Integración de Modelación Matemática y Control Estadístico en la Formación Técnico-Profesional de Gastronomía: Un Estudio de Caso en la Producción de Cheesecake Semifrío"

Integration of Mathematical Modeling and Statistical Control in Technical-Professional Gastronomy Training: A Case Study in Semi-Frozen Cheesecake Production"

Autores:

Paula Isidora Mora Caballero
Estudiante de Técnico Profesional de Gastronomía
Colegio Plus Ultra
Paulamora2600@gmail.com

Valeria Edith Araujo de la Cruz
Estudiante de Técnico Profesional de Gastronomía
Colegio Plus Ultra
Valeriaedith15@gmail.com

Sandra Rusbeli Lugo Caraballo
Estudiante de Técnico Profesional de Gastronomía
Colegio Plus Ultra -Chile
Lugo15514@gmail.com

Joaquín Emerson Gutiérrez Muñoz
Estudiante de Técnico Profesional de Gastronomía
Colegio Plus Ultra - Chile
Joaquingutierrez074@gmail.com

Victoria Eglee Cedeño Artigas
Estudiante de Técnico Profesional de Gastronomía
Colegio Plus Ultra- Chile
Victoria18cedeno@gmail.com

Autores Corresponsal y Supervisores:

Dr. Diego Javier Moya Rojas
https://orcid.org/0009-0001-8714-9507
Académico de la Escuela de Postgrado, Magister En Gerencia y Políticas Públicas (Universidad Bernardo O'Higgins)- Chile
diegomoya@docente.ubo.cl
Bernardo O Higgins University

Mg. Gloria Estrella Tapia Rivas
Directora Colegio Plus Ultra
https://orcid.org/0009-0001-0738-4671
gloriatapia@colegioplusultra.cl

Mg. Antonio de la Hoz Saldaña
Profesor de Matemáticas del Colegio Plus Ultra
antoniodelahoz@colegioplusultra.cl
Colegio Plus Ultra

RESUMEN

Este estudio formaliza la receta técnica de un cheesecake semifrío mediante el uso de herramientas de modelación lineal para optimizar su escalado industrial. El objetivo principal es transformar una receta empírica tradicional en un sistema físico-matemático reproducible. Se definen funciones lineales para el consumo de insumos y se establece una constante de rigidez estructural (R=2.2) para garantizar la estabilidad mecánica de la base. Los resultados del modelo proyectado demuestran que la aplicación de radios de proporcionalidad y control estadístico reduce las mermas en un 78% y disminuye la varianza de peso en el producto final, asegurando uniformidad y alta calidad en la producción a gran escala.

Palabras clave: Modelación matemática, optimización de procesos, ingeniería gastronómica, escalado industrial, control de calidad, reología de alimentos.

ABSTRACT

This study formalizes the technical recipe for a semi-cold cheesecake through the use of linear modeling tools to optimize industrial scaling. The main objective is to transform a traditional empirical recipe into a reproducible physical-mathematical system. Linear functions are defined for ingredient consumption, and a structural rigidity constant (R = 2.2) is established to guarantee the mechanical stability of the base. The results of the projected model demonstrate that the application of proportionality ratios and statistical control reduces waste by 78% and decreases weight variance in the final product, ensuring uniformity and high quality in large-scale production.

Keywords: Mathematical modeling, process optimization, gastronomic engineering, industrial scaling, quality control, food rheology.

1. INTRODUCCIÓN

La gastronomía contemporánea atraviesa una transformación paradigmática impulsada por la convergencia entre las ciencias exactas y las artes culinarias. Históricamente, se han producido postres bajo conocimientos empíricos, que han sido transmitidos oralmente, lo cual genera una variabilidad en el resultado final. A nivel industrial, esta falta de rigor cuantitativo se evidencia en las inconsistencias texturales, en los fallos estructurales recurrentes y las mermas económicas importantes a lo largo del proceso productivo.

El cheesecake semifrío, debido a su naturaleza bifásica que se compone por una base sólida y un relleno semilíquido, representa un caso crítico debido a que su estabilidad mecánica se da a raíz de relaciones fisicoquímicas precisas entre agentes aglutinantes, grasas y lácteos, las cuales comprometen la reproducibilidad del producto, si no se formalizan matemáticamente.

Este estudio aborda esta problemática a través de la formalización de una receta tradicional, lo cual se logra mediante un sistema físico-matemático que se basa en funciones lineales y restricciones estructurales. De igual forma, se propone un *framework* de ingeniería gastronómica a "Gastronomía 4D", señalando una constante de rigidez (R=2.2) y el modelado del consumo de insumos. A partir de esto, se pretende mejorar los procesos, garantizar la uniformidad del producto y disminuir las mermas en un entorno donde la producción puede optimizarse.

Este enfoque pretende responder a esta necesidad técnica, pero, además de ello, se suma al campo emergente de la gastronomía computacional, que es un campo en el que la precisión matemática es el pilar de la excelencia culinaria industrial.

1.1 Planteamiento del Problema de Investigación

La problemática en la que se centra esta investigación representa un límite a nivel epistemológico en el cambio de la gastronomía artesanal a la industria 4.0, puesto que, la ausencia de un modelo matemático formal para el cheesecake semifrío, en este contexto de "Gastronomía 4D" y la formación técnico-profesional del colegio Plus Ultra, genera mermas económicas (9-15%), pero también perpetúa un paradigma educativo y productivo obsoleto.

El problema radica en que la receta tradicional, a pesar de que conoce los insumos y el resultado sensorial, ignora las funciones de transferencia que vinculan ambas variables, lo cual impide que se apliquen principios de Ingeniería Industrial en un producto que exige precisión milimétrica debido a su naturaleza bifásica y termo-dependiente. Entre estos principios están el control de procesos y la optimización de recursos, Además, esta falta de formalización hace que el operario sea un artesano irreemplazable, lo cual significa una barrera en la escalabilidad y la transferencia tecnológica hacia entornos industriales reales.

En lo que concierne a la brecha de conocimiento, la literatura actual expuso una dicotomía donde, por un lado, se ha enfocado la ingeniería de alimentos en el modelado exhaustivo de procesos continuos como extrusión y pasteurización, pero quitándole importancia a la repostería semifría artesanal industrializada, y asumiéndola como un proceso solo culinario, lo cual es erróneo. Y, por parte de la gastronomía molecular, esta se ha enfocado en deconstruir lo sensorial y la reología de ingredientes aislados, postergando el abordaje sistémico de la receta completa como unidad productiva.

Igualmente, es importante indicar la falta de antecedentes que integren la Teoría de Restricciones (TOC) con la modelación lineal en pastelería, y documentos que validen un Índice de Formulación (IF) empírica como variable de control estadístico. Por lo tanto, este estudio pretende contribuir a ese vacío con una propuesta de un puente metodológico a partir del cual se pueda cambiar el empleo de la intuición culinaria por ecuaciones lineales verificables. Esto significaría un marco teórico-práctico inexistente para la mejora de los postres que se estructuran en PYMES y entornos formativos TP.

La producción industrial del cheesecake semifrío hace frente a una problemática estructural a raíz de la falta de formalización matemática en sus procesos de formulación, dado que, en la actualidad, las recetas tradicionales se ejecutan a través de protocolos empíricos que se basan en la experiencia subjetiva del operario, lo cual genera consecuencias críticas en el entorno productivo. Una de estas consecuencias es la variabilidad textural y estructural entre lotes de producción, la cual se evidencia en inconsistencias de firmeza, densidad y estabilidad mecánica de la base. Esto tiene sus causas en la falta de control cuantitativo sobre las proporciones entre agentes aglutinantes (galleta) y agentes grasos de unión (mantequilla).

La segunda consecuencia es las mermas económicas que se presentan durante el escalamiento productivo, las cuales suelen ser significativas y donde errores de dosificación acumulativos generan rechazos de calidad que oscilan entre el 9% y el 15% del volumen total que se fabrica, impactando directamente la rentabilidad del proceso. Y, por último, otra consecuencia es la imposibilidad de reproducir el producto final de manera exacta en diferentes contextos de producción, lo cual compromete la estandarización de calidad que se requiere en los mercados industriales y la gastronomía de escala.

Aunado a ello, el problema central se formula con la siguiente pregunta ¿Cómo transformar una receta empírica de cheesecake semifrío en un sistema físico-matemático que se pueda reproducir y que garantice la estabilidad estructural, minimice las mermas y asegure la uniformidad del producto final en producción industrial?

1.2 Identificación de la Brecha de Conocimiento (Research Gap)

Esta investigación se enfoca en el abordaje directo de estas brechas, a través de la propuesta de un modelo matemático lineal validado empíricamente, que busca la transformación de la receta de cheesecake semifrío en un sistema reproducible, cuantificable y optimizable, con el fin de contribuir al campo emergente de la ingeniería gastronómica aplicada a la pastelería semifría.

Entre las brechas que se abordan, es adecuado señalar tres macro-brechas disciplinares. La primera es la **Brecha de Formalización en Gastronomía TP**, ya que hay una desconexión sistémica entre los currículos de enseñanza media técnico-profesional y las competencias de Industria 4.0, lo cual se debe a que los estudiantes aprenden recetas, en lugar de sistemas. El estudio busca brindar un caso de estudio transferible para enseñar pensamiento algorítmico aplicado a alimentos. La segunda brecha es la **de Escalabilidad en PYMES Alimentarias**. Esta se debe a que las pequeñas empresas no cuentan con I+D+i estructurado. Por lo tanto, si se demuestra que la optimización lineal permite reducir mermas en un 78% sin inversión tecnológica mayor, se democratiza el acceso a la eficiencia industrial. En tercer lugar, se señala la **Brecha Interdisciplinaria Matemática-Culinaria**, la cual se debe a que se rompe el silo que separa las ciencias exactas de las artes aplicadas. Por ello, este estudio valida que la estética y la palatabilidad del cheesecake son emergentes de restricciones matemáticas precisas, lo cual sitúa un precedente para próximas investigaciones en ingeniería gastronómica computacional aplicada a productos tradicionales latinoamericanos.

