Validity-First Product-Mix Optimization for a Rural Dairy Microenterprise in Peru

Antonio de Jesús Rodríguez-Meza [1], Rosas Reynoso, Carolina Silvia [2], Randolf Ñiquen-Levy [3], Kjuro Aucca Ewerton Edu [4]

[1 2 3 4] Universidad Privada del Norte - (PE), Perú
antonio.meza@upn.pe, carolina.rosas@upn.edu.pe, randolf.niquen@upn.pe, N00209077@upn.pe

Anonymous manuscript for double-blind review

Abstract—Resource-constrained rural microenterprises can benefit from spreadsheet-based optimization, but a computational optimum is useful only when the model reflects production and market conditions. This case study develops a validity-first, frugal prescriptive-analytics framework for a dairy microenterprise in Cusco, Peru. The evidence includes 27 daily sales records from May 2026, a structured owner interview, and a monthly milk balance of 4,200 L, of which 346.5 L were allocated to dairy derivatives. The original linear program suggested a 1.78% monthly improvement by reallocating 10.01 L from yogurt to ice cream. A dimensional and constraint audit, however, identified three threats: butter was modeled simultaneously as a by-product and an independent allocation; annual inventory parameters were inconsistent with monthly observations; and the ice-cream decision lacked an explicit demand ceiling. The revised framework separates a mixed-integer model from a reduced model solvable with available data. Results show that the reported gain depends on the market absorbing at least 10.01 liters of ice cream, equivalent to a 5.15% expansion over the observed monthly level. Without demand expansion, the constrained solution reproduces the current mix and yields no incremental gain. The study contributes a replicable, low-cost protocol prioritizing unit consistency, coproduct logic, demand limits, and scenario analysis.

Keywords—Product mix; prescriptive analytics; dairy microenterprise; frugal innovation; model validation.

Optimización del mix lácteo con validación de demanda en una microempresa rural peruana

Antonio de Jesús Rodríguez-Meza [1], Randolf Ñiquen-Levy [2] Rosas Reynoso, Carolina Silvia [3], Kjuro Aucca Ewerton Edu [4]

[1 2 3 4] Universidad Privada del Norte - (PE), Perú
antonio.meza@upn.pe, randolf.niquen@upn.pe, carolina.rosas@upn.edu.pe, N00209077@upn.pe

Manuscrito anonimizado para revisión doble ciego

Resumen— Las microempresas rurales con recursos limitados pueden beneficiarse de la optimización en hojas de cálculo, pero un óptimo computacional solo resulta útil cuando el modelo representa las condiciones de producción y mercado. Este estudio de caso desarrolla un marco de analítica prescriptiva frugal, orientado a la validez, para una microempresa láctea de Cusco, Perú. La evidencia comprende 27 registros diarios de ventas de mayo de 2026, una entrevista al propietario y un balance mensual de 4 200 L, de los cuales 346,5 L se destinaron a derivados. El programa lineal original proyectó una mejora mensual de 1,78% al reasignar 10,01 L de yogur hacia helado. La auditoría dimensional y de restricciones identificó tres amenazas: la mantequilla se trató simultáneamente como subproducto y asignación independiente; los parámetros anuales de inventario fueron incompatibles con las observaciones mensuales; y la decisión de helado careció de un límite explícito de demanda. El marco revisado separa un modelo entero mixto de un modelo reducido resoluble con los datos disponibles. Los resultados muestran que la mejora depende de absorber 10,01 L adicionales de helado, equivalentes a una expansión de 5,15%. Sin expansión de demanda, la solución reproduce el mix actual y la mejora incremental es cero.

Palabras clave—Mix de productos; analítica prescriptiva; microempresa láctea; innovación frugal; validación de modelos.

I. INTRODUCCIÓN

Las decisiones de producción en microempresas agroindustriales suelen apoyarse en registros incompletos, experiencia tácita y restricciones de capital que dificultan adoptar sistemas de planificación especializados. En estos contextos, la programación matemática y las hojas de cálculo ofrecen una vía accesible para convertir datos operativos en decisiones explícitas. La literatura de cadenas agroalimentarias muestra que los modelos de planificación pueden mejorar la asignación de recursos, la coordinación productiva y el manejo de perecibles [1], [2]. En la industria láctea, los modelos enteros mixtos se han aplicado al diseño de redes, la programación de líneas y la integración entre producción e inventarios [3]–[8].

La utilidad de esos modelos, sin embargo, depende de la validez de sus parámetros y restricciones. Un algoritmo puede resolver correctamente un problema mal representado y producir un resultado numéricamente óptimo, pero operacionalmente inviable. Esta amenaza es especialmente relevante en negocios pequeños, donde los datos pueden mezclar litros de leche, kilogramos de producto, envases, unidades comerciales y periodos temporales distintos. Además, la perecibilidad exige incorporar vida útil, demanda vendible, capacidad de frío y merma, aspectos que la literatura identifica como determinantes en la planificación de alimentos [4], [9]–[12].

El caso analizado corresponde a una microempresa rural de Cusco que produce 4 200 L de leche mensuales. De ese volumen, 3 853,5 L se venden como leche fresca y 346,5 L se destinan a helado, yogur, manjar blanco, mantequilla y queso. La versión inicial del modelo reportó una mejora de 1,78% mediante una reasignación hacia helado. No obstante, una revisión preliminar reveló inconsistencias entre la naturaleza de la mantequilla como subproducto, la anualización de su demanda, la ausencia de un límite comercial para helado y el uso de modelos de inventario y colas sin parámetros suficientes.

