



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**Optimización del transporte entre centros de distribución mediante dinámica de sistemas:
un estudio en el Valle de Aburrá**

Eduardo Polanco Rodríguez

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniero Industrial

Modalidad de Práctica

Trabajo de Grado

Asesor

Juan Sebastián Jaén Posada, Doctor (PhD)

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Industrial

Medellín, Antioquia, Colombia

2026



Cita

(Polanco Rodríguez, 2026)

Referencia

Estilo APA 7 (2020)

Polanco Rodríguez, E. (2026). Optimización del transporte entre centros de distribución mediante dinámica de sistemas: un estudio en el Valle de Aburrá [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado a mis padres, por su apoyo incondicional, su esfuerzo constante y los valores que han guiado mi formación personal y profesional.

A mi familia, por el acompañamiento permanente y la confianza depositada en mí a lo largo de este proceso.

A mis amigos, por su apoyo, motivación y comprensión durante las diferentes etapas de este trabajo.

De manera especial, a mi asesor de tesis, por su orientación, compromiso y rigor académico, fundamentales para el desarrollo y culminación de esta investigación.

Tabla de contenido

Resumen	8
Abstract.....	9
1. Introducción.....	10
2. Objetivos.....	11
2.1 Objetivo general	11
2.2 Objetivos específicos	11
3. Marco teórico.....	12
4. Metodología.....	16
5. Análisis de resultados	41
5. Conclusiones y recomendaciones.....	45
Conclusiones.....	45
Recomendaciones	46
Referencias	47
Anexos	49

Lista de tablas

Tabla 1 Fases del proyecto	17
Tabla 2 Cronograma del proyecto	18
Tabla 3 Presupuesto del proyecto	19
Tabla 4 Auxiliares del modelo	37
Tabla 5 Constantes del modelo.....	38
Tabla 6 Flujos del modelo	39
Tabla 7 Niveles del Modelo	40

Lista de figuras

Figura 1 Esquema conceptual del sistema logístico modelado	20
Figura 2 Diagrama de sección del bloque de envío y despacho del modelo logístico	23
Figura 3 Diagrama de sección del Bloque de Inventario y Gestión de Recursos en Tránsito	23
Figura 4 Diagrama del Bloque De Cumplimiento de Metas y Mediciones	24
Figura 5 Análisis de sensibilidad frente al caso de variaciones de Camiones Disponibles en Guayabal	26
Figura 6 Análisis de sensibilidad frente al caso de variaciones de Camiones Disponibles en Rionegro	28
Figura 7 Análisis de sensibilidad frente al caso de variaciones de Camiones Disponibles en Girardota	29
Figura 8 Análisis de sensibilidad frente a las variaciones en la capacidad de carga del camión	30
Figura 9 Análisis de sensibilidad frente al caso de variaciones en los tiempos de descarga	32
Figura 10 Resultados de corrida del escenario base	41
Figura 11 Resultados de la corrida aplicando la política numero 1	42
Figura 12 Resultados de la corrida aplicando la política numero 2	43
Figura 13 Resultados de la corrida aplicando la política numero 3	43

Siglas, acrónimos y abreviaturas

CEDIS	Centros de Distribución
SC	Supply Chain (Cadena de Abastecimiento)
SD	System Dynamics (Dinámica de Sistemas)
DT	Dynamic Transportation (Transporte Dinámico) <i>opcional si lo usas mucho</i>
KPI	Key Performance Indicator (Indicador Clave de Desempeño)
TCT	Tiempo de Ciclo Total (variable dependiente principal)
TC	Tiempo de Carga
TD	Tiempo de Descarga
TV	Tiempo de Viaje
TR	Tiempo de Retorno
CAP	Capacidad de Carga por Vehículo (pallets/camión)
ESSITY	Empresa objeto de estudio (Grupo Essity / Familia)
POWERSIM	Software de modelación y simulación usado
UdeA	Universidad de Antioquia

Resumen

La eficiencia del transporte inter-CEDIS constituye uno de los factores más determinantes en el desempeño logístico de las organizaciones, debido a su incidencia directa sobre los costos operativos, la sincronización del flujo de inventarios y el cumplimiento del servicio en ventanas de tiempo exigentes. En este trabajo se desarrolla un modelo de simulación basado en Dinámica de Sistemas para analizar el comportamiento del transporte entre los centros de distribución del Grupo Essity ubicados en el territorio Antioqueño, específicamente entre Guayabal, Rionegro y Girardota. El modelo se construyó en Powersim empleando variables reales asociadas a capacidad vehicular, tiempos de carga y descarga, tiempos de viaje, restricciones operativas y política de asignación de flota.

Posteriormente, se diseñaron y compararon escenarios logísticos para evaluar su impacto en el tiempo total del proceso y en el uso efectivo de la flota. Los resultados muestran que una asignación de camiones ajustada a la carga y capacidad de cada CEDI reduce significativamente el tiempo total frente a esquemas simétricos o empíricos. Asimismo, la reducción de tiempos de carga y descarga genera mejoras marginales mayores que incrementos equivalentes en el número de vehículos. Finalmente, la asignación dinámica basada únicamente en priorización puede ser contraproducente sin respaldo de capacidad, por lo que se requieren políticas integradas que articulen recursos y reglas de decisión a nivel de red.

Palabras clave: Dinámica de Sistemas, Transporte Logístico, Centros de Distribución (CEDIS), Optimización Operacional, Simulación, Toma de Decisiones Logística

Abstract

Transportation efficiency between distribution centers is a critical driver of logistics performance, given its direct influence on operational costs, inventory synchronization, and service fulfillment within constrained time windows. This research develops a System Dynamics simulation model to analyze and optimize transportation flows among Essity's distribution centers in Antioquia, Colombia (Guayabal, Girardota, and Rionegro). The model was implemented in Powersim and integrates real operational parameters such as vehicle capacity, loading and unloading times, travel times, route restrictions, and fleet allocation policies.

Subsequently, different logistics scenarios were designed and compared to assess their impact on the total process time and the effective use of the fleet. The results show that allocating trucks in line with the workload and capacity of each distribution center (CEDI) significantly reduces total time compared with symmetric or empirical assignment schemes. Likewise, reducing loading and unloading times yields larger marginal improvements than equivalent increases in the number of vehicles. Finally, a purely priority-based dynamic allocation can be counterproductive without supporting capacity, so integrated policies that align resources and decision rules at the network level are required.

Keywords:

System Dynamics; Transportation Optimization; Distribution Centers (DCs); Simulation; Logistics Decision-Making; Urban Distribution

1. Introducción

La eficiencia del transporte entre centros de distribución es un elemento determinante para asegurar la continuidad operativa y el cumplimiento del servicio en una cadena de abastecimiento. En empresas con redes logísticas interconectadas, como el Grupo Essity en el Valle de Aburrá, pequeñas variaciones en tiempos de carga, descarga o disponibilidad de vehículos pueden generar acumulaciones de inventario, retrasos y aumentos en los costos operativos. Actualmente, la asignación y rotación de la flota entre los CEDIS de Guayabal, Rionegro y Girardota se realiza principalmente con base en la experiencia, lo que dificulta anticipar comportamientos, identificar cuellos de botella y evaluar alternativas de mejora.

Dado que este tipo de procesos presenta interdependencias, demoras y variabilidad, se requiere una herramienta que permita analizar el sistema de manera integral. Por lo anterior, la Dinámica de Sistemas se presenta como un enfoque adecuado para representar el funcionamiento del transporte inter-CEDIS y simular diferentes políticas de operación. A partir de ello, surge la pregunta de investigación:

¿Cómo afectan las políticas de asignación de flota y los tiempos operativos al tiempo total del ciclo logístico entre tres centros de distribución de Essity?

Con el fin de responder esta pregunta, el trabajo busca evaluar distintas estrategias de asignación de flota mediante un modelo de simulación en Powersim. Para lograrlo, se revisa la literatura relacionada, se identifican las variables críticas de la operación, se construye y valida el modelo dinámico y, finalmente, se comparan varios escenarios de decisión. Este estudio busca aportar una herramienta que facilite la toma de decisiones logísticas y permita mejorar la eficiencia operativa del transporte entre los CEDIS analizados.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Evaluar el impacto de diferentes políticas de asignación de flota y tiempos operativos sobre el tiempo total del ciclo logístico entre tres centros de distribución del Grupo Essity en Antioquia, mediante la construcción y simulación de un modelo basado en Dinámica de Sistemas.