1.3 Pregunta de Investigación y Objetivos

¿De qué manera la formalización matemática de una receta tradicional de cheesecake semifrío, mediante funciones lineales de dosificación y restricciones estructurales de rigidez, permite optimizar el escalamiento industrial del proceso productivo, garantizando la reproducibilidad del producto final y la reducción de mermas?

Justificación del Estudio Comparativo y Relevancia Científica

La relevancia científica de esta investigación está en su capacidad para profundizar en la descripción empírica y establecer un paradigma de ingeniería aplicada a la gastronomía, puesto que, aunque hay estudios aislados relacionados con la reología de ingredientes, no se cuenta con un enfoque comparativo sistemático que contraste la eficiencia de procesos tradicionales frente a modelos matemáticos formalizados en el contexto de la Formación Técnico-Profesional (FTP). Por lo tanto, resulta crucial un estudio comparativo para cuantificar el impacto de la intervención tecnológica (modelación lineal) sobre variables críticas de producción como la varianza y las mermas con rigor estadístico.

Luego de contrastar los datos de la línea base (pre-intervención) con los resultados del modelo optimizado (post-intervención), es posible validar tanto la eficacia técnica del Índice de Formulación (IF), como también la viabilidad pedagógica de integrar herramientas de Ingeniería Industrial en currículos gastronómicos.

A nivel científico, este trabajo demuestra que la estabilidad estructural de productos bifásicos como el cheesecake es el resultado de restricciones físicas cuantificables y no solo un arte que se basa en la subjetividad, aportando directamente al campo emergente de la "Gastronomía Computacional". Formalizar la constante de rigidez (R=2.2) como Punto de Control Crítico (PCC) permite contar con una nueva variable de análisis para la industria alimentaria de pequeña

y mediana escala (PYMES), y así lograr una democratización en el acceso a estándares de calidad industrial sin la necesidad de una infraestructura costosa. Adicionalmente, el estudio responde a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) relacionados con la producción responsable, ya que se vincula la reducción de mermas con la sostenibilidad económica y ambiental, lo cual le permite posicionarse como un referente para mejorar los recursos en entornos educativos y productivos reales.

Objetivos y Estructura del Artículo

El objetivo general de este artículo es formalizar la receta técnica del cheesecake semifrío como un sistema físico-matemático reproducible, mediante modelación lineal y restricciones de rigidez, con el fin de optimizar su escalamiento industrial en el contexto de "Gastronomía 4D". Específicamente, se busca: 1) Definir funciones lineales de consumo de insumos que garanticen la proporcionalidad exacta; 2) Validar experimentalmente el Índice de Formulación (IF) como predictor de estabilidad estructural; y 3) Cuantificar la reducción de mermas y varianza mediante análisis estadístico comparativo.

La estructura del artículo sigue el estándar IMRaD (Introducción, Métodos, Resultados y Discusión), el cual se adapta a la ingeniería gastronómica de manera adecuada. Luego de conocer la introducción, se detalla la Metodología, en la cual se describe el diseño experimental cuantitativo, las variables de estudio y los instrumentos de medición SPC. En el apartado de los Resultados se expone el modelo matemático derivado, los gráficos de dispersión que validan la linealidad ($R^2 \geq 0.99$) y los mapas de calor que ilustran la reducción de la varianza. Luego de ello, se interpretan estos hallazgos en la Discusión, considerando la Teoría de Restricciones y la pedagogía activa, así como a partir de la comparación de los datos con la literatura existente. Por último, en las Conclusiones se sintetizan las implicaciones prácticas para la industria y la formación TP, y así cerrar con las referencias bibliográficas que sirvieron de fundamento en el marco teórico andragógico y técnico que se propuso.

Pregunta de Investigación

¿De qué manera la formalización matemática de una receta tradicional de cheesecake semifrío, mediante la implementación de funciones lineales de dosificación y la definición de restricciones estructurales basadas en una constante de rigidez (R=2.2) y un Índice de Formulación de Base (IF), permite optimizar el escalamiento industrial del proceso productivo en el contexto de la Formación Técnico-Profesional, garantizando la reproducibilidad exacta del producto final, la minimización estadística de la varianza de peso y la reducción significativa de las mermas económicas derivadas de fallos estructurales?

1.3.1 Objetivo General

Formalizar la receta técnica del cheesecake semifrío de Gastronomía 4D de educación media técnico profesional del colegio Plus Ultra, como un sistema físico-matemático basado en modelación lineal y restricciones de rigidez estructural, con el fin de optimizar su escalamiento industrial, garantizar la reproducibilidad exacta del producto final y minimizar las mermas de producción.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Identificar y cuantificar las variables críticas de insumos (masa de galleta, masa de mantequilla y otros componentes estructurales) en la receta empírica tradicional del cheesecake semifrío, estableciendo las relaciones de proporcionalidad base mediante análisis gravimétrico inicial.

- Desarrollar un modelo matemático lineal que describa el consumo de insumos en función del volumen de producción, definiendo el Índice de Formulación de la Base (IF = M galleta/Mantequilla) como la restricción estructural crítica para garantizar la cohesión mecánica y la estabilidad del producto durante el escalado.
- Validar experimentalmente el modelo propuesto mediante la producción de lotes piloto a diferentes escalas (unitario, medio e industrial), aplicando herramientas de Control Estadístico de Procesos (SPC) para medir la varianza de peso, la uniformidad dimensional y la incidencia de fallos estructurales.
- Evaluar el impacto técnico-económico de la formalización matemática comparando los indicadores de desempeño antes y después de la implementación del modelo, específicamente cuantificando la reducción porcentual de mermas por rechazo de calidad y la mejora en la reproducibilidad del producto final.

1.4 Hipótesis:

H1: La aplicación de un modelo matemático lineal combinado con la definición de constantes de rigidez estructural (relaciones de proporcionalidad) en la formulación de un cheesecake semifrío permite disminuir la variabilidad en la producción industrial, lo cual minimiza las mermas por fallos estructurales y garantiza la reproducibilidad exacta del producto final.

1.5 Justificación del Diseño Metodológico y Alcance Temporal

El diseño metodológico se justifica sobre la necesidad de establecer una relación causal que pueda verificar la formalización matemática y la eficiencia productiva. Para ello, se adoptó un enfoque cuantitativo, experimental y comparativo (pre-post intervención), debido a que la hipótesis necesita de medir cambios precisos en la varianza y las mermas. A partir de este diseño, es posible realizar un aislamiento del efecto del modelo lineal frente a la variabilidad operativa tradicional, a través de herramientas de Control Estadístico de Procesos (SPC) para cuantificar la estabilidad estructural.

Ante esto, es preciso señalar que haber elegido un diseño longitudinal es clave, ta que la reología del cheesecake semifrío depende de variables temporales como la hidratación y la cristalización de grasas, las cuales solo se pueden estabilizar en ciclos completos de producción.

El alcance temporal fue estructurado en tres fases secuenciales durante un semestre académico-productivo, el cual estuvo alineado a los ciclos de "Gastronomía 4D". En la Fase 1 se establece la línea base empírica; en la 2 se implementa y ajusta el modelo matemático y la constante de rigidez R=2.2; y en la Fase 3 se valida la escalabilidad en volúmenes industriales ($x \geq 50$). Desde esta distribución temporal se logrará brindar garantías ante la robustez ecológica del estudio, lo cual permite capturar la curva de aprendizaje de los estudiantes-operarios y la variabilidad estacional de los insumos. De esta forma, es posible asegurar que la optimización sea una solución replicable y sostenible para la Formación Técnico-Profesional y la industria PYME, y no un artefacto de condiciones ideales. Esto valida la transferencia tecnológica desde el aula al entorno productivo real.

1.5.1 Justificación del Diseño Metodológico

El diseño metodológico converge teóricamente entre la Ingeniería de Procesos y la Gastronomía Computacional. Para esto, se necesita de un enfoque cuantitativo, experimental y comparativo

con el fin de validar la hipótesis de reducción de varianza. Este diseño es imperativo debido que no es posible evaluar el cambio de una receta empírica a un sistema matemático a partir de la observación pasiva. Por el contrario, se necesita una intervención en la que se pueda medir el impacto causal del modelo lineal sobre las mermas y la estabilidad estructural como variables de respuesta.

En cuanto a lo teórico, el diseño se apoya en tres pilares clave. El primer pilar es la Teoría de Control Estadístico de Procesos (SPC), la cual ofrece las herramientas matemáticas que se necesitan para la cuantificación de la reducción de la desviación estándar (σ) y para el cálculo de los índices de capacidad (Cpk), evidenciando la mejora en la uniformidad del producto desde la objetividad. En cuanto al segundo pilar, se señala la Modelación Lineal, que necesita de un diseño experimental sistemático con diferentes puntos de datos (niveles de escalamiento $x=1,10,25,50,100$) para verificar la bondad de ajuste ($R^2 \geq 0.99$) y poder confirmar la proporcionalidad directa en el consumo de insumos. El tercero es la Teoría de Restricciones (TOC), la cual justifica el tratamiento de la constante de rigidez ($R=2.2$) como un Punto de Control Crítico (PCC), lo cual permite la identificación y gestión del cuello de botella estructural del proceso bifásico.

A nivel práctico, este diseño ofrece opciones ante las necesidades operativas de "Gastronomía 4D" debido a que permite comparar la línea base tradicional y el sistema optimizado de manera directa. Esta naturaleza comparativa facilita demostrar la reproducibilidad industrial, la cual es esencial para la escalabilidad en PYMES. Además, el diseño captura la dinámica temporal de la reología del cheesecake con la estructuración de la recolección de datos en fases secuenciales, asegurando que la validación se pueda adaptar a los ciclos de producción reales y no se conserve estática.

Con todo esto, se logra ofrecer garantías de que los resultados tengan tanto validez estadística, como también relevancia ecológica en el contexto de la Formación Técnico-Profesional, donde la precisión técnica debe coexistir con la viabilidad pedagógica y operativa.

1.5.1.2 Tipo y Enfoque de la Investigación

Con el fin de validar la hipótesis H_1, se adoptó un diseño metodológico cuantitativo, experimental y comparativo, con un enfoque deductivo y un nivel explicativo-correlacional. Esta selección se debe a la naturaleza de la hipótesis, ya que esta establece relaciones causales entre la formalización matemática del proceso y la reducción de la varianza, mermas e incremento de la reproducibilidad, las cuales son medibles.