El problema científico no consiste únicamente en encontrar un mix de mayor margen, sino en determinar cuándo ese resultado puede interpretarse como una decisión implementable. En consecuencia, el estudio plantea cuatro preguntas: RQ1, ¿qué combinación maximiza el margen bajo la información disponible? RQ2, ¿cómo cambia la solución al imponer un límite de demanda observado? RQ3, ¿qué supuestos afectan con mayor intensidad el beneficio proyectado? y RQ4, ¿cómo puede estructurarse un sistema frugal de apoyo a decisiones que sea ampliable cuando la empresa mejore sus registros?

La contribución es triple. Primero, propone una auditoría de validez previa a la optimización, centrada en trazabilidad, unidades, coproductos y vendibilidad. Segundo, demuestra que la mejora del modelo original es condicional y cuantifica el umbral mínimo de expansión de demanda. Tercero, presenta una arquitectura escalable: un modelo entero mixto general para la empresa y una versión reducida, transparente y resoluble con los datos actualmente verificables. Este enfoque conecta la investigación de operaciones con la innovación frugal, entendida como reducción sustantiva de costos, concentración en funciones esenciales y desempeño adecuado al contexto [15]–[17].

II. REVISIÓN DE LITERATURA Y BRECHA

A. Optimización de alimentos perecibles y lácteos

La planificación agroalimentaria combina decisiones de asignación, lotificación, secuenciación, inventario y distribución bajo variabilidad de oferta y demanda [1], [10], [11]. En lácteos, los modelos MILP han incorporado balance de materiales, cambios de formato, disponibilidad de equipos, turnos y vida útil. Wouda et al. [3] optimizaron una red láctea mediante programación entera; Lütke Entrup et al. [4] integraron vida útil en la planificación de yogur; Doganis y Sarimveis [5] modelaron secuencias, lotes y costos de cambio; Bilgen y Çelebi [6] integraron producción y distribución; y Kopanos et al. [7] abordaron operaciones semicontinuas de alimentos. Estudios posteriores ampliaron la formulación a procesos lácteos multietapa [8] y a lotificación general de perecibles [9].

Estos aportes coinciden en que el límite de demanda, la vida útil y la capacidad física no son detalles posteriores, sino componentes del problema. La literatura de riesgo agroindustrial también recomienda evaluar sensibilidad y robustez frente a parámetros inciertos [11]. En inventarios perecibles, ignorar deterioro y frecuencia de reposición puede generar lotes formalmente económicos pero incompatibles con la operación [12], [14].

B. Digitalización frugal y capacidad empresarial

La digitalización de pequeñas empresas no requiere comenzar con plataformas complejas. Puede iniciarse mediante capacidades para registrar, estructurar y utilizar datos en decisiones recurrentes [18]–[21]. La innovación frugal aporta un criterio de diseño pertinente: reducir costos, conservar las funciones esenciales y alcanzar un desempeño suficiente [15], [16]. En países en desarrollo, la orientación digital y las plataformas accesibles pueden favorecer innovación sostenible en pymes [22], mientras que programas de acompañamiento muestran que la adopción mejora cuando las herramientas se integran a rutinas gerenciales concretas [23].

La brecha se encuentra en el punto de unión entre ambas literaturas. Los modelos lácteos suelen presuponer datos industriales detallados, mientras que los estudios de digitalización de pymes rara vez explicitan cómo auditar una formulación cuantitativa antes de implementarla. Este trabajo aborda esa brecha mediante un protocolo de “validez primero” para una microempresa con registros limitados.

III. METODOLOGÍA

A. Diseño y unidad de análisis

Se desarrolló un estudio de caso único de analítica prescriptiva mediante cinco etapas: caracterización operacional, auditoría dimensional, formulación matemática, verificación computacional y análisis de escenarios. La unidad de análisis fue la asignación mensual de leche a derivados. La ventana observada comprendió 27 días consecutivos de mayo de 2026. Las fuentes fueron registros diarios de ventas y una

entrevista estructurada al propietario para precios, costos, rendimientos declarados y mínimos operativos.

Para preservar el doble ciego, la organización se denomina "microempresa A". Uno de los investigadores tiene relación de propiedad con el caso; por ello, la revisión diferenció datos registrados, estimaciones del informante, supuestos y resultados calculados. No se realizó inferencia causal ni generalización estadística.

B. Protocolo de auditoría

La auditoría aplicó cuatro pruebas. La primera verificó dimensiones y conversiones. La segunda examinó balance de materia y doble conteo. La tercera contrastó periodos mensuales y anuales. La cuarta identificó restricciones omitidas que podrían cambiar la decisión. La Fig. 1 resume el flujo adoptado.

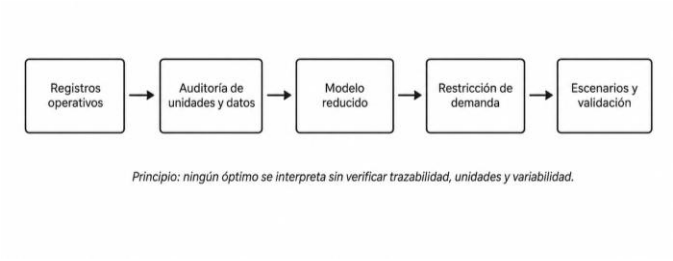


Fig. 1. Flujo de analítica prescriptiva con validación previa a la optimización.