2.2 Objetivos específicos

- Revisar la literatura relacionada con el uso de Dinámica de Sistemas en problemas logísticos de transporte y asignación de recursos.
- Identificar las variables, parámetros y restricciones operativas necesarias para la formulación del modelo de transporte inter-CEDIS.
- Construir y validar un modelo de simulación en Powersim que represente el comportamiento del transporte entre los centros de distribución de Guayabal, Rionegro y Girardota.
- Diseñar y comparar diferentes escenarios de asignación de flota y tiempos de operación, con el fin de determinar la estrategia que minimice el tiempo total del ciclo logístico.
- Analizar el comportamiento dinámico de los centros de distribución y de la flota de transporte, identificando las interdependencias que afectan el tiempo total del ciclo logístico.

3. Marco teórico

Cadena De Abastecimiento y Transporte

Para iniciar con el análisis del marco teórico es importante comprender que es una cadena de abastecimiento. Según Sunil Chopra y Peter Meindl esta *“puede definirse como el conjunto de actividades involucradas en el flujo y transformación de bienes desde la materia prima hasta el producto final entregado al consumidor, incluyendo la gestión de información, recursos y relaciones”* (Chopra & Meindl, 2016). Llevado al contexto contemporáneo de la industria se puede llegar a ver a las cadenas de abastecimiento como sistemas altamente interconectados cuya eficiencia depende en gran medida de la integración fluida entre los distintos eslabones que las componen.

Ahora, para continuar con este proceso es importante reconocer otro término importante, el cual es el transporte, el cual no actúa únicamente como un medio para movilizar productos, ya que en realidad dentro de los diversos eslabones de la cadena puede verse como una función esencial que conecta cada uno de estos, permitiendo que la sincronización de procesos y el cumplimiento de tiempos se traduzcan en eficiencia operativa y valor agregado que los clientes pueden percibir y a la vez funcionar como un amortiguador de incertidumbre buscando responder con flexibilidad y rapidez ante cualquier tipo de anomalía que pueda presentarse en la cadena de abastecimiento. Diversos estudios coinciden en que los costos asociados al transporte representan uno de los componentes más significativos dentro del costo total de la cadena, evidenciando que los costos de transporte constituyen una parte preponderante del costo logístico total en promedio entre el 50 % y el 60 %, e incluso hasta un 70 % en algunos sectores—, siendo el componente más importante dentro del gasto logístico (Rodríguez JP, 2024).

Para el grupo Essity, cuya red logística en Colombia incluye varios centros de distribución, el transporte constituye el eje sobre el cual se equilibran la producción y el cumplimiento de la demanda. Las dinámicas de transferencia entre CEDIS, como Guayabal, Rionegro y Girardota, ilustran la complejidad operativa de mantener un flujo constante de mercancía sin generar acumulaciones, retrasos o tiempos muertos. En este tipo de esquemas, el transporte no solo debe ser eficiente, sino también sensible a las restricciones temporales, de capacidad y de prioridad entre los distintos nodos.

Centros De Distribución y Transporte

En la compleja estructura de las cadenas de abastecimiento, los centros de distribución (CEDIS) se pueden ver como espacios intermedios que permiten consolidar mercancías, optimizar la cobertura geográfica y agilizar el flujo de productos hacia sus destinos finales, contribuyendo así a una red logística más eficiente (Castrillon-Ocampo, J, 2025), logrando así que se perciban como nodos estratégicos dentro de todo el sistema logístico.

Estos juegan un papel fundamental en la gestión de inventarios al facilitar la disponibilidad oportuna de productos en puntos estratégicos cercanos a la demanda. Además, permiten absorber variaciones en los volúmenes de producción o en los patrones de consumo, actuando como amortiguadores logísticos frente a la incertidumbre. Sin embargo, su efectividad depende en gran medida de la adecuada coordinación con el transporte, así lo afirma Huang et al. (2025), al decir que *“la integración de la red de transporte entre proveedores de materiales, plantas de producción y centros de distribución se vuelve crucial [...] ya que los costos de transporte constituyen una parte significativa de los gastos empresariales”*, reforzando así la necesidad de una planificación conjunta entre estos eslabones clave de la cadena logística. Ya que de esta relación dependen factores como la frecuencia, el volumen y la puntualidad de las operaciones. Llevando a ver el transporte y los centros de distribución como dos factores íntimamente relacionados debido a que el desempeño de uno condiciona directamente al otro.

En el caso del grupo Essity, esta interdependencia es particularmente visible. La compañía opera de manera especial con tres centros de distribución en el territorio Antioqueño: Guayabal, Rionegro y Girardota. Cada uno de este cumple funciones logísticas específicas y responde a dinámicas operativas particulares, lo que obliga a establecer flujos constantes de mercancía entre ellos. El diseño de rutas, la asignación de camiones y los tiempos de carga y descarga en cada nodo deben articularse cuidadosamente para evitar cuellos de botella que afecten la producción o el servicio.

Dinámica de sistemas aplicada a problemas de inventario y transporte

La logística moderna no puede ser entendida únicamente desde una perspectiva estática o fragmentada. Ya que, dada la complejidad de las redes de abastecimiento actuales, donde interactúan múltiples actores, procesos, recursos e incertidumbres, se puede ver esta casi como si fuera un sistema vivo con múltiples variables que se interrelacionan y que están en constante cambio, es por esto que se requiere un enfoque que permita modelar, simular y comprender los

comportamientos dinámicos de estas estructuras a lo largo del tiempo. En este sentido, la dinámica de sistemas surge como una herramienta metodológica potente para analizar y optimizar procesos logísticos, especialmente aquellos relacionados con el inventario y el transporte.

Según Forrester (1961), la dinámica de sistemas permite representar mediante modelos causales y de retroalimentación el comportamiento de sistemas complejos, lo cual resulta especialmente útil en cadenas de suministro donde las decisiones tomadas en un punto generan efectos en otros nodos. En el ámbito logístico, esta metodología se ha empleado con éxito para evaluar políticas de transporte, asignación de recursos, programación de entregas, niveles de inventario y otros aspectos interdependientes que impactan la eficiencia global del sistema (Georgiadis, Vlachos e Iakovou (2005)).

A diferencia de otras técnicas de simulación, como los modelos de eventos discretos, la dinámica de sistemas permite analizar el comportamiento agregado del sistema a lo largo del tiempo, destacando la acumulación de stocks, los retrasos en los flujos de información o materiales, y los efectos de decisiones operativas y estratégicas. En el contexto del transporte, por ejemplo, un cambio en la frecuencia de despacho o en el número de vehículos disponibles puede desencadenar oscilaciones en los niveles de inventario, congestión en los puntos de carga o incremento en los tiempos de espera, efectos que solo se hacen visibles al analizar el sistema de manera integral (Angerhofer & Angelides, 2000).

Para el caso del grupo Essity, cuya operación logística involucra la transferencia constante de pallets entre distintos centros de distribución resulta más que pertinente la aplicación de dinámica de sistemas. Debido a que la interacción entre restricciones de capacidad, programación de camiones, horarios de operación y niveles de inventario genera un entorno complejo donde los efectos de una decisión no siempre son evidentes de inmediato, pero que paulatinamente pueden verse y amplificarse en el tiempo. Mediante el modelado dinámico, es posible representar gráficamente estos bucles de retroalimentación, testear estrategias con diferentes políticas y anticipar los efectos de posibles cambios sin poner en riesgo la operación real.

Diseño y evaluación de políticas en Dinámica de Sistemas

En Dinámica de Sistemas, una política se entiende como un conjunto de reglas de decisión y operación que convierten información del sistema en acciones que modifican su estructura y desempeño. En este sentido, Sterman (2000) plantea que el modelado dinámico busca comprender cómo el desempeño de una organización se relaciona con su estructura interna y con sus políticas de operación, para así diseñar políticas de alto apalancamiento (high leverage policies).

El diseño de políticas requiere definir con claridad la frontera del modelo e identificar puntos de palanca. Shikhzadeh et al. (2012) señalan que comprender un sistema implica precisar su frontera y la red de bucles de realimentación que determina su dinámica; además, destacan que los puntos de palanca permiten ubicar partes del sistema donde una intervención focalizada puede generar mejoras relevantes.