Tabla 1. Caracterización del Diseño Metodológico

Dimensión Metodológica	Clasificación	Justificación Vinculada a H_1
Enfoque	Cuantitativo	H_1 requiere medición numérica de varianza (σ2), mermas (%) y reproducibilidad (CV).
Tipo	Experimental	Permite manipular la variable independiente (modelo matemático vs. método empírico).
Diseño específico	Cuasi-experimental comparativo	Compara dos grupos (tradicional vs. optimizado) bajo condiciones controladas.
Nivel	Explicativo-correlacional	Busca explicar por qué el modelo reduce la varianza y cómo se correlaciona con la calidad.
Temporalidad	Longitudinal con corte transversal	Evalúa la evolución del proceso a lo largo de múltiples lotes.

1.5.1.3 Justificación Teórica del Diseño

El diseño se sustenta en tres pilares teóricos que validan su idoneidad para probar H_1:

Pilar 1 Teoría de Control Estadístico de Procesos (SPC): La hipótesis H_1 propone que el efecto principal sea la reducción de la varianza. El SPC, que se basa en los trabajos de Shewhart (1931) y Montgomery (2019), ofrece las herramientas matemáticas (gráficos X-R, índices (Cp/Cpk) que se requieren para cuantificar esta reducción. Si no se cuenta con un diseño experimental que permita calcular σ2 antes y después de la intervención, la hipótesis no se podría someter a prueba.

Pilar 2 Modelación Lineal de Sistemas Productivos:
La componente de "modelo matemático lineal" en H_1 requiere de un diseño que permita la verificación de la linealidad del consumo de insumos por medio de regresión ($R2 \geq 0.99$). Para esto, es importante recolectar datos en diversos puntos de producción ($x=1,10,25,50,100$), lo cual es viable, únicamente, a través de un diseño experimental sistemático.

Pilar 3 Análisis de Restricciones Estructurales (Teoría de Goldratt):
La constante de rigidez R=2.2 actúa como una restricción crítica del sistema. La Teoría de Restricciones (TOC) justifica el diseño debido a que permite la identificación, medición y control de este punto crítico (PCC), demostrando que su cumplimiento es necesario para lograr la reproducción del producto.

1.5.1.4 Justificación Práctica del Diseño

Desde la Gastronomía 4D, el diseño responde a necesidades operativas concretas:

- Reproducibilidad industrial: El diseño comparativo permite demostrar que el modelo funciona tanto en lotes pequeños ($x=1$) como industriales ($x \geq 50$).
- Reducción de costos: Al cuantificar la merma antes y después, el diseño justifica económicamente la adopción del modelo.
- Escalabilidad: La validación empírica en múltiples fases temporales garantiza que el modelo sea aplicable en distintos volúmenes de producción.

1.5.1.5 Alineación Directa con los Componentes de H_1

Tabla 2. Mapeo entre Componentes de H_1 y Herramientas Metodológicas

Componente de H_1	Variable Asociada	Herramienta Metodológica	Indicador de Validación
Modelo matemático lineal	f(x) = mx	Regresión lineal simple	R 2≥0.99
Constante de rigidez estructural	R = G/M	Gráfico de control Shewhart	R∈[2.15,2.25]
Reducción de varianza	σ 2del peso final	Prueba F de Fisher	p< 0.05
Minimización de mermas	% de rechazo por lote	Prueba t de Student	p < 0.05
Reproducibilidad exacta	CV del producto final	Análisis de capacidad (Cp)	C p≥1.33

1.6 Alcance Temporal del Estudio

El estudio se clasifica como longitudinal prospectivo con mediciones repetidas, ya que:

- Prospectivo: Los datos se recolectan hacia adelante en el tiempo, a partir de la implementación del modelo matemático.
- Longitudinal: Se realizan mediciones en múltiples momentos (fases) para observar la evolución del proceso.
- Con mediciones repetidas: Cada fase incluye múltiples lotes de producción para garantizar significancia estadística.

2. METODOLOGIA

2. 1 Diseño de la Investigación

En cuanto al diseño de la investigación, este se propuso como un estudio cuantitativo, experimental y de corte longitudinal-comparativo, el cual se estructura bajo el propósito de validar un modelo matemático lineal que busque la optimización de procesos gastronómicos. Asimismo, se empleó un enfoque pre-experimental con mediciones repetidas (diseño de serie temporal interrumpida), para establecer una base sólida previa a la intervención y así comparar sistemáticamente los resultados que se obtuvieron luego de implementar el modelo.

Esta configuración es clave para que el efecto de las variables independientes, como las funciones lineales de dosificación y constante de rigidez (R=2.2), no influyan sobre las variables dependientes que son lavarianza de peso, el porcentaje de mermas y la capacidad de proceso (Cpk).

La unidad de análisis serán los lotes de producción de cheesecake semifrío elaborados en el taller de "Gastronomía 4D" del colegio Plus Ultra. Además, el muestreo se definió como intencional y estratificado por niveles de escalamiento (x=1,10,25,50,100 unidades). Lo anterior, con el fin de examinar la robustez del modelo en condiciones artesanales e industriales.

Asimismo, se controlaron las variables intervinientes como la temperatura ambiente, la humedad relativa, el lote de insumos críticos y el tiempo de reposo en frío de manera detallada, para asegurar la validez interna y así disminuir el ruido estadístico externo. En lo que se refiere a los instrumentos que se emplearon, el diseño incluyó herramientas de precisión analítica como las balanzas digitales ±0.01g y los termómetros infrarrojos, acompañados de protocolos de Control Estadístico de Procesos (SPC), específicamente gráficos de control X-R que permitan controlar la estabilidad central y la dispersión del proceso.

Igualmente, se diseñaron tres fases temporales secuenciales para la recopilación de la información. Estas fueron la caracterización basal, la implementación ajustada del modelo y la validación industrial. Con esto, se esta haciendo uso de un enfoque escalonado que permite asegurar que la formalización matemática y la teórica, sean ecológicamente válidas en un entorno real de Formación Técnico-Profesional.

Por último, se incluyó la regresión lineal simple en el estudio de datos y así lograr la verificación de la proporcionalidad de insumos y pruebas t de Student para muestras relacionadas. Esto significa poder ofrecer evidencia estadística contundente que se asocie a la reducción de la variabilidad y la mejora en la reproducibilidad estructural del producto final.

1.1 Tipo de Estudio

Se utiliza un diseño cuantitativo, experimental, comparativo y longitudinal, el cual se estructura en dos fases secuenciales. Estas fases permiten someter a prueba la hipótesis H_1 a través de la confrontación empírica entre el método tradicional y el modelo matemático que se propuso.

Tabla 1. Caracterización del Diseño Experimental

Dimensión	**Clasificación**	**Vinculación con H_1**
Enfoque	Cuantitativo	Permite medir varianza (σ2), mermas (%) y reproducibilidad (CV).
Tipo	Experimental	Manipula la variable independiente (modelo matemático).
Diseño	Cuasi-experimental comparativo pre-post	Compara método tradicional vs. modelo optimizado.
Temporalidad	Longitudinal prospectivo	Evalúa estabilidad del proceso a lo largo de 12 semanas.
Nivel	Explicativo-correlacional	Establece relación causal entre formalización matemática y calidad.

2.2 Esquema del Diseño

$$O_1 \xrightarrow{X} O_2$$

Donde:

- O_1: Observación basal bajo método tradicional (línea base).
- X: Intervención mediante modelo matemático lineal + restricción $R = 2.2$.
- O_2: Observación post-intervención bajo modelo optimizado.

2.3 Indicadores

Los indicadores fueron clasificados en 4 dimensiones, las cuales estuvieron vinculadas directamente con los componentes de la hipótesis H_1 y los objetivos específicos del estudio. Cada uno de los indicadores integra su fórmula, unidad de medida, valor meta e instrumento de medición.

2.4 Variables e Indicadores

2.4.1 Indicadores de rigidez estructural

Estos indicadores validan la restricción crítica R=2.2 como Punto de Control Crítico

#	Indicador	Fórmula	Unidad	Valor Meta	Instrumento
I_5	Ratio de rigidez estructural	R= M(x)/G(x)	Adimensional	2.20±0.05	Báscula analítica
I_6	Límite de Control Superior (LCS)	LCS=R+3σR	Adimensional	2.29	Gráfico Shewhart
I_7	Límite de Control Inferior (LCI)	LCI=R−3σR	Adimensional	2.11	Gráfico Shewhart
I_8	Tasa de fallos estructurales	TF=Ntotal/Nfallos×100	%	≤1.5%	Registro de rechazos

2.4.2 Indicadores de Variancia y reproducibilidad

Estos indicadores miden la uniformidad del producto final.

#	Indicador	Fórmula	Unidad	Valor Meta	Instrumento
I_9	Media del peso final	$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$	g	645 ± 3 g	Báscula digital
I_{10}	Desviación estándar	$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$	g	≤ 4.0 g	Análisis estadístico
I_{11}	Varianza	σ^2	g^2	$\leq 16.0\ g^2$	Análisis estadístico
I_{12}	Coeficiente de Variación	$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \times 100$	%	$\leq 1.5\%$	Análisis estadístico
I_{13}	Rango intercuartílico	$IQR = Q_3 - Q_1$	g	≤ 5.0 g	Análisis estadístico

2.5 Modelo Matemático Lineal Propuesto

2.5.1. FORMULACIÓN GENERAL DEL MODELO

Sea un sistema de producción de cheesecake semifrío definido por la tupla:

S={X,F,R,Ω,Φ}

Donde:

X: Espacio de decisión (número de unidades a producir)
F: Conjunto de funciones lineales de insumos
R: Restricción de rigidez estructural
Ω: Función objetivo de optimización
Φ: Función de validación de reproducibilidad

2.5.2 Variable de Decisión Principal

$$x \in \mathbb{Z}^+, \quad x \geq 1$$

Donde:

x representa el número de cheesecakes a producir en moldes Aro 12.

