

Resumen

El curado de las vainas de vainilla constituye una etapa crítica que define la calidad, el aroma y el valor comercial del producto. En Ecuador no existen referencias de una planta agroindustrial diseñada integralmente para su ejecución bajo condiciones controladas. El objetivo es diseñar una planta industrial para el curado de vainilla, para ello, se aplicó una metodología modificada que integra selección de tecnología, estimación de capacidad, balance de materia y energía simulado en *SuperPro Designer*, evaluación económica, distribución de planta mediante la metodología SLP con apoyo de inteligencia artificial (IA) y visualización del modelo tridimensional mediante realidad aumentada (RA). Se obtuvo un diseño técnicamente viable con una capacidad instalada de 320 kg por ciclo, ubicado en la parroquia Veracruz, provincia de Pastaza. La evaluación económica evidenció condiciones favorables con un VAN de 26 000 USD, una TIR de 13,20 %, un *Payback* de 5,42 años, un ROI de 18,44 % y un margen bruto de 27,82 %, mientras que el proceso mostró un bajo impacto ambiental al no generar residuos sólidos. La distribución de planta evaluada mediante SLP con apoyo de IA en tres iteraciones permitió eliminar inconsistencias de identificación y simbología, validación que fue complementada mediante la visualización en RA del modelo tridimensional.

Palabras clave

vainilla curada, diseño de planta agroindustrial, factibilidad económica, sostenibilidad

Abstract

The curing of vanilla pods is a critical stage that defines the quality, aroma, and commercial value of the product. In Ecuador, there are no references to an agro-industrial plant designed comprehensively for this process under controlled conditions. The objective is to design an industrial plant for vanilla curing. To achieve this, a modified methodology was applied, integrating technology selection, capacity estimation, mass and energy balance simulations using *SuperPro Designer*, economic evaluation, plant layout using the SLP methodology with artificial intelligence (AI) support, and visualization of the three-dimensional model using augmented reality (AR). A technically viable design was obtained with an installed capacity of 320 kg per cycle, located in the Veracruz parish, Pastaza province. The economic evaluation revealed favorable conditions with a net present value (NPV) of \$ 26,000, an internal rate of return (IRR) of 13.20 %, a payback period of 5.42 years, a return on investment (ROI) of 18.44 %, and a gross margin of 27.82 %. The process also demonstrated a low environmental impact, generating no solid waste. The plant layout, evaluated using System-on-a-Process (SLP) with AI support in three iterations, eliminated inconsistencies in identification and symbology validation. The AR visualization of the three-dimensional model further enhanced this validation.

Keywords

cured vanilla, agro-industrial plant design, economic feasibility, sustainability.

Direcciones ¹Universidad Estatal Amazónica. Pastaza, Ecuador. Pastaza, Ecuador. Email: kl.ruizu@uea.edu.ec, as.gomeza@uea.edu.ec, amperez@uea.edu.ec
Autor para la correspondencia Katherine Lizbeth Ruiz Ushiña. Universidad Estatal Amazónica. Pastaza, Ecuador. Pastaza, Ecuador. Email: kl.ruizu@uea.edu.ec
Cómo citar RUIZ USHIÑA, Katherine Lizbeth, GÓMEZ ANGULO, Annie Shoshana and PÉREZ MARTÍNEZ, Amaury 2026. **Diseño de una planta para el curado de las vainas de vainilla**. PrePrint UEA. Vol. AGI2626. p. ep04–1227. <https://doi.org/10.59410/PREPRINT-UEA-vAGI2626ep04-1227>

Editores Académicos xxx-xxxx-xxx

Editorial Editorial de la Universidad Estatal Amazónica 2026

Copyright Derechos de autor 2026 | PrePrint UEA. 
Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución 4.0.
Los autores del artículo autorizan a la RACYT a que este artículo sea compartido bajo las condiciones de la Licencia Creative Commons 4.0 (CC-BY 4.0).

1. Introducción

La vainilla natural obtenida de las vainas curadas es uno de los saborizantes de mayor valor comercial a nivel mundial, resultado no solo de su cultivo sino principalmente del proceso de curado, etapa determinante en la formación de vainillina y de los demás compuestos responsables de su aroma y sabor característicos. Según Gavel et al. (2025), la vainilla es una de las especias naturales más apreciadas y comercializadas a nivel mundial debido a sus características aromáticas únicas y a la amplia variedad de aplicaciones que posee en las industrias alimentaria, cosmética, farmacéutica y de perfumería.

Su principal compuesto aromático es la vainillina acompañada por cientos de compuestos volátiles que contribuyen al desarrollo de su perfil sensorial característico. Debido a la complejidad de su producción, que incluye la polinización manual de las flores y un prolongado proceso postcosecha, la vainilla natural es considerada una de las especias de mayor valor económico en el mercado internacional.

A pesar de la importancia de esta especie, las vainas recién cosechadas no tienen su aroma ni las propiedades organolépticas que distinguen a la vainilla curada. En su estado fresco, los frutos contienen principalmente glucovainillina, un precursor inodoro que requiere transformaciones bioquímicas

para convertirse en vainillina y otros compuestos aromáticos. De acuerdo con Antonio-Gutiérrez et al. (2023), estas transformaciones ocurren durante el proceso de curado cuando la acción de enzimas como la β -glucosidasa es favorecida por condiciones específicas de temperatura, humedad y tiempo, permitiendo la liberación de los compuestos responsables del aroma característico de la vainilla.

El curado de la vainilla representa una etapa crítica dentro de la cadena de valor, ya que determina en gran medida la calidad final del producto, su aceptación comercial y su valor económico. Gavel et al. (2025) destacan que este proceso resulta fundamental para el desarrollo de las características aromáticas y sensoriales que distinguen a la vainilla curada. Tradicionalmente, el curado comprende cuatro etapas relevantes: inhibición o escaldado, sudado, secado y acondicionamiento.

Durante la etapa de inhibición se interrumpe la actividad fisiológica de las vainas mediante tratamientos térmicos controlados, posteriormente, en el sudado se favorecen reacciones enzimáticas y bioquímicas responsables de la formación de compuestos aromáticos, proceso en el que intervienen diversas transformaciones que contribuyen al desarrollo de la vainillina, dicho por Antonio-Gutiérrez et al. (2023).

El secado permite reducir progresivamente el contenido de humedad para evitar deterioros microbiológicos; finalmente, el acondicionamiento contribuye a estabilizar las propiedades físicas y aromáticas del producto final. Los siguientes autores Perez-Viveros et al. (2025), indican que la interacción adecuada entre estas etapas influye directamente en atributos como el contenido de vainillina, el color, la textura, el contenido de humedad y la calidad sensorial de las vainas curadas.

Sin embargo, los métodos tradicionales de curado presentan diversas limitaciones como la duración del proceso y la dependencia de factores ambientales. En muchas regiones productoras el curado puede extenderse durante varios meses y requiere una supervisión constante para controlar adecuadamente la exposición al calor, la humedad y las condiciones de almacenamiento. Por ello, los autores Gavel et al. (2025) señalan que las variaciones climáticas, la experiencia de los operarios y la disponibilidad de infraestructura adecuada pueden generar diferencias significativas en la calidad final de las vainas, lo que provoca pérdidas económicas, un desarrollo irregular del aroma y dificultades para cumplir con los estándares comerciales exigidos por los mercados especializados.

Ante estas limitaciones, en los últimos años se han desarrollado diversas alternativas tecnológicas orientadas a optimizar el proceso de curado. De acuerdo con Antonio-Gutiérrez et al. (2023), las investigaciones recientes han reportado el uso de tecnologías como microondas, ultrasonido, altas presiones hidrostáticas, cámaras de secado controladas y sistemas automatizados de control térmico e higrométrico, con el objetivo de reducir los tiempos de procesamiento, mejorar la uniformidad del producto y aumentar el rendimiento de compuestos aromáticos.

Según Buitimea-Cantúa et al. (2023), estas tecnologías permiten mejorar las condiciones de procesamiento y favorecer

un mayor control sobre las variables que influyen en la calidad final de la vainilla. Por su parte, los autores Caiza et al. (2025) identifican diferentes rutas tecnológicas aplicadas al curado de vainilla con distintos niveles de madurez tecnológica (TRL), incluyendo soluciones que han alcanzado niveles próximos a TRL 8 y TRL 9, correspondientes a tecnologías validadas y aplicadas en entornos productivos reales. Este avance demuestra que el procesamiento de la vainilla ha evolucionado desde un enfoque predominantemente artesanal hacia sistemas con mayores posibilidades de control, estandarización y escalabilidad industrial.

El crecimiento de la producción primaria plantea la necesidad de fortalecer los eslabones posteriores de la cadena agroindustrial, especialmente aquellos relacionados con la transformación y agregación de valor. Según los autores Gavel et al. (2025), la comercialización de vainas verdes limita significativamente los ingresos de los productores debido a que el mayor valor económico se genera durante la etapa de procesamiento.

Por esta razón, la implementación de instalaciones especializadas para el curado permitiría transformar la materia prima local en un producto con mayores niveles de calidad, competitividad y aceptación en mercados nacionales e internacionales. Además, una infraestructura industrial adecuada facilitaría el control de variables críticas del proceso, la reducción de pérdidas postcosecha y la obtención de productos homogéneos que cumplan con requisitos técnicos y comerciales cada vez más exigentes.

En este sentido, Cervantes Castillo et al. (2018) destacan que la calidad de la vainilla curada depende directamente de las condiciones de beneficio, del contenido de humedad y de la concentración de compuestos aromáticos desarrollados durante el procesamiento. No obstante, a partir de la revisión bibliográfica y documental efectuada para esta investigación, no se identifican referencias que evidencien la existencia en Ecuador y particularmente en la Amazonía ecuatoriana de una planta agroindustrial diseñada integralmente para ejecutar el curado de vainilla bajo condiciones controladas, considerando aspectos tecnológicos, productivos, energéticos, ambientales y de distribución industrial.

Esta situación constituye una brecha dentro de la cadena de valor, ya que la disponibilidad de materia prima no garantiza por sí sola la producción de vainilla curada con calidad estandarizada y valor agregado suficiente para acceder a mercados especializados. Por lo tanto, Garza-Morales et al. (2021) identifican que los procesos de transformación y postcosecha representan etapas críticas para incrementar la rentabilidad y competitividad del cultivo, siendo necesario fortalecer la infraestructura y la gestión tecnológica asociada al procesamiento.

De igual manera, la FAO (2021) señala que el desarrollo de instalaciones adecuadas para las operaciones de curado, secado, almacenamiento y aseguramiento de la calidad constituye un elemento fundamental para mejorar el acceso a mercados y consolidar cadenas de valor sostenibles en la producción de vainilla.

