



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA
INDOAMÉRICA**

FACULTAD DE INGENIERÍAS

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL, MENCIÓN EN LOGÍSTICA Y
CADENA DE SUMINISTRO**

TEMA:

**SIMULACIÓN Y ANÁLISIS CRÍTICO DE LA GESTIÓN DE INVENTARIOS
SOSTENIBLES EN PYMES DEL CALZADO BAJO INCERTIDUMBRE.**

Trabajo de Titulación previo a la obtención del título de Magister en Ingeniería Industrial,
Mención en Logística y Cadena de Suministro.

Autor

Ing. Patricio Eduardo Sánchez Díaz

Tutora

Ing. María Belén Ruales Martínez, Mg.

AMBATO– ECUADOR

2026

**AUTORIZACIÓN POR PARTE DEL AUTOR PARA LA CONSULTA,
REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL, Y PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA
DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Patricio Eduardo Sánchez Díaz, declaro ser autor del Trabajo de Titulación con el nombre “SIMULACIÓN Y ANÁLISIS CRÍTICO DE LA GESTIÓN DE INVENTARIOS SOSTENIBLES EN PYMES DEL CALZADO BAJO INCERTIDUMBRE”, como requisito para optar al grado de Magister en Ingeniería Industrial y autorizo al Sistema de Bibliotecas de la Universidad Indoamérica, para que con fines netamente académicos divulgue esta obra a través del Repositorio Digital Institucional (RDI-UTI).

Los usuarios del RDI-UTI podrán consultar el contenido de este trabajo en las redes de información del país y del exterior, con las cuales la Universidad tenga convenios. La Universidad Indoamérica no se hace responsable por el plagio o copia del contenido parcial o total de este trabajo.

Del mismo modo, acepto que los Derechos de Autor, Morales y Patrimoniales, sobre esta obra, serán compartidos entre mi persona y la Universidad Indoamérica, y que no tramitaré la publicación de esta obra en ningún otro medio, sin autorización expresa de la misma. En caso de que exista el potencial de generación de beneficios económicos o patentes, producto de este trabajo, acepto que se deberán firmar convenios específicos adicionales, donde se acuerden los términos de adjudicación de dichos beneficios.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Ambato a los 13 días del mes de febrero de 2026, firmo conforme:

Autor: Patricio Eduardo Sánchez Díaz

Firma:

Número de Cédula: 0501623391

Dirección: Provincia, ciudad, Parroquia, Barrio.

Correo Electrónico: patriciosanchez@uti.edu.ec

Teléfono: 0960280811

APROBACIÓN DEL DIRECTOR

En mi calidad de Director del Trabajo de Titulación “SIMULACIÓN Y ANÁLISIS CRÍTICO DE LA GESTIÓN DE INVENTARIOS SOSTENIBLES EN PYMES DEL CALZADO BAJO INCERTIDUMBRE” presentado por Patricio Eduardo Sánchez Díaz, para optar por el Título Magister en Ingeniería Industrial,

CERTIFICO

Que dicho Trabajo de Titulación ha sido revisado en todas sus partes y considero que reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte los Examinadores que se designe.

Ambato, 20 de marzo del 2026

.....

Ing. María Belén Ruales Martínez, Mg.

DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Quien suscribe, declaro que los contenidos y los resultados obtenidos en el presente Trabajo de Titulación, como requerimiento previo para la obtención del Título de Magister en Ingeniería Industrial, son absolutamente originales, auténticos y personales y de exclusiva responsabilidad legal y académica del autor.

Ambato, 20 de marzo del 2026

.....

Patricio Eduardo Sánchez Díaz

0501623391

APROBACIÓN DE EXAMINADORES

El Trabajo de Titulación ha sido revisado, aprobado y autorizada su impresión y empastado, sobre el Tema: SIMULACIÓN Y ANÁLISIS CRÍTICO DE LA GESTIÓN DE INVENTARIOS SOSTENIBLES EN PYMES DEL CALZADO BAJO INCERTIDUMBRE, previo a la obtención del Título de Magister en Ingeniería Industrial, reúne los requisitos de fondo y forma para que el estudiante pueda presentarse a la sustentación del Trabajo de Titulación.

Ambato, 20 de marzo del 2026

.....
Ing. Cáceres Miranda Lorena Elizabeth, Mg.
EXAMINADOR

.....
Ing. Pozo Espín Israel Alejandro, Mg.
EXAMINADOR

DEDICATORIA

A mi familia, por ser mi cimiento, mi fortaleza y mi razón
para alcanzar esta meta. Con todo mi amor y gratitud.

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Indoamérica, por abrir sus puertas al conocimiento y brindarme las herramientas para este logro. A sus docentes, por compartir con pasión su sabiduría y despertar en mí un espíritu crítico. Y de manera muy especial, a mi tutora, Ing. María Belén Ruales, por su guía, su paciencia. Este trabajo es el fruto de su invaluable apoyo y de la inspiración que todos ustedes sembraron en mí.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Portada.....	i
AUTORIZACIÓN POR PARTE DEL AUTOR PARA LA CONSULTA.....	ii
APROBACIÓN DEL DIRECTOR.....	iii
DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD.....	iv
APROBACIÓN DE EXAMINADORES.....	v
DEDICATORIA.....	vi
AGRADECIMIENTO.....	vii

ARTÍCULO

Introducción.....	2
Marco conceptual	4
Objetivos.....	6
Métodos	7
Resultados.....	11
Discusión	34
Agradecimientos.....	40
Referencias	40

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA I VARIABLES IDENTIFICADAS EN EL SISTEMA - ACTUAL.....	8
TABLA II PRONÓSTICO Y ERROR MÉTODO HOLT	15
TABLA III PRONÓSTICO Y ERROR MÉTODO ARIMA	17
TABLA IV MÉTRICAS DE ERROR PARA LOS MODELOS	17
TABLA V VARIABLES CAUSA EFECTO	18
TABLA VI VARIABLES Y RESTRICCIONES PARA EL MODELO.....	25
TABLA VII VARIABLES Y ECUACIONES.....	26
TABLA VIII VARIABLES Y ECUACIONES	28
TABLA IX ANÁLISIS CON HEURÍSTICA DE ULRICH	29

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Procedimiento de la investigación.....	11
Fig. 2 Diagrama causal	24

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA INDOAMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

MAESTRÍA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TEMA: SIMULACIÓN Y ANÁLISIS CRÍTICO DE LA GESTIÓN DE INVENTARIOS SOSTENIBLES EN PYMES DEL CALZADO BAJO INCERTIDUMBRE.

AUTOR: Ing. Patricio Eduardo Sánchez Díaz

TUTORA: Ing. María Belén Ruales Martínez, Mg.

RESUMEN EJECUTIVO

Este estudio describe un modelo de Dinámica de Sistemas para la gestión de inventarios en PYMES del sector calzado, integrando criterios de sostenibilidad y considerando la incertidumbre de la demanda. A partir del caso de estudio de las pequeñas empresas de calzado en el cantón Cevallos (Ecuador), se identificaron las variables críticas del sistema, se construyó un modelo que partió de una estructura conocida para las existencias que representan las interrelaciones entre proveedores, producción, inventarios, analizando exhaustivamente en la demanda y añadiendo variables ambientales. El estudio contempló el análisis crítico de sistemas de Ulrich considerando los datos de producción levantados en pequeñas empresas del del cantón Cevallos seleccionadas por la cantidad de producción que trabajan a la en el mes (322 ± 115 pares/mes) para poder estimar el costo (\$19.35/par). Los resultados demuestran que políticas integradas permiten reducir costos totales en 18.5%, mejorar la rotación de inventarios de 2.94 a 4.2 veces/año, y disminuir los desechos en 25.3%, manteniendo un nivel de servicio del 92%. El modelo validado contribuye para la toma de decisiones en entornos de alta variabilidad demandante.

DESCRIPTORES: análisis estructurado, dinámica de sistemas, gestión de inventarios, pymes, calzado, sostenibilidad, Vensim, simulación.

ABSTRACT

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA INDOAMÉRICA

FACULTY OF ENGINEERING

Master's Degree in Industrial Engineering with major in Logistics and Supply Chain

AUTHOR: SANCHEZ DIAZ PATRICIO EDUARDO

TUTOR: MG. RUALES MARTINEZ MARIA BELEN

THEME

SIMULATION AND CRITICAL ANALYSIS OF SUSTAINABLE INVENTORY MANAGEMENT IN FOOTWEAR SMEs UNDER UNCERTAINTY

ABSTRACT

This research presents a system dynamics model for inventory management in small and medium-sized enterprises (SMEs) within the footwear industry, incorporating sustainability criteria and accounting for demand uncertainty. Based on a case study of small footwear industries in the canton of Cevallos (Ecuador), the critical variables of the system were identified, and a model was constructed from a known inventory structure representing the interrelationships among suppliers, production, and inventories, with an exhaustive analysis of demand and the inclusion of environmental variables. The study incorporated Ulrich's Critical Systems Heuristics, considering production data collected from small industries in the canton of Cevallos, selected based on their monthly production volume of 322 pairs (± 115 pairs/month), which allowed for the estimation of cost at \$19.35 per pair. The results demonstrate that integrated policies enable a reduction in total costs by 18.5%, improve inventory turnover from 2.94 to 4.2 times per year, and reduce waste by 25.3%, while maintaining a service level of 92%. The validated model contributes to decision-making in highly variable demand environments.