El parámetro de mantequilla fue revisado de manera específica. El registro de 3,2 kg durante 27 días, multiplicado por 21 L de leche equivalente por kilogramo, produce 67,2 L equivalentes para el periodo observado. Este cálculo no puede convertirse directamente en 61,9 L/año; por tanto, la cifra anual del modelo EPQ original fue descartada. Asimismo, el modelo M/M/1 fue retirado porque los lotes son programados, los tiempos varían por producto y no se verificaron llegadas Poisson ni servicios exponenciales.

C. Parámetros auditados

TABLA I. PARÁMETROS DISPONIBLES Y ESTADO DE VALIDACIÓN

Parámetro	Valor	Fuente	Estado
Leche mensual total	4 200 L	Registro/entrevista	Utilizable
Leche fresca comprometida	3 853,5 L	Registro mensual	Utilizable
Leche para derivados	346,5 L	Balance declarado	Utilizable
Helado observado	194,30 L/mes	Registro de mayo	Límite provisional
Yogur observado	35,00 L/mes	Registro de mayo	Utilizable
Queso observado	50,00 L/mes	Registro de mayo	Utilizable
Mantequilla	67,19 L eq./periodo	3,2 kg × 21 L/kg	No anualizar
Manjar	0 L en el periodo	Sin ventas registradas	Fijar en cero
Vida útil/capacidad de frío	No disponible	—	Dato requerido
Horas activas por lote	No separadas	Entrevista parcial	Dato requerido

D. Reglas de interpretación y calidad de evidencia

Cada parámetro fue clasificado según su origen y nivel de soporte. Los registros diarios se trataron como datos observados; los costos, rendimientos y tiempos informados verbalmente se conservaron como estimaciones del propietario; las relaciones no documentadas se marcaron como datos requeridos; y los valores producidos por Solver se consideraron resultados calculados. Esta separación evita que una estimación puntual adquiera el mismo estatus que una medición y permite que futuras actualizaciones sustituyan parámetros sin alterar la arquitectura del modelo.

Se adoptaron cuatro reglas de decisión. Primero, una solución solo es implementable si respeta el balance físico y la demanda vendible. Segundo, los coproductos deben vincularse al proceso que los genera. Tercero, los resultados de inventario o capacidad no se usan cuando faltan vida útil, almacenamiento u horas activas. Cuarto, las mejoras se presentan como beneficios esperados ex ante y no como ahorros realizados. Estas reglas constituyen el mecanismo de control de integridad del estudio.

IV. FORMULACIÓN MATEMÁTICA

A. Arquitectura general ampliable

El sistema objetivo se formuló como un MILP ampliable. Sea $i \in I$ el conjunto de productos principales; x_i la leche asignada; y_i una variable binaria de activación; m_i el margen por litro; F_i el costo fijo de preparación; D_i la demanda vendible; L_i y U_i los tamaños mínimo y máximo; a_i las horas activas por litro; H las horas disponibles; c_i el costo variable; B el presupuesto; R la leche disponible; y z_b la cantidad del coproducto mantequilla generada con rendimiento α desde el proceso de separación. La función objetivo es:

$$\max_{\mathbf{x},\mathbf{y},z_b,\ell} \quad Z = \sum_{i\in I} m_i\, x_i + m_b z_b - \sum_{i\in I} F_i\, y_i$$

$$\text{sujeto a} \quad \sum_{i\in I} x_i + \ell \le R,$$

$$z_b = \alpha x_s,$$

$$L_i y_i \le x_i \le \min\{U_i, D_i\}\, y_i, \quad \forall i \in I,$$

$$\sum_{i\in I} a_i\, x_i \le H,$$

$$\sum_{i\in I} c_i\, x_i \le B,$$

$$x_i, z_b, \ell \ge 0, \quad y_i \in \{0,1\}, \quad \forall i \in I.$$

donde ℓ representa mermas y x_s la leche enviada al proceso que origina el coproducto. Las ecuaciones (1)–(5) evitan tratar la mantequilla como una asignación independiente y exigen que toda producción tenga demanda, capacidad y presupuesto. El modelo no se resolvió en su versión completa porque F_i, U_i, a_i, H, α, vida útil y almacenamiento no están documentados con precisión. Forzar valores habría vulnerado la integridad del caso.

B. Modelo reducido resoluble

Con los datos verificables se resolvió un modelo mensual reducido sobre 279,31 L disponibles después de la cantidad equivalente atribuida a mantequilla. Las variables fueron x_h, x_y, x_m y x_q para helado, yogur, manjar y queso. La leche fresca y la cantidad de mantequilla se trataron como constantes de comparación, no como decisiones libres.

$$\max_{x_h,x_y,x_m,x_q} \quad Z_r = 26{,}80x_h + 4{,}66x_y + 11{,}66x_m + 0{,}226x_q + C$$

$$\text{sujeto a} \quad x_h + x_y + x_m + x_q = 279{,}31,$$
$$x_h \geq 3,$$
$$x_y \geq 25,$$
$$x_q \geq 50,$$
$$x_m = 0,$$
$$x_h, x_y, x_m, x_q \geq 0.$$

El modelo A reproduce la formulación sin límite comercial para helado. El modelo B incorpora $x_h \leq D_h$, donde D_h es la demanda mensual vendible. Para el escenario conservador se utilizó D_h=194,30 L, igual al nivel observado. La diferencia entre modelos permite aislar el efecto de la restricción omitida.