En la práctica, estas intervenciones pueden incluir ajustes a relaciones existentes o incluso la incorporación de nuevos bucles de retroalimentación cuando ello mejora el desempeño. La evaluación de políticas se realiza mediante experimentos de simulación que comparan el escenario base con alternativas. Shikhzadeh et al. (2012) describen que el diseño y evaluación de políticas se apoya en un proceso previo de formulación del problema, construcción de hipótesis dinámica, formulación del modelo y pruebas, antes de ensayar intervenciones en el mundo real.

Finalmente, es recomendable, antes de implementar las políticas, analizar su robustez mediante pruebas de sensibilidad, variando parámetros y condiciones operativas relevantes para verificar si los resultados se mantienen bajo escenarios plausibles. En este sentido, Aracil (1995) define el análisis de sensibilidad como el estudio de cómo se modifican las conclusiones del modelo cuando cambian los parámetros o las relaciones funcionales, y señala que este análisis permite evaluar la robustez al identificar qué elementos hacen que el comportamiento sea más sensible o estable frente a variaciones.

4. Metodología

Enfoque del estudio

El proyecto adopta un enfoque cuantitativo y aplicado, sustentado en técnicas de modelado dinámico, con el fin de simular y comparar diferentes escenarios de asignación de transporte entre centros de distribución (CEDIS). Este enfoque permite trabajar con datos reales obtenidos directamente de la operación logística de la empresa Essity, modelarlos a través de software especializado, y extraer conclusiones fundamentadas en evidencia numérica y comportamiento sistémico.

La técnica central fue la dinámica de sistemas, implementada en el software PowerSim, que permite construir modelos basados en relaciones causales, flujos acumulativos y retroalimentaciones. Esta técnica se complementará con el análisis comparativo de resultados por medio de tablas comparativas, gráficos de comportamiento y métricas que permitan brindar claridad sobre las mejores operaciones que vayan en pos del cumplimiento de los objetivos propuestos.

Técnicas e instrumentos

Recolección de datos: entrevistas con personal logístico de Essity, revisión de bases internas de producción, flota y despachos diarios.

Instrumento de modelado: software PowerSim (licencia académica).

Instrumentos de análisis: tablas comparativas, gráficos de comportamiento y análisis de sensibilidad.

Criterios de evaluación: tiempo total del ciclo logístico buscando minimizarlo y nivel de uso de uso de los recursos de transporte

Fases Del Proyecto

El proyecto se desarrollará en 5 fases:

Tabla 1 Fases del proyecto

Numero	Fase	Descripción
1	Diagnóstico y recolección de información	Recolección de datos primarios: producción, capacidad, rutas, restricciones mediante reuniones con el equipo de Essity y revisión de registros históricos.
2	Formulación del modelo	Construcción del modelo base en PowerSim con las variables y relaciones causales. Validación con un período real de operación.
3	Diseño de escenarios	Definición de distintas estrategias de asignación de camiones y programación logística a simular.
4	Ejecución de simulaciones	Simulación de cada escenario, recolección de resultados, análisis de indicadores clave.
5	Evaluación y recomendaciones	Comparación de escenarios, identificación de la mejor estrategia y formulación de recomendaciones prácticas para la empresa.

Cronograma de actividades

Para el desarrollo del proyecto se estimó un tiempo de 5 meses, en los cuales se planeó desarrollar un total de 8 actividades distribuidas de forma secuencial, al mismo tiempo en reuniones previas con el tutor se han acordado reuniones periódicas cada 15 días para la validación de los avances.

Tabla 2 Cronograma del proyecto

Actividad	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5
Revisión bibliográfica	X				
Recolección de datos	X	X			
Formulación del modelo base		X	X		
Validación del modelo			X		
Diseño y simulación de escenarios			X	X	
Análisis de resultados				X	X
Redacción final del informe				X	X
Presentación y cierre					X

Presupuesto

Dado que el trabajo se desarrollará en el marco de una práctica de investigación universitaria, con datos internos y licencias académicas disponibles, los costos del proyecto serán mínimos. No se contemplan gastos operativos altos, pero sí se reconocen algunos elementos clave

Tabla 3 Presupuesto del proyecto

Categoría	Detalle	Responsable / Fuente	Costo estimado (COP)
1. Recurso humano	Trabajo del estudiante (análisis, modelado, redacción) – 240 horas estimadas	Estudiante	\$0 (práctica formativa)
	Asesoría académica y reuniones con empresa (docente y supervisor logístico)	Universidad y empresa	\$0 (pro bono)
2. Herramientas técnicas	Software PowerSim (licencia académica)	Universidad	\$ 0
	Soporte técnico para validación de modelo (2 sesiones especializadas)	Empresa aliada	\$200.000 (estimado en valor hora profesional)
3. Insumos digitales y recursos de apoyo	Plataforma para bibliografía, almacenamiento en la nube y edición de gráficos	Estudiante / Universidad	\$ 100.000
4. Difusión y cierre	Diseño de presentación final, impresión de póster o informe si aplica	Estudiante	\$ 150.000
Total estimado			\$ 450.000

Limitaciones metodológicas

Planteamiento del Problema

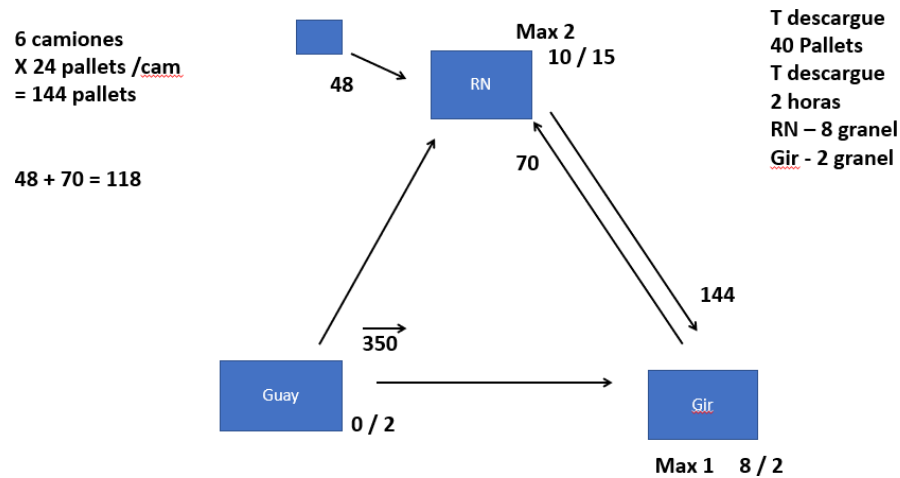


Figura 1 Esquema conceptual del sistema logístico modelado

En la operación logística del Grupo Essity (Familia) en el Valle de Aburrá, la gestión del transporte entre los centros de distribución de Guayabal, Rionegro y Girardota enfrenta importantes desafíos operativos y estratégicos. Guayabal, como centro productor, genera diariamente 350 pallets, los cuales deben ser redistribuidos hacia los otros dos centros. Sin embargo, la operación involucra flujos constantes de mercancía en ambas direcciones, bajo condiciones de infraestructura limitada, horarios variables, tiempos de espera en carga y descarga, y una flota restringida de solo seis camiones, cada uno con capacidad para 24 pallets.

Actualmente, las decisiones relacionadas con el despacho, asignación y rotación de camiones se realizan con base en la experiencia operativa, sin el respaldo de un modelo formal que contemple la naturaleza dinámica y altamente interdependiente del sistema, generando cuellos de botella en la operación, acumulación de inventario, tiempos de espera prolongados y riesgo de bloqueo en Guayabal, lo que puede comprometer la continuidad de la producción.

Además, es importante aclarar que los cambios frecuentes en los patrones de demanda entre centros, los tiempos variables de viaje y descarga, y las restricciones de capacidad de cada nodo logístico, hacen que las soluciones estáticas o manuales resulten insuficientes. La complejidad del problema requiere un enfoque más robusto, que permita modelar el sistema de manera integral y

simular diferentes políticas de asignación y despacho de camiones, con el fin de identificar las estrategias más eficientes.

En este contexto, surge la necesidad de diseñar un modelo basado en dinámica de sistemas que permita analizar el comportamiento logístico en su conjunto, considerando las variables críticas, restricciones operativas y posibles escenarios de decisión.