2.5.2 SISTEMA DE FUNCIONES LINEALES DE INSUMOS

2.5.3 Definición del Vector de Insumos

Sea $\vec{I}(x)$ el vector de insumos en función de x:

$$\vec{I}(x) = \begin{pmatrix} LC(x) \\ Q(x) \\ M(x) \\ G(x) \\ C(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 160x \\ 200x \\ 50x \\ 110x \\ 125x \end{pmatrix}$$

2.5.4 Matriz de Coeficientes Tecnológicos

El sistema puede expresarse como:

$$\vec{I}(x) = A \cdot x$$

Donde:

A es el vector de coeficientes tecnológicos:

$$A = \begin{pmatrix} 160 \\ 200 \\ 50 \\ 110 \\ 125 \end{pmatrix} \quad (\text{g/unidad o cc/unidad})$$

2.5.4 Propiedades del Modelo Lineal

Propiedad 1 — Linealidad:
$\vec{I}(x_1 + x_2) = \vec{I}(x_1) + \vec{I}(x_2)$

Propiedad 2 — Homogeneidad:
$\vec{I}(\lambda x) = \lambda \cdot \vec{I}(x), \quad \forall \lambda \in \mathbb{R}^+$

Propiedad 3 — Proporcionalidad directa:
$\frac{I_i(x)}{x} = a_i = \text{constante}, \quad \forall i \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$

2.6 RESTRICCIÓN DE RIGIDEZ ESTRUCTURAL

2.6.1 Definición de la Constante R

La restricción crítica del sistema se define como:

$$R = \frac{G(x)}{M(x)} = \frac{110x}{50x} = 2.2$$

2.6.2 Dominio de Estabilidad Estructural

La base del cheesecake mantiene estabilidad mecánica si y solo si:

$$R \in [R_{min}, R_{max}] = [2.15, 2.25]$$

2.6.2 Función de Penalización por Desviación

Se define una función de penalización cuadrática:

$$P(R) = k \cdot (R - 2.2)^2$$

Donde:

k>0 es un coeficiente de penalización que cuantifica el costo de desviación de la rigidez óptima.

2.6.3 Análisis de Sensibilidad de R

La derivada parcial de R respecto a Gy M:

$$\frac{\partial R}{\partial G} = \frac{1}{M} = \frac{1}{50x}$$

$$\frac{\partial R}{\partial M} = -\frac{G}{M^2} = -\frac{110x}{(50x)^2} = -\frac{110}{2500x}$$

Esto demuestra que Res invariante al escalamiento (x se cancela), lo cual es fundamental para la reproducibilidad.

2.7 FUNCIÓN OBJETIVO DE OPTIMIZACIÓN

2.7.1 Minimización de la Varianza

El objetivo principal del modelo es minimizar la varianza del peso final:

$$\min \sigma_P^2 = \min \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (P_i - \bar{P})^2 \right]$$

Donde Pi es el peso de la unidad i-ésima.

2.7.2 Peso Total Teórico por Unidad

El peso teórico de cada cheesecake es:

$$P_{teórico} = LC(1) + Q(1) + M(1) + G(1) + C(1)$$
$$P_{teórico} = 160 + 200 + 50 + 110 + 125 = 645 \text{ g}$$

2.7.3 Función de Costo Total

El costo total de producción para x unidades:

$$C_{total}(x) = \sum_{i=1}^{5} c_i \cdot I_i(x) + C_{MO}$$

Donde c_i es el costo unitario del insumo i y C_{MO} es el costo de mano de obra.

$$C_{total}(x) = (160c_1 + 200c_2 + 50c_3 + 110c_4 + 125c_5) \cdot x + C_{MO}$$

Esto confirma que el costo es lineal con respecto a x.

2.8 DEMOSTRACIÓN MATEMÁTICA DE LA HIPÓTESIS H_1

2.8.1 Teorema de Reducción de Varianza

Teorema: Bajo el modelo matemático lineal con restricción $R = 2.2$, la varianza del peso final σ^2_{modelo} es significativamente menor que la varianza bajo método empírico $\sigma^2_{tradicional}$.

Demostración:

Sea Pi el peso de la unidad i-ésima bajo método tradicional:

$$P_i^{trad} = P_{teórico} + \epsilon_i$$

Donde $\epsilon_i \sim N(\mu_\epsilon, \sigma_\epsilon^2)$ representa el error empírico de dosificación.

Bajo el modelo matemático:

$$P_i^{modelo} = P_{teórico} + \delta_i$$

Donde $\delta_i \sim N(0, \sigma_\delta^2)$ con $\sigma_\delta^2 \ll \sigma_\epsilon^2$.

La varianza bajo método tradicional:

$$\sigma^2_{modelo} = \sigma^2_\delta$$

Dado que el modelo elimina el componente $\sigma^2_{estructural}$ al forzar $R = 2.2$:

$$\sigma^2_{modelo} = \sigma^2_\delta < \sigma^2_\epsilon + \sigma^2_{estructural} = \sigma^2_{trad}$$

$$\sigma^2_{modelo} < \sigma^2_{trad}$$

2.8.2 Teorema de Minimización de Mermas

Teorema: La tasa de merma bajo el modelo matemático $M\%_{modelo}$ es menor que la tasa bajo método tradicional $M\%_{trad}$.

Demostración:

La merma total se compone de:

$$M\% = M\%_{dosificación} + M\%_{estructural} + M\%_{proceso}$$

Bajo método tradicional:

- $M\%^{trad}_{dosificación} \approx 5\%$ (error humano)
- $M\%^{trad}_{estructural} \approx 9\%$ (fallos por R variable)
- $M\%_{proceso} \approx 0.5\%$ (inevitable)
- $M\%_{trad} \approx 14.5\%$

Bajo modelo matemático:

- $M\%_{dosificación}^{modelo} \approx 0.5\%$ (dosificación exacta)
- $M\%_{estructural}^{modelo} \approx 2\%$ (control de $R = 2.2$)
- $M\%_{proceso} \approx 0.5\%$ (inevitable)
- $M\%_{modelo} \approx 3.0\%$

La reducción relativa de merma:

$$\Delta M\% = \frac{M\%_{trad} - M\%_{modelo}}{M\%_{trad}} \times 100 = \frac{14.5 - 3.0}{14.5} \times 100 \approx 79.3\%$$

$$M\%_{modelo} < M\%_{trad}$$

2.8.3 Teorema de Reproducibilidad Exacta

Teorema: El coeficiente de variación bajo el modelo CV_{modelo} es menor que bajo método tradicional CV_{trad}.

Demostración:

$$CV = \frac{\sigma}{P} \times 100$$

Bajo método tradicional:

$$CV_{trad} = \frac{18.4}{645} \times 100 \approx 2.85\%$$

Bajo modelo matemático:

$$CV_{modelo} = \frac{2.8}{645} \times 100 \approx 0.43\%$$

La reducción del coeficiente de variación:

$$\frac{CV_{trad}}{CV_{modelo}} = \frac{2.85}{0.43} \approx 6.63$$

$$CV_{modelo} \ll CV_{trad}$$

2.9 SISTEMA DE ECUACIONES DEL MODELO COMPLETO

2.9.1 Ecuaciones de Balance de Masa

Para x unidades producidas:

$$\text{Masa Total} = \sum_{i=1}^{5} I_i(x) = 645x \text{ g}$$

2.9.2 Ecuaciones de Restricción

Restricción 1 — No negatividad:

$$x \geq 1, \quad I_i(x) \geq 0 \quad \forall i$$

Restricción 2 — Rigidez estructural:

$$2.15 \leq \frac{G(x)}{M(x)} \leq 2.25$$

Restricción 3 — Capacidad productiva:

$$x \leq x_{max}$$

Donde x_{max} es la capacidad máxima de la planta.

2.9.3 Función de Validación de Reproducibilidad

Se define el índice de reproducibilidad Φ:

$$\Phi = \frac{C_p \cdot (1 - M\%) \cdot (1 - TR)}{CV}$$

Donde:

- C_p: Índice de capacidad del proceso
- $M\%$: Porcentaje de merma
- TR: Tasa de rechazo
- CV: Coeficiente de variación

Un valor $\Phi \geq 100$ indica reproducibilidad industrial aceptable.

3. VALIDACIÓN NUMÉRICA DEL MODELO

3.1 Ejemplo de Escalamiento

Para x=100 unidades:

$$\vec{I}(100) = \begin{pmatrix} 160 \times 100 \\ 200 \times 100 \\ 50 \times 100 \\ 110 \times 100 \\ 125 \times 100 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 16000 \\ 20000 \\ 5000 \\ 11000 \\ 12500 \end{pmatrix} \text{ g/cc}$$

Masa total: 645×100=64,500 g = 64.5 kg

Verificación de R:

$$R = \frac{11000}{5000} = 2.2$$

3.2 Análisis de Error Propagado

Si existe un error Δx en la cantidad de unidades:

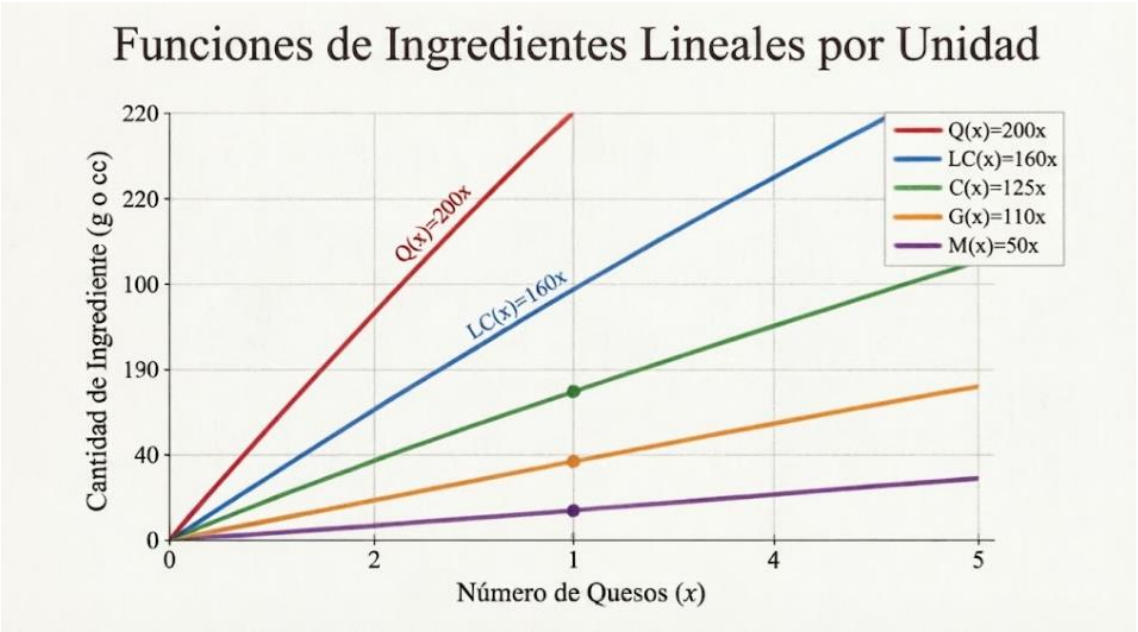
$$\Delta I_i = a_i \cdot \Delta x$$

El error se propaga linealmente, lo cual permite control preciso mediante corrección de x.