Fundamentando sus bases operativas y de ingeniería en el modelo tecnológico desarrollado por Ayala Grefa (2022),

cuyo prototipo de biorreactor automatizado demuestra la viabilidad de estandarizar las variables críticas del beneficiado tradicional, reduciendo los tiempos de manufactura y garantizando un rendimiento homogéneo de los compuestos volátiles bajo un enfoque de sostenibilidad regional. De acuerdo con Perez-Viveros et al. (2025), resaltan la importancia de implementar procesos controlados que permitan garantizar la calidad del producto final y fortalecer su competitividad comercial. Por lo tanto, el objetivo es diseñar una planta industrial para el curado de vainilla.

2. Metodología

La metodología modificada (**Figura 1**) planteada por Guardado Yordi et al. (2024) fue utilizada en el diseño de una planta agroindustrial para el curado de las vainas de vainilla. En esta metodología se integran las metodologías de Guardado Yordi et al. (2025) y Guardado Yordi et al. (2026) que, combinadas, contienen un enfoque integral, herramientas de diseño de procesos, simulación y distribución en planta.

Este enfoque permite adaptar cada etapa del diseño a las características específicas del proceso de curado y a los requerimientos de calidad del producto final. La distribución de la planta constituye un elemento fundamental para garantizar la continuidad y eficiencia del proceso productivo, debido a que permite organizar de manera lógica las áreas de producción, almacenamiento, control de calidad, administración y servicios complementarios. En este sentido, la aplicación de la metodología SLP permite establecer la distribución considerando el flujo del producto, las relaciones entre las actividades y los requerimientos de espacio.

En cuanto a la distribución del layout, se plantea una organización espacial de las diferentes áreas de la planta de acuerdo con su función y relación operativa. Esta distribución contempla las áreas de producción y las áreas complementarias, como almacenamiento, control, mantenimiento, administración y circulación, procurando que cada espacio se encuentre ubicado de manera funcional y accesible. De acuerdo con Scalvenzi et al. (2025), la reorganización del layout permite mejorar la coherencia espacial, facilitar el acceso a las áreas de mantenimiento, control y almacenamiento y disminuir la interferencia de las áreas auxiliares con las rutas principales de operación.

Una adecuada organización busca mantener una secuencia operacional fluida, reducir movimientos innecesarios y evitar interferencias entre las rutas de materiales y del personal. Además, la proximidad entre etapas críticas del proceso y la correcta integración de las áreas de apoyo favorecen la coordinación, el control y la continuidad de las operaciones (Scalvenzi et al., 2025).

En la **Figura 1** se muestra la integración de estas tres metodologías que se utilizaron para el diseño del proceso y, posteriormente, el diseño de la planta, producto de la incorporación del paso Diseño de Planta con Realidad Aumentada. La metodología consta de 19 pasos. Se implementaron los pasos: producto, selección de tecnología, definir un esquema tecnológico, estimación de la capacidad, macrolocalización, balance de masa y energía, consumo de materia prima <dis-

ponibilidad de materia prima, compatible con el medio ambiente, se pueden realizar modificaciones tecnológicas, costo de diseño y adquisición de equipos, análisis económico de la inversión y la producción, alternativa factible, existen otras tecnologías, existen nuevas capacidades, diseño de la planta con realidad aumentada, tecnologías y capacidad óptimas.

Se siguieron las recomendaciones planteadas por Pérez-Martínez et al. (2012). Los pasos para la selección de la tecnología y la definición del esquema tecnológico siguieron las recomendaciones planteadas por Guardado Yordi et al. (2025) y para el paso de Distribución-Localización de la planta se siguieron las acciones planteadas por Guardado Yordi et al. (2026). La integración de las metodologías permitió complementar el diseño del proceso en los primeros pasos e incluir un paso del diseño de planta, incorporando la distribución y la localización. Aunque en el paso de distribución y localización se siguieron las acciones planteadas por Guardado Yordi et al. (2026).

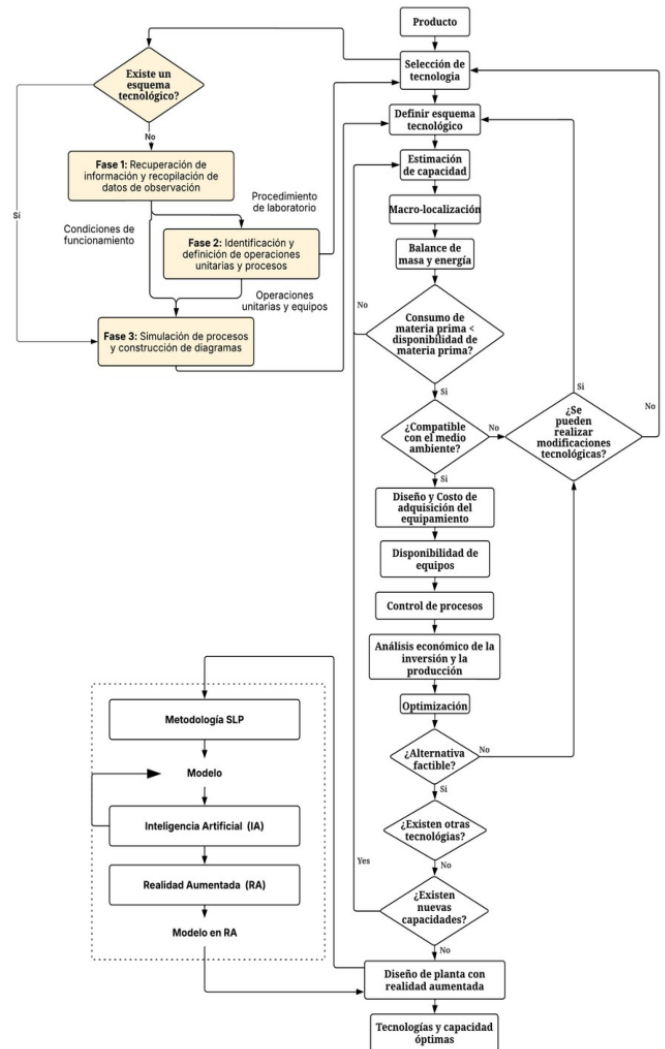


Figura 1 | Metodología para el diseño de proceso y de planta

En el desarrollo del diseño se utilizaron dos herramientas: el software *SuperPro Designer* (Intelligen, Inc.) para la simulación de los flujos del proceso y el *SketchUp Web 2025* para generar representaciones tridimensionales precisas de las estructuras y de la distribución espacial de los equipos. En el

SuperPro Designer se ingresaron los parámetros económicos y las principales condiciones de operación necesarias para simular el proceso de curado de las vainas.

Las condiciones correspondientes a las etapas de marchitado, sudado y secado fueron establecidas con base en condiciones reportadas en estudios científicos sobre el curado de vainilla (Dignum et al. 2002). Para el marchitado se consideró la inmersión de las vainas en agua caliente a 60 °C durante 3 minutos, tratamiento empleado para detener la actividad vegetativa e iniciar las modificaciones estructurales necesarias para el desarrollo posterior del aroma (Yeh et al. 2024).

Durante la etapa de sudado, las vainas de vainilla se mantienen inicialmente a 40 °C –50 °C durante 2 días, seguidas de aproximadamente 10 días a 35 °C –40 °C y alta humedad (Yeh et al. 2024). Estas condiciones favorecen la actividad enzimática y las transformaciones bioquímicas que permiten la conversión de glucovanillina en vainillina, contribuyendo al desarrollo del color, aroma y características propias de la vainilla curada (Dignum et al. 2002). Posteriormente, en la etapa de secado, las vainas se mantienen alrededor de 25 °C, reduciendo progresivamente su humedad hasta aproximadamente 35%–38%, evitando una pérdida rápida de agua que pueda afectar la calidad física y aromática del producto (Yeh et al. 2021).

Tabla 1 | Propuesta de las instrucciones para la IA para que actúe como agente experto en distribución de plantas. Tomado de Guardado Yordi et al. (2026).

Criterio SLP	Preguntas que debe responder la evaluación
Viaje del producto (PJ)	¿Cuáles son las principales deficiencias que pueden surgir durante el recorrido del producto dentro de la planta? ¿El recorrido del producto sigue una secuencia lógica, continua y sin retrocesos visibles entre las áreas del proceso? ¿La ubicación de recepción de materia prima permite un flujo adecuado hacia las siguientes etapas del proceso? ¿La ausencia de un sistema de trazabilidad podría afectar el control del proceso productivo?
Relación entre actividades (RBA)	¿La ubicación de las áreas mantiene una relación adecuada de proximidad según las necesidades del proceso? ¿Las áreas críticas como acondicionamiento, laboratorio, envasado y almacenamiento favorecen la continuidad operativa? ¿Existen riesgos por la ubicación de áreas complementarias como residuos, químicos, baños, oficinas o cuarentena? ¿La distribución permite una comunicación eficiente entre las áreas productivas?
Diagrama relacional de viajes y actividades	¿La representación gráfica permite identificar claramente la secuencia de recorridos entre las áreas del proceso? ¿Las conexiones representadas permiten comprender el flujo de materiales, producto y personal? ¿Existen cruces, retrocesos o recorridos poco claros visibles en el plano? ¿La representación gráfica cumple con los principios básicos del SLP para mostrar la relación entre las áreas?
Requisitos de espacio	¿La distribución actual permite identificar espacios suficientes para operación, almacenamiento y circulación? ¿Existen posibles problemas visibles relacionados con pasillos, accesos, zonas de trabajo o almacenamiento? ¿La ubicación de equipos y áreas permite una operación segura y ordenada? ¿Qué ajustes menores podrían mejorar el aprovechamiento del espacio disponible?

Para el análisis económico se establecieron como valores de referencia un precio de compra de 30,00 USD/kg de vainilla verde y un precio de venta de 300,00 USD/kg de vainilla curada. Estos valores corresponden al escenario económico planteado para la simulación y no representan precios oficiales del mercado ecuatoriano, debido a la variabilidad de la vainilla según calidad, origen, grado de curado, humedad y condiciones de oferta y demanda (Andreetta 2026). Con estos parámetros se realizó la simulación en *SuperPro Designer*, obteniéndose el balance de materia y energía, el dimensionamiento y costo de los equipos y los principales indicadores económicos de la planta (Xu et al. 2024).

En esta investigación se incorporó el paso “Diseño de planta con realidad aumentada” y se profundizó en los pasos donde se utilizó la inteligencia artificial como un asistente experto para mejorar la distribución de la planta. Se mantuvo la estructura recomendada por Guardado Yordi et al. (2026) (instrucciones generales + la **Tabla 1**). Específicamente, se modificaron las instrucciones generales proporcionadas a la IA siguiendo las pautas planteadas por Zhou et al. (2023). La nueva propuesta de las instrucciones (prompt) fue modificada. Se realizaron 3 intentos de modificación a la distribución de la planta utilizando la metodología SLP y el *SketchUp* como herramienta para la generación de la imagen hasta que los criterios indiquen NO SE REQUIEREN AJUSTES.