Proceso de Modelación

4.1 Descripción del sistema actual

La operación logística del Grupo Essity bajo estudio se estructura a partir de una red interconectada de tres centros de distribución: Guayabal, Rionegro y Girardota. En este sistema, Guayabal actúa como nodo productor y los otros dos como centros receptores. Diariamente, deben movilizarse alrededor de 350 pallets hacia los otros centros, junto con envíos adicionales entre los dos centros restantes, utilizando una flota limitada de seis camiones, cada uno con capacidad para 24 pallets.

Las decisiones de despacho se toman de manera empírica, generando frecuentes acumulaciones en los patios de carga, tiempos muertos y desequilibrios en la atención entre los nodos. Se busca un sistema de planificación dinámica óptima que permita anticipar bloqueos logísticos y optimizar el uso de la flota. Además, las condiciones operativas –como ventanas horarias y tiempos de viaje, dificultan la ejecución eficiente de las rutas.

4.2 Justificación del enfoque metodológico

Dado el carácter dinámico, interdependiente y cíclico del sistema de transporte entre CEDIS, se optó por utilizar Dinámica de Sistemas (SD) como técnica de modelación. Este enfoque permite capturar de manera integral las relaciones causales, retroalimentaciones y retrasos temporales entre los flujos logísticos, factores que son difíciles de representar mediante métodos analíticos clásicos.

A diferencia de otras técnicas de simulación como eventos discretos, esta permite simular políticas estratégicas sobre horizontes temporales prolongados, evaluar impactos acumulativos y detectar efectos secundarios o no lineales. La herramienta PowerSim fue empleada para la construcción y

validación del modelo, aprovechando su capacidad para representar stocks, flujos, bucles de retroalimentación y variables auxiliares.

4.3 Formulación del modelo

La estructura del modelo se articuló en torno a variables de estado (niveles) como el inventario disponible en Guayabal y la cantidad de envíos acumulados por nodo; flujos como el número de despachos efectivos por ciclo; y variables auxiliares que regulan la lógica de asignación, disponibilidad y prioridad operativa.

Adicional a esto el modelo se construyó a partir de una representación dinámica del proceso logístico entre los CEDIS de Essity, dividiéndose en tres bloques funcionales: (1) Bloque de Envío y Despacho, (2) Bloque de Inventario y Gestión de Recursos en Tránsito, y (3) Bloque de Recepción y Cumplimiento de Metas:

1. Bloque de Envío y Despacho

Este bloque comprende el proceso de asignación y despacho de la carga desde los centros emisores hacia los centros de recepción. Aunque Guayabal es el nodo logístico primario en la generación de carga, el modelo contempla esquemas en los que los envíos también pueden originarse desde otros centros, como parte de políticas de asignación dinámica o estrategias de optimización de rutas. El objetivo de este bloque es reflejar con fidelidad las decisiones operativas que determinan cuándo, hacia dónde y con cuántos recursos se debe despachar mercancía.

El proceso de envío está condicionado por la disponibilidad de recursos operativos (puertos, flota, inventario) y por criterios de priorización. Por ejemplo, en ciertos escenarios se simula la asignación preferencial de camiones al centro de destino con mayor rezago logístico. Esto permite representar políticas tanto estáticas como dinámicas, donde las reglas de decisión evolucionan en el tiempo según el comportamiento del sistema.

Además, este bloque incorpora restricciones propias de la infraestructura física y las capacidades de los centros logísticos, así como las ventanas de tiempo disponibles para operar.

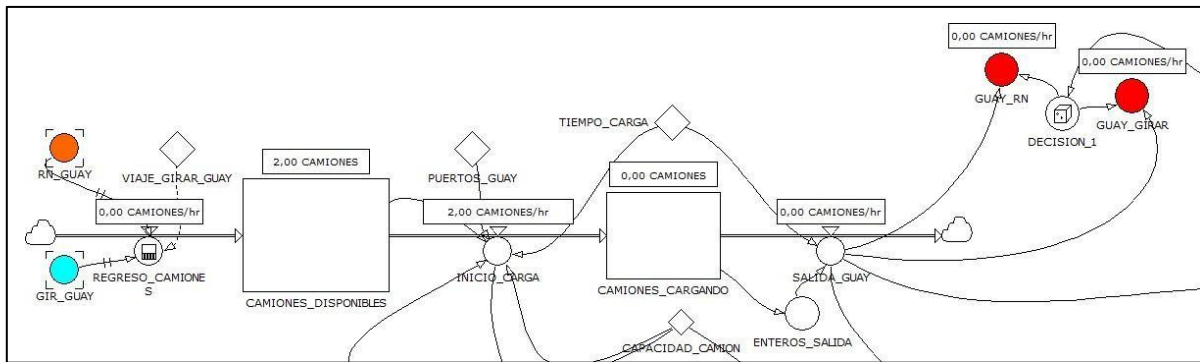


Figura 2 Diagrama de sección del bloque de envío y despacho del modelo logístico

2. Bloque de Inventario y Gestión de Recursos en Tránsito

Este bloque opera como un sistema de seguimiento del estado interno del modelo. Su función es doble: gestionar el inventario disponible para despacho, y monitorear los recursos logísticos en tránsito, particularmente los camiones asignados a diferentes destinos. Su implementación permite reflejar la dinámica acumulativa de la operación, donde los niveles de inventario cambian en función de la entrada y salida de productos, y los camiones recorren ciclos completos de carga, viaje, descarga y retorno.

Este módulo cumple un papel fundamental en la estabilidad del modelo, ya que controla los balances logísticos y evita comportamientos anómalos como envíos sin capacidad o acumulación infinita. Además, permite simular condiciones realistas como la posibilidad de que ciertos camiones retornen vacíos o que algunas entregas no se completen, afectando así el inventario general del sistema.

En términos de gestión, este bloque representa la capa de inteligencia operacional del modelo, que se encarga de asignar eficientemente los recursos disponibles, contabilizar rondas logísticas y asegurar que cada acción en el sistema tenga trazabilidad y consecuencias.

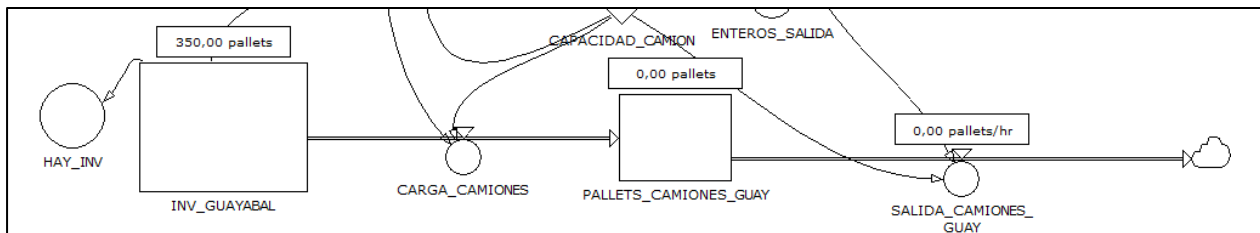


Figura 3 Diagrama de sección del Bloque de Inventario y Gestión de Recursos en Tránsito

3. Bloque De Cumplimiento de Metas y Mediciones

El tercer bloque del modelo corresponde al proceso de recepción y verificación del cumplimiento de metas en los centros de destino, y actúa como el módulo evaluador del desempeño global del sistema logístico. En este bloque se registran todas las entregas efectivamente completadas y se comparan de manera continua con los objetivos operativos definidos para cada nodo, permitiendo identificar en qué medida cada CEDI avanza hacia su meta y en qué momentos se presentan rezagos significativos. A partir de estas comparaciones se generan señales de retroalimentación que influyen en los demás componentes del modelo, especialmente en las políticas de asignación y despacho, lo que permite adaptar el comportamiento del sistema según su estado real. De esta forma, el Bloque 3 no solo cierra el ciclo logístico registrando la recepción de la carga, sino que también cumple la función crítica de evaluar la eficiencia del proceso, detectar cuellos de botella y determinar si las políticas implementadas están contribuyendo efectivamente al logro de las metas establecidas.

