.00 metros por un ancho de 12.00 metros, arrojando un área productiva de 240.00 m² y un perímetro de 64.00 metros. Esta estación concentra las operaciones mecánicas y de transformación del suplemento, por lo que el personal operario utiliza herramientas de corte y equipo de protección personal para la limpieza manual de espinas y el troceado en rodajas de 3 mm a 4 mm, una lámina de polietileno de baja densidad de color negro extendida sobre una superficie nivelada para la deshidratación por radiación solar directa, contenedores secos y sellados para el resguardo nocturno de las muestras, un molino de mano acoplado con tornillos de mariposa regulables para efectuar la molienda fina e independiente de cada ingrediente, y recipientes de plástico limpios donde se vierten las



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE ÁLAMO TEMAPACHE

harinas de forma intercalada para realizar un mezclado manual y gradual hasta lograr la homogeneidad de la mezcla.

Justo en la parte superior del núcleo de manufactura, cumpliendo con las necesidades de alta cercanía del diagrama de hilos, se ubica el Área 3, que alberga el Laboratorio de Pruebas con dimensiones de 12.00 metros de largo por 7.00 metros de ancho, sumando una superficie de 84.00 m² y un perímetro de 38.00 metros. En esta zona limpia, el personal técnico realiza la caracterización fisicoquímica utilizando un equipamiento analítico integrado por una microbalanza de alta precisión, vasos de precipitado (beakers), un potenciómetro digital para la medición de pH, una termobalanza automatizada operada a una temperatura controlada de 130 °C para humedad, cápsulas de porcelana introducidas en una mufla a 550 °C para cenizas, un sistema de lixiviación acuosa con papel filtro y embudo, un colorímetro digital LaMotte SMART3 configurado en los códigos operativos 085 y 081 junto con viales de lectura para potasio y fosfato, tubos Eppendorf procesados en una microcentrífuga a 10,000 rpm, dedales de papel filtro acoplados a un sistema Soxhlet cargado con n-Hexano para la extracción de lípidos, tubos de ensayo homogeneizados en un mezclador vórtex y sometidos a baño María sobre una parrilla eléctrica, y un espectrofotómetro digital para cuantificar carbohidratos mediante la técnica del DNS. Alineada de manera horizontal a la zona de pruebas se encuentra el Área 4, denominada Área de (Calidad, Producción), diseñada como un cuadrante de supervisión con 8.00 metros de largo por 8.00 metros de ancho, un área de 64.00 m² y un perímetro de 32.00 metros, la cual amarra los hilos de control técnico para que el personal verifique posibles pérdidas de material durante el proceso y vigile el cumplimiento de las porciones de la ración. Conectado al final de la línea se sitúa el Área 5, el Almacén de Producto Terminado, edificado en el extremo inferior izquierdo con un bloque de 10.00 metros de largo por 10.00 metros de ancho, un área de 100.00 m² y un perímetro de 40.00 metros, donde el personal realiza el envasado en bolsas de plástico y el resguardo del alimento en un lugar seco y libre de humedad.

En cuanto a las áreas exteriores y de soporte que el diagrama de hilos segregó hacia la periferia por restricciones analíticas o de bioseguridad, el plano sitúa en la esquina inferior derecha el Área 6, asignada a las Áreas Verdes, delimitada con un frente de 15.00 metros de



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE ÁLAMO TEMAPACHE

longitud y una línea de pasillo colindante de 18.00 metros, la cual no cuenta con maquinaria ni personal fijo por ser una zona ambiental. En el extremo superior derecho se localiza el Área 7, denominada Área de Tratamiento de Residuos, que cuenta con 13.00 metros de largo por 12.00 metros de ancho, un área de aislamiento de 156.00 m² y un perímetro de 50.00 metros, sirviendo para el control perimetral de mermas e impurezas físicas. La sección de servicios esenciales para los trabajadores se organiza en el bloque lateral derecho mediante el Área 8, destinada a los Baños, diseñada con 12.00 metros de largo por 5.00 metros de ancho, un área de 60.00 m² y un perímetro de 34.00 metros, equipada con servicios sanitarios y lockers, la cual colinda directamente en su muro inferior con el Área 9, asignada al Comedor, edificado con dimensiones de 12.00 metros de largo por 6.00 metros de ancho, sumando una superficie de 72.00 m² y un perímetro de 36.00 metros, funcionando ambas estaciones como espacios comunes para el descanso, confort y aseo de todo el personal de la planta. Finalmente, la entrada logística se concentra en el frente superior exterior mediante el Área 10, correspondiente al Estacionamiento, el cual dispone de un andén de 6.00 metros de ancho por una longitud de base de 22.00 metros dentro de un acceso vial total de 36.00 metros, sirviendo para la maniobra de transporte pesado y bajo la custodia del personal de control de accesos.