La propuesta de las nuevas instrucciones fue: Actúa como

un auditor especialista en metodología de distribución de planta SLP (*Systematic Layout Planning*):

Tu tarea consiste exclusivamente en evaluar la distribución existente de una planta de curado de vainilla representada en una imagen de vista superior, verificando el cumplimiento de los criterios establecidos en la tabla proporcionada: viaje del producto (PJ), relación entre actividades (RBA), diagrama relacional de viajes y actividades y requisitos de espacio. La evaluación debe realizarse únicamente con la información observable en la imagen y en la tabla, sin asumir datos que no estén representados gráficamente como distancias, tiempos, cantidades transportadas, cargas, frecuencias reales, capacidades, dimensiones o productividad. El objetivo es determinar si la distribución actual cumple con los principios de la metodología SLP e identificar oportunidades de mejora únicamente cuando exista evidencia visible en el plano. No debes desarrollar un nuevo diseño de planta, no debes rediseñar la distribución y no debes solicitar herramientas adicionales de SLP como diagramas From-To, diagramas relacionales de Muther, análisis carga-distancia, cálculos de recorridos, estudios de capacidad o matrices adicionales, salvo que estos elementos ya estén incluidos en la información proporcionada. Las recomendaciones deben limitarse a ajustes menores sobre la distribución existente y deben estar enfocadas en mejorar el flujo del producto, la relación entre áreas, la claridad de los recorridos y el aprove-

chamamiento del espacio. Si un criterio cumple adecuadamente y no presenta deficiencias visibles, debes responder con la frase exacta “NO SE HAN IDENTIFICADO DIFERENCIAS” y si no existen recomendaciones adicionales debes responder con la frase exacta “NO SE REQUIEREN AJUSTES”. La respuesta final debe presentarse únicamente en una tabla de tres columnas: “Criterios SLP utilizados en la consigna”, “Se han identificado oportunidades de mejora” y “Sugerencia de ajuste”, manteniendo exactamente las filas: Viaje del producto (PJ), Relación entre actividades (RBA), Diagrama relacional de viajes y actividades y Requisitos de espacio. No debes incluir explicaciones adicionales fuera de la tabla. (Tabla 1).

Después se siguió con los pasos recomendados por Guardado Yordi et al. (2026) hasta culminar el diseño de la planta de curado de las vainas de vainilla.

3. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos durante el diseño de la planta para el curado de vainas de vainilla se muestran en los siguientes epígrafes. En cada epígrafe se muestran y se discuten los resultados según la tecnología seleccionada, el diseño del proceso, el balance de materia y energía, la evaluación económica y la distribución de planta.

3.1. Producto

La vainilla es un producto natural de origen vegetal a partir de vainas maduras de vainilla, las cuales pasan por un proceso de curado que es esencial para la formación de los compuestos aromáticos responsables de su sabor y aroma característicos. Durante este procedimiento, las vainas maduras desarrollan el contenido de vainillina mediante reacciones enzimáticas inducidas en el fruto, las cuales requieren un periodo de reposo de varias semanas. Cada etapa del curado cumple una función específica orientada a la obtención de estos compuestos (Rosado Zarrabal et al. 2023).

Las propiedades de la vainilla curada también están influenciadas por la especie cultivada y por la tecnología de curado empleada. *Vanilla planifolia* es la especie de mayor importancia económica y representa la mayor parte de la producción mundial debido a su elevado contenido de vainillina, mientras que *Vanilla x tahitensis* se distingue por un perfil aromático más floral y afrutado, y *Vanilla pompona* por producir vainas de mayor tamaño con un aroma menos intenso.

Técnicas artesanales han evolucionado mediante la incorporación de tecnologías como cámaras climáticas con control automático de temperatura y humedad, secadores solares de circulación forzada, secadores de aire caliente y sistemas híbridos de secado, que permiten reducir los tiempos de procesamiento, mejorar la uniformidad del secado, disminuir los riesgos de contaminación microbiológica y estandarizar la calidad del producto final. La implementación de estas tecnologías, junto con sistemas de monitoreo y control de variables, contribuye a optimizar la eficiencia del proceso, fortalecer la trazabilidad y aumentar la competitividad de la vainilla natural en los mercados nacionales e internacionales (Araújo et al. 2026).

Posteriormente, durante la etapa de sudado, las vainas se mantienen en un ambiente de alta humedad a 40 °C–50 °C durante 2 días, seguidas de un período adicional de 10 días a 35 °C–40 °C en condiciones de alta humedad (Yeh et al. 2024). Estas condiciones favorecen la actividad enzimática y las transformaciones bioquímicas relacionadas con la conversión de glucovanillina en vainillina, contribuyendo al desarrollo del color, aroma y características propias de la vainilla curada (Dignum et al. 2002).

Finalmente, en la etapa de secado, las vainas se colocan en un ambiente controlado a unos 25 °C, reduciendo su contenido de humedad hasta alcanzar unos 35 %–38 %, condición reportada antes de pasar a la etapa de acondicionamiento (Yeh et al. 2024). El secado debe realizarse de manera gradual para evitar una pérdida excesivamente rápida de humedad que pueda afectar las características físicas y aromáticas del producto (Yeh et al. 2021).

En cuanto a los parámetros económicos, el precio de compra de la materia prima se estableció en 30,00 USD/kg de vainilla verde, mientras que el precio de venta del producto final se fijó en 300,00 USD/kg de vainas curadas. Estos valores fueron establecidos como precios de referencia para el escenario económico de la planta, considerando la variabilidad que caracteriza al mercado de la vainilla. Andreetta (2026) analizó el mercado de la vainilla natural y su potencial comercial en Ecuador, utilizando información de FAOSTAT para presentar la evolución de los precios unitarios de exportación expresados en USD/kg, evidenciando que el valor de la vainilla ha presentado variaciones importantes a lo largo del tiempo. Asimismo, Xu et al. (2024) señalaron que las vainas de vainilla curadas pueden alcanzar valores comerciales elevados, reportándose precios de aproximadamente 50–80 USD/kg, dependiendo de las condiciones del mercado y del producto.

Con base en estas condiciones técnicas y económicas, se ingresaron en el *SuperPro Designer* los parámetros necesarios para la simulación del proceso, lo que permitió generar el balance de materia y energía, estimar el dimensionamiento y costo de los equipos y obtener los principales indicadores económicos de la planta. Por lo tanto, los valores utilizados de 30,00 USD/kg para la vainilla verde y 300,00 USD/kg para las vainas curadas deben entenderse como valores de referencia establecidos para el escenario económico de la propuesta y no como precios oficiales del mercado ecuatoriano (Andreetta 2026). Esta consideración es necesaria debido a que el precio de la vainilla puede variar según el origen, calidad, contenido de humedad, grado de curado, características físicas de las vainas y condiciones de oferta y demanda (Xu et al. 2024).

3.2. Selección de tecnología

La tecnología propuesta representa una alternativa técnicamente viable para el diseño de la planta, permitiendo identificar la alternativa más adecuada para garantizar la calidad del producto, facilitando el control del proceso, manteniendo un equilibrio entre inversión, eficiencia energética y calidad del producto final, aspectos fundamentales para el desarrollo de una planta de curado de vainilla.

De acuerdo con la revisión sistemática realizada por Caiza

et al. (2025), existen múltiples tecnologías para el curado de vainilla que combinan diferentes métodos de inhibición, sudado, secado y acondicionamiento. Sin embargo, las tecnologías con mayor nivel de madurez tecnológica (TRL 8 y 9) corresponden a aquellas que emplean el escaldado o la inmersión en agua caliente como etapa inicial, seguida del sudado y de un secado controlado, debido a que estas metodologías favorecen la formación de vainillina, disminuyen la variabilidad del proceso y permiten obtener un producto con mejores características fisicoquímicas y sensoriales.

En la **Tabla 2** se detallan los procesos llevados a cabo a nivel bibliográfico y las operaciones unitarias empleadas en el curado de las vainas de vainilla. Se propone una alternativa para el curado de las vainillas: marchitado, sudado, secado. Tras evaluar las opciones, se determina que el método óptimo es la inmersión en agua. También se especifica el equipamiento que se utilizará en el proceso de curado: tanque enchaquetado y secador de bandejas.

Tabla 2 | Tecnología para el curado de vainas de vainilla (Caiza et al. 2025); (Operaciones unitarias); (Alternativa); (Equipos).

Referencia	Operaciones unitarias	Alternativa 1	Equipo
(Caiza et al. 2025)	Inhibición	Marchitado	Tanque enchaquetado
	Fermentación	Sudado	Secador por bandejas
	Secado	Secado	Secador por bandejas

La **Figura 2** contiene el diagrama de bloques del proceso de curado de la vainilla. El proceso inicia con la etapa de marchitado, en la que las vainas frescas son sometidas a inmersión en agua caliente a 65 °C durante 15 segundos, tratamiento térmico que detiene la actividad fisiológica del fruto, favorece la ruptura de las membranas celulares y activa las enzimas involucradas en la formación de compuestos aromáticos. Posteriormente, las vainas pasan a la etapa de sudado, donde se mantienen a 55 °C durante 24 horas. En esta fase se desarrollan las principales reacciones enzimáticas y bioquímicas responsables de la formación de los compuestos aromáticos, principalmente la vainillina. Finalmente, el proceso concluye con el secado mediante aire caliente a 40 °C durante 15 días, etapa en la que se elimina gradualmente la humedad de las vainas, se estabilizan sus características fisicoquímicas y sensoriales, y se obtiene un producto curado con las condiciones de calidad requeridas para su almacenamiento y comercialización.

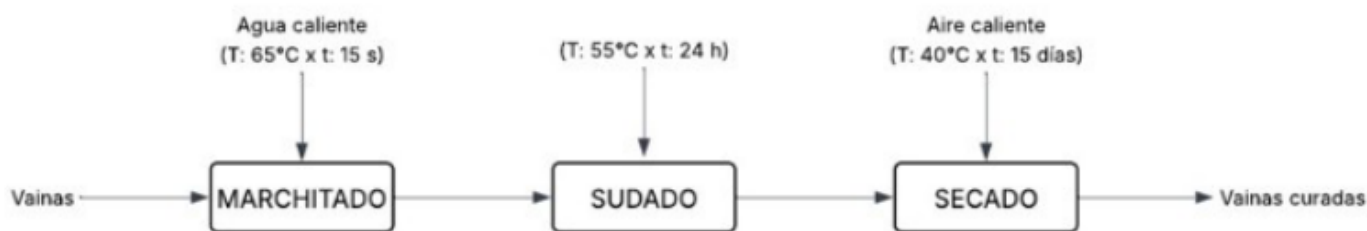


Figura 2 | Diagramas de bloque para el curado de las vainas de vainilla

3.3 Definir esquema tecnológico

La **Figura 3A** representa el diagrama de flujo de procesos de un sistema tecnológico conformado por dos equipos principales conectados de forma secuencial. El proceso inicia en el equipo P-1 / V-101 (Blending / Storage), al cual ingresan tres corrientes: aire, vainilla y agua caliente. En esta unidad se realiza el acondicionamiento del material, generándose una corriente de agua de salida como subproducto del proceso. Como resultado de esta primera etapa, se obtiene una corriente de vainillas fermentadas, la cual es transferida hacia la siguiente operación.