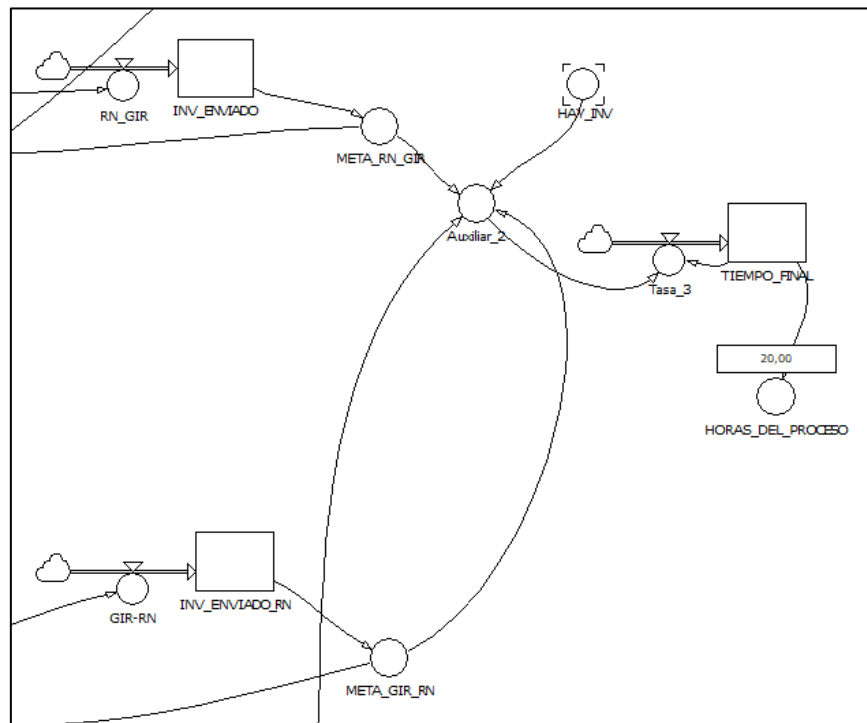


Figura 4 Diagrama del Bloque De Cumplimiento de Metas y Mediciones

Análisis de sensibilidad

Una vez formulado el modelo base y comprobada su coherencia interna, se considera necesario evaluar cómo responde dicho sistema ante variaciones en los parámetros críticos que lo componen. Permitiendo que se identifique los elementos de mayor influencia sobre el comportamiento del sistema y buscando que la formulación de políticas operativas sea más efectiva y fundamentada.

En el caso particular del presente modelo logístico, centrado en la operación de carga, transporte y descarga entre los CEDIS Guayabal, Girardota y Rionegro, la complejidad del proceso hace que múltiples factores puedan convertirse en cuellos de botella en diferentes escenarios. Variables como el número de camiones disponibles, el tiempo de carga y descarga, la capacidad operativa de los puertos, la disponibilidad de inventario y la capacidad de los vehículos interactúan de manera no lineal, generando comportamientos acumulativos, retardos, ciclos de realimentación y congestión que no son evidentes de manera intuitiva.

A través de la simulación de múltiples corridas bajo distintos valores de parámetros clave, fue posible observar el comportamiento del sistema en términos de dispersión (percentiles 10, 25, 75 y 90) y promedio. Estos resultados permiten no solo evaluar la sensibilidad del modelo, sino también sustentar decisiones gerenciales basadas en evidencia cuantitativa.

A continuación, se presentan los análisis individuales de sensibilidad realizados sobre las variables más relevantes del sistema, acompañados de su interpretación, hallazgos principales y recomendaciones derivadas.

1. Sensibilidad frente al Número de Camiones Disponibles

El número de camiones constituye uno de los recursos críticos en la operación logística analizada, ya que determina la capacidad del sistema para movilizar inventario desde el nodo de origen (Guayabal) hacia los destinos (Girardota y Rionegro). Por ello, se evaluó cómo cambios en la flota disponible afectan la duración total del proceso.

Para este análisis se realizaron múltiples simulaciones variando el número de camiones disponibles, mientras se mantuvieron constantes los demás parámetros del modelo. El objetivo fue observar el

impacto de esta variable sobre las *horas totales del proceso*, considerando diferentes métricas de dispersión: percentiles 10, 25, 75, 90 y promedio.

Resultados para Camiones Disponibles en Guayabal

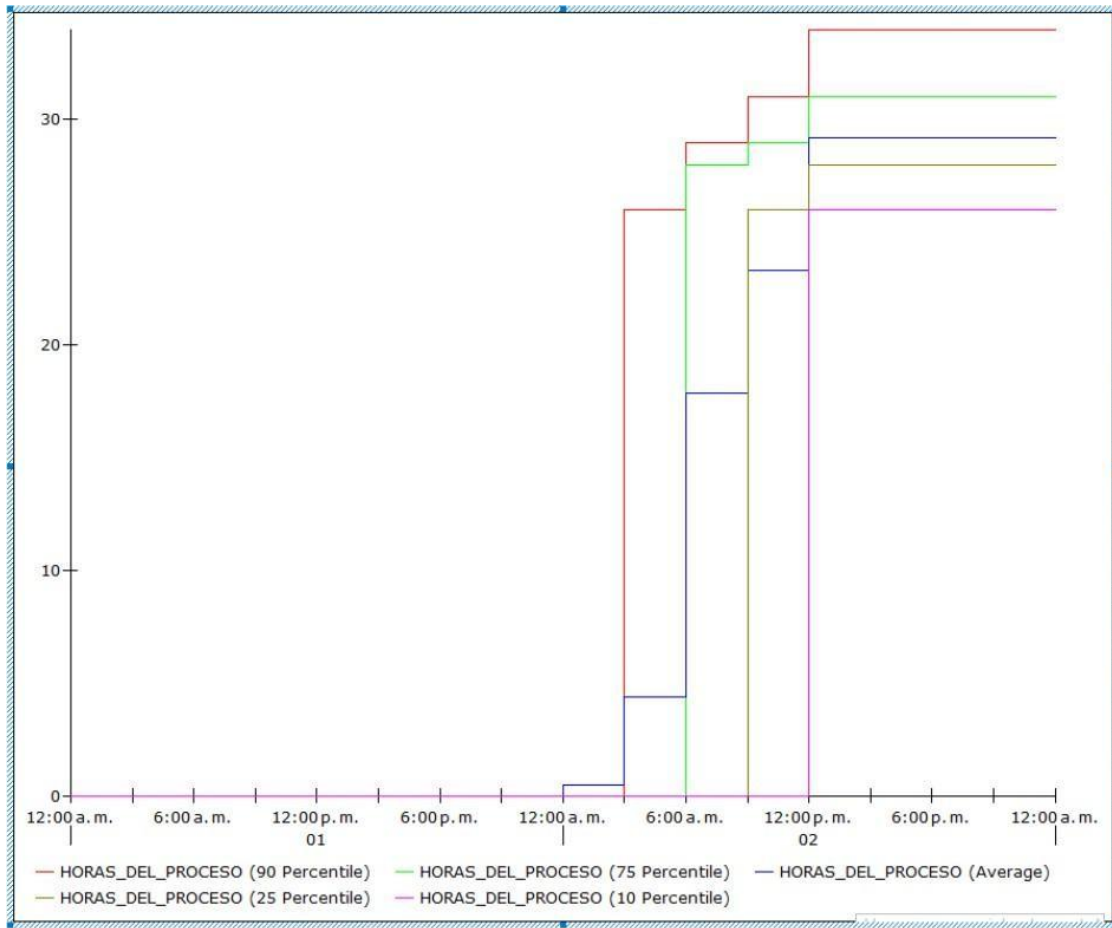


Figura 5 Análisis de sensibilidad frente al caso de variaciones de Camiones Disponibles en Guayabal

El primer análisis de sensibilidad corresponde al nodo Guayabal, el cual constituye el punto de origen del sistema. Los resultados muestran que este nodo es de los más sensibles a variaciones en la disponibilidad de camiones. Denotando resultados destacables como:

- El percentil 90 presenta una reducción significativa al incrementar los camiones, evidenciando que los peores escenarios mejoran notablemente.

-El promedio disminuye de forma clara, lo que refleja un impacto directo y positivo sobre el sistema en condiciones habituales.

-Los percentiles 25 y 10 permanecen más estables, lo cual indica que el sistema opera de forma aceptable incluso con valores bajos, pero se estresa considerablemente bajo alta demanda.

Hallazgos

Guayabal es el origen del flujo logístico. Desde allí se despacha el inventario hacia Girardota y Rionegro. Por ello se puede deducir que:

-Ante más camiones, es menos tiempo ocioso de los puertos, es mayor la tasa de extracción del inventario y además los ciclos de transporte son más frecuentes, reduciendo la acumulación de inventario.