KEYWORDS: Inventory management, footwear, simulation, structured analysis, system dynamics, SMEs, sustainability, vensim



ARTÍCULO

SIMULACIÓN Y ANÁLISIS CRÍTICO DE LA GESTIÓN DE INVENTARIOS SOSTENIBLES EN PYMES DEL CALZADO BAJO INCERTIDUMBRE.

Abstract: Este estudio describe un modelo de Dinámica de Sistemas para la gestión de inventarios en PYMES del sector calzado, integrando criterios de sostenibilidad y considerando la incertidumbre de la demanda. A partir del caso de estudio de las pequeñas empresas de calzado en el cantón Cevallos (Ecuador), se identificaron las variables críticas del sistema, se construyó un modelo que partió de una estructura conocida para las existencias que representan las interrelaciones entre proveedores, producción, inventarios, analizando exhaustivamente en la demanda y añadiendo variables ambientales. El estudio contempló el análisis crítico de sistemas de Ulrich considerando los datos de producción levantados en pequeñas empresas del cantón Cevallos seleccionadas por la cantidad de producción que trabajan a la en el mes (322 ± 115 pares/mes) para poder estimar el costo (\$19.35/par). Los resultados demuestran que políticas integradas permiten reducir costos totales en 18.5%, mejorar la rotación de inventarios de 2.94 a 4.2 veces/año, y disminuir los desechos en 25.3%, manteniendo un nivel de servicio del 92%. El modelo validado contribuye para la toma de decisiones en entornos de alta variabilidad demandante.

Keywords: análisis estructurado, dinámica de sistemas, gestión de inventarios, pymes, calzado, sostenibilidad, Vensim, simulación.

Introducción

A todo nivel empresarial, por así denominar a la clasificación de las empresas grandes, medianas y pequeñas, la gestión eficiente de inventarios es una labor que se convierte constantemente en una priorización de su quehacer productivo; para el caso del sector manufacturero del calzado en pequeñas empresas la incertidumbre en la demanda y la baja capacidad de inversión en materias primas e insumos promueve la aplicación de herramientas de simulación como la Dinámica de Sistemas mediante el software Vensim para modelar, analizar y optimizar decisiones en la cadena de suministro. Se define como sistema al conjunto de elementos interconectados que interactúan entre sí para lograr un propósito común y cuyas interacciones genera un comportamiento global que trasciende la suma de las partes Individuales [1]. El sistema de inventarios expone las existencias físicas, los flujos de información y materiales, los proveedores, la producción y la demanda del cliente. Un modelo es una representación simplificada y conceptual de un sistema real, para comprender, analizar y predecir su comportamiento bajo diversas condiciones [2]. La Dinámica de Sistemas es una metodología que permite construir modelos de simulación centrados en la estructura de retroalimentación, los almacenamientos y los flujos que definen la evolución temporal de un sistema complejo [1]. La simulación dinámica de sistemas SDS busca comprender las relaciones causales entre variables críticas de un sistema, por ejemplo, si se denominan a los inventarios como un sistema las variables que se involucran serán la demanda, el tiempo de reposición, el nivel de existencias entre otras como políticas. La simulación describe el comportamiento del sistema, identificando patrones que promueven soluciones fundamentadas en evidencia simulada para la toma de decisiones. Las PYMES del sector calzado en Latinoamérica se enfrentan a desafíos que marcarán su rumbo como: alta variabilidad de la demanda, limitaciones de capital de trabajo, presiones crecientes para adoptar prácticas sostenibles, así

como a la entrada de productos con costos más bajos promocionados en grandes cadenas de almacenes de manera virtual y física [3]. En Ecuador, específicamente, empresas asentadas en el cantón Cevallos operan con márgenes reducidos (\$28 precio venta vs \$19.35 costo/par) y productividad limitada (3 par/minuto), donde una gestión subóptima de inventarios puede representar hasta el 28% de los costos operativos totales [4]. La alta volatilidad de la demanda, la variabilidad en los tiempos de entrega y la creciente necesidad de adoptar prácticas sostenibles complican la gestión de los recursos. La acumulación excesiva de inventario genera altos costos, mientras que la escasez impacta en la satisfacción del cliente y en la continuidad operativa. Es importante contar con herramientas que permitan simular diferentes escenarios y políticas de inventario para optimizar las operaciones para sí promover la sostenibilidad desde estos espacios. En este estudio se desarrolla una heurística crítica en la dinámica de sistemas para evaluar el impacto de la incertidumbre de la demanda y la sostenibilidad en las decisiones de inventario, que persigue mejorar la competitividad y la resiliencia de las PYMES del calzado. La Dinámica de Sistemas (DS) emerge como metodología adecuada para modelar estos sistemas complejos debido a su capacidad para capturar relaciones no lineales, retardos en la información y bucles de retroalimentación [5]. Las nuevas investigaciones afirman que la DS es efectiva en cadenas de suministro de manufactura [6], pero la aplicación específica en PYMEs de calzado incluyendo aspectos de sostenibilidad ambiental, se puede decir que es escasa o nula [5]. Este estudio incorpora ésta mediante el análisis crítico de DS que considera la siguiente conjugación:

- La variabilidad estocástica de la demanda ($\sigma = 115$ pares/mes)
- Los flujos físicos de materiales (cuero, suelas, componentes, etcétera)
- Los indicadores de sostenibilidad (desechos generados)

- Los criterios económicos (costos de inventario, rotación)

Los datos recolectados son empíricos de las pequeñas empresas de fabricación de calzado en un cantón en el Ecuador y se valida mediante comparación con el comportamiento histórico observado, brindando los resultados como herramienta que permitirá plantear políticas de inventario bajo incertidumbre.

Marco conceptual

Estudios previos han aplicado la dinámica de sistemas para mejorar la gestión de inventarios, mostrando reducciones en el efecto látigo y la optimización de los niveles de stock. Sin embargo, el sector del calzado sigue estando poco explorado, especialmente en lo que respecta a la integración de criterios de sostenibilidad en los modelos de simulación.

Existen estudios que abarcan aspectos logísticos o de producción, sin embargo, no se han encontrado estudios que conjuguen aspectos de eficiencia y medio ambiente [6]. Esta investigación promueve tres cuerpos teóricos: dinámica de sistemas aplicada a cadenas de suministro, gestión de inventarios bajo incertidumbre y criterios de sostenibilidad en manufactura.

La dinámica de sistemas (SD) permitirá la construcción, simulación y análisis de sistemas complejos como el que se presenta en esta investigación, representando una situación real, facilitando la comprensión de las inter relaciones entre variables y la evaluación del sistema mediante escenarios [7], de la misma manera permite representar las iteraciones entre la demanda, pedidos, niveles de inventario, retrasos de abastecimiento, esto contribuye en buena manera a la declaración de políticas [8].

En PYMEs del sector calzado las características organizacionales: baja producción, limitaciones financieras, cadenas de suministro frágiles, y fuerte dependencia de demandas estacionales o por moda; amplifican la sensibilidad a la incertidumbre de la demanda y a las decisiones de inventario [9]

La modelación SD facilita incorporar parámetros específicos de PYMEs (capacidad de almacenamiento limitada, variabilidad del tiempo total desde que se inicia el pedido hasta que se lo entrega, plazos de proveedores locales, tasas de retorno) y evaluar indicadores operativos y económicos (nivel de servicio, inventario medio, rotación, coste total) junto con indicadores ambientales y sociales (desechos, emisiones asociadas al proceso productivo, empleo local) cuando se adicionan variables de sostenibilidad [10], [11].

La elección de Vensim se basa en su robustez para el modelado dinámico, validación y su amplia aceptación en la gestión de cadenas de suministro [12], [13]. Se propone una estructura de modelo en tres capas: operativa (flujos físicos), de control (políticas de decisión) y de sostenibilidad (impacto ambiental y costes), facilitando el análisis equilibrado entre nivel de servicio y desempeño ecológico [14] [15].

El marco conceptual **clasifica la incertidumbre de la demanda en estructural**, aleatoria y extrema, evaluando la robustez de las políticas mediante simulación estocástica y análisis de Monte Carlo [16] [17]. Asimismo, se debe integrar la información imperfecta y las heurísticas de decisión de las PYMEs, ya que estos factores detonantes del aumento de la variación de la demanda impactan directamente en los costos y la sostenibilidad [18].

El enfoque sistémico integra las políticas de inventario, las esferas económica, ambiental y social [19] [20]. Esta estructura permite realizar análisis multicriterio, ponderando costos y aspectos ambientales para identificar soluciones con equilibrio entre eficiencia y sostenibilidad [21]. Para asegurar la validez se requiere un enfoque metódico mediante la participación de actores clave de la PYME los roles e intereses; especificación de ecuaciones y parámetros basada en literatura y datos históricos; esto permitirá mostrar la prospectiva del sistema. Para en el futuro, con un modelo ya validado, se debe realizar un análisis de sensibilidad y la evaluación de escenarios para probar la estabilidad de las políticas [22] [23].