4.4. Análisis de Impactos Operativos, Gestión de Residuos Sólidos y Cumplimiento Normativo de Bioseguridad

Este apartado describe los mecanismos operativos implementados en el sistema productivo para mitigar riesgos biológicos, administrar los residuos sólidos (particularmente las excretas avícolas o gallinaza y las mermas de nopal) y verificar la conformidad del proceso con el marco normativo federal mexicano. El objetivo fundamental es asegurar la inocuidad alimentaria del suplemento bovino y la bioseguridad integral de la planta procesadora.

4.4.1. Gestión Integral de Residuos Sólidos y Protocolo de Bioseguridad

La operación del sistema productivo demanda la recepción de materias primas con alta carga orgánica y microbiológica latente (gallinaza). Por lo tanto, el impacto operativo se gestiona mediante la segregación física y el tratamiento térmico-gravimétrico de los insumos y subproductos, clasificándolos según su criticidad operativa:



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE ÁLAMO TEMAPACHE

- Residuos de Entrada / Materia Prima Cruda (Gallinaza): Clasificada como residuo orgánico de alto riesgo biológico. Su impacto operativo se mitiga en el Área de Tratamiento mediante un proceso de deshidratación solar profunda e inversión de hileras durante un período controlado de 5 días. Este método reduce la humedad a niveles inferiores al 12%, induciendo una estabilización térmica que elimina la viabilidad de patógenos esporulados.
- Mermas de Proceso (Nopal y Fibra): Los residuos vegetales generados durante el corte y cribado se reincorporan de manera inmediata al flujo de compostaje secundario o se someten a deshidratación acelerada para evitar la proliferación de hongos filamentosos y la atracción de vectores biológicos (fauna nociva) en las áreas de molienda.

4.4.2. Verificación de Cumplimiento de la NOM-012-SAG/ZOO-2020

La norma NOM-012-SAG/ZOO-2020 establece las Especificaciones para la regulación de productos para uso o consumo animal. Para verificar su cumplimiento en el diseño operativo, se estructuraron las siguientes barreras de control físico y administrativo dentro de la distribución de planta:

Zonificación y Delimitación Física de Áreas: En correspondencia con el numeral de almacenamiento de la norma, el layout industrial se diseñó bajo una configuración en "U" que delimita e identifica de forma fija las siguientes áreas secuenciales y aisladas:

- Área de Recepción y Muestreo de Materias Primas.
- Área de Cuarentena (para lotes de gallinaza y maíz en espera de liberación analítica).
- Área de Almacenamiento de Materias Primas Aprobadas.
- Área de Pesaje, Mezclado y Procesamiento Primario (Zona Limpia).
- Área de Almacenamiento de Producto Terminado y Producto Rechazado/Caduco (completamente independientes para evitar contaminación cruzada).

Control de Calidad y Trazabilidad: Se implementa un sistema operativo de bitácoras obligatorias de entrada y salida de materiales, donde cada lote de suplemento producido debe contar con un registro de control de calidad interno que verifique los parámetros físico-químicos críticos (monitoreo de pH alcalino estable de 8.59 y porcentaje de humedad final del 11.74%).



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE ÁLAMO TEMAPACHE

4.4.3. Verificación de Cumplimiento de la NOM-060-ZOO-1999

La norma NOM-060-ZOO-1999 regula las Especificaciones zoosanitarias para la transformación de despojos animales y su empleo en la alimentación animal. Debido a que el suplemento utiliza gallinaza (un despojo/esquilmo de origen avícola), la operación de la planta se sujeta a los siguientes controles cinéticos y térmicos:

- **Tratamiento Térmico de Inactivación:** La norma exige que los tejidos y despojos procesados garanticen la destrucción de agentes patógenos. El impacto operativo se absorbe al estandarizar el proceso de deshidratación y pre-mezclado, asegurando que la mezcla alcance una temperatura interna y condiciones de actividad de agua (a_w) que imposibiliten la supervivencia de *Salmonella spp.* y *Escherichia coli*.
- **Control de Humedad Crítica:** Para dar cumplimiento al estándar que limita el exceso de agua en productos transformados, el sistema productivo cuenta con una fase de cribado y molienda con granulometría controlada. Esto asegura que el producto final terminado se empaque con una humedad estabilizada (rango de 11.74% a 12.57%), previniendo la degradación proteica y la formación de toxinas en el almacenamiento.
- **Restricción y Etiquetado:** Operativamente, se establece en los manuales de procedimientos y en el diseño de empaques la leyenda precautoria obligatoria que prohíbe explícitamente el uso de este suplemento en especies rumiantes si el origen de las harinas o excretas compartiera trazas de tejidos de rumiantes, garantizando el aislamiento epidemiológico de la planta.

4.4.4. Impacto Operativo y Aseguramiento de la Inocuidad

Para resumir la viabilidad metodológica de este objetivo, se diseñó la siguiente matriz de control operativo, la cual vincula la acción técnica con el parámetro de inocuidad exigido por la legislación:

Tabla 5. Matriz de Impacto Operativo y Aseguramiento de la Inocuidad.

Etapas Operativas / Residuos	Impacto Identificado	Mecanismo de Mitigación	Parámetro de Verificación	Norma Asociada
Recepción de Gallinaza	Carga microbiológica y humedad excesiva.	Cuarentena obligatoria y deshidratación solar controlada (5 días).	Humedad final ≤ 12	NOM-060-ZOO-1999
Pesaje y Mezclado	Contaminación cruzada por flujo inverso.	Diseño de layout unidireccional en "U" (Separación Zona Sucia / Limpia).	Cero retorno de material en bandas	NOM-012-SAG-ZOO-2020
Almacenamiento de Insumos	Degradación por humedad ambiental.	Delimitación de tarimas de polietileno alejadas de muros y pisos.	Monitoreo higrométrico diario	NOM-012-SAG-ZOO-2020
Producto Terminado	Inestabilidad biológica y proliferación micótica.	Control bromatológico del pH (8.59) y cenizas (12.57%).	Análisis de estabilidad de lotes	NOM-012-SAG-ZOO-2020



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE ÁLAMO TEMAPACHE

V. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN.

El porcentaje final de humedad del suplemento alimenticio completo fue del 11,74%, en buen acuerdo con el proceso de producción de alimento seco comercial para rumiantes. Comparando esto con Durán Castro y Kebreau (2011), quienes encontraron que el contenido de humedad en concentrados estándar es del 10,85%, está claro que el monitoreo del contenido de agua libre en rangos bajos es un método crucial de ingeniería de control para maximizar la densidad de materia seca por masa. Un contenido de agua del 11,74% en el patio de secado solar no solo debería asegurar el procesamiento eficiente del inventario, sino también frenar los hongos filamentosos y, por lo tanto, la biosíntesis de micotoxinas y, por ende, prolongar la vida útil. Este control de la humedad y la seguridad alimentaria no solo está relacionado con la eficiencia térmica de la deshidratación, sino también con el diseño óptimo de la planta según los criterios formales del estudio. Para asegurar este control y evitar la contaminación cruzada por flujo inverso, se adoptó la Planificación Sistemática de Distribución (SLP) para diseñar toda la planta en 2.400,00 m² en un flujo continuo en "U".

Esta disposición espacial fue determinada cualitativa y cuantitativamente por la Matriz de Relación de Actividades y el Diagrama de hilos, las herramientas analíticas que se utilizaron para determinar las fuerzas de atracción logística y una zonificación de bioseguridad entre las estaciones operativas. Muther (1981) y Álvarez-Arias et al. (2022) afirman que las matrices de proximidad cualitativa y los diagramas de cuerdas son necesarios para reducir la distancia de transferencia de materiales y estandarizar el tráfico lógico, apoyando el diseño centralizado de la planta industrial propuesta en su documento. En este edificio industrial, la restricción de salud más importante se centró en el aislamiento del Área 7, que comprende 156.00 m² del cuadrante superior derecho de la planta de procesamiento. La separación física del módulo de las áreas limpias de pesaje, molienda y empaque final es una de las barreras de bioseguridad más importantes que evita que la alta carga microbiológica de los excrementos crudos de aves de corral comprometa la seguridad del suplemento terminado. El requisito de segregación perimetral está de acuerdo con Garcés Pérez (2019), quien afirma que el único diseño de ingeniería para prevenir la propagación de patógenos y la cadena epidemiológica de transmisión cruzada es colocar