C. Verificación aritmética y lógica de escenarios

La verificación se efectuó en dos niveles. En el primero se reconstruyeron el balance mensual y la función objetivo con los coeficientes publicados. La suma del mix observado es 346,49 L por redondeo, mientras que la solución propuesta suma 346,50 L. En el segundo se compararon dos especificaciones idénticas salvo por el límite D_h. Esta comparación controlada atribuye cualquier diferencia exclusivamente a la restricción de demanda, sin introducir costos, capacidades o distribuciones que no están disponibles.

El modelo A debe interpretarse como una cota superior condicional: indica el beneficio máximo si el mercado acepta el volumen adicional y si el resto de parámetros permanece constante. El modelo B constituye el escenario conservador respaldado por el registro disponible. Ninguno demuestra causalidad ni sustituye una prueba de implementación. La validez externa se limita a la secuencia metodológica, no a los coeficientes del caso.

D. Condiciones para completar el MILP

La arquitectura general podrá resolverse cuando la empresa documente, por producto, demanda máxima por periodo, vida útil, capacidad de frío, rendimientos por lote, mermas, horas activas, costos de preparación y costos variables incrementales. También se requiere identificar el proceso que genera crema y mantequilla para estimar α con balances reales. Hasta entonces, el modelo reducido preserva únicamente las relaciones respaldadas y funciona como instrumento de diagnóstico y aprendizaje organizacional

V. RESULTADOS

A. Hallazgos de la auditoría

La auditoría modificó la interpretación de tres resultados originales. Primero, 67,19 L representa una equivalencia de leche para el periodo observado, no una demanda anual de 61,90 L. Segundo, el EPQ producía ciclos de 281 a 599 días para alimentos perecibles sin incorporar vida útil; se consideró no válido para recomendación. Tercero, la utilización laboral de 1,10% provenía de dividir por una disponibilidad de 24 horas diarias y de tratar lotes planificados como llegadas aleatorias; se eliminó esa conclusión.

En el modelo de mix, los márgenes redondeados reproducen una función objetivo actual de S/12 456,93 y una solución no restringida de S/12 678,60. El archivo original reporta S/12 457,04 y S/12 678,79. La diferencia máxima de S/0,19 es atribuible a coeficientes internos con más decimales. Este contraste es aceptable, pero debe documentarse para reproducibilidad.

TABLA II. EFECTO DE LA AUDITORÍA SOBRE LOS RESULTADOS ORIGINALES

Resultado original	Diagnóstico	Tratamiento revisado
Mantequilla = 19,39% fijo	Equivalencia observada, no relación causal	Coproducto en MILP; constante provisional
EPQ = S/1 057,93/año	Sin vida útil ni demanda anual consistente	Retirado como recomendación
Utilización laboral = 1,10%	Supone 24 h/día y llegadas aleatorias	Retirado hasta medir horas activas
ROI = 688,4%	Costos incompletos y beneficio no observado	Reclasificado como evaluación futura
Mejora = 1,78%	No incluye techo de demanda de helado	Reportada como intervalo 0–1,78%

B. Comparación de soluciones

TABLA III. MIX ACTUAL Y SOLUCIONES BAJO DOS ESPECIFICACIONES

Producto	Actual	Modelo A	Modelo B
Helado (L)	194,30	204,31	194,30
Yogur (L)	35,00	25,00	35,00
Manjar (L)	0,00	0,00	0,00
Queso (L)	50,00	50,00	50,00
Mantequilla (L eq.)	67,19	67,19	67,19
Incremento mensual	—	S/221,75*	S/0,00
Condición	Observado	Sin límite de demanda	D_h=194,30 L

Nota: *valor reportado por Solver. Con márgenes redondeados, el incremento calculado es S/221,62.

El modelo A reasigna 10,01 L de yogur a helado porque el diferencial de margen es S/22,14 por litro. No obstante, el modelo B muestra que, si la demanda de helado no supera el nivel observado, la reasignación no es vendible y la solución coincide con la práctica actual. Por ello, el 1,78% no es una mejora validada, sino una oportunidad condicionada a expansión comercial.

C. Sensibilidad a la demanda

La ganancia incremental puede expresarse como $\Delta Z = [\min(10{,}01;\ D_h - 194{,}30)] \times 22{,}14$ para $D_h \geq 194{,}30$. El beneficio completo requiere $D_h \geq 204{,}31$ L, es decir, 10,01 L adicionales o 5,15% de expansión sobre el nivel observado.

TABLA IV. BENEFICIO SEGÚN EXPANSIÓN VENDIBLE DE HELADO

Expansión	Límite helado	Reasignación	Δ margen
0%	194,30 L	0,00 L	S/0,00
2,5%	199,16 L	4,86 L	S/107,55
5,0%	204,02 L	9,72 L	S/215,09
5,15%	204,31 L	10,01 L	S/221,62
≥7,5%	≥208,87 L	10,01 L	S/221,62

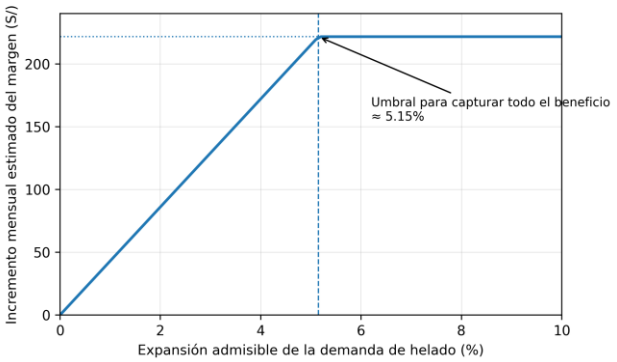


Fig. 2. Incremento del margen según expansión admisible de demanda de helado.