Las vainillas fermentadas ingresan posteriormente al equipo P-2 / TDR-101 (Tray Drying), donde se incorpora una corriente de aire caliente para llevar a cabo la operación de secado. Durante esta etapa se produce una corriente de aire frío como salida del equipo y se obtiene el producto final identificado como vainas curadas. De esta manera, el sistema tecnológico presenta una secuencia continua en la que el material fluye desde la etapa de mezclado y almacenamiento hasta la etapa de secado en bandejas, transformando las vainillas fermentadas en vainas curadas mediante el uso de corrientes de aire y agua caliente.

De acuerdo con la revisión sistemática de Caiza et al. (2025), quienes reportan que las tecnologías con mayor nivel de madurez tecnológica (TRL 8 y 9) integran procesos de escaldado o marchitado, sudado controlado y secado mediante equipos tecnificados debido

a que estas configuraciones permiten estandarizar la producción, reducir la dependencia de las condiciones climáticas y mejorar la uniformidad del producto final.

La **Figura 3B** representa el diagrama de Gantt que muestra la secuencia temporal de las actividades que conforman el sistema tecnológico para la elaboración de vainas curadas, indicando el orden de ejecución y la duración de cada operación. La programación inicia con las actividades correspondientes al equipo P-1 / V-101, donde se realizan las operaciones de PULL-IN-1 (0,50 h) y PULL-IN-2 (0,02 h) para el ingreso de materiales. A continuación, se ejecutan las operaciones HEAT-2 (0,03 h), SPLIT-1 (0,25 h) y COOL-1 (0,25 h), las cuales preceden a las etapas principales del proceso.

Posteriormente en el mismo equipo se desarrollan las operaciones HEAT-1 (168,00 h) y REACT-1 (168,00 h), que representan el mayor tiempo de procesamiento de esta unidad. Finalizada esta etapa, el material es descargado mediante la actividad TRANSFER-OUT-1 (0,50 h) para su envío a la siguiente operación del proceso.

La segunda parte de la programación corresponde al equipo P-2 / TDR-101, donde el producto es recibido mediante la operación TRANSFER-IN-1 (0,50 h). Finalmente se ejecuta la operación DRY-1 (432,00 h), correspondiente al secado, la cual constituye la actividad de mayor duración dentro de todo el proceso.

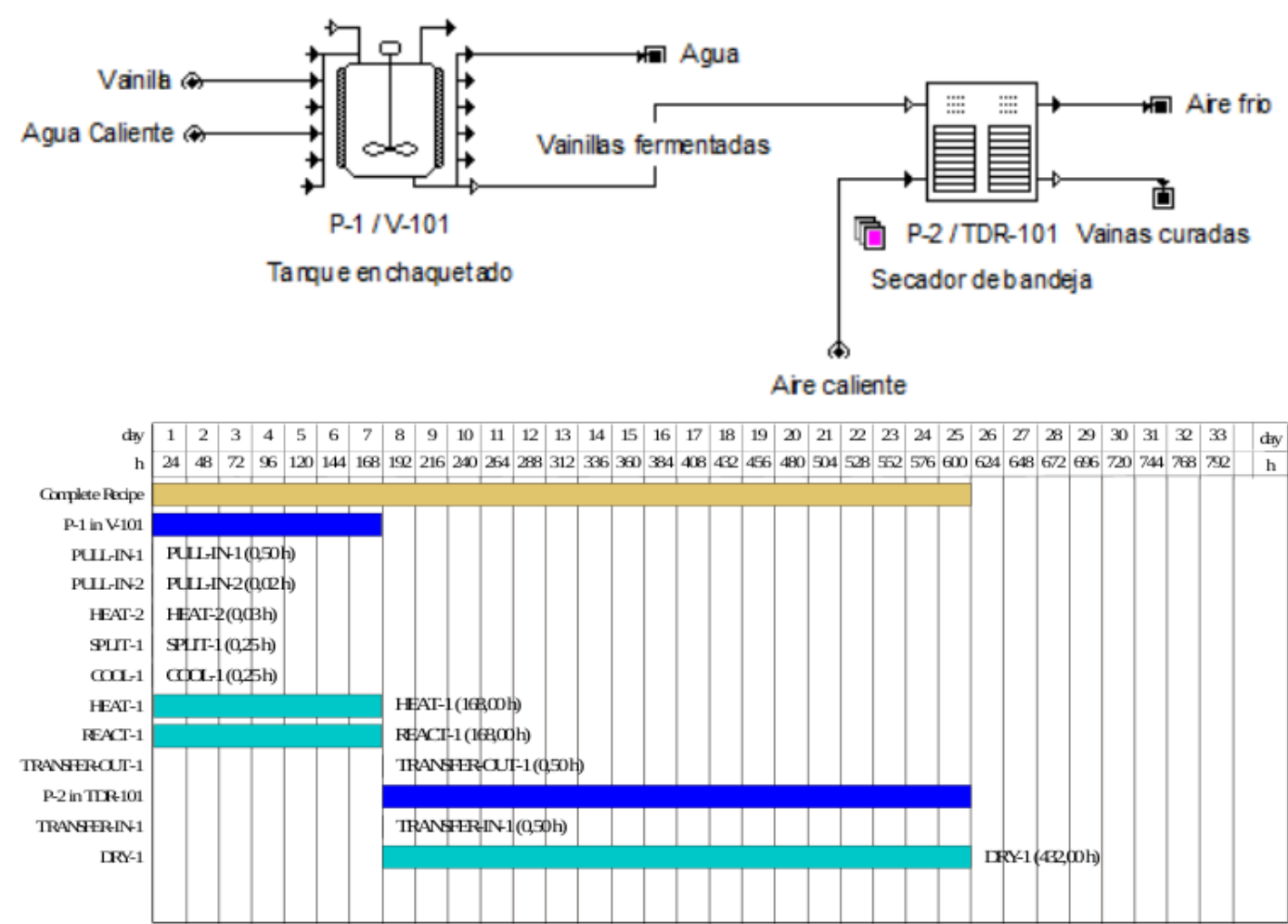


Figura 3 | Diagramas (A) de flujo de proceso. (B) de Gantt.

3.4 Estimación de la capacidad

La capacidad instalada de la planta fue estimada en 320 kg por ciclo de curado, valor que se ajusta a la disponibilidad de materia prima y a los tiempos requeridos por las diferentes etapas del proceso. Esta planificación coincide con lo reportado por Peña-Barrientos et al. (2023), quienes indican que la capacidad de procesamiento de una planta de vainilla está determinada principalmente por la duración del proceso de curado, el cual comprende las etapas de escaldado, sudado, secado y acondicionamiento, pudiendo extenderse entre tres y seis meses dependiendo de la tecnología utilizada y de las condiciones ambientales.

En este sentido, el procesamiento por lotes de 40 kg en ocho equipos paralelos permite mantener un flujo continuo de producción, evitando la saturación de las unidades de secado y favoreciendo un mejor control de variables críticas como la temperatura, la humedad y el tiempo de residencia. Asimismo, la ubicación de la planta junto al área de cultivo reduce el tiempo entre la cosecha y el inicio del curado, contribuyendo a preservar la calidad de las vainas frescas y a optimizar la eficiencia logística. La capacidad de producción propuesta resulta técnicamente compatible con la disponibilidad de materia prima y con las características del proceso de curado de vainilla.

3.5 Macrolocalización

La macrolocalización (**Figura 4**) propuesta para la planta de curado de las vainas de vainilla en la parroquia Veracruz, provincia de Pastaza, demuestra ser una alternativa técnicamente viable, ya que se encuentra en una zona donde el cultivo de vainilla ha sido priorizado por el Gobierno Provincial de Pastaza como una cadena

productiva estratégica. Actualmente, la provincia impulsa el desarrollo de la cadena de valor de la vainilla mediante la Escuela de la Vainilla y programas de asistencia técnica y capacitación dirigidos a los productores, evidenciando una disponibilidad creciente de materia prima para procesos de transformación agroindustrial (Cruz et al. 2022). En Pastaza existen más de 200 productores vinculados al cultivo de vainilla (Cruz et al. 2022), lo que garantiza un abastecimiento continuo para futuras plantas de curado.



Figura 4 | Macrolocalización de la planta del curado de vainilla

Considerando el proyecto propuesto, las 3.2 ha de cultivo de vainilla ubicadas junto a la planta representan una fuente permanente de materia prima. Tomando como referencia un rendimiento técnico promedio de 2 000 vainas a 3 000 vainas verdes por hectárea, la plantación podría disponer de aproximadamente 4 000 vainas a 6 000 vainas frescas por ciclo de producción, cantidad suficiente

para abastecer una planta piloto o de pequeña escala y mantener un proceso continuo de curado (Martin et al. 2021). Esta disponibilidad se complementa con la oferta de productores de la provincia, permitiendo incrementar la capacidad de procesamiento conforme aumente la demanda.

La cercanía entre el cultivo y la planta reduce significativamente el tiempo entre la cosecha y el inicio del curado, minimizando pérdidas por deshidratación o deterioro fisiológico de las vainas y favoreciendo la formación de vainillina durante el proceso. Además, la hectárea destinada a la infraestructura industrial proporciona el espacio suficiente para futuras ampliaciones de la capacidad instalada, áreas de almacenamiento y servicios auxiliares.

Estos resultados coinciden con lo planteado por Pérez-Martínez et al. (2012), quienes señalan que la localización de una planta agroindustrial debe considerar la cercanía a las fuentes de materia prima, la disponibilidad de infraestructura y la reducción de costos logísticos para incrementar la eficiencia del proceso. De igual manera, Guardado Yordi et al. (2026) destacan que una adecuada localización y distribución de planta mejora el flujo de materiales, optimiza la operación de los equipos y aumenta el desempeño global del sistema productivo. La ubicación propuesta en la parroquia Veracruz responde a la disponibilidad actual de vainilla impulsada por la provincia y a los criterios técnicos necesarios para garantizar un proceso de curado eficiente, competitivo y sostenible.