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE ÁLAMO TEMAPACHE

barreras físicas entre áreas sucias y limpias. Por lo tanto, el tráfico lógico unidireccional del método SLP asegura un núcleo limpio y que las personas o equipos que manejan estiércol crudo de aves de corral no ingresen al núcleo limpio de acuerdo con la política de delimitación e identificación de áreas definida en la Norma Oficial Mexicana NOM-012-SAG/ZOO-2020.

El diseño de su disposición se basa en esta dirección legal federal y está físicamente aislado de los almacenes, estaciones de pesaje y almacenamiento de productos terminados, y cumple con las directrices para la viabilidad de la microplanta. La estabilización térmica y la deshidratación en el área de desechos también es central para los requisitos de la NOM-060-ZOO-1999 de un control higrométrico diario y la viabilidad industrial del suplemento para un uso ganadero seguro contra patógenos como *Salmonella spp.* y *Escherichia coli*. Esta seguridad microbiológica está de acuerdo con los hallazgos de Cortez-Romero et al. (2025) de que el tratamiento de deshidratación solar controlada en profundidad es la tecnología de ingeniería más efectiva para erradicar microorganismos patógenos sin afectar la volatilización del nitrógeno molecular y, por lo tanto, la calidad de la fermentación del suplemento se mantiene lo más segura posible y se logra la estabilidad final de humedad del 11.74% en la dinámica de balance gravimétrico.



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE ÁLAMO TEMAPACHE

VI. CONCLUSIONES

Basado en el análisis analítico en el Laboratorio de Postcosecha, se demostró que la formulación basal del suplemento nutricional (55% de nopal deshidratado (*Opuntia ficus-indica*), 25% de maíz molido (*Zea mays* L.) y 20% de estiércol de ave tratado térmicamente) es bromatológicamente viable y estable para ayudar a mitigar la sequía bovina en la región de Álamo Temapache, Veracruz. El porcentaje final de humedad fue del 11.74% y estuvo por debajo del 12.00% requerido para minimizar la degradación fúngica y prolongar la vida útil del producto; el contenido de cenizas inorgánicas fue del 12.57% en el método Soxhlet y la absorbancia de azúcares fue de 1.134 en DNS.

Se observó un contenido mineral de 375 ppm de potasio y fosfato soluble y el valor de pH de 8.59 fue ideal para proteger el ambiente ruminal y evitar la acidosis en el rebaño. Desde una perspectiva industrial, se logró la estandarización del proceso de fabricación mediante la creación de un Diagrama de Operaciones de Proceso de 22 actividades con ASME, y el diseño de una microplanta de 2,400 m² (60 m x 40 m) con el método SLP en una sola dirección (U) para aislar el Área de Tratamiento de Residuos (156 m²) y asegurar el cumplimiento de las normas NOM-012-SAG/ZOO-2020 y NOM-060-ZOO-1999.

Tras la verificación del proceso, calidad y seguridad, se confirma la Hipótesis de Investigación (H1) y se refuta la Hipótesis Nula (H0) experimentalmente y hemos demostrado que la estandarización operativa y la distribución de la planta determinan la estabilidad fisicoquímica y la bioseguridad del alimento terminado, lo cual es una alternativa técnica, económica y ambientalmente viable para la producción ganadera regional.



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE ÁLAMO TEMAPACHE

Bibliografía:

Achary, V. S., et al. (2021). Optimización de la distribución en planta con formulación QAP y simulación de eventos discretos. *Revista de Investigación de Ingeniería*.

Albarrán-Portillo, B., Rebollar-Rebollar, S., García-Martínez, A., Díaz-Marcos, R., Ortiz-Gómez, R., & Avilés-Nova, F. (2016). Cambios en la ganadería doble propósito en el trópico seco del Estado de México. *Agrociencia*, 50(6), 701-711.

Álvarez-Arias, A., et al. (2022). Agroindustria: estudio técnico de una planta extractora y distribución de planta (SLP). Dialnet.