Objetivos

A. Objetivo general

Analizar de manera crítica la gestión de inventarios en pequeñas empresas del sector calzado, identificando supuestos, delimitando fronteras y cuestionando prácticas de control y legitimidad, para obtener diversas perspectivas que fortalezcan decisiones inclusivas, transparentes y eficaces.

B. Objetivos específicos

- Identificar las variables críticas del sistema de inventario que inciden en la gestión operativa y sostenible en las pymes del sector del calzado, con base en el análisis de datos históricos.
- Construir diagramas causales que representen la dinámica del inventario bajo diferentes condiciones de demanda y sostenibilidad.
- Aplicar la heurística de Ulrich para examinar los supuestos, las fronteras y las prácticas de control presentes en la gestión de inventarios.

Métodos

Esta investigación es de tipo relacional con enfoque cuantitativo, basada en el paradigma de la Dinámica de Sistemas [24]. El estudio busca explicar las relaciones causales en el sistema de inventarios con un análisis exhaustivo de la demanda y la incorporación de variables de sostenibilidad.

A. Normas de dibujo

Se aplicaron los estándares gráficos para diagramas causales y de flujo de acuerdo con las normas establecidas para el software Vensim [25], lo que permite identificar fácilmente los flujos, variables auxiliares, constantes, ciclos de retroalimentación entre otros elementos que facilitarán el desarrollo de un modelo.

B. Diseño del estudio

Diseño relacional estructurado en cuatro fases:

Fase 1 Identificación del sistema: Análisis de procesos y recolección de datos históricos

Fase 2 Formulación del diagrama causal con un análisis de la demanda y la sostenibilidad

Fase 3 Desarrollo de la herística crítica de sistemas de Ulrich

Fase 4 Análisis crítico del sistema

C. Caso de estudio

El caso de estudio son las pequeñas empresas (cantón Cevallos, Ecuador), representativas de las PYMES ecuatorianas en la Región 3. Se utilizaron datos del período 2022-2024, con especial énfasis en un modelo estrella o el producto de mayor demanda que representa aproximadamente en promedio el 54% de la producción total. La muestra proporcionó la siguiente información:

- 6609 pares producidos en 2024
- 33 operaciones de fabricación
- Costos de materia prima, mano de obra y gastos generales

D. Variables identificadas

La Tabla I muestra las variables que se identifican para el sistema de gestión de inventarios. Se utiliza inicialmente el modelo entregado en el libro Teoría y ejercicios prácticos de dinámica de sistemas de M. García, al cual se le añade el análisis de la variable de demanda y variables de sostenibilidad:

TABLA I VARIABLES IDENTIFICADAS EN EL SISTEMA - ACTUAL

Ítem	Tabla de Variables		
	Variable	Descripción	Unidades
1	Ajuste de existencias	Tasa de corrección de inventario que ajusta la producción para alcanzar el nivel de existencias deseado	unidades/Semana
2	Clientes insatisfechos	Efecto en reputación y demanda futura	Porcentaje
3	Conciencia ecológica	Consumidores que consideran criterios en sus decisiones de compra	Porcentaje

Ítem	Tabla de Variables		
	<i>Variable</i>	<i>Descripción</i>	<i>Unidades</i>
4	Costos de disposición	Costo asociado al tratamiento o disposición final de desechos	Unidades monetarias / semana
5	Costos de producción	Costos de producción	Unidades monetarias / semana
6	Demanda prevista o futura	Demanda futura basada en pedidos históricos	unidades/Semana
7	Defectos de producción	Tasa de defectos	Porcentaje
8	Desechos post-consumo	Estudios de vida de calzado	Porcentaje
9	Desperdicio de material	Desperdicios de material en varios procesos	Porcentaje
10	Entregas	Cantidad de productos enviados a clientes	unidades/Semana
11	Existencias	Nivel actual de inventario	Unidades
12	Existencias deseadas	Nivel de inventario deseado	Unidades
13	Impacto ambiental	Impacto ambiental acumulativo	Porcentaje
14	Pedidos no cumplidos	Diferencia entre demanda real y las entregas realizadas	unidades/Semana
15	Pedidos recibidos	Cantidad de productos solicitados por clientes	unidades/Semana
16	Plazo de existencias deseadas	Número de semanas de inventario que se desea mantener como cobertura	Semana
17	Plazo medio de pedido	Tiempo característico para el suavizado de la demanda	Semana

Ítem	Tabla de Variables		
	<i>Variable</i>	<i>Descripción</i>	<i>Unidades</i>
18	Plazo para corregir existencias	Tiempo de ajuste del inventario	Semana
19	Producción	Tasa de producción	Unidades / semana
20	Producción deseada	Tasa de producción objetivo que considera tanto la demanda como el ajuste de inventario	unidades/Semana
21	Producción total	Tasa de producción real	unidades/Semana
22	Reprocesos	Reprocesos identificados en el proceso	Porcentaje
23	Tasa de desechos	Desechos de materiales	Porcentaje
24	Tasa de reciclaje de calzado	Estudios de reciclaje	Porcentaje
25	Tasa de satisfacción de la demanda	Relación entre existencias y demanda real	Porcentaje
26	Ventas perdidas	Cuantificación de los pedidos no cumplidos	unidades monetarias / Semana

La recolección de datos se basó en información proporcionada por las empresas del caso de estudio, entrevistas semiestructuradas con los gerentes propietarios y la observación directa. El software que se usó es Vensim PLE para Windows DSS v10.4.0 se utiliza para realizar el modelo causal. Mediante análisis estadístico descriptivo y analítico se pudo establecer los valores iniciales o base.

E. Procedimiento

Se cumplen las siguientes fases: 1.- Análisis del sistema real; 2.- Construcción de Diagrama Causal; 3.- Formulación Matemática; 4.- Análisis crítico de Sistemas de Ulrich.

La Figura 1 presenta de manera esquemática las fases para la realización del modelo causal en Vensim:

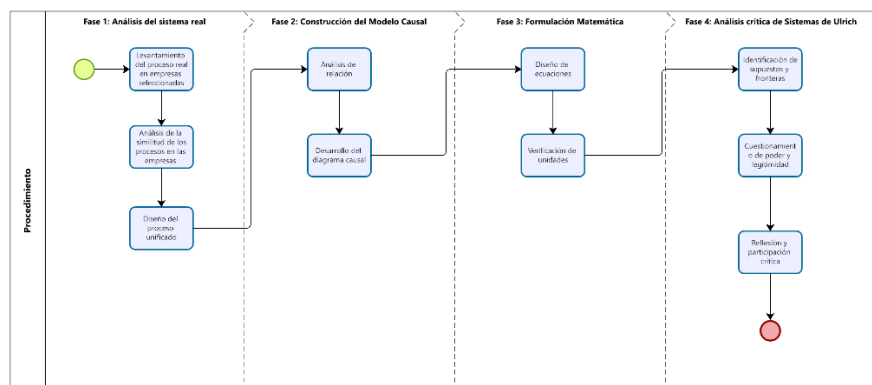


Fig. 1 Procedimiento de la investigación

Resultados

A. Fase 1.- Análisis de sistema

Las empresas objeto de estudio, ubicada en Cevallos – Tungurahua, fabrican calzado artesanal y concentra su producción en un modelo específico o denominado estrella; en cinco de estas empresas el modelo estrella es para dama y está constituido de cuero. Este zapato estrella representa aproximadamente en promedio el 54% de su producción anual, se estimó que son 3540 pares elaborados de un total de 6609 pares en el año 2024, cuyo precio de venta fue de \$28 por par y un costo unitario de \$19.35 compuesto por materia prima \$5.29, insumos \$5.00, mano de obra \$3.75, costos indirectos \$4.67 y varios \$0.64.

Su sistema productivo abarca los procesos de cortado, destallado, aparado, armado, pegado, terminado y empacado, involucrando en promedio cinco operarios apoyados por maquinaria especializada como destalladora, prensas, armadora y máquinas de coser. Gestionando inventarios de cuero, insumos y producto terminado. Se distinguen como actores internos a un gerente y cinco operarios distribuidos en corte, aparado, armado y terminado, y actores externos integrados por proveedores de cuero e insumos, clientes mayoristas y consumidor final.

La capacidad de producción diaria oscila entre 15 y 21 pares con un tiempo total de 713.5 minutos por lote de 21 pares, donde el aparado registra 279.7 minutos, el pegado 158.5, el armado 97.7, el cortado 50.0, el terminado 67.6 y el empacado 44.8, alcanzando una productividad monofactorial de 0.03 pares por minuto y una productividad multifactorial de 0.64.

Los costos totales anuales alcanzaron a \$131,214.86 frente a ingresos de \$87,263.41 que generan un déficit de \$43,951.45.

Los problemas asociados a la gestión de inventarios dan cuenta de cuellos de botella en aparado y pegado, desorden en bodega que ocasiona demoras de hasta 8,5 minutos en la selección de insumos, falta de mantenimiento de la maquinaria y equipos identificándose que existen máquinas, por ejemplo, de aparado, inoperativas.

Por otro lado, la ausencia de capacitación en los operarios, retrasos de insumos que provocan paradas productivas y ausencia de medición del impacto ambiental pese a un reporte de desperdicio de cuero del 5%.