- La estructura del modelo posiciona a Guayabal como el nodo con mayor influencia sobre toda la dinámica.

- La ampliación de flota en Guayabal es la política más efectiva para reducir los tiempos totales del proceso.

Resultados para Camiones Disponibles en Rionegro.

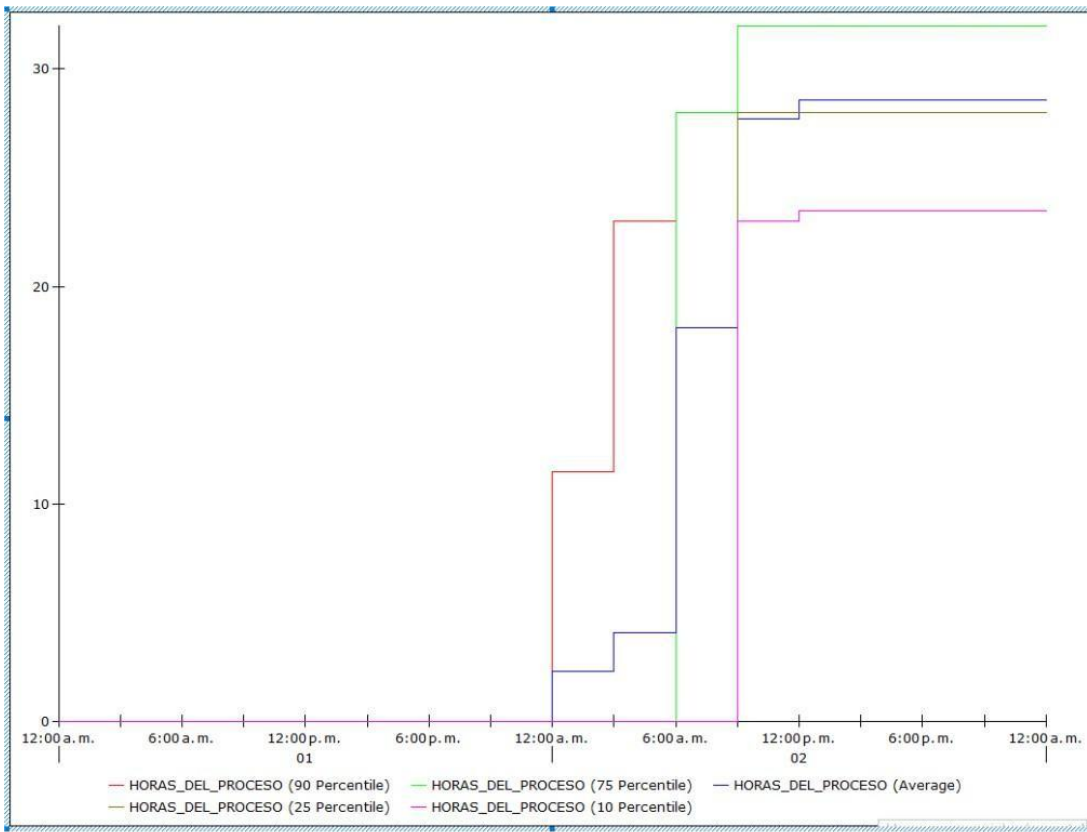


Figura 6 Análisis de sensibilidad frente al caso de variaciones de Camiones Disponibles en Rionegro.

Este segundo análisis corresponde a Rionegro, el cual se caracteriza por ser un punto receptor y de retorno. Bajo el cual, al realizar su análisis de sensibilidad se encontraron ciertos factores relevantes para la construcción de políticas como:

- El percentil 90 presenta una reducción moderada al aumentar los camiones.

- El promedio cambia ligeramente, indicando que su impacto no es tan fuerte como en Guayabal.

- Los percentiles 10 y 25 muestran mínima variación, lo cual sugiere que el sistema no depende críticamente de este recurso en este nodo.

Hallazgos

Rionegro es un destino y punto de retorno, no de generación de flujo, por lo tanto el aumento de camiones mejora el retorno, pero su efecto está acotado por el ritmo de carga en Guayabal, ya que una vez que hay suficientes camiones para cubrir la demanda de descarga, añadir más no aporta beneficios operativos significativos. Dando a entender que Rionegro no es un cuello de botella estructural y que aumentar su flota ofrece beneficios que no son verdaderamente significativos

Resultados para Camiones Disponibles en Girardota

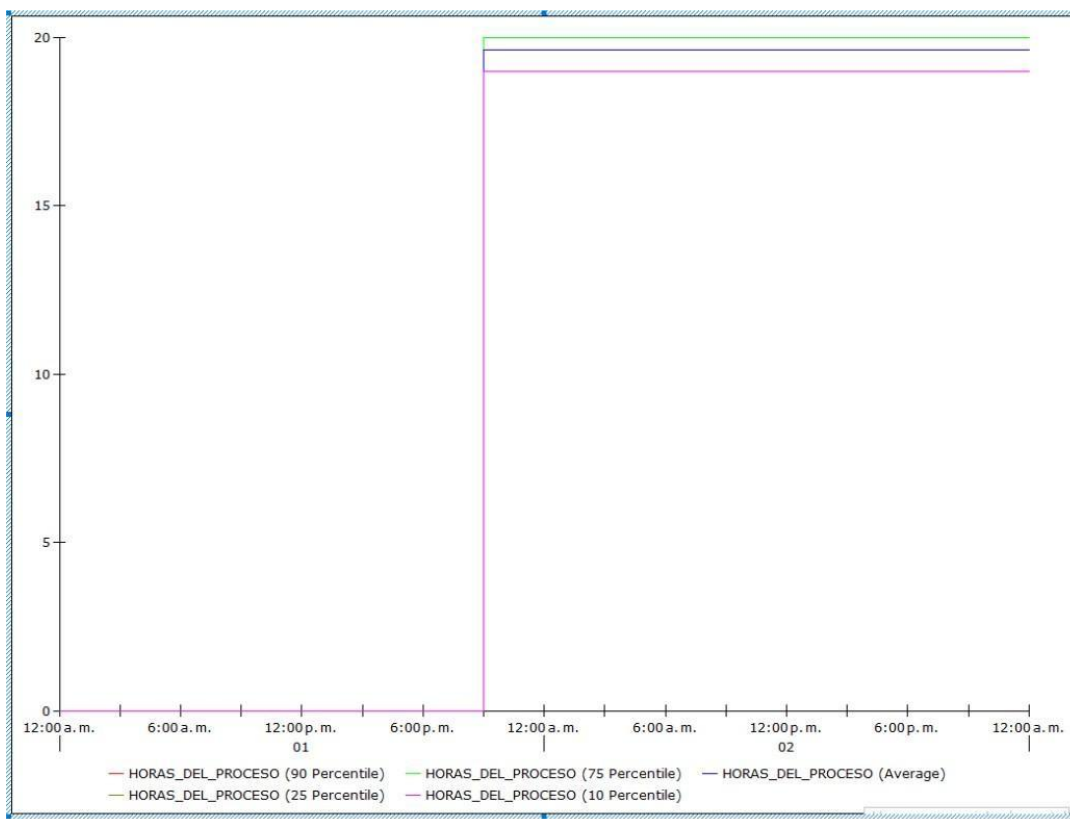


Figura 7 Análisis de sensibilidad frente al caso de variaciones de Camiones Disponibles en Girardota

Girardota fue igualmente evaluada siguiendo una distribución triangular de disponibilidad. Siendo este al igual que Rio Negro, un punto de recepción y de envío secundario, se analizó su comportamiento encontrando los siguientes resultados a destacar:

- Los percentiles 75, 90 y el promedio muestran variaciones mínimas entre escenarios.

-Los percentiles 10 y 25 permanecen prácticamente constantes.

Hallazgos

Girardota muestra la menor sensibilidad del sistema debido a que su flujo de transporte es mucho menor en comparación con Rionegro, lo que también se ve apoyado por una baja probabilidad de congestión en descarga y un menor peso relativo dentro del ciclo logístico total.

Indicando que la operación en el CEDI de Girardota es estable y no condiciona la eficiencia global del sistema. Permitiendo concluir que Girardota es el nodo con menor impacto estructural y que aumentar la cantidad de camiones en su centro no genera mejoras sustanciales en el desempeño total.