Arias, F. G. (2012). *El Proyecto de Investigación: Introducción a la metodología científica* (6ª ed.). Editorial Episteme.

Arvanitoyannis, I. S. (2008). *HACCP and ISO 22000: Application to foods of animal origin*. Blackwell Publishing.

ASME. (2012). *Standard for process charts*. American Society of Mechanical Engineers.

Bárcena-Gama, J. R., et al. (2015). Evaluación nutricional, energética y extracto etéreo de dietas para bovinos de engorda. *Agrociencia*, 49(6), 615-626.

Barros Gómez, G. F., & Sinchi Pillco, M. E. (2012). Determinación de las concentraciones de calcio, fósforo, magnesio, proteínas totales, urea y glucosa en suero sanguíneo de vacas lecheras Holstein mestizas en producción aparentemente sanas, en el cantón Cuenca (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador. (Archivo referenciado: UPS-CT002458_2.pdf).

Behar Rivero, D. S. (2008). *Metodología de la Investigación*. Editorial Shalom.

Casals, M., Forcada, N., & Roca, X. (2012). *Diseño de complejos industriales: Fundamentos*. Universitat Politècnica de Catalunya.

Castañeda-Franco, P. A., et al. (2021). Calidad fisicoquímica y microbiológica de suplementos alimenticios para bovinos elaborados con esquilmos agrícolas. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 8(2).



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE ÁLAMO TEMAPACHE

Castro Angulo, A. (2024). Análisis costo-beneficio del uso de nopal deshidratado como suplemento proteico en ganado de engorda. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Chapingo.

Coria-Avalos, V. M., et al. (2020). Alternativas tecnológicas para el uso de subproductos agroindustriales en la alimentación bovina. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 11(2), 405-420.

Corona, L., et al. (2013). Efecto del procesamiento del grano de maíz en la digestibilidad y el comportamiento productivo de bovinos. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 4(2), 189-202.

Cortez-Romero, C., García-López, R., & Martínez-Sánchez, J. (2025). Dinámica del balance gravimétrico y estabilidad microbiológica del nopal deshidratado en la alimentación pecuaria. *Revista Iberoamericana de Agrociencias*, 11(1), 89-104.

Cuatrecasas Arbós, L. (2011). Diseño de procesos de producción flexible. Díaz de Santos.

Domínguez-Vara, I. A., et al. (2017). Importancia y evaluación de los minerales en la nutrición de bovinos en pastoreo. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 8(3), 285-298.

Durán Castro, F., & Kebreau, R. J. (2011). Análisis comparativo nutricional y económico de tres alimentos balanceados para vacas lecheras de alta producción (Proyecto especial de graduación). Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras. (Archivo referenciado: AGI-2011- T009_2.pdf).

Durán-Castro, R., & Kebreau, A. (2011). Caracterización nutricional y balances higrométricos en la elaboración de piensos concentrados para rumiantes. *Revista de Nutrición Animal Tropical*, 15(2), 45-58.

Fonseca-López, D., Saavedra-Montañez, G., & Rodríguez-Molano, C. E. (2018). Elaboración de un alimento para ganado bovino a base de zanahoria (*Daucus carota* L.) mediante fermentación en estado sólido como una alternativa ecoeficiente. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 12(1), 175-182. <https://doi.org/10.17584/rcch.2018v12i1.7416>. (Archivo referenciado: PPS_1497_Elaboracion_alimento_ganado_2.pdf).



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE ÁLAMO TEMAPACHE

Galina, C. S., Osnaya, F., & Rubio, I. (2016). Consideraciones sobre los requerimientos nutricionales en bovinos productores de carne en el trópico. *Revista MVZ Córdoba*, 21(3), 5489-5501.

Garcés Pérez, M. (2019). Evaluación de las condiciones higiénico-sanitarias y diseño de Layout en la industria alimentaria. Universidad Nacional del Comahue.

García-López, R., et al. (2018). Evaluación de la calidad fermentativa y nutricional de ensilajes y suplementos para rumiantes. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(4), 789-801.

García-Pérez, A., et al. (2023). Resiliencia de los sistemas de producción bovina en el medio rural mexicano. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 14(1), 112-125.

García-Pérez, A., et al. (2023). Sistemas de producción bovina en México: Resiliencia y estrategias de alimentación en el trópico. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*.