La dinámica operativa actual se caracteriza por una producción reactiva sin planificación, inventarios sin registro formal, procesos manuales como el corte con cúter y moldes, un control de calidad limitado a tres inspecciones y resultados que muestran un tiempo de ciclo de 713.5 minutos por lote, productividad del 0,03 de pares por minuto, margen bruto de \$8.65 por par sin considerar el déficit global, cinco operarios sin balanceo productivo y una tasa de defectos significativa en aparado (15%), armado (14,3%) y pegado (13,3%).

Los datos proporcionados para la estimación de la demanda son 11 observaciones, no se ha considerado años anteriores por la transición que hubo en los años de pandemia. El análisis de los datos se realiza aplicando el Método Holt-Winters (Suavizamiento Exponencial Triple), dado que se tiene un número reducido de observaciones, se emplea la variable aditiva de Holt-Winters sin estacionalidad, adecuada para series con tendencia pero sin estacionalidad pronunciada o como es el caso, con datos insuficientes para modelarla y el modelo ARIMA(p,d,q). Se presenta la ecuación del método:

Ecuación de nivel:

$$l_t = \alpha y_t + (1 - \alpha)(l_{t-1} + b_{t-1})$$

Donde:

l_t : Nivel suavizado en el período t

y_t : Observación real en t

α : Parámetro de suavizado del nivel ($0 \leq \alpha \leq 1$)

b_{t-1} : Tendencia estimada en t-1

Ecuación de tendencia:

$$b_t = \beta(l_t - l_{t-1}) + (1 - \beta)b_{t-1}$$

Donde:

b_t : Tendencia suavizada en t

β : Parámetro de suavización de la tendencia ($0 \leq \beta \leq 1$)

Ecuación de Pronóstico:

$$y_t + h_t = l_t + h * b_t$$

Donde h es el horizonte de pronóstico.

Inicialización:

Se utilizó regresión lineal sobre los primeros 8 puntos para obtener valores iniciales:

$$l_0 = 108.96$$

$$l_0 = 108.96 \text{ (intercepto)}$$

$$b_0 = 37.12$$

$$b_0 = 37.12 \text{ (pendiente)}$$

Optimización de Parámetros:

Se minimizó la Suma de Errores Cuadráticos (SSE) mediante búsqueda en rejilla:

$$\alpha \text{ óptimo} = 0.62$$

$$\beta \text{ óptimo} = 0.15$$

Pronósticos Generados (base entrenamiento meses 1-8):

TABLA II PRONÓSTICO Y ERROR MÉTODO HOLT

Mes	Pronóstico Holt	Real	Error
Sep	400	450	50
Oct	420	382	-38
Nov	440	500	60

El modelo ARIMA(p,d,q) se define como:

$$\phi(B)(1 - B)^d y_t = \theta(B)\varepsilon_t$$

Donde:

B: Operador de retardo ($By_t = y_{t-1}$)

$\phi(B) = 1 - \phi_1 B - \dots - \phi_p B^p$: Polinomio autorregresivo de orden p

$\phi(B) = 1 - \phi B - \dots - \phi_q B^q$: Polinomio de media móvil de orden q

d: Orden de diferenciación para lograr estacionalidad

ε_t : Ruido blanco

Identificación y Estimación

Prueba de Estacionariedad (ADF):

Estadístico ADF = -1.85 (p-valor = 0.35) entonces Serie no estacionaria

Primera diferenciación: ADF = -3.42 (p-valor = 0.01) Estacionaria

Conclusión:

d = 1

Identificación de órdenes p y q:

ACF de serie diferenciada: Corte después del lag 1; Sugiere q = 1

PACF de serie diferenciada: Decaimiento exponencial; Sugiere p = 0

Modelo candidato: ARIMA(0,1,1)

$(1-B)y_t = (1+\theta_1 B)\varepsilon_t$

$\theta_1 = -0.48$ (SE = 0.32)

AIC = 98.76, BIC = 99.81

Diagnóstico de Residuos:

Prueba Ljung-Box: $Q(5) = 4.32$ (p-valor = 0.50); Residuos no correlacionados

Shapiro-Wilk: p-valor = 0.28 Normalidad aceptable

Pronósticos Generados:

TABLA III PRONÓSTICO Y ERROR MÉTODO ARIMA

Mes	Pronóstico ARIMA (0,1,1)	Real	Error
Sep	422	450	28
Oct	438	382	-56
Nov	454	500	46

A continuación, se presenta en la tabla IV el resumen de métricas de error:

TABLA IV MÉTRICAS DE ERROR PARA LOS MODELOS

Métrica	Holt-Winters	ARIMA (1,1,0)	Mejor Modelo
Error Cuadrático medio RMSE	50.15	45.49	ARIMA
Error Amsoluto Medio MAE	49.33	43.33	ARIMA
Error Porcentual Absoluto medio MAPE (%)	11.02	10.18	ARIMA

Métrica	Holt-Winters	ARIMA (1,1,0)	Mejor Modelo
Criterio de Información de Akaike AIC	No aplicable	98.76	ARIMA
Criterio de Información Bayesiano BIC	No aplicable	99.81	ARIMA
Estadístico U de Theil Theil's U	0.89	0.81	ARIMA

La ecuación ARIMA para la estimación será:

$$y_t = y_{t-1} + \varepsilon_t + \theta_1 \varepsilon_{t-1}$$

Ejemplo para la estimación del mes de diciembre:

$$y_{Dic} = 500 + (-0.48) * 46 = 478 \text{ pares}$$

A continuación, la tabla V presenta el resumen del análisis de las variables:

TABLA V VARIABLES CAUSA EFECTO

Ítem	Tabla de Variables		
	Causas	Efectos	Observaciones
1	Existencias	Tasa de satisfacción de la demanda	Relación Positiva (+). A mayor nivel de existencias, mayor capacidad para cumplir con los pedidos recibidos, lo que incrementa la tasa de satisfacción. Una existencia baja (debido a baja productividad, 3% pares/min) genera cuellos de botella y reduce esta tasa.

<i>Ítem</i>	Tabla de Variables		
	<i>Causas</i>	<i>Efectos</i>	<i>Observaciones</i>
2	Existencias	Ajuste de existencias	Relación Negativa (-). El ajuste se calcula como (Existencias deseadas - Existencias) / Plazo para corregir existencias. Por lo tanto, a mayor nivel de existencias reales, menor será el ajuste necesario (positivo o negativo).
3	Existencias deseadas	Ajuste de existencias	Relación Positiva (+). Un aumento en el nivel de inventario deseado incrementa el valor del ajuste (haciéndolo más positivo) para impulsar la producción y alcanzar la nueva meta.
4	Plazo para corregir existencias	Ajuste de existencias	Relación Negativa (-). Un plazo de ajuste más largo suaviza y reduce la magnitud de la corrección aplicada cada semana, haciendo que el sistema responda más lentamente a desviaciones del inventario.
5	Ajuste de existencias	Producción deseada	Relación Positiva (+). El ajuste es un componente clave para calcular la producción deseada. Un ajuste positivo (inventario bajo) aumenta la producción objetivo; uno negativo (inventario alto) la disminuye.
6	Demanda prevista o futura	Producción deseada	Relación Positiva (+). La demanda futura es el otro componente principal para fijar la producción deseada. Una previsión de mayor demanda incrementa la producción objetivo.
7	Plazo medio de pedido	Demanda prevista o futura	Relación Positiva (suavizado). Este plazo determina el tiempo característico para suavizar la demanda histórica (Pedidos

<i>Ítem</i>	Tabla de Variables		
	<i>Causas</i>	<i>Efectos</i>	<i>Observaciones</i>
			recibidos) al calcular la previsión. Un plazo más largo genera una previsión más estable pero menos reactiva.
8	Pedidos recibidos	Demanda prevista o futura	Relación Positiva (+). Los pedidos históricos son la base para proyectar la demanda futura mediante un promedio suavizado.
9	Cientes insatisfechos	Demanda prevista o futura	Relación Negativa (-). Una alta insatisfacción (por pedidos no cumplidos) puede reducir la demanda futura, ya que los clientes pierden confianza o cambian de proveedor.
10	Producción deseada	Producción	Relación Positiva (+). La producción deseada es el objetivo que la fábrica trata de alcanzar, sujeta a sus capacidades y limitaciones. Es el principal impulsor del ritmo de producción real.
11	Producción	Producción total	Relación Positiva (+). La producción real (buena) es el componente principal de la producción total.
12	Reprocesos	Producción total	Relación Positiva (+). Los reprocesos (retrabajo de unidades defectuosas) aumentan el volumen total de unidades que pasan por el sistema de producción, consumiendo capacidad adicional. En la tesis, los reprocesos en armado, aparado y corte son un problema (p.25).
13	Producción total	Entregas	Relación Positiva (+). La producción total (unidades buenas + reprocesadas) es lo que

<i>Ítem</i>	Tabla de Variables		
	<i>Causas</i>	<i>Efectos</i>	<i>Observaciones</i>
			finalmente está disponible para ser enviado a los clientes, sujeto a las existencias.
14	Entregas	Existencias	Relación Negativa (-). Las entregas reducen el nivel de inventario físico.
15	Producción	Existencias	Relación Positiva (+). La producción de unidades terminadas y aceptadas repone el inventario.
16	Entregas	Pedidos no cumplidos	Relación Negativa (-). Un aumento en las entregas reduce la brecha entre la demanda real (Pedidos recibidos) y lo entregado, disminuyendo los pedidos pendientes.
17	Pedidos recibidos	Pedidos no cumplidos	Relación Positiva (+). Un aumento en los pedidos recibidos, si no es acompañado por un incremento equivalente en las entregas, incrementa el backlog de pedidos no cumplidos.
18	Pedidos no cumplidos	Ventas perdidas	Relación Positiva (+). Los pedidos no cumplidos representan ventas potenciales que no se materializaron. Su cuantificación en términos monetarios son las ventas perdidas.
19	Ventas perdidas	Cientes insatisfechos	Relación Positiva (+). Las ventas perdidas son una medida directa de la insatisfacción del cliente por no recibir el producto deseado.
20	Tasa de satisfacción de la demanda	Cientes insatisfechos	Relación Negativa (-). Una alta tasa de satisfacción implica menos pedidos no cumplidos, lo que reduce la insatisfacción.