Análisis de Sensibilidad Aplicado a la capacidad de Carga del camión

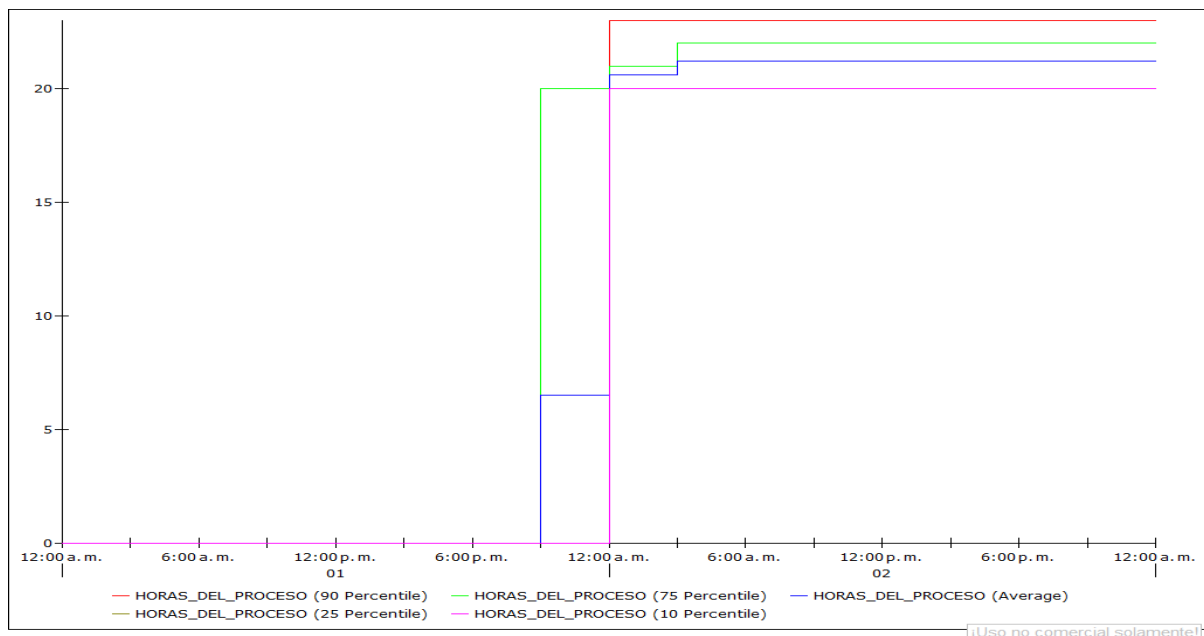


Figura 8 Análisis de sensibilidad frente a las variaciones en la capacidad de carga del camión

La capacidad de carga de los camiones fue evaluada aplicando una distribución triangular, variando entre escenarios de menor, mediana y mayor capacidad operativa. Esta variable determina cuántos

pallets pueden ser movilizadas por viaje, y en principio podría tener un impacto relevante en la eficiencia logística.

Al analizar la respuesta del sistema ante variaciones en la capacidad de los camiones, se identificaron los siguientes resultados:

- Los percentiles 75, 90 y el promedio presentan variaciones moderadas, y muestran una reducción que, aunque existe, es menos pronunciada en comparación con otras variables como disponibilidad de camiones en Guayabal o número de puertos.
- Los percentiles 10 y 25 se mantienen prácticamente constantes, lo que indica que en los escenarios más favorables el sistema no se ve afectado por cambios en la capacidad de carga.
- La reducción en el tiempo total del proceso se estabiliza rápidamente, sin mostrar caídas significativas después de cierto punto.

Hallazgos

El análisis revela que la capacidad del camión no constituye un factor crítico dentro del desempeño global del sistema. Esto obedece a que el ciclo logístico está altamente condicionado por variables como los tiempos de carga, la disponibilidad de camiones en Guayabal y los cuellos de botella en descarga, más que por la cantidad de pallets transportados en cada viaje. Esto debido a que:

-El flujo total de pallets no es lo suficientemente alto para que aumentar la capacidad genere diferencias sustanciales.

-Los ciclos de servicio (cargar–viajar–descargar–retornar) siguen dependiendo del tiempo, no de la capacidad.

-La operación no se congestiona por volumen transportado, sino por disponibilidad de vehículos y limitaciones en los centros.

Todo esto lleva a la conclusión de que incrementar la capacidad de los camiones no produce mejoras significativas en el tiempo total del proceso logístico. Su efecto es marginal y se encuentra

rápidamente limitado por otros factores estructurales del modelo. Por tanto, aumentar la capacidad de carga no se perfila como una estrategia prioritaria de optimización.

Análisis de sensibilidad para tiempo de descarga

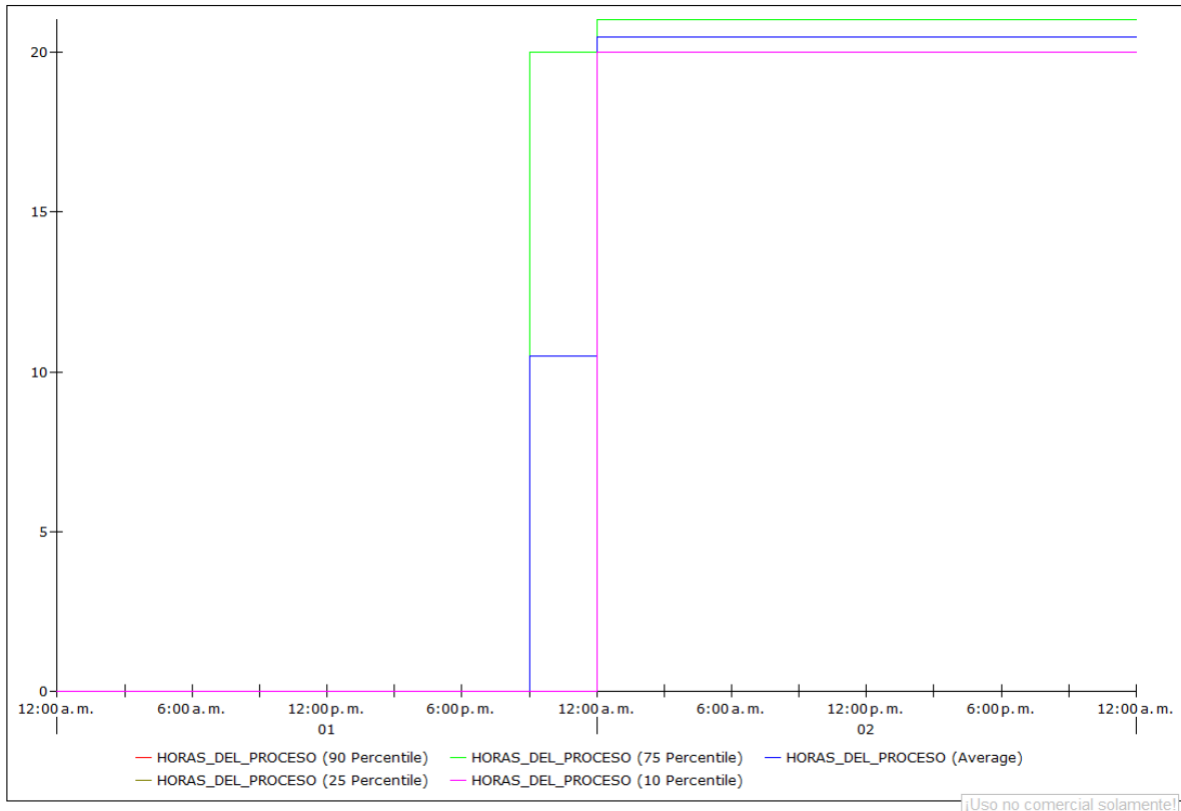


Figura 9 Análisis de sensibilidad frente al caso de variaciones en los tiempos de descarga

El tiempo de descarga constituye una etapa clave dentro del ciclo logístico, especialmente en los nodos de recepción como Rionegro y Girardota. Su influencia puede manifestarse en la velocidad con la que los camiones retornan al sistema y en la capacidad de respuesta de los centros de distribución. Con el fin de evaluar su impacto en el desempeño global, se realizó un análisis de sensibilidad variando esta variable de manera controlada.