3.6 Balance de masa y energía

La **Tabla 3** presenta las principales corrientes de entrada y salida del proceso de curado de vainilla, obtenidas mediante la simulación. Como corrientes de entrada se registraron 320 kg de vainilla, 80 kg de agua caliente y 317,587 kg de aire caliente correspondientes a los recursos necesarios para desarrollar las etapas de marchitado, sudado y secado. En cuanto a las corrientes de salida, se obtuvieron 635,175 kg de aire frío, 10 kg de agua y 72,411 kg de vainas curadas.

Tabla 3 | Corriente de entrada y salida.

Corrientes	Tipo de corriente	Total
Vainilla	Entrada	320
Agua caliente	Entrada	80
Aire caliente	Entrada	317,587
Aire frío	Salida	635,175
Agua	Salida	10
Vainas curadas	Salida	72,411

Estos resultados muestran que el proceso genera una reducción considerable de la masa de la materia prima, principalmente asociada a la eliminación de agua durante el secado. De acuerdo con Caiza et al. (2025), durante el curado las vainas pueden perder entre dos tercios y tres cuartos de su peso inicial por la eliminación gradual del agua, hasta alcanzar un contenido de humedad cercano al 25%–30%, considerado adecuado para conservar y comercializarlo. Asimismo, la reducción controlada de la humedad favorece la hidrólisis de la glucovanillina y la formación de vainillina, principal compuesto responsable del aroma característico de la vainilla.

3.7 Consumo de materia prima <disponibilidad de materia prima

La disponibilidad de materia prima en la **tabla 4** constituye uno de los criterios fundamentales para garantizar la viabilidad técnica del proceso de curado de vainilla. Se dispone de una superficie de 3.2 ha destinada al cultivo de vainas de vainilla, con aproximadamente 2 300 plantas que presentan un rendimiento promedio de 200 kg/ha al año (Martin et al. 2021).

Tabla 4 | Comparación entre la disponibilidad y consumo de materia prima

Consumo	Disponibilidad	Diferencia
640 kg	640 kg	0

Estos resultados son consistentes con lo reportado por Caiza et al. (2025), quienes señalan que la capacidad de una planta de curado debe establecerse en función de la disponibilidad de materia prima y de la duración del proceso de curado, debido a que las etapas de marchitado, sudado y secado requieren tiempos prolongados de permanencia que condicionan la cantidad de vainas que pueden procesarse simultáneamente. Los autores destacan que la planificación del procesamiento por lotes constituye una estrategia adecuada para mantener un flujo continuo de producción, el uso de los equipos y evitar la acumulación o deterioro de las vainas frescas durante el almacenamiento.

La planificación de la cosecha en lotes de 10 kg y su procesamiento escalonado durante ciclos de 45 días favorecen un suministro continuo de materia prima hacia las etapas de marchitado, sudado y secado, evitando la saturación de los equipos y reduciendo pérdidas por deterioro del producto fresco. En consecuencia, se cumple el criterio metodológico de que el consumo de materia prima es compatible con la disponibilidad existente, asegurando la operación sostenida de la planta y permitiendo afrontar variaciones estacionales propias del cultivo de vainilla en la provincia de Pastaza.

Cabe señalar que, si la capacidad instalada de la planta fuese superior a la disponibilidad real de materia prima, los equipos de secado operarían por debajo de su capacidad nominal, incrementando el costo unitario de producción al distribuirse los costos fijos entre un menor volumen procesado. En ese escenario, sería necesario ampliar los acuerdos de abastecimiento con productores de la provincia para aprovechar la capacidad instalada. Por el contrario, si la disponibilidad de materia prima superara la capacidad de procesamiento, se generaría una acumulación de vainas frescas en espera de ser curadas, lo que incrementaría el riesgo de deterioro fisiológico y de pérdida de calidad del producto, siendo necesario evaluar la incorporación de equipos adicionales en paralelo o la ampliación de los turnos de trabajo. El margen operativo actual de aproximadamente 4,5% entre la disponibilidad (306 kg) y la capacidad instalada (320 kg), es reducido por lo que pequeñas variaciones en el rendimiento del cultivo podrían generar un déficit de abastecimiento. En consecuencia, se recomienda formalizar acuerdos de compra con productores adicionales de la zona para garantizar la continuidad operativa de la planta.

3.8 Compatible con el medio ambiente

Un aspecto adicional del balance ambiental corresponde a la corriente de agua que sale de la etapa de marchitado por inmersión de las vainas en agua caliente (equipo P-1/V-101), equivalente a 10 kg por lote. Al tratarse de agua que no incorpora sustancias químicas ni contaminantes durante el proceso, esta corriente podría reutilizarse en ciclos posteriores de marchitado, reduciendo el consumo neto de agua fresca de la planta. De manera similar, la corriente de aire empleada en el secado (equipo P-2/TDR-101) tampoco arrastra contaminantes, por lo que su vertimiento a la atmósfera no representa un riesgo ambiental significativo. Desde la perspectiva de los recursos empleados, la materia prima del proceso proviene de un cultivo agrícola renovable y la demanda energética asociada a la generación de vapor y al acondicionamiento de aire podría cubrirse parcial o totalmente con fuentes renovables como biomasa o energía solar térmica, lo que reforzaría la sostenibilidad ambiental de la planta (Towler et al. 2021). En conjunto, la baja generación de vertimientos, la posibilidad de reutilización del agua de proceso y el uso de insumos renovables permiten concluir que la tecnología seleccionada no genera contaminación significativa y resulta compatible con los principios de sostenibilidad ambiental.

Tabla 5 | Indicadores medioambientales

Tipo	Indicador	Cantidad	Unidad
Consumo	Materia prima	640	kg/kg P
Consumo	Agua	1 105	kg/kg
Consumo	Energía	0,06	kWh/kg
Vertimientos	Líquido	0,138	kg/kg
	Gas (Aire)	4 386	kg/kg
	Sólido	-	-

En la **Tabla 5** se registra un uso de 640 kg/año de materia prima, con la necesidad de 1 105 kg de agua por cada kg de producto y 0,06 kW-h de energía por kg, lo cual indica los recursos requeridos para llevar a cabo la operación. En lo que respecta a los desechos, no se generan residuos sólidos, ya que el balance de materia no reporta ninguna corriente sólida de descarte. Sin embargo, se identifica un vertimiento líquido de 10 kg por lote (0,138 kg/ kg de producto), correspondiente al agua utilizada en la etapa de marchitado (equipo P-1/V-101). Al no incorporar sustancias químicas ni contaminantes, esta corriente presenta bajo riesgo ambiental y podría reincorporarse en ciclos posteriores del proceso, reduciendo el consumo neto de agua fresca. Adicionalmente, se emite un vertimiento gaseoso neto de 4 386 kg de aire por kg de producto,

resultado de la diferencia entre el aire caliente empleado en el secado y el aire frío de salida, el cual transporta principalmente la humedad evaporada de las vainas durante el curado. En conjunto, el proceso presenta un impacto ambiental relativamente bajo, con un vertimiento líquido de fácil manejo y sin generación de residuos sólidos.

3.9 Diseño y costos de adquisición del equipamiento

El diseño del equipamiento para el curado de las vainas de vainilla, considerando la capacidad de producción de la planta, las operaciones unitarias involucradas y la disponibilidad comercial de equipos, fabricados en acero inoxidable para la industria alimentaria. La selección de los equipos se orientó a garantizar el control de las variables críticas del proceso, facilitar las operaciones de limpieza y cumplir con los principios de inocuidad establecidos para la agroindustria alimentaria. Esta distribución de costos coincide con lo reportado por Caiza et al. (2025), quienes identifican que las tecnologías de mayor nivel de madurez tecnológica (TRL 8–9) incorporan equipos especializados para controlar la temperatura y la humedad durante el curado, permitiendo obtener una mayor uniformidad del producto y una mejor concentración de vainillina (**Tabla 6**).

Tabla 6 | Dimensionamiento y costos estimados del equipamiento

Cantidad	Nombre	Descripción	Costo unitario (USD)	Costo total (USD)	Referencia
1	Tanque de mezcla	Volumen de recipiente= 453,46 L	2 000	2 000	(Alibaba.com 2026)
8	Secador de bandejas	Área de las bandejas = 2,45 m ²	500	4 000	(Made-in-china.com 2026)
		Equipos no listados		1 000	
			Total	7 000	

En términos absolutos, el costo total de adquisición de los equipos principales asciende a 7 000 USD, monto que resulta razonable para una planta piloto de pequeña escala como la propuesta. El secador de bandejas TDR-101 concentra la mayor proporción de la inversión en equipos debido a que se requieren ocho unidades para procesar el lote de vainilla, mientras que el tanque de mezcla V-101 representa un costo considerablemente menor. Esta distribución coincide con lo señalado por Towler et al. (2021), quienes indican que en plantas agroindustriales de pequeña escala los equipos de secado y acondicionamiento térmico suelen concentrar la mayor proporción del costo de adquisición debido a su mayor complejidad constructiva y a los materiales especializados requeridos para el control de temperatura y humedad en comparación con equipos de mezclado o almacenamiento de menor exigencia técnica. Considerando el Costo Fijo Directo de Capital obtenido (4 000 USD), la inversión total se ubica dentro del rango esperado para instalaciones piloto o de pequeña escala en la agroindustria alimentaria, lo que respalda la consistencia de las estimaciones de costos generadas mediante *SuperPro Designer*.

3.10. Análisis económico de inversión y producción

Los resultados muestran que la estructura de la estimación de costo de inversión (**tabla 7**) está dominada por el valor de la materia prima, situación habitual en los procesos agroindustriales, donde el producto agrícola constituye el principal componente del costo total. En contraste, los costos de agua y energía son relativamente bajos, debido a que el proceso de curado utiliza únicamente agua caliente para el marchitado y aire caliente para el secado, sin requerir reactivos químicos ni operaciones de elevada demanda energética.

Esta distribución de costos coincide con lo señalado por Towler et al.

(2021), quienes indican que en plantas agroindustriales de pequeña escala el costo de la materia prima representa la mayor proporción de los costos variables, mientras que el consumo de servicios industriales depende de la eficiencia de los equipos seleccionados. Asimismo, Towler et al. (2021) destacan que la incorporación de equipos con control de temperatura mejora la eficiencia energética y reduce los costos operativos, incrementando la competitividad del proceso.