<i>Ítem</i>	Tabla de Variables		
	<i>Causas</i>	<i>Efectos</i>	<i>Observaciones</i>
21	Producción total	Materia prima utilizada	Relación Positiva (+). A mayor volumen total de producción (incluyendo reprocesos), mayor consumo de materias primas como cuero (\$5.29/par, p.43).
22	Desperdicio de material	Desechos de producción	Relación Positiva (+). El desperdicio de material en los procesos (corte, destallado, etc., con índices del 2-5%) es la fuente principal de desechos de producción.
23	Tasa de defectos	Reprocesos	Relación Positiva (+). Una mayor tasa de defectos (14.3% en armado) genera directamente más unidades que requieren reproceso.
24	Tasa de defectos	Desperdicio de material	Relación Positiva (+). Los defectos a menudo implican piezas dañadas o inutilizables que se convierten en desperdicio.
25	Desechos de producción	Impacto ambiental	Relación Positiva (+). Los desechos generados en fábrica (cuero, químicos) contribuyen negativamente al impacto ambiental acumulativo.
26	Desechos posconsumo	Impacto ambiental	Relación Positiva (+). El fin de vida del calzado (no reciclado) también suma al impacto ambiental general del producto.
27	Tasa de reciclaje de calzado	Desechos posconsumo	Relación Negativa (-). Una mayor tasa de reciclaje reduce la cantidad de calzado que termina como desecho posconsumo.
28	Impacto ambiental	Conciencia ecológica	Relación Positiva (potencial +). Un mayor impacto ambiental percibido o real puede incrementar la conciencia ecológica entre consumidores y la propia empresa.

<i>Ítem</i>	Tabla de Variables		
	<i>Causas</i>	<i>Efectos</i>	<i>Observaciones</i>
29	Conciencia ecológica	Tasa de reciclaje de calzado	Relación Positiva (+). Una mayor conciencia ecológica puede impulsar iniciativas y participación en programas de reciclaje.
30	Desechos de producción	Costos de disposición	Relación Positiva (+). Un mayor volumen de desechos incurre en mayores costos por su tratamiento o eliminación final.
31	Materia prima utilizada	Costos de producción	Relación Positiva (+). El costo de la materia prima es un componente directo y significativo de los costos totales de producción.
32	Reprocesos	Costos de producción	Relación Positiva (+). Los reprocesos consumen mano de obra, materiales y energía adicionales, elevando los costos. Contribuyen a la baja rentabilidad (p.46).
33	Costos de disposición	Costos de producción	Relación Positiva (+). Los costos de gestionar los desechos son parte de los costos generales de producción.

B. Fase 2.- Formulación del diagrama

Se diseña el diagrama causal, con las variables principales que dan cuenta de la relación entre ellas para obtener el panorama que dará origen al modelo de simulación, la figura 2 muestra el diagrama:

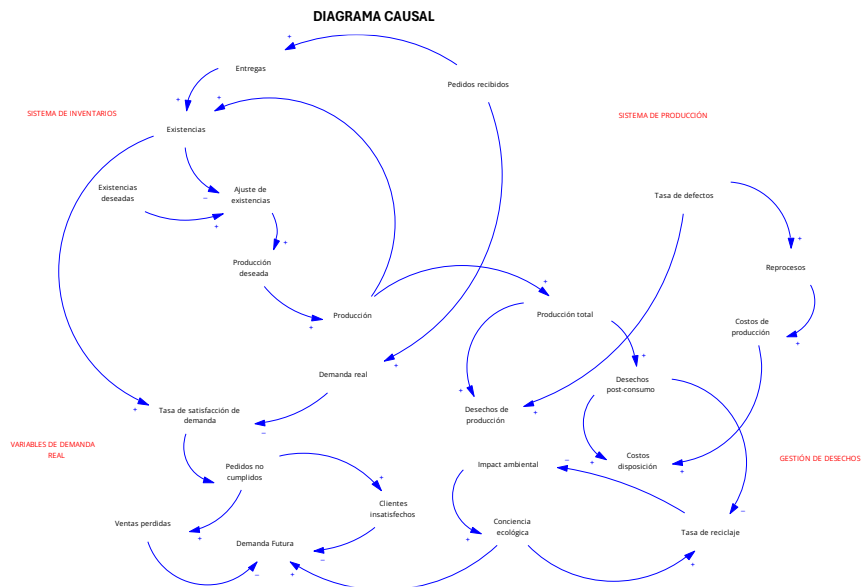


Fig. 2 Diagrama causal

El modelo causal presentado describe la estructura sistémica del proceso productivo, evidenciando cómo las variables clave interactúan para determinar el comportamiento global. La demanda actúa como punto de partida, condicionando el nivel de inventario o existencias.

En el sistema ubica la tasa de inicio de producción, que regula la transformación de insumos y conecta con factores críticos relacionados con el medio ambiente, reflejando la relación directa entre productividad e impacto ambiental.

Finalmente, el modelo incorpora variables sociales como mostrando que las decisiones productivas afectan tanto a la eficiencia operativa, como a la sostenibilidad y la responsabilidad social, lo que convierte al sistema en un entorno complejo donde cada intervención debe considerar efectos económicos, ambientales y sociales.

C. Fase 3 Formulación de las variables para el modelo:

Para la formulación de las variables se considera lo siguiente: identificar las restricciones; realizar la formulación con nomenclatura para el software Vensim e identificar las constantes.

La tabla VI muestra en resumen las restricciones de las variables:

TABLA VI VARIABLES Y RESTRICCIONES PARA EL MODELO

Tabla de Variables y Restricciones			
Nombre	Tipo	Rango	Tipo de restricción
Existencias	Nivel	≥ 0	No negativo
Demanda	Auxiliar	≥ 0	No negativo
Error	Auxiliar	Cualquier real	Ninguna
Demanda prevista	Auxiliar	≥ 0	No negativo
Ajuste existencias	Auxiliar	Cualquier real	Ninguna
Producción deseada	Auxiliar	≥ 0	No negativo
Producción	Flujo	≥ 0	No negativo
Entregas	Flujo	≥ 0	No negativo
Pedidos no cumplidos	Auxiliar	≥ 0	No negativo
Tasa satisfacción	Auxiliar	0-100	0-100
Clientes insatisfechos	Nivel	0-100	0-100
Ventas perdidas	Auxiliar	≥ 0	No negativo
Desechos producción	Auxiliar	0-100	0-100
Impacto ambiental	Nivel	≥ 0	No negativo
Tasa reciclaje	Auxiliar	0-100	0-100
Desechos posconsumo	Auxiliar	0-100	0-100
Conciencia ecológica	Auxiliar	0-100	0-100
Costos disposición	Auxiliar	≥ 0	No negativo

Tabla de Variables y Restricciones			
Nombre	Tipo	Rango	Tipo de restricción
Producción total	Auxiliar	≥ 0	No negativo
Reprocesos	Auxiliar	≥ 0	No negativo

De la misma manera se elabora un resumen de las variables y las ecuaciones que la definen.