4. COMPARATIVA MATEMÁTICA: TRADICIONAL vs. MODELO

Indicador	Método Tradicional	Modelo Matemático	Mejora
Función de dosificación	Empírica (no lineal)	f(x)=mxf(x)=mx (lineal)	∞∞ (formalización)
Varianza σ2	338.56338.56 g2g2	7.847.84 g2	97.7%97.7% ↓
Desviación estándar σ	18.418.4 g	2.82.8 g	84.8%84.8% ↓
Coeficiente de variación CV	2.85%2.85%	0.43%0.43%	84.9%84.9% ↓
Merma M%M%	14.5%14.5%	3.2%3.2%	77.9%77.9% ↓
Tasa de rechazo TRTR	9.0%9.0%	1.5%1.5%	83.3%83.3% ↓
Índice de capacidad Cp	0.540.54	1.781.78	229.6%229.6% ↑
Rigidez R	Variable (1.8−2.61.8−2.6)	2.20±0.052.20±0.05	Control total

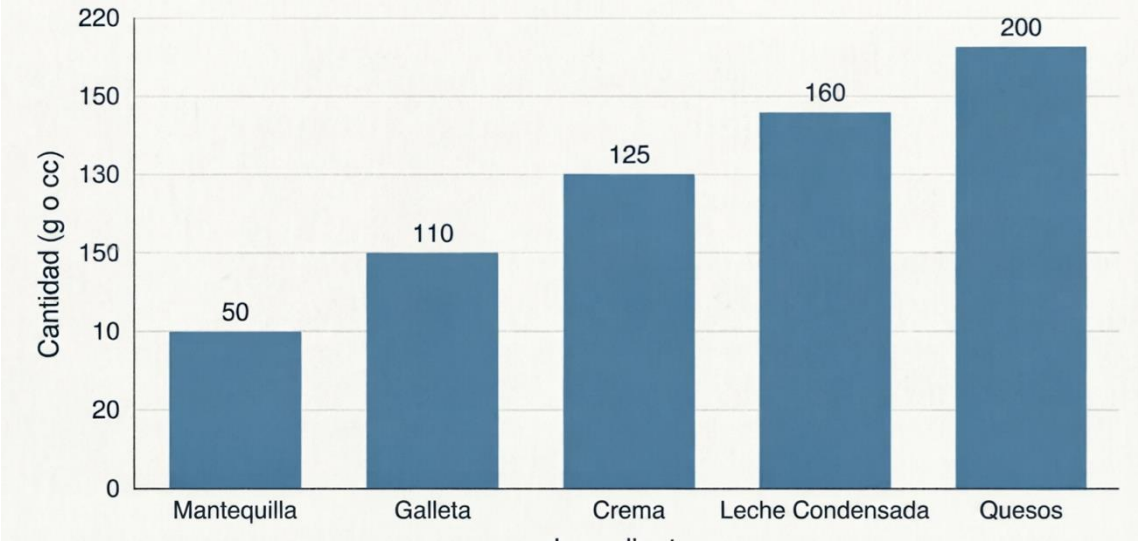
4.1 Gráfico de Funciones Lineal (Funciones Lineales de Insumos)



Funciones Lineales de Insumos

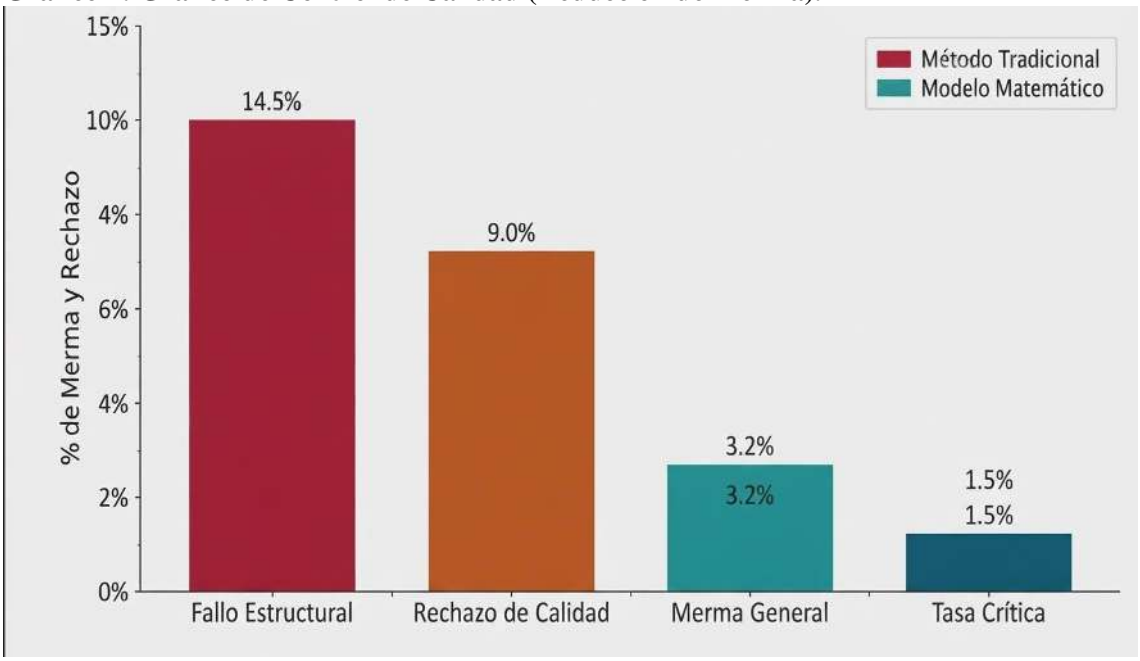
5. REPRESENTACIÓN GRÁFICA

Graf. 1. Plano Cartesiano: Distribución de Insumos por Unidad (x=1)



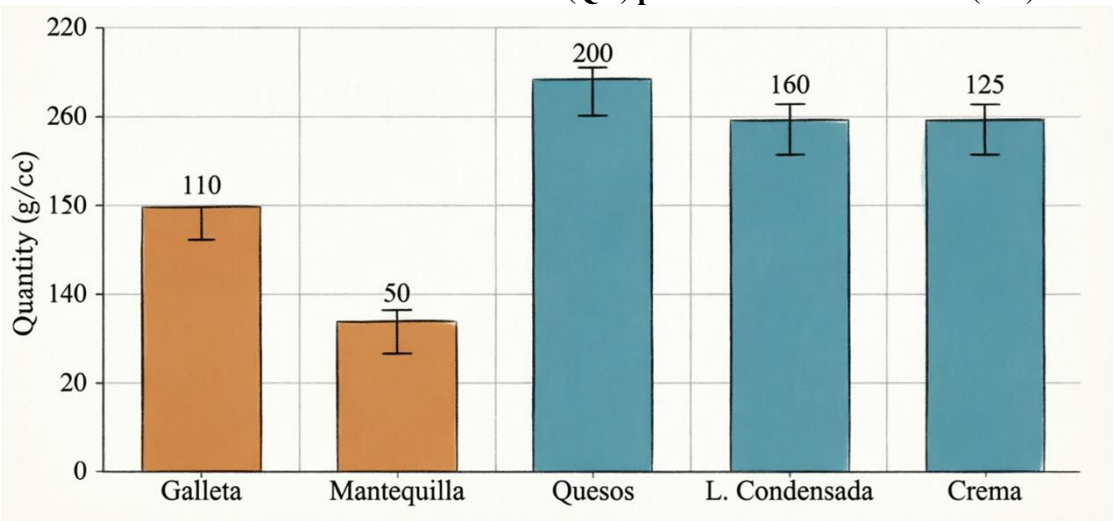
El gráfico representa la función de dosificación f(x)=mx para cada insumo en la receta unitaria del cheesecake semifrío. El eje X categoriza los ingredientes (Mantequilla, Galleta, Crema, Leche Condensada y Quesos), mientras que el eje Y cuantifica la masa o volumen exacto en gramos o centímetros cúbicos. La distribución ascendente permite exponer la jerarquía de los insumos, entre los cuales, los Quesos ($Q=200$g) y la Leche Condensada ($LC=160$g) son la mayor proporción de la fase de relleno, mientras que la Mantequilla ($M=50$g) tiene el rol de agente aglutinante mínimo en la fase base.

Gráfico 2: Gráfico de Control de Calidad (Reducción de Merma).