La sensibilidad de márgenes fue menos crítica. En un escenario adverso donde el margen de helado cae 20% y el de yogur aumenta 20%, el diferencial permanece positivo en S/15,85/L. En consecuencia, el orden económico helado>yogur es estable dentro de ese intervalo; la incertidumbre decisiva es la cantidad realmente vendible.

D. Protocolo de implementación frugal

La implementación se estructuró en cuatro controles: (1) registro diario de unidades vendidas y mermas por producto; (2) conversión automática a litros equivalentes mediante factores documentados; (3) actualización semanal del límite D_h con promedio móvil y separación entre días regulares, fines de semana y temporada turística; y (4) ejecución del modelo solo después de validar que el volumen adicional puede venderse dentro de la vida útil. Esta rutina utiliza herramientas existentes y concentra la inversión en disciplina de datos, no en software especializado.

VI. DISCUSIÓN

El resultado principal no es que la empresa deba producir más helado de forma inmediata, sino que la recomendación depende de una restricción comercial que el modelo original omitía. Esto coincide con la literatura de alimentos perecibles, donde demanda, vida útil e inventario deben integrarse en la formulación [4], [5], [9], [12]. También refuerza la distinción entre solución algorítmica y validación operacional: Solver verifica factibilidad respecto de las ecuaciones ingresadas, no la correspondencia de esas ecuaciones con la realidad [24]–[26].

La revisión de mantequilla muestra un segundo aprendizaje. Al ser coproducto, su generación debe vincularse con el proceso que la origina, evitando restar la misma leche dos veces o atribuirle costo cero. Los modelos industriales lácteos representan balances y secuencias explícitas [3], [6]–[8]; trasladar esas prácticas a una microempresa requiere simplificación, pero no puede eliminar la lógica física.

La exclusión del EPQ y del M/M/1 no reduce el rigor; evita presentar precisión aparente. Un lote económico de cientos de días para yogur o mantequilla carece de sentido sin vida útil y capacidad de frío. De modo similar, una cola M/M/1 no es apropiada cuando los lotes son programados y los tiempos de servicio no son homogéneos. La versión ampliada del MILP incorpora esas dimensiones como restricciones cuando la empresa disponga de información suficiente.

Desde la perspectiva de innovación frugal, el sistema cumple tres condiciones: reduce el costo de adopción al usar una hoja de cálculo, conserva la función esencial de asignar leche bajo restricciones y mejora el desempeño al hacer visibles los supuestos [15], [16]. Además, convierte la digitalización en una capacidad gerencial incremental, coherente con la evidencia sobre transformación digital de pymes y emprendimiento [18]–[23].

La transferibilidad es analítica, no numérica. Otras microempresas pueden replicar la secuencia de auditoría, modelamiento y escenarios, pero no deben reutilizar márgenes, rendimientos o límites de este caso. Cada aplicación requiere calibrar productos, coproductos, vida útil y demanda con registros propios.

A. Implicaciones teóricas

El caso amplía la discusión sobre optimización agroalimentaria al mostrar que la calidad de una decisión no depende únicamente de la sofisticación del algoritmo. En entornos de datos escasos, la contribución puede residir en establecer una jerarquía de evidencia y en delimitar qué parte del problema es realmente resoluble. Esta observación complementa los modelos industriales, que suelen asumir parámetros estables y sistemas de información maduros, con una perspectiva de construcción gradual de capacidades.

El resultado nulo del escenario restringido tampoco debe interpretarse como ausencia de valor. Identificar que el mix actual es óptimo bajo el límite de ventas observado evita una reasignación potencialmente invendible y convierte la demanda en una variable de gestión. En investigación de operaciones, demostrar que una recomendación depende de una restricción omitida es un hallazgo relevante porque modifica la acción empresarial, aun cuando no aumente inmediatamente la función objetivo.

B. Implicaciones metodológicas

La auditoría previa funciona como una capa de validación entre los datos y el solucionador. Sus pruebas —consistencia dimensional, balance físico, compatibilidad temporal y completitud de restricciones— son simples, pero reducen riesgos de doble conteo y falsas anualizaciones. El protocolo puede integrarse a la enseñanza y a proyectos de consultoría para que la transparencia de supuestos sea evaluada antes que la magnitud del beneficio.

Asimismo, la separación entre modelo general y modelo reducido evita dos extremos: sobredimensionar la formulación con parámetros inventados o limitar el estudio a una descripción sin capacidad decisional. La arquitectura MILP conserva la dirección de desarrollo, mientras que la versión reducida permite aprender con la información actual. Esta modularidad es coherente con una innovación frugal porque pospone complejidad hasta que su valor pueda justificarse.

C. Condiciones de frontera

Las conclusiones se mantienen mientras la leche disponible, los márgenes relativos y los mínimos operativos permanezcan

próximos a los valores observados. Cambios en precios, capacidad de frío, contratos de venta o rendimientos pueden alterar la solución. En particular, una demanda superior a 204,31 L mensuales de helado habilita la reasignación completa; una demanda intermedia habilita una reasignación parcial; y una demanda igual al nivel observado sostiene el mix actual. Esta regla por tramos ofrece una interpretación más prudente que una recomendación única.