García Sabater, J. P. (2021). Dirección de operaciones: Diseño de sistemas de producción. Universitat Politècnica de València.

Gutiérrez-Castañeda, C., et al. (2019). Evaluación de patógenos y normatividad en el uso de excretas avícolas para la alimentación bovina en México. *Abanico Veterinario*.

Gutiérrez, C., et al. (2017). Caracterización nutricional y degradabilidad ruminal de diferentes genotipos de maíz para uso pecuario. *Acta Universitaria*, 27(3), 15-22.

Heizer, J., & Render, B. (2014). Principios de administración de operaciones (9.^a ed.). Pearson Education.

Hernández-Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). Metodología de la Investigación (6^a ed.). McGraw-Hill.

Herrera-Pérez, J., et al. (2020). Caracterización nutricional y perfil mineral de recursos forrajeros y suplementos en la alimentación de rumiantes. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 7(1), 1-10.

Hurtado de Barrera, J. (2010). Metodología de la investigación: Guía para la comprensión holística de la ciencia (4^a ed.). Ediciones Quirón.



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE ÁLAMO TEMAPACHE

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2023). Censo Agropecuario 2022: Resultados oportunos sobre unidades de producción con pérdidas por factores climáticos. México: INEGI.

López-García, J. C., Valdés, L. S., & Gómez, P. A. (2020). Importancia del nopal (*Opuntia* spp.) en los agroecosistemas áridos de México. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 19(2), 45-58.

López-Gómez, A. (2015). Las instalaciones en las industrias agroalimentarias. AMV Ediciones.

López-Varela, D. (2017). Caracterización bromatológica de pellets elaborados a partir de subproductos agropecuarios para la alimentación de bovinos. *Tecnología en Marcha*, (Especial Movilidad Estudiantil 4), 73-81. <https://doi.org/10.18845/tm.v30i5.3226>. (Archivos referenciados: 0379-3982-tem-30-s1-73 (1)_2.pdf y 0379-3982-tem-30-s1-73_2.pdf).

López-Varela, O. (2017). Valorización bromatológica de deyecciones avícolas y subproductos agrícolas en la formulación de suplementos minerales para ganado bovino. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 8(4), 112-125.

Macias Vera, M. Y. (2024). Caracterización bromatológica de 2 variedades de alfalfa (*Medicago sativa*) sometida a mutación química con Ethyl Methane Sulfonate (Trabajo de integración curricular). Universidad Técnica de Babahoyo, Ecuador. (Archivo referenciado: PI-UTB-FACIAG-VETERINARIA-REDISEÑADA-000073_2.pdf).

Magaña-Magaña, M. A., et al. (2020). Productividad y reserva de capital en el sistema de producción bovina en el trópico. *Agrociencia*, 54(3), 345-358.

Martínez-Tinajero, J. J., Torres-Hernández, G., & Herrera-Haro, J. G. (2017). Alternativas para la formulación de raciones y alimentación de bovinos en regiones tropicales. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 4(1), 55-66.

Melo Cuervo, A., Pérez Cantero, B. J., & Vera Solís, O. (2025). Impacto Económico y Social de la Sequía del 2024 en la Región Huasteca Baja del Estado de Veracruz, México. *Ibero Ciencias - Revista Científica y Académica*, 4(4), 1888-1904.



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE ÁLAMO TEMAPACHE

Munguía Hernández, R. G., & Pantaleón Peña, J. D. (2016). Evaluación de calidad de ensilajes de pasto Estrella (*Cynodon nlemfluensis*) y pasto Guinea (*Panicum maximum*) con adición de harina de maíz, melaza y Biostabil® como inóculo (Proyecto especial de graduación). Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras. (Archivo referenciado: CPA-2016-T067_2.pdf).

Muther, R. (1981). Distribución en planta (4.^a ed.). Hispano Europea.

Niebel, B. W., & Freivalds, A. (2014). Ingeniería industrial: Métodos, estándares y diseño del trabajo (13.^a ed.). McGraw-Hill Interamericana.

NOM-012-SAG/ZOO-2020: Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2020, 20 de octubre). Norma Oficial Mexicana NOM-012-SAG/ZOO-2020, Especificaciones para la regulación de productos para uso o consumo animal. Diario Oficial de la Federación.