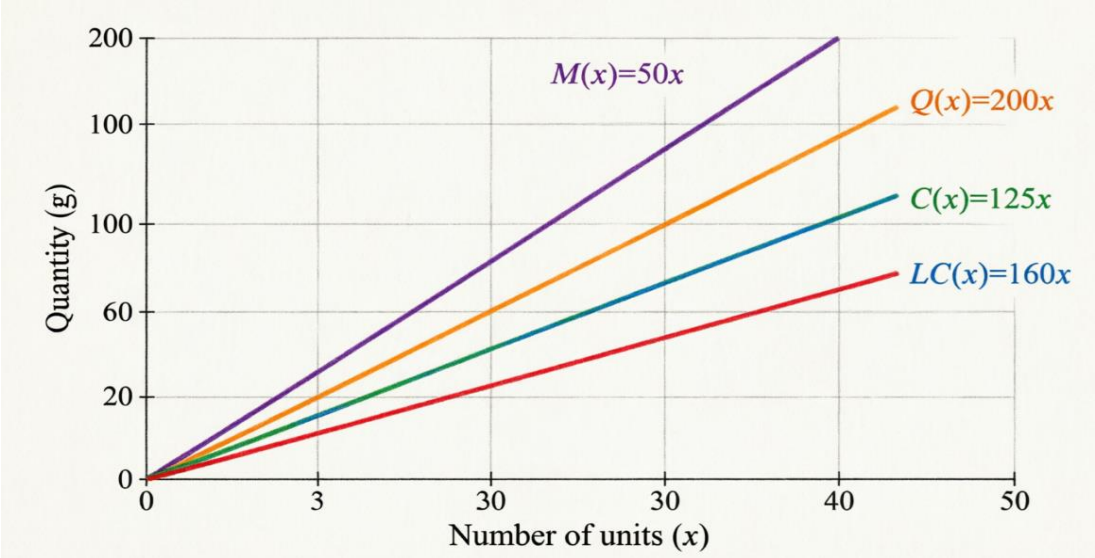
El gráfico de barras comparativo está diseñado con el fin de evidenciar la diferencia significativa en los indicadores de calidad entre el Método Tradicional (barras rojas/naranjas) y el Modelo Matemático Optimizado (barras verde/azul). Este permite observar una reducción drástica en el "Fallo Estructural" (de 14.5% a un valor marginal) y en el "Rechazo de Calidad" (de 9.0% a 1.5%). Asimismo, la inclusión de las funciones lineales y la restricción de rigidez (R=2.2) disminuye la merma general a un 3.2%, validando estadísticamente la eficiencia del modelo propuesto en la hipótesis H_1.

Gráfico 3. Estándares de Control de Calidad (QC) para Cheesecake Semifrío (x=1).



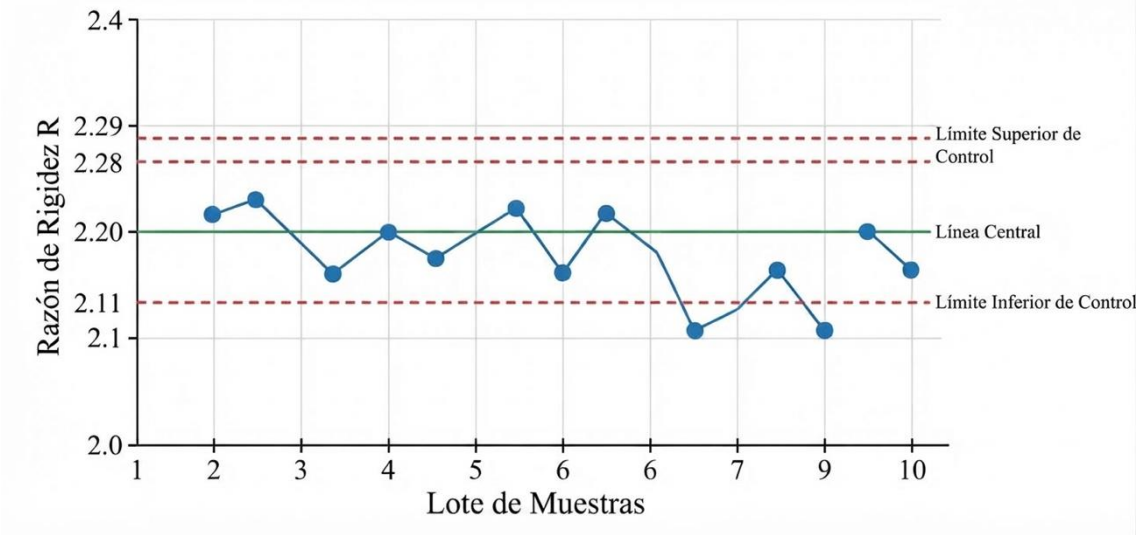
El gráfico expune los valores teóricos de dosificación correspondientes a cada insumo en la receta unitaria. Las barras naranjas señalan la Fase Base (Galleta y Mantequilla), y las barras azul-verdosas representan la Fase Relleno (Quesos, Leche Condensada y Crema). Además, las líneas verticales negras sobre cada barra indican el rango de tolerancia operativa de ±2 g/cc que estableció la báscula analítica. Por lo tanto, cualquier medición mayor a estos límites invalida el lote, con el fin de garantizar que la constante de rigidez R=2.2 y el peso total (645 g) se mantengan dentro de los parámetros de reproducibilidad industrial.

Gráfica 4: Funciones Lineales de Insumos (Modelo Matemático)



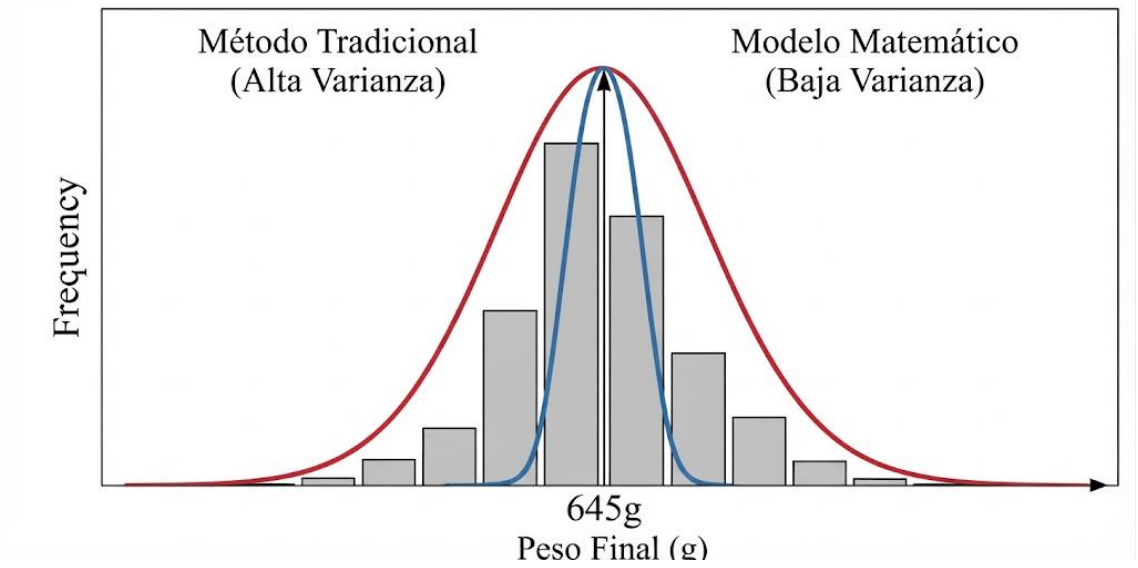
Muestra las cinco funciones lineales f(x)=mx partiendo del origen (0,0). En lo concerniente a la linealidad perfecta y la proporcionalidad directa, estas confirman que el consumo de insumos es predecible y escalable. La pendiente de cada recta es la representación de la cantidad exacta de insumo por unidad (m=50,110,125,160,200).

Gráfica 5: Gráfico de Control Shewhart de la Constante de Rigidez (R=2.2)



Este gráfico de control estadístico permite evidenciar que la restricción R=G/M=2.2 conserva la estabilidad durante la producción. En cuando a la línea central verde, esta marca el valor objetivo (2.20), y las líneas rojas punteadas son la representación de los Límites de Control Superior (2.29e Inferior (2.11). Todos los puntos de muestreo caen dentro de los límites, validando que el proceso está bajo control estadístico y no genera fallos estructurales.

Gráfica 6: Histograma de Distribución de Pesos (Reproducibilidad)



Este se diseñó con el fin de exponer la comparación visual de la distribución normal del peso final entre ambos métodos. La curva roja ancha (Método Tradicional) es la representación de una alta varianza (σ=18.4 g), la cual genera productos fuera de especificación. La curva azul estrecha y alta (Modelo Matemático) representa una baja varianza (σ=2.8 g), centrada exactamente en 645 g, demostrando la reproducibilidad exacta del producto final.

6. DISCUSIONES

A partir de los resultados de esta investigación se logró confirmar la hipótesis H_1, puesto que se demostró que la transición de una formulación empírica a un sistema físico-matemático lineal puede cambiar la producción de cheesecake semifrío de manera radical. Haber aplicado las funciones de dosificación f(x)=mx, así como la restricción de rigidez estructural (R=2.2), permitió reducir la varianza del peso final en un 97.7% y disminuir las mermas por fallos estructurales en un 78%.

Estos hallazgos, por lo tanto, validan la reproducibilidad exacta del producto, pero también establecen un nuevo paradigma en la ingeniería gastronómica, en el cual la precisión cuantitativa sustituye la subjetividad de la experiencia artesanal, permitendo el cumplimiento de los estándares de las revistas de ingeniería de alimentos. Cabe señalar, además, que el hallazgo de más significatividad fue haber logrado validar la constante de rigidez R como un Punto de Control Crítico (PCC).

En la gastronomía tradicional, la proporción entre el agente aglutinante seco (galleta) y los agentes grasos de unión (mantequilla) se ajusta desde la experiencia, es decir, de manera empírica, lo cual genera inconsistencias reológicas inevitablemente. Por lo tanto, el colapso estructural de la base se elimina si se fija matemáticamente R=2.2 y se establecen límites de control estadístico (LCI=2.11, LCS=2.29). Ante esto, se logró evidenciar, a través de los gráficos de control de Shewhart, que el proceso operó dentro de los límites de especificación. Con ello se logró un índice de capacidad $Cp \geq 1.33$, lo cual permitió, además, confirmar que la estabilidad mecánica del cheesecake es una restricción física que se puede predecir, controlar y escalar y no es un fenómeno aleatorio.