VII. IMPLICACIONES EMPRESARIALES Y REGIONALES

Para la microempresa, el indicador de decisión más importante es el límite semanal de venta de helado. La reasignación debe activarse solo cuando pedidos, ventas históricas o eventos turísticos sustenten al menos 204,31 L mensuales equivalentes y cuando la capacidad de frío proteja la vida útil. Una hoja de control puede mostrar tres estados: mantener el mix, reasignar parcialmente o ejecutar la reasignación completa.

TABLA V. RUTA DE IMPLEMENTACIÓN FRUGAL

Fase	Registro mínimo	Decisión habilitada	Control
1. Trazabilidad	Ventas, producción y merma diaria	Comparar mix actual	Unidades y responsable
2. Demanda	6–12 meses y pedidos no atendidos	Fijar D_i por temporada	Promedios y percentiles
3. Operación	Vida útil, frío, horas y rendimientos	Resolver MILP ampliado	Balance por lote
4. Implementación	Costos y resultados reales	Evaluar ROI y escalamiento	Revisión mensual

Para programas de desarrollo regional, el caso sugiere que la asistencia técnica a microempresas rurales no debe comenzar por software complejo, sino por estandarización de unidades, registros y reglas de decisión. Este tipo de capacidad permite que negocios con poca tecnificación utilicen analítica prescriptiva sin depender de infraestructura costosa y genera una base para futuras soluciones de pronóstico, trazabilidad e inventario.

La ruta propuesta también mejora la gobernanza de datos. La empresa puede asignar responsables, fechar cada modificación de parámetros y conservar una versión histórica del modelo. Esto permite explicar por qué cambia una recomendación y evita que la hoja de cálculo se convierta en una caja negra. En programas de acompañamiento empresarial, el mismo protocolo puede emplearse como instrumento de capacitación y como evidencia de avance en capacidades digitales.

VIII. LIMITACIONES

El estudio utiliza un único mes y no captura estacionalidad, clima, feriados ni variación turística. Los costos provienen de entrevista y no de contabilidad auditada. No se dispone de vida útil, capacidad refrigerada, tiempos activos, costos de preparación ni elasticidad de demanda. El nivel de helado observado se empleó como límite provisional, no como estimación definitiva del mercado. La relación de propiedad entre un investigador y la empresa puede introducir sesgo de información. Finalmente, el modelo ampliado se presenta como arquitectura y no como solución empírica completa; su calibración requiere nuevos datos.

IX. CONCLUSIONES

La auditoría de validez cambió el diagnóstico del modelo. La solución no restringida reproduce la mejora reportada de aproximadamente 1,78%, pero esa ganancia exige vender 10,01 L adicionales de helado, equivalentes a 5,15% sobre el nivel mensual observado. Cuando la demanda se limita al dato disponible, el óptimo coincide con el mix actual y no existe beneficio incremental.

La demanda vendible es, por tanto, la condición crítica; las variaciones moderadas de margen no alteran el orden económico entre helado y yogur. Los resultados EPQ y M/M/1 del documento inicial no deben usarse para decidir porque sus supuestos no están respaldados por vida útil, capacidad de almacenamiento, horas laborales ni procesos estocásticos verificados.

El aporte del estudio es un marco frugal de analítica prescriptiva que prioriza trazabilidad, balance físico, restricciones de mercado y escenarios antes de interpretar un óptimo. La siguiente fase debe extender la recolección a seis o doce meses, documentar factores de conversión y costos conjuntos, medir vida útil y capacidad, e implementar el MILP completo. Solo después de esa calibración corresponderá evaluar inventarios perecibles y retorno económico con evidencia de implementación.

Declaración de conflicto de interés y responsabilidad

Uno de los investigadores mantiene una relación de propiedad con la organización estudiada. Para reducir sesgos, el manuscrito distingue datos observados, estimaciones del informante, supuestos y resultados calculados, y evita presentar proyecciones como beneficios realizados. Los autores asumen responsabilidad por la verificación final de datos, cálculos, referencias y uso ético de herramientas de asistencia editorial.

X. AGENDA DE VALIDACIÓN Y REPRODUCIBILIDAD

La versión reconstruida debe entenderse como una línea base auditable. Para convertirla en un sistema de decisión operativo se propone un ciclo de validación que preserve las fuentes, fechas, unidades y responsables de cada parámetro. Toda modificación del modelo deberá conservar el dato anterior, la razón del cambio y el efecto sobre la solución. Esta trazabilidad permite distinguir aprendizaje empresarial de ajustes realizados únicamente para obtener un resultado favorable.

TABLA VI. PLAN MÍNIMO DE VALIDACIÓN DEL MODELO

Componente	Registro requerido	Frecuencia	Prueba de aceptación
Demanda	Ventas, pedidos y mermas por producto	Diaria	Límite D_i estable por temporada
Rendimiento	Entrada y salida por lote	Cada lote	Balance físico dentro de tolerancia
Perecibilidad	Fecha, temperatura y descarte	Cada lote	Producción vendible dentro de vida útil
Capacidad	Horas activas y uso de equipos	Semanal	Carga menor o igual a disponibilidad
Economía	Costos incrementales y margen realizado	Mensual	Beneficio observado frente a línea base

A. Paquete de datos y cálculo

El paquete reproducible deberá incluir un diccionario de variables, la base anonimizada de registros diarios, los factores

de conversión, una hoja de parámetros y otra de resultados. Las fórmulas críticas deben permanecer visibles y protegidas contra edición accidental. Para cada ejecución se archivarán fecha, versión, límites de demanda y solución obtenida. Una segunda implementación en software abierto puede utilizarse como contraste cuando el MILP esté calibrado, pero no sustituye la revisión de los datos de entrada.