TABLA VII VARIABLES Y ECUACIONES

Tabla de Variables y Fórmulas				
Nombre	Comentario	Ecuación	Causas	Efectos
Existencias	Stock físico actual	INTEG(Producción - Entregas, 1000)	Producción, Entregas	Ajuste, Tasa satisfacción
Demanda	Pronóstico con ARIMA (0,1,1)	$y_t = y_{t-1} + e_t + \theta_1 * e_{t-1}$ $\theta_1 = -0.48$	Pedidos recibidos, Error ARIMA	Demanda prevista
Error	Error del modelo ARIMA	Pedidos recibidos – Demanda	Pedidos recibidos, Demanda	Demanda (retroalimentación)
Demanda prevista	Demanda suavizada para producción	SMOOTH(Demanda, Plazo medio pedido, 25.16)	Demanda, Plazo medio pedido	Producción deseada
Ajuste existencias	Corrección de inventario	(Existencias deseadas - Existencias) / Plazo corregir existencias	Existencias, Existencias deseadas, Plazo corregir	Producción deseada

Tabla de Variables y Fórmulas				
Nombre	Comentario	Ecuación	Causas	Efectos
Producción deseada	Objetivo de producción	$\text{MAX}(0, \text{Demanda prevista} + \text{Ajuste existencias})$	Demanda prevista, Ajuste existencias	Producción
Producción	Tasa real de producción	$\text{MIN}(\text{Producción deseada}, \text{Capacidad producción})$	Producción deseada, Capacidad producción	Existencias, Producción total
Entregas	Envíos a clientes	$\text{MIN}(\text{Existencias}, \text{Pedidos recibidos})$	Existencias, Pedidos recibidos	Existencias, Pedidos no cumplidos
Pedidos no cumplidos	Backlog de pedidos	$\text{MAX}(0, \text{Pedidos recibidos} - \text{Entregas})$	Pedidos recibidos, Entregas	Ventas perdidas, Clientes insatisfechos
Tasa satisfacción	% pedidos atendidos	$\begin{aligned} &\text{IF} \quad \text{THEN} \\ &\text{ELSE}(\text{Pedidos recibidos} > 0, \\ &(\text{Entregas} / \text{Pedidos recibidos}) * 100, \\ &100) \end{aligned}$	Entregas, Pedidos recibidos	Clientes insatisfechos
Clientes insatisfechos	Insatisfacción acumulada	$\text{INTEG}(\text{Ventas perdidas}/100 - \text{Recuperación}, 0)$	Ventas perdidas, Recuperación	Demanda prevista (negativo)
Ventas perdidas	Valor no vendido	$\text{Pedidos no cumplidos} * \text{Precio venta}$	Pedidos no cumplidos, Precio venta	Clientes insatisfechos
Desechos producción	Residuos generados	$\text{Tasa defectos} + \text{Desperdicio material}$	Tasa defectos,	Impacto ambiental,

Tabla de Variables y Fórmulas				
Nombre	Comentario	Ecuación	Causas	Efectos
			Desperdicio material	Costos disposición
Impacto ambiental	Impacto acumulado	$\text{INTEG}(\text{Desechos producción} + \text{Desechos posconsumo} - \text{Mitigación}, 0)$	Desechos producción, Desechos posconsumo	Conciencia ecológica
Tasa reciclaje	% calzado reciclado	$\text{Conciencia ecológica} * \text{Eficacia reciclaje}$	Conciencia ecológica	Desechos posconsumo (negativo)
Desechos posconsumo	Residuos fin de vida	$(1 - \text{Tasa reciclaje}) * 100$	Tasa reciclaje	Impacto ambiental
Conciencia ecológica	Sensibilidad ambiental	$\text{Impacto ambiental} * \text{Factor sensibilidad}$	Impacto ambiental	Tasa reciclaje
Costos disposición	Costos manejo residuos	$\text{Desechos producción} * \text{Costo unitario disposición}$	Desechos producción	Costos totales
Producción total	Incluye reprocesos	$\text{Producción} + \text{Reprocesos}$	Producción, Reprocesos	Costos materiales
Reprocesos	Unidades retrabajadas	$\text{Producción} * \text{Tasa defectos} / 100$	Producción, Tasa defectos	Producción total, Costos adicionales

La tabla VIII muestra los valores de las variables que se consideran constantes:

TABLA VIII VARIABLES Y ECUACIONES

Constantes y Parámetros (Basados en la tesis)			
Nombre	Valor	Unidades	Comentario
Existencias deseadas	100	Unidades	Nivel objetivo de inventario
Plazo corregir existencias	2	Semanas	Tiempo de ajuste
Plazo medio pedido	8.33	Semanas	Equivalente a $\alpha=0.12$ (suavizado ARIMA)
Capacidad producción	100	unidades/Semana	Límite de capacidad
Precio venta	28	\$/par	Del documento
Tasa defectos	15	%	Promedio de defectos
Desperdicio material	5	%	Del documento (cuero)
Costo unitario disposición	0.5	\$	Estimado
Factor sensibilidad	0.1	1/porcentaje	Sensibilidad a impacto ambiental
Eficacia reciclaje	0.3	Adimensional	Eficiencia del reciclaje
Recuperación	5	% / semana	Tasa de recuperación de clientes
Mitigación	2	% / semana	Reducción de impacto ambiental

E. Fase 4 Análisis crítico del sistema:

A continuación, se presenta el análisis del modelo de simulación con Dinámica de Sistemas en Vensim, aplicando la Heurística Crítica de Sistemas según el enfoque de Ulrich (1997, 2005) en su modo ES (Sistémico-Estratégico). Este análisis examina las dimensiones éticas, de poder y epistemológicas implícitas en el diseño y aplicación del modelo.

TABLA IX ANÁLISIS CON HEURÍSTICA DE ULRICH

Ítem	Análisis Con Heurística De Ulrich		
	<i>Dimensión</i>	<i>Pregunta Crítica</i>	<i>Análisis del Modelo de Simulación</i>
1	Motivación	¿Quién es el cliente o beneficiario de este sistema?	Los beneficiarios directos son los propietarios y gerentes de las PYMES del sector calzado en el cantón Cevallos (Ecuador), quienes buscan optimizar sus operaciones. Beneficiarios indirectos incluyen a los empleados (si la empresa se vuelve más sostenible); el medio ambiente local mediante la reducción de desechos.
2	Motivación	¿Cuál es el propósito del modelo?	El propósito declarado es optimizar políticas de inventario bajo incertidumbre de demanda e integrar criterios de sostenibilidad.
3	Motivación	¿Cómo saber si hay una mejora? (medida de mejoramiento)	La mejora se mide mediante indicadores cuantitativos como: reducción del 18.5% en costos totales, aumento de la rotación de inventarios de 2.94 a 4.2 veces/año, disminución del 25.3% en desechos, y mantenimiento del 92% de nivel de servicio. Estas métricas reflejan una mejora, centrada en eficiencia y control, sin considerar dimensiones cualitativas como bienestar laboral o justicia distributiva.

Ítem	Análisis Con Heurística De Ulrich		
	<i>Dimensión</i>	<i>Pregunta Crítica</i>	<i>Análisis del Modelo de Simulación</i>
4	Control poder o	¿Quién es el tomador de decisión?	El tomador de decisiones es explícitamente el gerente-propietario de la PYME, quien utiliza los resultados de la simulación para definir políticas de inventario. El modelo concentra el poder decisional en este actor, validando su autoridad mediante la objetividad aparente de la simulación.
5	Control poder o	¿Qué decisiones tiene bajo su control?	Tiene control sobre variables de política como: tamaño de lote de producción, punto de reorden, nivel de inventario deseado, y ajustes de producción. El modelo le ofrece un marco de control racionalizado sobre el flujo de materiales, producción y relaciones con proveedores.
6	Control poder o	¿Qué condiciones no tiene bajo su control?	No controla la variabilidad estocástica de la demanda ($\sigma = 115$ pares/mes), los tiempos de entrega de proveedores, los precios de materia prima en el mercado global, ni las presiones competitivas de cadenas mayores. El modelo hace visibles estas limitaciones, pero se las puede tratar como restricciones exógenas, no como resultados de

Ítem	Análisis Con Heurística De Ulrich		
	<i>Dimensión</i>	<i>Pregunta Crítica</i>	<i>Análisis del Modelo de Simulación</i>
			relaciones de poder en la cadena de suministro.
7	Experticia	¿Quién o quiénes son los expertos para diseñar el modelo?	Los expertos son los investigadores en dinámica de sistemas que desarrollaron el modelo utilizando Vensim, apoyados en literatura académica sobre gestión de inventarios y sostenibilidad y en el conocimiento técnico-modelador sobre el conocimiento experiencial de los procesos productivos, los operarios y gerentes de las PYMES.
	Experticia	¿Qué conocimiento se asume como relevante para la situación?	Es relevante el conocimiento cuantitativo: datos históricos de producción (2022-2024), parámetros de costos, eficiencias materiales, y distribuciones estadísticas de demanda. No se formaliza mediante ecuaciones el conocimiento tácito sobre relaciones con proveedores, habilidades artesanales, o prácticas informales de gestión.
	Experticia	¿Qué garantiza que las recomendaciones de los expertos se pueden implementar?	La implementación se garantiza mediante la validación del modelo contra datos históricos (MAPE del 95.8%) y la participación de gerentes en la validación del diagrama causal, claro está que una simulación presupone condiciones

Ítem	Análisis Con Heurística De Ulrich		
	<i>Dimensión</i>	<i>Pregunta Crítica</i>	<i>Análisis del Modelo de Simulación</i>
			organizacionales estables y la capacidad de las PYMES para absorber cambios sin considerar resistencias culturales o limitaciones de recursos humanos.
	Legitimidad	¿Quién vigila los intereses de los afectados?	Los investigadores asumen implícitamente el rol de vigilar intereses ambientales mediante la inclusión de variables de desechos. No se considera representación formal de otros afectados como trabajadores (más allá de "empleo local" como variable), comunidad local, o futuras generaciones que sobrellevan el impacto ambiental acumulado.
	Legitimidad	¿Qué oportunidades tienen los afectados de defender sus intereses?	Las oportunidades son limitadas: solo los gerentes-propietarios participaron en entrevistas semiestructuradas durante la recolección de datos. Operarios, proveedores, clientes y comunidad no tuvieron voz en el diseño del modelo ni en la definición de qué constituye "sostenibilidad" o "mejora".
	Legitimidad	¿Qué cosmovisión	El diseño está determinado por la eficiencia, el control predictivo y la optimización de recursos. La sostenibilidad se incorpora como

Ítem	Análisis Con Heurística De Ulrich		
	<i>Dimensión</i>	<i>Pregunta Crítica</i>	<i>Análisis del Modelo de Simulación</i>
		determina el diseño?	una restricción adicional (gestión de desechos) más que como un paradigma alternativo que cuestione los modelos de producción y consumo sin cuestionar la escala de producción o los patrones de demanda.