Tabla 7 | Estimación de costo de inversión

Concepto	Valor (USD)
Costo de adquisición de los equipos	7 000
Instalación	3 000
Tuberías de proceso	3 000
Instrumentación	3 000
Aislamiento	0
Sistema eléctrico	1 000
Edificaciones	3 000
Mejoras del terreno	1 000
Instalaciones auxiliares	3 000
Ingeniería	6 000
Construcción	8 000
Honorarios del contratista	2 000
Contingencia	4 000
Costo Fijo Directo de Capital	43 000

El costo estimado de producción por ciclo asciende a 31 000 USD en la **Tabla 8**, siendo la materia prima el componente de mayor participación, con aproximadamente el 65,5 % del costo total. La mano de obra dependiente representa alrededor del 13,8 %, mientras que los costos asociados a las instalaciones alcanzan aproximadamente el 20,7 %. Los demás rubros considerados, como consumibles, trata-

miento y disposición de residuos, servicios básicos, el transporte llega junto con la materia prima, misceláneos, publicidad y ventas, regalías operativas y disposición de productos no conformes, no presentan costos asignados en la estimación. En conjunto, estos valores permiten aproximar los recursos económicos necesarios para el proceso de producción y garantizar la continuidad de las operaciones de curado y la obtención del producto final.

Tabla 8 | Estimación del costo de producción

Ítem de costo	Costo (USD)
Materias primas	19 000
Costos dependientes del costo de mano de obra	4 000
Costos dependientes del costo de inversión	8 000
Consumibles	0
Tratamiento y disposición de residuos	0
Servicios básicos	0
Transporte	0
Misceláneos	0
Publicidad y ventas	0
Regalías operativas	0
Disposición de productos no conformes	0
Total	31 000

Este comportamiento coincide con lo reportado por Andreetta (2026), quien señala que la vainilla natural es una de las especias de mayor valor comercial en el mercado internacional debido a la complejidad de su cultivo, la limitada oferta y el largo proceso de curado requerido para desarrollar sus atributos aromáticos. En consecuencia, el costo de adquisición de la vainilla verde tiene una influencia directa sobre la rentabilidad del proceso y sobre la estructura económica de la planta.

3.11. ¿Alternativa factible?

Los indicadores financieros obtenidos permiten considerar al proyecto como una alternativa factible y económicamente atractiva debido a que genera valor, presenta una tasa de retorno superior al rendimiento mínimo requerido y permite recuperar la inversión dentro del horizonte establecido.

La **Tabla 9** muestra los indicadores financieros más relevantes del proyecto, que revelan una situación económica favorable. En primer lugar, el VAN de USD 26 000 calculado con una tasa de descuento del 7 % demuestra que después de recuperar la inversión inicial y considerar el valor del dinero en el tiempo, el proyecto generaría un valor adicional positivo. Esto indica que los flujos de caja esperados son suficientes para cubrir las obligaciones de la inversión y aportar beneficios económicos durante el horizonte de evaluación.

Tabla 9 | indicadores dinámicos económicos

Concepto	Valor
Valor Actual Neto (VAN) a 7 % de interés (USD)	26 000
Tasa Interna de Retorno (TIR) después de impuestos (%)	13,20
Tiempo de recuperación (<i>Payback</i>) (años)	5,42
Retorno sobre la inversión (ROI) (%)	18,44
Margen bruto (%)	27,82
Ingreso unitario (USD/kg)	300.00

La TIR de 13,20% refuerza esta conclusión, ya que supera en 10,27% la tasa de descuento utilizada (7%). Esta diferencia representa un margen favorable frente al costo de oportunidad del capital y evidencia una capacidad atractiva del proyecto para generar rendimiento sobre los recursos invertidos. El *Payback Time* de 5,42 años indica que la recuperación de la inversión se produciría dentro del periodo evaluado, aunque representa un plazo que debe considerarse en la planificación financiera y en la gestión del flujo

de caja.

El retorno sobre la inversión (ROI) del 18,44% indica que la inversión presenta una capacidad favorable para generar beneficios en relación con el capital comprometido. Este resultado guarda relación con el margen bruto de 27,82%, el cual evidencia que existe una diferencia favorable entre los ingresos por ventas y los costos directos asociados a la producción. En este sentido, el ingreso unitario de USD 300 por kilogramo de vainas curadas constituye un elemento importante para la rentabilidad del proyecto siempre que este precio sea sostenible frente a las condiciones del mercado y exista una demanda suficiente para comercializar el producto. La relación entre un VAN positivo, una TIR superior a la tasa de descuento, un ROI favorable y un margen bruto del 27,82% permite determinar que el proyecto posee condiciones económicas favorables para su implementación.

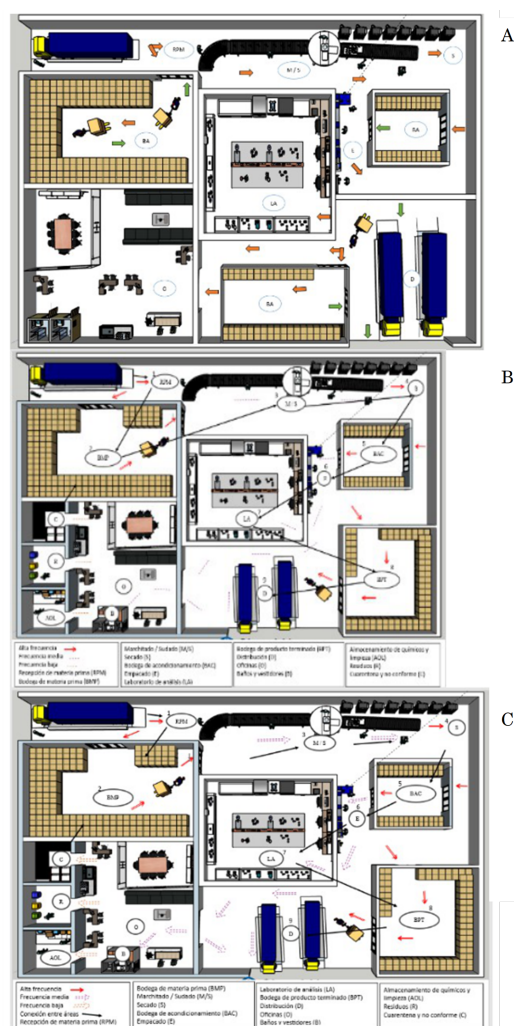


Figura 5 | Distribución de la planta. (A) iteración 1, (B) iteración 2, (C) iteración 3

3.12 Diseño de planta con realidad aumentada

3.12.1. Integración de Realidad Aumentada (RA) e Inteligencia Artificial (IA)

En la **Figura 5A** se presenta la primera propuesta de distribución de las áreas dentro de la planta. A partir de la evaluación realizada en el diagrama relacional de viajes y actividades se identificaron oportunidades de mejora. Se observa que varias áreas de almacenamiento utilizaban la misma abreviatura BA, lo que generaba confusión al momento de identificar las diferentes bodegas. También se evidenció el uso de flechas de distintos colores sin una leyenda que explicara claramente su significado. Por esta razón,

fue necesario realizar ajustes en la identificación de las áreas y mejorar la simbología utilizada en el diagrama.

En la **Figura 5B** se observa la segunda iteración del diseño, realizada después de corregir las inconsistencias identificadas en el primer intento. En esta propuesta se mejoró la identificación de las diferentes áreas y se incorporó una leyenda que permitió interpretar de mejor manera los recorridos y relaciones representados mediante las flechas. Los criterios de viaje del producto (PJ), relación entre actividades (RBA) y requisitos de espacio continuaron sin presentar diferencias. No obstante, durante esta segunda revisión se identificó una inconsistencia en la nomenclatura del área 6. En el plano, esta área estaba identificada con la letra F, mientras que en la leyenda correspondía al área de Empacado (E). Por lo tanto, se recomendó reemplazar la letra F por E para mantener una identificación uniforme entre el plano y la leyenda.

En la **Figura 5C** se presenta la versión final o intento acertado, obtenida después de realizar las correcciones identificadas en las dos iteraciones anteriores. En esta propuesta se corrigió la nomenclatura del área de Empacado, utilizando la abreviatura E, y se mantuvo una identificación clara y coherente de todas las áreas de la planta. Como resultado de la evaluación final, no se identificaron diferencias en ninguno de los criterios establecidos: viaje del producto (PJ), relación entre actividades (RBA), diagrama relacional de viajes y actividades y requisitos de espacio. Esto indica que la distribución final cumple adecuadamente con los criterios

evaluados mediante la metodología SLP, logrando una representación clara de las áreas, los recorridos y las relaciones entre las actividades.

3.12.2. Integración de Realidad Aumentada (RA) e Inteligencia Artificial (IA)

La **Tabla 10** presenta los resultados obtenidos en las tres iteraciones de evaluación de la distribución de planta mediante la metodología SLP. En el criterio de viaje del producto (PJ), no se identificaron diferencias en ninguna de las tres iteraciones, evidenciando que la secuencia del recorrido del producto se mantuvo adecuada y no requirió ajustes. De igual manera, en la relación entre actividades (RBA) no se identificaron diferencias durante las tres iteraciones, por lo que las relaciones establecidas entre las áreas se conservaron sin modificaciones.

En cuanto al diagrama relacional de viajes y actividades, se identificaron las principales oportunidades de mejora. En la primera iteración se detectaron ambigüedades en la identificación de las áreas y en la representación de la simbología; en la segunda iteración se encontró una inconsistencia en la nomenclatura del área de Empacado, la cual fue corregida; y en la tercera iteración no se identificaron diferencias, por lo que no fueron necesarios nuevos ajustes. Finalmente, en los requisitos de espacio, no se identificaron diferencias en ninguna de las tres iteraciones, manteniéndose los requerimientos establecidos sin necesidad de modificaciones.

Tabla 10 | Integración de Realidad Aumentada (RA) e Inteligencia Artificial (IA)

Iteración	Criterios SLP utilizados en la consigna	Oportunidades de mejora identificadas	Sugerencias de ajuste
1	1. Viaje del producto (PJ)	No se han identificado diferencias.	No se requieren ajustes.
	2. Relación entre actividades (RBA)	No se han identificado diferencias.	No se requieren ajustes.
	3. Diagrama relacional de viajes y actividades	Se identificó una ambigüedad en la representación, debido a que tres áreas diferentes aparecían identificadas con la misma abreviatura BA (bodega de almacenamiento), lo que dificultaba distinguir claramente las etapas de almacenamiento. También se utilizaron flechas de diferentes colores sin una leyenda visible que permitiera interpretar claramente su significado.	Identificar cada área con una abreviatura única y coherente con su función. Diferenciar claramente las distintas bodegas e incorporar una leyenda para las flechas, manteniendo una simbología uniforme para representar el sentido y tipo de recorrido.
	4. Requisitos de espacio	No se han identificado diferencias.	No se requieren ajustes.
2	1. Viaje del producto (PJ)	No se han identificado diferencias.	No se requieren ajustes.
	2. Relación entre actividades (RBA)	No se han identificado diferencias.	No se requieren ajustes.
	3. Diagrama relacional de viajes y actividades	Se identificó una inconsistencia en la nomenclatura del área 6. En el plano aparecía identificada como F, mientras que en la leyenda correspondía al área de Empacado (E). Esta diferencia afectaba la correspondencia entre la identificación gráfica y la leyenda.	Sustituir la identificación F del área 6 por E, para que coincida con la denominación de Empacado y mantener una nomenclatura uniforme en todo el diagrama.
	4. Requisitos de espacio	No se han identificado diferencias.	No se requieren ajustes.
3	1. Viaje del producto (PJ)	No se han identificado diferencias.	No se requieren ajustes.
	2. Relación entre actividades (RBA)	No se han identificado diferencias.	No se requieren ajustes.
	3. Diagrama relacional de viajes y actividades	No se han identificado diferencias.	No se requieren ajustes.
	4. Requisitos de espacio	No se han identificado diferencias.	No se requieren ajustes.