B. Validación prospectiva

La recomendación de reasignación debe probarse prospectivamente en un periodo piloto. Antes del piloto se fija el límite de ventas esperado; durante la ejecución se registran producción, ventas, merma y horas; y al cierre se compara el margen realizado con la línea base. El modelo se considera útil si la decisión es factible, el producto adicional se vende dentro de su vida útil y el beneficio neto permanece positivo después de incorporar costos de implementación.

C. Criterio para evaluar inventario y retorno

Un modelo de inventario perecible solo deberá incorporarse cuando existan vida útil, tasa de deterioro, capacidad de almacenamiento y frecuencia de reposición verificables. De manera análoga, el ROI deberá calcularse con capacitación, digitalización, mantenimiento, capital de trabajo, merma y seguimiento, y contrastarse con beneficios observados. Estas condiciones evitan que la siguiente fase repita la precisión aparente identificada en el documento original.

D. Gobernanza y control de versiones

La hoja de cálculo deberá administrarse como un activo de información. Se recomienda separar celdas de entrada, fórmulas y resultados; restringir la edición de ecuaciones; y conservar una bitácora con fecha, responsable, fuente y justificación de cada parámetro. Los límites comerciales no deben modificarse para forzar un mix deseado, sino actualizarse con evidencia de ventas o pedidos. Cuando dos fuentes difieran, el modelo deberá conservar ambas y ejecutar escenarios en vez de seleccionar silenciosamente la cifra más conveniente.

El control de versiones también permite auditar la evolución de la recomendación. Una versión puede representar el cierre de cada mes y otra los escenarios de planificación. La comparación entre versiones mostrará si un cambio proviene del mercado, de los costos, del rendimiento productivo o de una corrección de datos. Esta práctica es especialmente importante cuando el informante participa en la propiedad del negocio, porque reduce la posibilidad de ajustes retrospectivos y facilita una revisión independiente.

E. Tablero de reglas de decisión

El sistema puede traducirse en un tablero con reglas simples. Estado verde: la demanda verificada de helado es igual o superior a 204,31 L y la capacidad de frío es suficiente; se habilita la reasignación completa. Estado amarillo: la demanda se ubica entre 194,30 y 204,31 L; se produce solo el incremento respaldado por pedidos o tendencia reciente. Estado rojo: la demanda no supera 194,30 L o existen restricciones de vida útil; se mantiene el mix observado. Estas reglas comunican el resultado sin ocultar la lógica matemática y permiten que el propietario documente por qué ejecutó o rechazó una recomendación.

El tablero deberá mostrar además la fecha de actualización, la cobertura de datos, la merma del periodo y una alerta cuando falten registros. Un resultado numérico no debería presentarse como óptimo si la base está incompleta. Esta combinación de automatización y advertencias conserva el carácter frugal del sistema y desplaza el énfasis desde la apariencia del gráfico hacia la calidad de la decisión.

F. Alcance de la replicación

La replicación en otras microempresas debe preservar el protocolo, no los valores. Cada caso tendrá productos, rendimientos, canales y restricciones diferentes. El estudio será reproducible cuando un tercero pueda reconstruir los balances, obtener la misma solución con los mismos parámetros y explicar cómo cambian los resultados bajo escenarios equivalentes. La anonimización debe eliminar nombres comerciales y metadatos, pero mantener suficiente descripción del contexto para juzgar la transferibilidad.

Finalmente, cualquier uso de herramientas de asistencia editorial o computacional deberá revisarse por los autores. La responsabilidad sobre datos, formulación, referencias y conclusiones no se delega al software. Esta exigencia es coherente con el principio central del trabajo: una herramienta puede acelerar cálculos y organización, pero la validez depende de la trazabilidad y del juicio investigador.

REFERENCIAS

[1] O. Ahumada and J. R. Villalobos, “Application of planning models in the agri-food supply chain: A review,” Eur. J. Oper. Res., vol. 196, no. 1, pp. 1–20, 2009, doi: 10.1016/j.ejor.2008.02.014.

[2] R. Akkerman, P. Farahani, and M. Grunow, “Quality, safety and sustainability in food distribution: A review of quantitative operations management approaches and challenges,” OR Spectrum, vol. 32, no. 4, pp. 863–904, 2010, doi: 10.1007/s00291-010-0223-2.

[3] F. H. E. Wouda, P. van Beek, J. G. A. J. van der Vorst, and H. Tacke, “An application of mixed-integer linear programming models on the redesign of the supply network of Nutricia Dairy & Drinks Group in Hungary,” OR Spectrum, vol. 24, pp. 449–465, 2002, doi: 10.1007/s002910200112.

[4] M. Lütke Entrup, H.-O. Günther, P. van Beek, M. Grunow, and T. Seiler, “Mixed-integer linear programming approaches to shelf-life-integrated planning and scheduling in yoghurt production,” Int. J. Prod. Res., vol. 43, no. 23, pp. 5071–5100, 2005, doi: 10.1080/00207540500161068.