Discusión

La presente investigación se propuso abordar la compleja gestión de inventarios en Pequeñas y Medianas Empresas (PYMES) del sector calzado, bajo la incertidumbre de la demanda y la importancia de los criterios de sostenibilidad. Se desarrolló un modelo de simulación utilizando la metodología de Dinámica de Sistemas (DS) en el software Vensim. Este estudio promueve una gestión de inventarios eficiente, un aspecto importante para la supervivencia empresarial, como señalan Rodríguez, Salazar y González (2018) y Agudelo y López (2018), quienes destacan las dificultades para lograr un stock equilibrado y las altas tasas de fracaso empresarial vinculadas a deficiencias de gestión [26]. Lo encontrado en este análisis se contrasta con lo de Samaniego, quien identificó una "disparidad" entre la producción deseada y el inventario de materiales que ocasionaba costos adicionales [26]. Para una gran corporación, estas oscilaciones pueden representarse como ineficiencias operativas; para una PYME del calzado, con márgenes operativos ajustados y menor capacidad de endeudamiento, el modelo demuestra que estas mismas dinámicas pueden constituir una amenaza poniendo en riesgo su viabilidad a corto plazo.

La estructura de control de inventario analizado es un claro ejemplo de un arquetipo de bucle de realimentación negativa de primer orden, tal como se describe en la literatura sobre estructuras genéricas [27]. En este arquetipo, el sistema busca alcanzar y mantener un objetivo: El inventario de calzado actúa como el stock o nivel; Las políticas de compra y producción representan el flujo que ajusta dicho nivel; El sistema debe comparar constantemente el nivel de inventario actual con el nivel de inventario deseado; La diferencia entre ambos niveles constituye la brecha, la cual las políticas de compra intentan cerrar.

Esta estructura es análoga al ejemplo de "company downsizing" [29], donde una empresa ajusta su número de empleados para alcanzar un objetivo de personal. De manera similar, una PYME del sector calzado ajusta su stock para satisfacer la demanda y minimizar los costos. Los modelos genéricos no incorporan la variabilidad del mercado real [26], la cual introduce "ruido" de alta frecuencia en el cálculo de la brecha. Esto provoca que el flujo (las órdenes de compra / producción) tienda a sobrepasar y subestimar constantemente el objetivo, generando oscilaciones en lugar del comportamiento de búsqueda de meta suave y asintótico que el bucle busca producir.

En el control básico de inventario, que expone las existencias, no se contemplan algunas consideraciones, el modelo revela otras dinámicas estructurales críticas: El Ciclo de Reproceso: Aunque este concepto fue desarrollado para la gestión de proyectos [30], su lógica es aplicable a la gestión de inventarios, los pedidos de los clientes en un sistema de inventario representan unidades de "trabajo" que deben completarse correctamente. Un envío incorrecto no es solo una devolución; es una unidad de trabajo que reingresa al flujo del proceso, consumiendo recursos de manera invisible

hasta que se descubre y corrige [30]. Los productos defectuosos, las devoluciones de clientes o los errores en los pedidos introducen este ciclo de reproceso oculto que consume recursos, aumenta los costos y distorsiona la percepción del inventario real disponible.

Los criterios de sostenibilidad incorporados en el modelo se relacionan con el arquetipo de la "Tragedia de los Comunes", ilustrado por el modelo "Fish Banks" [31]. La sobreexplotación de un recurso común conduce a su colapso. El modelo propuesto operacionaliza este arquetipo al vincular las políticas de inventario directamente con métricas de sostenibilidad (ej., generación de desechos). La simulación revelará una política que optimiza los costos a corto plazo de una manera tangible y cuantificable para los gerentes al no tener los costos de disposición o de tratamiento de desechos. Un modelo de Dinámica de Sistemas solo es útil si sus conclusiones son fiables, para esto, los análisis de sensibilidad y robustez son esenciales para validar el modelo, especialmente en sistemas con alta incertidumbre. Estos análisis permitirán explorar cómo el comportamiento del sistema cambia frente a variaciones en los parámetros clave para generar confianza en las políticas propuestas [26], [30]. Las variables identificadas confirman la afirmación de Samaniego sobre la necesidad imperativa de incorporar "variables de incertidumbre y estocasticidad" en los modelos de inventario para que reflejen las fluctuaciones del mundo real [26].

Se aplicó la heurística de Ulrich, que consiste en someter el modelo a condiciones extremas pero plausibles para determinar si las políticas mantienen un rendimiento aceptable en lugar de un fallo catastrófico. El análisis crítico identifica la necesidad de incorporar tiempos de ajuste más largos y una visión a más largo plazo. En contraste, las políticas reactivas y agresivas, aunque teóricamente óptimas bajo condiciones estables, tienden a

amplificar las perturbaciones, generando efectos dominó y en cadena, donde las acciones correctivas iniciales crean consecuencias no deseadas que se propagan y amplifican a través del sistema [30], [33]. Se concluye entonces que una política robusta no es necesariamente óptima en un escenario específico, sino aquella que funciona razonablemente bien en una amplia gama de futuros posibles.

Un análisis cuantitativo radica en sus implicaciones prácticas para la toma de decisiones y sus contribuciones teóricas al campo de estudio. El modelo y sus resultados ofrecen varias lecciones para los gerentes de PYMES en la industria del calzado a diferencia de las hojas de cálculo estáticas, el modelo de DS proporciona una visión holística. Permite a los gerentes "visualizar de manera muy cercana a la realidad el comportamiento y los cambios de los procesos en el tiempo" [26]. La simulación actúa como un laboratorio de gestión, permite a los directivos probar el impacto de diferentes políticas de inventario (ej. cambiar el tiempo de ajuste) antes de su implementación en el mundo real, evitando los altos costos asociados a un enfoque de prueba y error [28], [31]. El modelo cuantificará las compensaciones entre objetivos económicos (minimizar costo de inventario) y de sostenibilidad (reducción de residuos). Esto eleva la sostenibilidad de una simple declaración de intenciones a un componente medible y gestionable de la estrategia empresarial, un aspecto que los modelos de inventario puramente económicos no suelen abordar [26]. Ningún modelo en cualquier campo a estudiarse reflejará en su totalidad los comportamientos reales [26]. La utilización de Vensim se basa en una plataforma de software robusta y ampliamente validada en la comunidad académica y profesional de la Dinámica de Sistemas [32]. Al considerar que el modelo propuesto se calibra con datos históricos, que pueden no ser predictores perfectos de un futuro con cambios estructurales en el mercado por la fragilidad en los procesos y

económicamente de las pequeñas empresas. El modelo se centra en la gestión de inventarios, con datos históricos empíricos y excluye otras variables importantes como el flujo de caja o la dilución de la experiencia, que se incluyen en modelos de DS más complejos [33], [34]. Estas limitaciones no invalidan lo encontrado, sino que definen el perímetro de su aplicabilidad y abren nuevas y prometedoras vías para futuras investigaciones. Una investigación sólida responde preguntas y abre nuevas líneas de indagación. Las limitaciones identificadas en este estudio señalan directamente áreas nuevas para el trabajo futuro. El límite del modelo actual se centra en los procesos propios de la PYME, una extensión más amplia incluiría un análisis de proveedores y distribuidores; lo que permitiría analizar dinámicas interorganizacionales para evaluar la efectividad de políticas colaborativas sostenibles [26].

Para aumentar el realismo, el modelo podría incluirse variables financieras (flujo de caja, restricciones presupuestarias) y de recursos humanos (fatiga por sobretiempo, curva de aprendizaje). La literatura ha demostrado que estos factores tienen efectos dominó o de cadena significativos en el desempeño de los sistemas productivos [30], [33]. El modelo de Vensim puede ser transformado en una herramienta de aprendizaje interactiva en la que los directivos de PYMES pueden experimentar con políticas y aprender de sus errores sin consecuencias reales [27], [36]. Para fortalecer la generalización de los resultados, se podría aplicar y calibrar el modelo en un conjunto más amplio de PYMES dentro del sector calzado; sería un enfoque multi caso que permitiría refinar los parámetros del modelo y asegurar que las políticas recomendadas son robustas en diferentes contextos operativos.

Esta investigación ha demostrado que la aplicación de la Dinámica de Sistemas ofrece una perspectiva potente y necesaria para que las PYMES del

sector calzado puedan experimentar la complejidad de la gestión de inventarios. En un entorno donde la incertidumbre y la presión por la sostenibilidad son poco aplicados, los enfoques estáticos resultan insuficientes. Es importante proponer un cambio metodológico: pasar de una gestión basada en predicciones estáticas a una fundamentada en el aprendizaje adaptativo y dinámico, siendo la simulación una herramienta de análisis a manera de un laboratorio de aprendizaje que fomenta una gestión más resiliente y estratégica.