3.13. Localización

En la **Figura 6** se observa el terreno seleccionado para la implementación de la planta agroindustrial. El predio se encuentra en una zona con acceso directo desde vías cercanas lo que facilita el

ingreso y salida de materias primas, productos terminados, personal y vehículos de transporte. Su ubicación dentro de un sector ya intervenido y rodeado de construcciones permite considerar la disponibilidad de servicios básicos e infraestructura necesaria para el funcionamiento de la planta. La elección de este lugar se debe

principalmente a que presenta un espacio amplio adecuado para distribuir las diferentes áreas de la planta, como recepción de materia prima, procesamiento, almacenamiento, laboratorio, oficinas y despacho. La forma y extensión del terreno también permiten organizar la distribución interna de manera funcional, considerando los recorridos del producto y la relación entre las diferentes actividades establecidas mediante la metodología SLP.



Figura 6 | Localización

Para aplicar realidad aumentada, este terreno es una base adecuada ya que la imagen satelital permite ubicar el proyecto dentro de su contexto real. Sobre esta representación se podrá superponer digitalmente el diseño de la planta, permitiendo visualizar cómo quedaría la infraestructura en el terreno seleccionado, la ubicación de las diferentes áreas y su relación con el entorno. De esta mane-

ra, la realidad aumentada facilitará una comprensión más clara y realista de la propuesta antes de su construcción.

3.14. Realidad aumentada

3.14.1 Aplicación de realidad aumentada en la visualización del diseño de la planta de curado de vainilla

Se implementó la visualización del modelo tridimensional mediante realidad aumentada (RA), con el propósito de representar espacialmente la propuesta de distribución de la planta de curado de vainilla. La realidad aumentada permite integrar objetos virtuales tridimensionales con el entorno físico, facilitando la interpretación de las características espaciales del diseño y la interacción con sus diferentes componentes. En este estudio, el modelo digital de la planta fue desarrollado en formato tridimensional y posteriormente visualizado mediante un dispositivo móvil compatible con aplicaciones de realidad aumentada.

La representación obtenida permitió observar la disposición de las diferentes áreas de la planta, los equipos, estanterías, elementos de almacenamiento y espacios destinados a la circulación. Como se muestra en la **Figura 7**, el modelo tridimensional se proyecta sobre el entorno real, permitiendo analizar la relación espacial entre los diferentes elementos que conforman la instalación. Esta representación proporciona una perspectiva complementaria al plano bidimensional, debido a que permite apreciar características como la distribución volumétrica, la ubicación de los equipos y la disponibilidad de espacios de circulación desde diferentes ángulos de observación.



Figura 7 | Diseño de la planta del curado de la vainilla con realidad aumentada

La aplicación de realidad aumentada constituye una herramienta de apoyo para la evaluación del diseño propuesto, ya que permite visualizar anticipadamente la configuración espacial de la planta antes de una posible implementación física. En este sentido, su utilización facilita la identificación de posibles interferencias entre equipos, limitaciones de espacio y dificultades asociadas con la circulación del personal y del producto. Asimismo, la visualización tridimensional permite complementar el análisis realizado mediante la metodología de Distribución Sistemática de Planta (SLP), proporcionando una representación más cercana a las condiciones espaciales que tendría la instalación. De esta manera, la RA se plantea como una herramienta tecnológica complementaria para la validación visual del diseño de planta, contribuyendo a una mejor comprensión de la distribución propuesta y al análisis previo de su posible implementación.

4. Conclusiones

El diseño propuesto permitió establecer una alternativa integral para el curado de vainas de vainilla, considerando los requerimientos tecnológicos, productivos del proceso. La propuesta alcanzó una capacidad instalada de 320 kg por ciclo y permitió organizar las diferentes etapas del curado. La aplicación de la metodología de Distribución Sistemática de Planta (SLP), complementada con inteligencia artificial, permitió estructurar la distribución de las áreas de acuerdo con el flujo del producto, las relaciones entre actividades y los requerimientos de espacio.

Desde el punto de vista técnico y de localización, la macrolocalización establecida en la parroquia Veracruz, provincia de Pastaza, en un terreno junto a 2 ha de cultivo propio reduce los tiempos entre cosecha y curado y favorece la calidad de la materia prima. La planta requiere una inversión de

capital de 43 000 USD y un costo de producción por ciclo de 31 000 USD, siendo la materia prima el rubro más significativo. Los indicadores obtenidos VAN de 26 000 USD al 7 % de descuento, TIR de 13,20 %, *Payback* de 5,42 años, ROI de 18,44 % y margen bruto de 27,82 % confirman que el proyecto constituye una alternativa económicamente factible, siempre que el precio de referencia de 300 USD/kg se mantenga sostenible frente a las condiciones del mercado

El diseño de esta planta resulta relevante porque transfor-

ma localmente la vainilla verde en un producto curado de mayor valor agregado, superando la limitación identificada en la cadena de valor ecuatoriana, donde la comercialización de vainas sin procesar reduce significativamente los ingresos de los productores. La propuesta beneficia directamente a los productores de vainilla de la provincia de Pastaza al ofrecerles una infraestructura que estandariza la calidad del producto reduce pérdidas postcosecha y facilita el acceso a mercados nacionales e internacionales.

Contribuciones de los autores

Katherine Lizbeth Ruiz Ushiña: Adquisición, y análisis de los datos; redactó el manuscrito, aprobó la versión enviada y la versión sustancialmente editada

Annie Shoshana Gómez Angulo: Adquisición, y análisis de los datos; redactó el manuscrito, aprobó la versión enviada y la versión sustancialmente editada

Amaury Pérez Martínez: Concepción del trabajo; aprobó la versión enviada y la versión sustancialmente editada

Todos los autores aporbaron la version enviada y editada.[0.5em]

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

5. Referencias

ALIBABA.COM, 2026. Tanque De Mezcla De Acero Inoxidable Con Agitador,De Doble Pared,Con Calentamiento Eléctrico A Vapor,De 500l,1000l,5000l,Odm - Buy Product on Alibaba.com. . Online. 2026. Available from: https://www.alibaba.com/product-detail/500L-1000L-5000L-Steam-Electric-Heating_1601799267392.html?spm=a2700.prosearch.normal_offer.d_title.389867af70VN1B&priceId=888fcbfa90a24e2181f5c349c38d0d06 [Accessed 6 September 2026].

ANDREETTA, Fundación Angel, 2026. Ecuador, con aroma de vainilla. *Andreettana Tropical Andes Biodiversity and Conservation*. Online. 15 July 2026. Vol. 2, no. 3, p. 40–47. DOI: 10.66850/av2307. Available from: <https://revistas.faaec.org/index.php/andreettana/article/view/7>

ANTONIO-GUTIÉRREZ, Oscar, PACHECO-REYES, Isidro, LAGUNEZ-RIVERA, Luicita, SOLANO, Rodolfo, CAÑIZARES-MACÍAS, María del Pilar and VILAREM, Gerard, 2023. Effect of Microwave and Ultrasound during the Killing Stage of the Curing Process of Vanilla (*Vanilla planifolia*, Andrews) Pods. *Foods*. Online. 19 January 2023. Vol. 12, no. 3, p. 469. DOI: 10.3390/foods12030469. Available from: <https://www.mdpi.com/2304-8158/12/3/469>

ARAÚJO, Mateus Guedes, RUAS, Maria Eduarda Andrade, LIMA, William James Nogueira and FARIA, Janaína Teles de, 2026. Liquid–Liquid Equilibrium and Vanillin Partitioning in PEG–Sodium Sulfate Aqueous Two-Phase Systems. *Food Science and Technology*. Online. 26 February 2026. Vol. 46, p. 2026. DOI: 10.5327/FST.575. Available from: <https://fstjournal.com.br/revista/article/view/575> [Accessed 6 July 2026].

AYALA GREFA, Jipson Bryan, 2022. *Prototipo de un equipo para el proceso de curado de la vainilla (Vanilla sp) con luz artificial como fuente de calor.*. Online. Tesis de Maestría. Available from: <https://repositorio.uea.edu.ec/handle/123456789/1085> [Accessed 6 September 2026].

BUITIMEA-CANTÚA, Génesis V., CHÁVEZ-LEAL, Viridiana, SOTOCABALLERO, Mayra C., TELLEZ-MEDINA, Dario I., WELTI-CHANGES, Jorge and ESCOBEDO-AVELLANEDA, Zamantha, 2023. Enzymatic Activity and Its Relationships with the Total Phenolic Content and Color Change in the High Hydrostatic Pressure-Assisted Curing of Vanilla Bean (*Vanilla planifolia*). *Molecules*. Online. 15 November 2023. Vol. 28, no. 22, p. 7606. DOI: 10.3390/molecules28227606. Available from: <https://www.mdpi.com/1420-3049/28/22/7606>

CAIZA, Jennifer Elizabeth Ayme and MARTÍNEZ, Amaury Pérez, 2025. *Tecnologías utilizadas en el curado de vainilla: una revisión sistemática.*. Online. 30 October 2025. Ecuador: PREPRINT UEA AGROINDUSTRIA. [Accessed 12 August 2026].

CERVANTES CASTILLO, Adán, LIMA MORALES, Mónica, DELGADO ALVARADO, Adriana, HERRERA CABRERA, Braulio Edgar, ARÉVALO GALARZA, Gustavo Antonio, SOTO HERNANDEZ, Ramón Marcos, GARCÍA OSORIO, Cecilia and ARÉVALO GALARZA, Ma. de Lourdes C., 2018. Calidad de frutos vainilla (*Vanilla planifolia* Jacks. ex Andrews) procedente de la Huasteca Potosina, México. *Nova Scientia*. Online. 1 November 2018. Vol. 10, no. 21, p. 360–378. DOI: 10.21640/ns.v10i21.1586. Available

from: http://nova_scientia.delasalle.edu.mx/ojs/index.php/Nova/article/view/1586

CRUZ, Wilfrido de la, SAMANIEGO, Edison, RE, Sandra Soria, DOMÍNGUEZ, Javier, ZÚÑIGA, Sandra and ROJAS, Lizzaida, 2022. Caracterización morfológica del género Vanilla en el ecosistema Napo – Pastaza de la Amazonia ecuatoriana. *Ecovida*. Online. 2022. Vol. 12, no. 1, p. 128–135. Available from: <https://revistaecovida.upr.edu.cu/index.php/ecovida/article/view/249> [Accessed 20 August 2026].