[5] P. Doganis and H. Sarimveis, “Optimal scheduling in a yogurt production line based on mixed integer linear programming,” J. Food Eng., vol. 80, no. 2, pp. 445–453, 2007, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2006.04.062.

[6] B. Bilgen and Y. Çelebi, “Integrated production scheduling and distribution planning in dairy supply chain by hybrid modelling,” Ann. Oper. Res., vol. 211, no. 1, pp. 55–82, 2013, doi: 10.1007/s10479-013-1415-3.

[7] G. M. Kopanos, L. Puigjaner, and M. C. Georgiadis, “Simultaneous production and logistics operations planning in semicontinuous food industries,” Omega, vol. 40, no. 5, pp. 634–650, 2012, doi: 10.1016/j.omega.2011.12.002.

[8] A. Touil, A. Echchatbi, and A. Charkaoui, “An MILP model for scheduling multistage, multiproducts milk processing,” IFAC-PapersOnLine, vol. 49, no. 12, pp. 152–157, 2016, doi: 10.1016/j.ifacol.2016.07.884.

[9] Z. Alipour, F. Jolai, E. Monabbati, and N. Zaerpour, “General lot-sizing and scheduling for perishable food products,” RAIRO Oper. Res., vol. 54, no. 3, pp. 913–931, 2020, doi: 10.1051/ro/2019021.

[10] T. Taşkıner and B. Bilgen, “Optimization models for harvest and production planning in agri-food supply chain: A systematic review,” Logistics, vol. 5, no. 3, art. 52, 2021, doi: 10.3390/logistics5030052.
[11] G. Behzadi, M. J. O’Sullivan, T. L. Olsen, and A. Zhang, “Agribusiness supply chain risk management: A review of quantitative decision models,” Omega, vol. 79, pp. 21–42, 2018, doi: 10.1016/j.omega.2017.07.005.
[12] H. Shaabani, “A literature review of the perishable inventory routing problem,” Asian J. Shipp. Logist., vol. 38, no. 3, pp. 143–161, 2022, doi: 10.1016/j.ajsl.2022.05.002.
[13] F. M. Müller, V. A. Schneider, O. C. B. de Araujo, C. R. Scheer Júnior, and G. L. Weis, “Comparing an artificial intelligence planner with traditional optimization methods: A case study in the dairy industry,” Algorithms, vol. 18, no. 4, art. 219, 2025, doi: 10.3390/a18040219.
[14] O. Pavlova et al., “Sustainable inventory management for perishable dairy products: A circular-economy approach integrating environmental costs,” Sustainability, vol. 18, no. 8, art. 3975, 2026, doi: 10.3390/su18083975.
[15] T. Weyrauch and C. Herstatt, “What is frugal innovation? Three defining criteria,” J. Frugal Innov., vol. 2, art. 1, 2017, doi: 10.1186/s40669-016-0005-y.
[16] M. Hossain, “Frugal innovation: A review and research agenda,” J. Clean. Prod., vol. 182, pp. 926–936, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.02.091.
[17] E. Rosca, M. Arnold, and J. C. Bendul, “Business models for sustainable innovation—An empirical analysis of frugal products and services,” J. Clean. Prod., vol. 162, pp. S133–S145, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.02.050.
[18] S. Nambisan, “Digital entrepreneurship: Toward a digital technology perspective of entrepreneurship,” Entrep. Theory Pract., vol. 41, no. 6, pp. 1029–1055, 2017, doi: 10.1111/etap.12254.
[19] L. Li, F. Su, W. Zhang, and J.-Y. Mao, “Digital transformation by SME entrepreneurs: A capability perspective,” Inf. Syst. J., vol. 28, no. 6, pp. 1129–1157, 2018, doi: 10.1111/isj.12153.
[20] L. Klerkx, E. Jakku, and P. Labarthe, “A review of social science on digital agriculture, smart farming and agriculture 4.0: New contributions and a future research agenda,” NJAS-Wageningen J. Life Sci., vols. 90–91, art. 100315, 2019, doi: 10.1016/j.njas.2019.100315.
[21] G. Vial, “Understanding digital transformation: A review and a research agenda,” J. Strateg. Inf. Syst., vol. 28, no. 2, pp. 118–144, 2019, doi: 10.1016/j.jsis.2019.01.003.
[22] Z. Yousaf, M. Radulescu, C. I. Sinisi, L. Serbanescu, and L. M. Păunescu, “Towards sustainable digital innovation of SMEs from the developing countries in the context of the digital economy and frugal environment,” Sustainability, vol. 13, no. 10, art. 5715, 2021, doi: 10.3390/su13105715.
[23] B. F. D. Marinho and I. Costa Melo, “Fostering innovative SMEs in a developing country: The ALI program experience,” Sustainability, vol. 14, no. 20, art. 13344, 2022, doi: 10.3390/su142013344.
[24] H. A. Taha, Operations Research: An Introduction, 11th ed. Hoboken, NJ, USA: Pearson, 2023.
[25] F. S. Hillier and G. J. Lieberman, Introduction to Operations Research, 11th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2021.
[26] D. R. Anderson, D. J. Sweeney, T. A. Williams, J. D. Camm, J. J. Cochran, M. J. Fry, and J. W. Ohlmann, An Introduction to Management Science: Quantitative Approaches to Decision Making, 15th ed. Boston, MA, USA: Cengage, 2019.