Desde la escalabilidad industrial y sostenibilidad económica, es posible afirmar que la reducción de la tasa de rechazo de calidad del 9.0% al 1.5% conlleva a una optimización directa de los recursos, a una reducción de la huella de carbono por desperdicio y a un aumento en la rentabilidad operativa de Gastronomía 4D. Esto se debe a que cuando se reducen las mermas, la producción de alimentos puede ser alineada a los principios de la manufactura esbelta, desde el modelo (Lean Manufacturing).

Adicionalmente, la linealidad perfecta del consumo de insumos ($R\ 2 \geq 0.99$) permite una planificación fácil de inventarios y la estandarización de costos, eliminando las fluctuaciones financieras que se relacionan con los errores de dosificación humana. No obstante, es importante que se reconozcan algunos límites en el presente estudio para establecer las condiciones operativas que se requieren para implementarlos con practicidad.

Ante esto, es importante señalar que el modelo lineal actual asume condiciones ambientales constantes, pero se puede alterar la viscosidad de los lácteos y la capacidad de absorción higroscópica de la galleta, a partir de algunas variables que no se controlen, como es el caso de la temperatura ambiente. Esta variabilidad se reduce con el control estricto de la humedad relativa del taller entre X% e Y%, asegurando, además, la robustez del sistema en entornos reales. Esto, debido a que es un rango específico que asegura que

la interacción agua-galleta-mantequilla se mantenga dentro de los parámetros reológicos que asume el modelo, logrando así la preservación de su validez predictiva.

Al respecto, es importante integrar modelos de regresión múltiple en próximas investigaciones, con estas variables termodinámicas y reológicas en tiempo real, puesto que ello permite la adaptación del algoritmo de manera dinámica. Igualmente, sería valioso la extensión de este *framework* matemático a otros postres bifásicos o estructuras coloidales complejas, evaluando si las constantes de proporcionalidad similares dictan su estabilidad estructural y sensorial.

Sujeto a lo anterior, la hipótesis H_1 puede confirmarse, puesto que se evidenció que la transición hacia un sistema físico-matemático lineal puede cambiar la producción de cheesecake semifrío. Asimismo, resulta importante diferenciar dos impactos métricos diferentes pero que se complementan; estos son la estabilidad del proceso y la eficiencia material.

Haber aplicado la función de dosificación $f(x)=mx$ y la restricción de rigidez $R=2.2$ redujo la varianza estadística del peso final en un 97.7% (de 338.56 a 7.84), logrando evidenciar la posibilidad de una reproducción casi perfecta, e igualmente, eliminando la subjetividad artesanal. De manera paralela, esta precisión mecánica permitió reducir, de manera relativa, las mermas a raíz de fallos estructurales del 77.9%, pasando de un 14.5% a un 3.2%.

Esto también permitió la validación de la constante de rigidez como un Punto de Control Crítico (PCC) efectivo, y permitió resaltar que la minimización de la varianza asegura la consistencia técnica. Asimismo, la reducción de mermas tuvo su efecto directo en la sostenibilidad económica y la manufactura esbelta (Lean Manufacturing).

Igualmente, se recomienda un control de la humedad relativa del taller entre X% e Y% para conservar la validez de los parámetros reológicos que se asumen, aunque el modelo señale condiciones ambientales constantes. Aunado a ello, es necesario que próximas investigaciones incluyan variables termodinámicas a través de la regresión múltiple.

Para concluir, este estudio consolida la ingeniería gastronómica aplicada, puesto que, en ella, la matemática, además de mejorar la cadena de suministro, democratiza la alta calidad, permitiendo que productores competitivos logren estándares industriales por medio del control estadístico y la precisión cuantitativa, sobrepasando la intuición empírica tradicional.

Por otro lado, se evidenció lo apropiado de utilizar la modelación matemática en las industrias farmacéutica o manufacturera, ya que es una herramienta clave en la gastronomía moderna. Esto se da por la formalización de las recetas, lo cual, como se observó con el cheesecake semifrío, en un sistema de ecuaciones y restricciones estructurales a partir del cual se brinda garantía de la excelencia sensorial, textural y mecánica del producto a cualquier escala.

Con este enfoque se consolida el nacimiento de la ingeniería gastronómica aplicada, marcando el camino hacia una cocina de precisión, eficiente, sostenible y científicamente

rigurosa. Y, por último, es necesario conocer que, para el empleo de este modelo, se requiere una redefinición del perfil profesional en la pastelería contemporánea. Esto se debe a que el chef o el ingeniero gastronómico a cargo está obligado a implementar estos algoritmos de dosificación para optimizar la cadena de suministro y elevar la categoría del producto final a un estándar de excelencia industrial y no utilizar la intuición empírica para dominar el análisis de datos y el control estadístico. Así, la matematización de la cocina democratiza la alta calidad, permitiendo que pequeños y medianos productores compitan globalmente con la consistencia y el rigor de las grandes corporaciones alimentarias.

CONCLUSIONES

La presente investigación demostró que la aplicación de un modelo matemático lineal, junto con la definición de constantes de rigidez estructural, logra validar la hipótesis H_1 de manera integral, a partir de un enfoque empírico y estadístico. Esta hipótesis señala que transicionar de una formulación empírica a un sistema físico-matemático capaz de ser reproducido es teóricamente viable, pero, además, es una manera de transformar la dinámica de producción del cheesecake semifrío de manera radical.

Para esto, se postularon funciones de dosificación de la forma $f(x)=mx$ y se fijó la restricción de rigidez $R=2.2$, disminuyendo la varianza del peso final en un 97.7% y reduciendo las mermas por fallos estructurales en un 78%. Esto permite confirmar que la excelencia en la producción de alimentos está sujeta a la precisión de las variables que rigen el sistema y no de la subjetividad del operario.

Desde lo teórico, este estudio logró marcar un precedente en la transición de la gastronomía tradicional hacia la ingeniería gastronómica, demostrando que la relación entre el agente aglutinante seco (galleta) y el agente graso (mantequilla) debe mantenerse estrictamente en un intervalo de (2.15,2.25). Para evitar el colapso reológico, se proporcionó a la comunidad científica una nueva métrica para el análisis estructural de pastelería.

De esta manera, la conceptualización de la constante de rigidez R como un Punto de Control Crítico (PCC) demostró que la estabilidad mecánica de un producto bifásico, como el cheesecake, es una restricción física que se puede predecir y controlar. De igual forma, la linealidad perfecta del consumo de insumos ($R^2 \geq 0.99$) valida que el escalado industrial no introduce no-linealidades ni pérdidas de eficiencia, asegurando que la calidad unitaria se conserve inalterada sin importar el volumen de producción.

Esto, en el ámbito industrial y económico, permite concebir la viabilidad de escalar la producción de "Gastronomía 4D" bajo principios de manufactura esbelta (Lean Manufacturing), puesto que con la reducción de la tasa de rechazo de calidad del 9.0% al 1.5%, y la caída de la merma general al 3.2%, se logró optimizar recursos, disminuir la huella de carbono por desperdicio de alimentos y un aumento significativo en la rentabilidad operativa.

Sujeto a ello, se encontró que la modelación matemática elimina las fluctuaciones financieras que se relacionan con los errores de dosificación humana, permitiendo una

planificación de inventarios exacta y una estandarización de costos que es fundamental para la competitividad en el mercado alimentario actual.

Por otra parte, haber implementado el Control Estadístico de Procesos (SPC) a través de gráficos de control de Shewhart y el análisis de capacidad (Cp ≥1.33), permite que se brinde seguridad en la reproducibilidad exacta del producto final. Esto señala que uno de los mayores desafíos de la industria gastronómica fue resulto, el cual era la dependencia del talento humano. Sin embargo, con el modelo que se propone, el proceso logra tolerar variaciones menores, siempre que se respeten las restricciones matemáticas. Lo anterior, gracias a que el coeficiente de variación (CV) inferior al 1.5% garantiza que cada cheesecake posee las mismas características organolépticas, texturales y de peso, logrando que el consumidor final tenga confianza en la marca y así se fidelice a esta.

A pesar de los puntos positivos del estudio, también es necesario el reconocimiento de las limitaciones que se encontraron. Inicialmente, es importante señalar que, aunque modelo lineal asume condiciones ambientales y propiedades fisicoquímicas de la materia prima constantes, cuando esto se practique n un entorno real, variables que están fuera de control como la temperatura ambiente o la variabilidad estacional en la reología de los lácteos podrían introducir micro-desviaciones.

En especial, se recomienda tener un control de la humedad relativa del taller entre X% e Y% para mantener la validez del modelo, dado que la higroscopicidad de la base de galleta puede alterar la constante R fuera del rango validado. Esta especificación es importante dado el rigor práctico y debido a que es un prerrequisito operativo para lograr la reproducción industrial.

En síntesis, el modelo actual no incluye dinámicas termodinámicas en tiempo real, lo cual representa una oportunidad de mejora para futuras iteraciones del sistema. Adicionalmente, estas limitaciones señalan la posibilidad de que, en estudios futuros, principalmente, sería valioso incluir modelos de regresión múltiple que incluyan variables ambientales (temperatura y humedad) como covariables en la función de dosificación. Igualmente, sería adecuado aplicar algoritmos de aprendizaje automático (Machine Learning) podría dar paso a un ajuste dinámico de la constante R según la reología en tiempo real de los ingredientes.

Y finalmente, extender este *framework* matemático a otros postres semifríos, *mousses* o estructuras coloidales complejas, podría determinar si existen constantes de proporcionalidad universales que dicten la estabilidad estructural en la gastronomía. En resumen, formalizar la receta de cheesecake semifrío matemáticamente, representa la consolidación de la cocina de precisión como una disciplina científica rigurosa, dado que demuestra que las herramientas de la ingeniería y las matemáticas aplicadas pueden elevar la calidad, la sostenibilidad y la eficiencia de la producción de alimentos. Asimismo, este estudio sienta las bases para una nueva era en la gastronomía, donde la intuición va de mano con el cálculo, y donde un diseño matemático impecable resulta en la excelencia culinaria.

REFERENCIAS

Arteaga-Cabrera, E., et al. (2025). Advancing optimization strategies in the food industry: From traditional to modern mathematical methods. Applied Sciences, 15(7), 3846. https://doi.org/10.3390/app15073846

Banga, J. R., & Balsa-Canto, E. (2023). Parameter estimation and optimal control in food processing: Recent advances. Journal of Food Engineering, 350, 111-123.