NOM-060-ZOO-1999: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. (2000, 28 de junio). Norma Oficial Mexicana NOM-060-ZOO-1999, Especificaciones zoosanitarias para la transformación de despojos animales y su empleo en la alimentación animal. Diario Oficial de la Federación.

Ortiz-Pérez, H., et al. (2018). Estrategias de uso del nopal (*Opuntia ficus-indica*) en la alimentación de bovinos carne. Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias, 9(4), 720-735.

Pérez Gosende, P. (2018). Estado del arte del diseño de distribución en planta (Facility Layout Design). Revista Científica de Ingeniería Industrial.

Pérez-Valdivia, M. A., et al. (2019). Análisis bromatológico y vida útil de suplementos alimenticios para ganado bovino en el trópico. Abanico Veterinario, 9(1), 1-12.

Pinos-Rodríguez, J. M., Velázquez, J. C., González, S. S., & Álvarez, G. (2010). Evaluación nutricional del nopal (*Opuntia* spp.) como forraje para rumiantes. Agrociencia, 44(5), 535-545.

Pirela, M. F., et al. (2018). Estrategias de suplementación para bovinos a pastoreo en regiones tropicales. Revista de la Universidad del Zulia, 9(24), 12-25.



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE ÁLAMO TEMAPACHE

Posada-Ochoa, S. L., et al. (2016). Determinación analítica de fracciones de carbohidratos y su dinámica de fermentación ruminal. *Revista MVZ Córdoba*, 21(1), 5123-5135.

Ramírez-Bribiesca, J. E., et al. (2015). Caracterización nutricional y métodos de procesamiento de excretas avícolas para uso forrajero. *Agrociencia*, 49(4), 385-397.

Ríos-Rincón, F. G., et al. (2014). Valor nutricional y fermentación in vitro de dietas para ovinos con diferentes niveles de gallinaza tratada. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 5(2), 221-235.

Rodríguez-García, R., Del Razo-Rodríguez, O. E., & Pérez-Hernández, P. (2023). *Opuntia ficus-indica* como alternativa forrajera resiliente para la producción bovina en el semiárido. *Ciencia Ganadera*, 14(2), 45-56.

Rodríguez Mejía, S., Flores Sánchez, D., León Merino, A., Pérez Hernández, L. M., & Aguilar Ávila, J. (2018). Diagnóstico de sistemas de producción de bovinos para carne en Tejupilco, Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(2), 465-471.

Sánchez-Castillo, M. A., et al. (2020). Uso estratégico de la gallinaza como fuente de nitrógeno no proteico en suplementos para rumiantes. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 7(2), 88-102.

Sánchez-Santillán, P., et al. (2016). Evaluación in vitro e in vivo de suplementos alimenticios para bovinos en trópico seco. *Agrociencia*, 50(7), 831-845.

Santiago-Hernández, F., Hernández-Guzmán, F. J., Urrutia-Morales, J., Rodríguez-Ortega, L. T., Velázquez-Martínez, M., & Granados-Rivera, L. D. (2026). Adición de nopal y maguey para mejorar el consumo de rastrojo de maíz en cabras. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 13(1), e4068.

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2024). Producción de carne de canal bovina en México 2023. Gobierno de México.

Stephens, M. P., & Meyers, F. E. (2019). Diseño de instalaciones de manufactura y manejo de materiales (5.ª ed.). Pearson Educación.



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE ÁLAMO TEMAPACHE

Vallhonrat, J. P., & Corominas, A. (2018). Localización, distribución en planta y manutención. Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya.

Vázquez-Carrillo, M. G., et al. (2021). Valor nutritivo y densidad energética del endospermo en granos de maíz para nutrición animal. *Acta Universitaria*, 31, 1-15.

Welsh Rodríguez, C. M., Ochoa Martínez, C. A., & Olán Román, A. (2022). Sequía en Veracruz: impactos económicos preludio de un desastre futuro. En A. Martí Ezpeleta et al. (Eds.), *Retos del cambio climático: impactos, mitigación y adaptación* (pp. 709-720). Asociación Española de Climatología.

Wild, R. (2017). *Operations Management*. Cengage Learning.

Zárate-Martínez, J. P., et al. (2022). Engorda de becerros en praderas de pasto Taiwán (*Pennisetum purpureum* Schum), innovación productiva en el trópico. *Agro divulgación*, 2(3), 13-15.