DIGNUM, Mark J.W., KERLER, Josef and VERPOORTE, Rob, 2002. Vanilla curing under laboratory conditions. *Food Chemistry*. Online. 1 November 2002. Vol. 79, no. 2, p. 165–171. DOI: 10.1016/S0308-8146(02)00125-5. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308814602001255?utm_source=chatgpt.com [Accessed 17 August 2026].

FAO, 2021. Sustainable Vanilla Value Chain Development in the Greater Sepik Region. . Online. 2021. Available from: <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cb7767en> [Accessed 17 August 2026].

GARZA-MORALES, RODOLFO, BANDA-ORTIZ, ;, HUMBERTO, VÁZQUEZ-TRUJILLO, ; and KATIA, 2021. Supply Chain and Economic Viability of Vanilla planifolia Andrew Production: A Case Study. *Agro Productividad*. Online. 19 February 2021. Vol. 14, no. 1, p. 31–36. DOI: 10.32854/AGROP.V14I1.1795. Available from: <https://www.revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/1795> [Accessed 13 August 2026].

GAVEL, Freya Jemmet, WHITE, Alan and COCK, Ian Edwin, 2025. A Review of Vanilla planifolia Andrews Horticulture and Curing, Phytochemistry and Quality Evaluation. *Review Article Pharmacognosy Communications*. Online. 2025. Vol. 15, no. 2, p. 49–61. DOI: 10.5530/pc.2025.2.9. Available from: <https://www.phcogcommn.org> [Accessed 13 August 2026].

GUARDADO YORDI, Estela, GUAMBUGUETE GUAMAN, Irma Sofia, FREIRE FUENTES, Mayra Elizabeth, RADICE, Matteo, SCALVENZI, Laura, ABREU-NARANJO, Reinier, BRAVO SÁNCHEZ, Luis Ramón and PÉREZ MARTÍNEZ, Amaury, 2025. Conceptual Design of the Process for Making Cosmetic Emulsion Using Amazonian Oils. *Processes*. Online. 4 June 2025. Vol. 13, no. 6, p. 1770. DOI: 10.3390/pr13061770. Available from: <https://www.mdpi.com/2227-9717/13/6/1770>

GUARDADO YORDI, Estela, RADICE, Matteo, SCALVENZI, Laura and PÉREZ MARTÍNEZ, Amaury, 2024. Diseño del Proceso Sostenible para la Obtención de una Emulsión Cosmética desde un Enfoque de Biocomercio. *Revista Politécnica*. Online. 30 November 2024. Vol. 54, no. 2, p. 35–46. DOI: 10.33333/rp.vol54n2.03. Available from: https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/1990

GUARDADO YORDI, Estela, VINOCUNGA-PILLAJO, Reni Danilo, CÁRDENAS BONIFA, Johnny Alejandro, LUZURIAGA ORTIZ, Lenin Xavier, LEÓN GUARDADO, Lianne, RADICE, Matteo, ALBERNAS CARVAJAL, Yaillet, ABREU-NARANJO, Reinier and PÉREZ MARTÍNEZ, Amaury, 2026. AI-Assisted Systematic Layout Planning and Augmented Reality-Based Qualitative Spatial Assessment for the Design of a Cosmetic Emulsion

Production Plant. *Processes*. Online. 2 June 2026. Vol. 14, no. 11, p. 1809. DOI: 10.3390/pr14111809. Available from: <https://www.mdpi.com/2227-9717/14/11/1809>

MADE-IN-CHINA.COM, 2026. Secadora de frutas, verduras y carnes para el hogar Chuangyu 5/8/12/16/20 máquina recomendada - 2026 Secador para Frutas y Verduras, Secador de vacío para Frutas y Verduras price | Made-in-china.com. . Online. 2026. Available from: https://es.made-in-china.com/co_jingyuchina/product_Chuangyu-5-8-12-16-20-Trays-Household-Fruit-Vegetable-Meat-Dryer-Recommended-Machine_yuoiyrinog.html?header_search_page=lv [Accessed 6 September 2026].

MARTIN, Dominic Andreas, WURZ, Annemarie, OSEN, Kristina, GRASS, Ingo, HÖLSCHER, Dirk, RABEMANANTSOA, Thorien, TSCHARNTKE, Teja and KREFT, Holger, 2021. Shade-Tree Rehabilitation in Vanilla Agroforests is Yield Neutral and May Translate into Landscape-Scale Canopy Cover Gains. *Ecosystems*. Online. 7 August 2021. Vol. 24, no. 5, p. 1253–1267. DOI: 10.1007/s10021-020-00586-5. Available from: <https://link.springer.com/10.1007/s10021-020-00586-5>

PEÑA-BARRIENTOS, Alberto, PEREA-FLORES, María de J., MARTÍNEZ-GUTIÉRREZ, Hugo, PATRÓN-SOBERANO, Olga A., GONZÁLEZ-JIMÉNEZ, Francisco E., VEGA-CUELLAR, Miguel and DÁVILA-ORTIZ, Gloria, 2023. Physicochemical, microbiological, and structural relationship of vanilla beans (*Vanilla planifolia*, Andrews) during traditional curing process and use of its waste. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*. Online. 1 February 2023. Vol. 32, p. 100445. DOI: 10.1016/J.JARMAP.2022.100445. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214786122000778> [Accessed 11 July 2026].

PÉREZ-MARTÍNEZ, A., CERVANTES-MENDIETA, E., JULIÁN-RICARDO, M.C., GONZÁLEZ-SUÁREZ, E., GÓMEZ-ATANAY, A., OQUENDO-FERRER, H., GALINDO-LLANES, P. and RAMOS-SÁNCHEZ, L., 2012. Procedimiento para enfrentar tareas de diseño de procesos de la industria azucarera y sus derivados. *Revista mexicana de ingeniería química*. Online. 2012. Vol. 11, no. 2, p. 333–349. Available from: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-27382012000200012&lng=es&nrm=iso&tlng=es [Accessed 6 July 2026].

PEREZ-VIVEROS, Isabel Janid, GARCÍA-BARRÓN, Sergio Erick, HERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ, Blanca Elizabeth, BARRERA-RODRÍGUEZ, Ariadna Isabel, ACERO-ORTEGA, Claudia Ariadna and ESPEJEL-GARCÍA, Anastacio, 2025. Influence of Traditional Vanilla Curing on Its Physicochemical Properties and Aromatic Profile. *Foods* 2025, Vol. 14, Page 1652. Online. 7 May 2025. Vol. 14, no. 9, p. 1652. DOI: 10.3390/FOODS14091652. Available from: <https://www.mdpi.com/2304-8158/14/9/1652/htm> [Accessed 13 August 2026].

ROSADO ZARRABAL, Thelma Lucia, MICELI MENDEZ, Clara Luz, MI-

CELI MENDEZ, Irene, LOPEZ MICELI, Mario Alberto, ROSADO ZARRABAL, THELMA LUCIA; 38412, MICELI MENDEZ, CLARA LUZ; 288394 and LOPEZ MICELI, MARIO ALBERTO; 530702, 2023. Calidad físico-química de vainillas (*vanilla planifolia* jacks. Ex andrews: orchidaceae) de dos localidades zoques de Chiapas, México. . Online. 2023. Available from: <https://repositorio.unicach.mx/handle/20.500.12753/6705> [Accessed 6 July 2026].

SCALVENZI, Laura, GUARDADO YORDI, Estela, SANTAMARÍA CAÑÓ, Edgar Wilfrido, AVILEZ TOLAGASI, Ibeth Nina, RADICE, Matteo, ABREU-NARANJO, Reinier, LEÓN GUARDADO, Lianne, BRAVO SÁNCHEZ, Luis Ramón and PÉREZ MARTÍNEZ, Amaury, 2025. The Design of an Intensified Process and Production Plant for Cosmetic Emulsions Using Amazonian Oils. *Processes*. Online. 17 June 2025. Vol. 13, no. 6, p. 1923. DOI: 10.3390/pr13061923. Available from: <https://www.mdpi.com/2227-9717/13/6/1923>

TOWLER, Gavin and SINNOTT, Ray, 2021. Chemical Engineering Design: Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design. *Chemical Engineering Design*. Online. 15 July 2021. DOI: 10.1016/C2019-0-02025-0. Available from: <https://www.sciencedirect.com/book/monograph/9780128211793/chemical-engineering-design> [Accessed 20 August 2026].

XU, Lingxia, LIAQAT, Fakhra, KHAZI, Mahammed Ilyas, SUN, Jianzhong and ZHU, Daochen, 2024. Natural deep eutectic solvents-based green extraction of vanillin: optimization, purification, and bioactivity assessment. *Frontiers in Nutrition*. Online. 19 January 2024. Vol. 10, p. 1279552. DOI: 10.3389/fnut.2023.1279552. Available from: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnut.2023.1279552/full> [Accessed 17 August 2026].

YEH, Chih Hsin, CHEN, Kai Yi, CHOU, Chia Yi, LIAO, Hsin Yi and CHEN, Hsin Chun, 2021. New Insights on Volatile Components of *Vanilla planifolia* Cultivated in Taiwan. *Molecules*. Online. 2 June 2021. Vol. 26, no. 12, p. 3608. DOI: 10.3390/MOLECULES26123608. Available from: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8231200/> [Accessed 17 August 2026].

YEH, Chih Hsin, CHOU, Chia Yi, YANG, Kai Min, WU, Chin Sheng, CHU, Lee Ping, HSU, Yu Ling and CHEN, Hsin Chun, 2024. Effects of storage time and temperature on the aroma quality and color of vanilla beans (*Vanilla planifolia*) from Taiwan. *Food Chemistry: X*. Online. 30 December 2024. Vol. 24, p. 101761. DOI: 10.1016/J.FOCHX.2024.101761. Available from: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11472101/> [Accessed 17 August 2026].

ZHOU, Jeffrey, LU, Tianjian, MISHRA, Swaroop, BRAHMA, Siddhartha, BASU, Sujoy, LUAN, Yi, ZHOU, Denny, LE HOU, ‡ and GOOGLE, † ‡, 2023. Instruction-Following Evaluation for Large Language Models. . Online. 14 November 2023. Available from: <https://arxiv.org/pdf/2311.07911> [Accessed 18 June 2026].