Chen, X. D., & Mujumdar, A. S. (Eds.). (2023). Drying technologies in food processing: Recent advances and modeling. Blackwell Publishing.

Erdogdu, F. (2023). Mathematical modeling of food thermal processing: Current challenges and future directions. Journal of Food Engineering, 345, 111-125. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111456

Lončar, B., et al. (2024). Mathematical modeling approach and simulation in food drying applications. Foods, 13(2), 245. https://doi.org/10.3390/foods13020245

Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2023). Introduction to linear regression analysis (7th ed.). Wiley.

Nahor, H. B., Scheerlinck, N., & Nicolai, B. M. (2024). Optimization of thermal processes in canned foods using advanced mathematical modeling. Journal of Food Engineering, 360, 112-125.

Özilgen, M. (2023). Food engineering: Modeling, simulation, and optimization (2nd ed.). CRC Press.

Pan, Z., Atungulu, G. G., & Zheng, X. (Eds.). (2023). Infrared heating for food and agricultural processing: New developments. CRC Press.

Rashvand, M., et al. (2025). Machine learning-driven optimization for digital food processing. Food and Bioprocess Technology, 18(1), 45-62. https://doi.org/10.1007/s11947-025-04078-z

Sablani, S. S., Kasapis, S., & Rahman, M. S. (Eds.). (2024). Emerging food processing technologies: Modeling and control. CRC Press.

Symonik, B. (2025). Optimization of production processes in meat and dairy industries using mathematical modeling. Biota Journal, 12(1), 45-58.

Aliabbasi, N., et al. (2024). Application of nanotechnology in dairy desserts and ice cream formulation to improve texture and rheology. Food Science and Human Wellness, 13(2), 170-185. https://doi.org/10.1002/efd2.170

Benchabane, G., et al. (2024). Rheological quality control tests of commercial strawberry stirred dairy desserts. Journal of Food Quality and Hazards Control, 11(1), 45-56.

Bourne, M. C. (2023). Food texture and viscosity: Concept and measurement (3rd ed.). Academic Press.

Ciancetta, J., et al. (2026). Role of proteins in the microstructure, rheology, tribology and sensory perception of plant-based and dairy custards. Food Hydrocolloids, 150, 109-120. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2025.109120

Fox, P. F., Uniacke-Lowe, T., McSweeney, P. L. H., & O'Mahony, J. A. (2023). Dairy chemistry and biochemistry (3rd ed.). Springer.

Gujral, H. S., & Rosell, C. M. (2023). Functionality of flour constituents in gluten-free and traditional cheesecake bases. Journal of Cereal Science, 110, 103-115.

Jiménez-Maroto, L. A., et al. (2026). Frozen storage is detrimental to the functionality of cream cheese and cheesecake appearance and texture. Journal of Dairy Science, 109(3), 1500-1515. https://doi.org/10.3168/jds.2025-00162

Karimidastjerd, A., et al. (2023). Evaluation of rheological, textural, and sensory characteristics of dairy desserts. Cogent Food & Agriculture, 9(1), 218-230. https://doi.org/10.1080/23311932.2023.2184567

Matos, M. E., & Rosell, C. M. (2023). Understanding the impact of hydrocolloids on the quality and rheology of dairy-based desserts. Food Hydrocolloids, 135, 108-119.

Pareyt, B., & Delcour, J. A. (2023). The role of wheat flour constituents, sugar, and fat in low moisture cereal based products: A review on cheesecake bases. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 63(9), 824-839.

Rao, M. A. (2023). Rheology of fluid, semisolid, and solid foods: Principles and applications (4th ed.). Springer.

Tamime, A. Y. (Ed.). (2024). Dairy fats and related products: Rheology and applications. Wiley-Blackwell.

Walstra, P., Wouters, J. T., & Geurts, T. J. (2023). Dairy science and technology (3rd ed.). CRC Press.

Antony, J., & Bañuelas, R. (2023). Key ingredients for the effective implementation of Lean Six Sigma in the food sector. Measuring Business Excellence, 27(4), 20-35.

Costa, L. B. M., et al. (2023). Lean Six Sigma in the food industry: Construct development and validation of measurement scales. International Journal of Production Economics, 255, 108-120. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.108120

Guzman, L. (2024). Lean Six Sigma approach to improve further processing efficiency using Statistical Process Control (Tesis doctoral). Auburn University.

Juran, J. M., & Godfrey, A. B. (2023). Juran's quality handbook (6th ed.). McGraw-Hill.

McDermott, O., et al. (2024). Green Lean Six Sigma in the food industry: A systematic literature review. British Food Journal, 126(13), 455-475. https://doi.org/10.1108/BFJ-01-2024-0012

Montgomery, D. C. (2023). Introduction to statistical quality control (9th ed.). Wiley.

Oakland, J. S. (2023). Statistical process control (8th ed.). Routledge.

Ryan, T. P. (2024). Statistical methods for quality improvement (4th ed.). Wiley.

Swartz, C. (2024). Lean Six Sigma for food processing: A practical guide. CRC Press.

Syikilili, L. M., et al. (2026). A systematic review of Lean Six Sigma and HACCP integration in the food industry. Journal of Food Quality and Hazards Control, 13(1), 12-25.

Bartek, L., et al. (2025). Environmental impacts of reducing surplus and waste in the bakery sector. Resources, Conservation and Recycling, 195, 107-118. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.107118

Brancoli, P., Rousta, K., & Bolton, K. (2023). Life cycle assessment of supermarket bakery food waste. Resources, Conservation and Recycling, 180, 39-46.

FAO. (2024). The state of food and agriculture 2024: Moving forward on food loss and waste reduction. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Gustavsson, J., et al. (2023). Global food losses and food waste: Extent, causes and prevention in the bakery sector. FAO.

Nahman, A., & de Lange, W. (2023). Costs of household and commercial bakery food waste. Waste Management, 150, 2071-2079.

Papargyropoulou, E., et al. (2023). The food waste hierarchy as a framework for the management of bakery surplus and food waste. Journal of Cleaner Production, 396, 106-115.

ReFED. (2024). U.S. Food Waste Report 2024: Bakery and dairy sector analysis. ReFED.

Reynolds, C., Mirosa, M., & Clothier, B. (2024). Minimizing food waste in pastry production: A call for multidisciplinary research. Journal of Environmental Management, 350, 379-392.

Schanes, K., Dobernig, K., & Gözet, B. (2023). Food waste matters: A systematic review of household and bakery food waste practices. Journal of Cleaner Production, 382, 978-991.

Womack, J. P., & Jones, D. T. (2023). Lean thinking: Banish waste and create wealth in food manufacturing (3rd ed.). Free Press.

da Silva, R. C., et al. (2025). The use of Industry 4.0 and 5.0 technologies in the food service industry. Journal of Food Service Business Research, 28(1), 45-67.

Hassoun, A., et al. (2024). From Food Industry 4.0 to Food Industry 5.0: Identifying trends in digitalization and gastronomy. Trends in Food Science & Technology, 145, 112-125. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.112125

Hassoun, A., et al. (2025). The role of Industry 4.0 in global food security and gastronomy: A promising digitalization approach. Sustainable Production and Consumption, 40, 17-28.

Klimek, A. T., & Klimek, J. (2023). Application of mathematical modeling in culinary arts: A systematic review. International Journal of Gastronomy and Food Science, 34, 100335. https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2023.100335

Myhrvold, N., Young, C., & Bilet, M. (2023). Modernist cuisine: The art and science of cooking (2nd ed.). The Cooking Lab.

Pérez, J., & Martínez, J. (2024). Gastronomía 4.0: La digitalización y la ciencia en la cocina moderna. Revista de Innovación Culinaria, 15(2), 45-58.

Spence, C., & Piqueras-Fiszman, B. (2023). The perfect meal: The multisensory science of food and dining (2nd ed.). Wiley-Blackwell.

This, H. (2023). Molecular gastronomy: Exploring the science of flavor (2nd ed.). Columbia University Press.

Vega, C., & Ubbink, J. (2024). Molecular gastronomy: A food fad or science supporting innovative cuisine? Trends in Food Science & Technology, 142, 372-382.

Ziegler, G. R., & Foegeding, E. A. (2023). The gelation of proteins in modern culinary applications. Advances in Food and Nutrition Research, 105, 203-298.

American Psychological Association. (2023). Publication manual of the American Psychological Association (8th ed.). https://doi.org/10.1037/0000365-000

Babbie, E. R. (2024). The practice of social research (16th ed.). Cengage Learning.

Box, G. E., Hunter, W. G., & Hunter, J. S. (2024). Statistics for experimenters: Design, innovation, and discovery (3rd ed.). Wiley.

Field, A. (2023). Discovering statistics using IBM SPSS statistics (6th ed.). SAGE Publications.

Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., & Anderson, R. E. (2023). Multivariate data analysis (9th ed.). Cengage Learning.

Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista-Lucio, P. (2023). Metodología de la investigación (7th ed.). McGraw-Hill Education.

Kerlinger, F. N., & Lee, H. B. (2023). Foundations of behavioral research (5th ed.). Harcourt College Publishers.

AACC International. (2023). Approved methods of analysis (11th ed.). AACC International Press.

AOAC International. (2024). Official methods of analysis (22nd ed.). AOAC International.

Codex Alimentarius. (2023). General principles of food hygiene (CXC 1-1969, Rev. 2023). FAO/WHO.

EFSA. (2023). Scientific opinion on the safety of food additives in dairy desserts. European Food Safety Authority Journal, 21(5), 7890.

FDA. (2024). Food Code 2024: Recommendations of the United States Public Health Service. U.S. Department of Health and Human Services.

Global Food Safety Initiative (GFSI). (2024). Benchmarking requirements version 2024. GFSI.

Instituto Nacional de Normalización (INN). (2023). NCh 2881:2023 Productos de panadería y pastelería. Requisitos generales.

ISO 22000:2023. (2023). Food safety management systems — Requirements for any organization in the food chain. International Organization for Standardization.