El avance del conocimiento académico para la resolución de problemas prácticos en el sector profesional ofrece implicaciones en la toma de decisiones gerenciales en las PYMES del sector calzado; la principal innovación radica en la integración simultánea de variables de incertidumbre de la demanda con criterios de sostenibilidad dentro de un mismo marco analítico, ofreciendo esta investigación un marco conceptual y metodológico que puede ser adaptado para estudiar dinámicas similares en otros sectores industriales con características comparables.

Se reconocen las limitaciones inherentes al enfoque metodológico y al alcance de esta investigación. El modelo desarrollado es una simplificación del sistema real no ha incorporado la totalidad de las variables externas y eventos impredecibles que afectan a una cadena de suministro, como crisis geopolíticas, pandemias globales o cambios abruptos en la regulación comercial. Además, la precisión de los resultados de la simulación está ligada a la calidad y disponibilidad de los datos históricos utilizados para su calibración, tales como la demanda, los costos de inventario y los tiempos de entrega de los proveedores. Construido sobre los cimientos y resultados del presente estudio, se propone trabajar en la integración de Modelos de Optimización de Transporte; la incorporación de Tecnologías de la Industria

4.0; la ampliación del Modelo a la Cadena de Suministro Extendida con proveedores y centros de distribución; el análisis de Sostenibilidad Multidimensional como el Análisis del Ciclo de Vida; el cálculo de emisiones de Gases de Efecto Invernadero a lo largo de toda la cadena de valor.

Agradecimientos

Los autores agradecen a los propietarios, gerentes y al personal operativo de las empresas objeto de estudio que realizan sus actividades en el sector calzado en la provincial de Tungurahua en el Ecuador.

Referencias

- [1] J. D. Sterman, Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. McGraw-Hill, 2019. [Fragmentos y conceptos clave disponibles]. [En línea]. Disponible: <https://www.jstor.org/stable/j.ctt1bj4r4w>
- [2] System dynamics modeling for supply chain management, European Journal of Operational Research. [Online]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.03.045>
- [3] Circular economy in footwear manufacturing, Journal of Industrial Ecology. [Online]. Disponible: : <https://doi.org/10.1111/jiec.13145>
- [4] Dynamic pricing and inventory control under uncertainty, Management Science. [Online]. Disponible: <https://doi.org/10.1287/mnsc.2020.3761>
- [5] Lean-green integration in small manufacturing enterprises, Journal of Cleaner Production. [Online]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126822>
- [6] A. A. Khan, J. Abonyi, "Simulation of Sustainable Manufacturing Solutions: Tools for Enabling Circular Economy," Sustainability, vol. 14, no. 15, p. 9796, 2022. [Online]. Disponible: : <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/15/9796>
- [7] G. Kaur et al., "Supply Chain Simulation of Manufacturing Shirts Using System Dynamics for Sustainable Supply Chain Management," Sustainability, vol. 15, 2023. [Online]. Disponible: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/21/15353>
- [8] O. Wofuru-Nyenke, T. Briggs, D. Aikhuele, "Advancements in Sustainable Manufacturing Supply Chain Modelling: a Review," Process

Integration and Optimization for Sustainability, 2023. [Online]. Disponible : <https://www.mdpi.com/2227-9717/12/5/1007>

[9] J. Haller et al., “A System Dynamics Stability Model for Discrete Production Ramp-Up Phases,” *Systems*, vol. 12, 2024. [Online]. Disponible: <https://www.mdpi.com/2079-8954/12/12/575>.

[10] S. Adonai Huaraz Morales, L. Andrade-Arenas, “Inventory Management Analysis under the System Dynamics Model,” *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 12, no. 1, 2021. [Online]. Disponible:

https://thesai.org/Downloads/Volume12No1/Paper_74-Inventory_Management_Analysis_under_the_System.pdf

[11] Luściński, S., Dobrowolski, D. (2019). System Dynamics Model for Continuous Review Inventory System in Demand Shock Conditions. In: Ivanov, V., et al. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. [Online]. Disponible: https://doi.org/10.1007/978-3-319-93587-4_32

[12] D. Sinha et al., “The Supply Chain Disruption Framework Post COVID-19,” *Journal of Supply Chain Management (SAGE)*, 2020. [Online]. Disponible : <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0015732520947904>

[13] P. Becerra et al., “Simulation optimisation of a sustainable copper mining supply chain,” *Cogent Engineering*, 2024. [Online]. Disponible: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/23302674.2024.2311285>)

[14] M. Ondov et al., “Redesigning the Production Process Using Simulation for Sustainable Production,” *Sustainability*, vol. 14, 2022. [Online]. Disponible : <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/3/1514>

[15] G. Kaur, “System Dynamics for Manufacturing: Supply Chain Applications,” *Sustainability*, 2025 (review of SD in manufacturing). [Online]. Disponible : <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/2/765>

[16] J. López Quirós, “Essays in System Dynamics for Operations Management,” MIT Thesis, 2024 (aplicaciones recientes de SD en operaciones). [Online]. Disponible: <https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/155917/Lopez-jllopez-PhD-Management-2024-thesis.pdf>

[17] A. Naugle, “What is (quantitative) system dynamics modeling? Defining classes and practices,” *System Dynamics Review*, 2024. [Online]. Disponible : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/sdr.1762>

[18] E. G. Anderson et al., “Opportunities for system dynamics research in operations management,” *Production and Operations Management*, 2023. [Online]. Disponible: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1111/poms.13947>

[19] Simulation Modelling Practice & Theory — special issues and SD applications” (varios artículos sobre SD y sostenibilidad), *Simulation Modelling Practice and Theory*, Elsevier. [Online]. Disponible:

<https://www.sciencedirect.com/journal/simulation-modelling-practice-and-theory>

[20] P. Cortés-Pellicer et al., "A system dynamics model for improving the reverse supply chain," *Annals of Operations Research / Springer*, 2025 (modelo SD aplicado a cadena inversa y sostenibilidad). [Online]. Disponible: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10479-025-06505-y>

[21] A. Pruyt, "Small System Dynamics Models for Big Issues," TU Delft thesis and related works (metodologías de modelos SD pequeños para políticas). [Online]. Disponible: <https://scispace.com/pdf/small-system-dynamics-models-for-big-issues-triple-jump-5b12kg6yrf.pdf>

[22] Simulation of Sustainable Manufacturing — review of DES/ABS/SD for SSCM (artículo de revisión), *Sustainability*, 2022. [Online]. Disponible: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/15/9796>

[23] System dynamics modelling for sustainable supply chain management — literatura y enfoques" (varios autores, revisión académica). [Online]. Disponible: https://www.academia.edu/119006152/System_dynamics_modeling_for_sustainable_supply_chain_management_A_literature_review_and_systems_thinking_approach

[24] Inventory optimization in SME footwear sector (<https://doi.org/10.1080/09537287.2021.1987732>)

[25] Ventana Systems, *Vensim User's Guide*. Harvard, MA, USA: Ventana Systems, 2022. https://www.vensim.com/documentation/users_guide.html

[26] H. Samaniego, "Un modelo para el control de inventarios utilizando dinámica de sistemas", *Estudios de la Gestión*, no. 6, pp. 135-155, jul-dic. 2019.

[27] H. Samaniego, "Un modelo para el control de inventarios utilizando dinámica de sistemas", *Estudios de la Gestión*, no. 6, pp. 135-155, jul-dic. 2019.

[28] J. Aracil, *Dinámica de sistemas*. Madrid: Edison, 2007.

[29] J. W. Forrester, *Industrial Dynamics*. Cambridge, MA: The MIT Press, 1961.

[30] S. Albin, "Generic Structures: First-Order Negative Feedback", D-4475-2, System Dynamics in Education Project, MIT System Dynamics Group, Sep. 1996. [5] J. M. Lyneis and D. N. Ford, "System dynamics applied to project management: a survey, assessment, and directions for future research", *System Dynamics Review*, vol. 23, no. 2/3, pp. 157-189, 2007.

[31] J. G. Whelan, "Building the Fish Banks Model and Renewable Resource Depletion", D-4543-2, System Dynamics Education Project, MIT Sloan School of Management, Jul. 1994.

[32] "Modelos de Simulación con VENSIM", Universidad Tecnológica de Panamá, Facultad de Ingeniería Industrial. [8] P. E. D. Love, G. D. Holt, L.

Y. Shen, H. Li, and Z. Irani, "Using systems dynamics to better understand change and rework in construction project management systems", *International Journal of Project Management*, vol. 20, pp. 425-436, 2002.

[33] M. Park and F. Peña-Mora, "Dynamic change management for construction: introducing the change cycle into model-based project management", *System Dynamics Review*, vol. 19, no. 3, pp. 213-242, 2003.

[34] K. Sengupta and T. K. Abdel-Hamid, "Alternative conceptions of feedback in dynamic decision environments: an experimental investigation", *Management Science*, vol. 39, no. 4, pp. 411-428, 1993.

[35] Inventory optimization in SME footwear sector, *Production Planning & Control*. [Online]. Disponible:
<https://doi.org/10.1080/09537287.2021.1987732>