Comportamiento observado

Al evaluar el tiempo total del proceso bajo diferentes escenarios de tiempo de descarga, se identificaron los siguientes patrones:

- El percentil 90 no presenta variaciones significativas. Se mantiene prácticamente constante entre escenarios, lo que sugiere que, incluso bajo condiciones críticas, el sistema no experimenta congestión atribuible a la descarga.
- El percentil 75 muestra una ligera disminución o estabilización, evidenciando que la mayoría de escenarios operan sin saturación en este punto.
- El promedio del sistema permanece prácticamente igual, lo que indica que los cambios en el tiempo de descarga no afectan los tiempos generales del flujo logístico.
- Los percentiles 10 y 25 se mantienen totalmente planos, lo que confirma que en los escenarios más favorables la operación de descarga no representa ninguna restricción operacional.

Hallazgos

Los resultados indican que el tiempo de descarga no constituye un cuello de botella en el sistema actual. A diferencia del tiempo de carga —que mostró impactos significativos en los percentiles altos y en el promedio— la descarga presenta una baja sensibilidad debido a:

- Una menor concentración de operaciones simultáneas en los centros de destino.
- Una alta capacidad de recepción frente al flujo real del modelo.
- Un balance adecuado entre llegadas y disponibilidad de recursos, evitando acumulaciones.

Con esto se identifica que el tiempo de descarga tiene un peso marginal en el rendimiento global del sistema, por lo que su optimización, si bien positiva, no generaría mejoras sustanciales en la duración total del proceso.

Conclusión

El análisis demuestra que el tiempo de descarga presenta baja relevancia estructural dentro del modelo logístico. El sistema opera con holgura en esta etapa, sin evidenciar saturación ni retrasos acumulados al modificar esta variable. Por tanto, la descarga no limita la eficiencia global, y no debe considerarse un foco prioritario de intervención comparado con otras áreas críticas como el tiempo de carga o la disponibilidad de vehículos en Guayabal.

4.4 Escenarios simulados

Se diseñaron 4 escenarios para analizar el impacto de distintas políticas:

1. **Base actual:** operación sin cambios.
2. **Política 1:** incorporación de dos camiones adicionales con salida desde Rionegro.
3. **Política 2:** adición de dos camiones más y dos nuevos puertos de carga en Guayabal.
4. **Política 3:** asignación dinámica priorizando el CEDI más rezagado.

Política 0. Escenario de referencia (Operación actual)

Esta política corresponde al funcionamiento real del sistema, sin modificaciones en flota, infraestructura ni reglas de asignación. Se mantienen los tiempos actuales de carga y descarga, la disponibilidad de camiones en cada nodo y la operación estándar del flujo desde Guayabal hacia Rionegro y Girardota. Con una única modificación encontrada en el desarrollo del modelo en el cual se evidencia la necesidad de que los primeros viajes desde rio negro vayan vacíos directamente a Guayabal, para que estos posteriormente vuelvan a Rio Negro, esto debido a que se encontró que esta acción, resultaba altamente significativa para el vaciado de Guayabal y por consiguiente para la reducción de los tiempos.

El propósito de este escenario es servir como línea base para comparar de manera objetiva los efectos de las políticas de mejora. Su comportamiento revela la concentración de congestión en Guayabal, la variabilidad de tiempos de proceso y la sensibilidad del sistema frente a la oferta limitada de transporte.

Política 1: Incorporación de dos camiones adicionales con punto de partida desde el CEDI de Rionegro

Esta política consiste en aumentar la capacidad de la flota activa mediante la adición de dos camiones que inician su jornada desde el centro logístico de Rionegro. Dado que este nodo constituye el origen principal de las operaciones de distribución hacia los centros de Guayabal y Girardota, contar con un mayor número de unidades disponibles desde este punto permite reducir los tiempos de espera y acelerar la frecuencia de envíos.

La implementación de esta política responde a la identificación de cuellos de botella en la asignación inicial de transporte, especialmente en los momentos de alta demanda o bajo condiciones de utilización máxima de los camiones existentes. Al contar con mayor disponibilidad de flota, se mejora el flujo logístico en las primeras horas del ciclo, reduciendo la congestión en los puertos de carga y permitiendo un cumplimiento más ágil de las metas asignadas a cada centro receptor.

Según los resultados de la simulación, esta política redujo el tiempo promedio de cumplimiento de los objetivos de envío de 28 horas a 22 horas, evidenciando una mejora del 21,4% en la eficiencia general del sistema sin necesidad de modificar la infraestructura de carga ni las ventanas horarias de operación.

Política 2: Incremento simultáneo de flota y capacidad operativa en el nodo de Guayabal

Esta segunda política plantea una intervención combinada: por un lado, la incorporación de dos camiones adicionales (como en la política anterior) y, por otro, la habilitación de dos nuevos puertos de carga en el centro de distribución de Guayabal. Esta medida responde a los cuellos de botella operativos detectados en dicho nodo, donde las limitaciones de capacidad de carga estaban generando tiempos de espera excesivos y retrasos en los ciclos logísticos.

Al mejorar tanto la disponibilidad de transporte como la capacidad operativa del nodo receptor, se optimiza el flujo de procesamiento en ambas etapas del sistema (envío y recepción), permitiendo despachar simultáneamente más vehículos y reduciendo la acumulación de inventario. Esta política resulta especialmente eficaz en escenarios de alta demanda y saturación, ya que introduce mayor flexibilidad operativa.

La simulación evidenció una mejora aún más marcada en los tiempos de ciclo logístico, alcanzando una reducción del tiempo promedio de cumplimiento de metas a 20 horas (desde una línea base de

28 horas), lo cual representa una mejora del 28,5%. Esta política demostró ser la más efectiva de las tres en cuanto a disminución de tiempos, si bien implica una mayor inversión en infraestructura.

Política 3: Priorización dinámica del centro de distribución más rezagado

A diferencia de las dos primeras, esta política no se enfoca en aumentar los recursos disponibles, sino en optimizar su asignación. Consiste en implementar una lógica de priorización inteligente en la cual los camiones disponibles son asignados preferencialmente al CEDI que presente mayor rezago relativo respecto al cumplimiento de sus metas operativas. En otras palabras, se evalúa en tiempo real qué centro tiene mayor diferencia entre lo esperado y lo realmente recibido, y se prioriza el envío hacia ese nodo.

El objetivo de esta política es promover un balance operativo entre los centros de destino, evitando que uno de ellos reciba atención desproporcionadamente menor, lo que podría provocar acumulación de retrasos y desbalance logístico. Esta lógica de asignación prioritaria se basa en criterios de equidad y nivelación, buscando que todos los nodos avancen en el cumplimiento de sus metas a un ritmo más armónico.

Aunque esta estrategia no reduce los tiempos promedio de forma tan significativa como las políticas anteriores, sí mejora la estabilidad del sistema y reduce la variabilidad de desempeño entre nodos. Esto la convierte en una opción adecuada para contextos donde se valora la equidad operativa, especialmente en sistemas con múltiples destinos críticos. La simulación mostró una mejor distribución del cumplimiento entre Guayabal y Girardota, con tiempos más equilibrados en ambos frentes.

Variables del modelo

Tabla 4 Auxiliares del modelo

Tipo de Variable	Nombre de la Variable	Descripción	Unidad de Medida	Formula
Auxiliar	AUXILIAR_2	Variable lógica que detiene el flujo logístico en el momento en que se han cumplido las metas de despacho hacia Río Negro y Girardota y el desabastecimiento total de Guayabal	Camiones	$\text{MIN}(\text{FLOOR}(\text{CAMIONES_CARGANDO} / 1 << \text{CAMIONES}>>); 2 << \text{CAMIONES}>>)$
Auxiliar	DECISIÓN 3	Variable de decisión basada en aleatoriedad y condición de ENVÍO, determina si sale camión hacia cada ruta.	Camiones/hr	$(1 - \text{DECISION_1}) * \text{SALIDA_GUAY}$
Auxiliar	DECISION_1	Variable de decisión basada en aleatoriedad y condición de ENVÍO, determina si sale camión hacia cada ruta.	Camiones/hr	$\text{DECISION_1} * \text{SALIDA_GUAY}$
Auxiliar	DECISION_2	Variable de decisión basada en aleatoriedad y condición de ENVÍO, determina si sale camión hacia cada ruta.	Adimensional (0/1)	$\text{ENVIO} * \text{IF}(\text{RANDOM}() <= 0,99; 0; 1) + (1 - \text{ENVIO}) * \text{IF}(\text{RANDOM}() <= 0,45; 0; 1)$
Auxiliar	ENTEROS_SALIDA	Restricción operativa de salida, limita el número de camiones que pueden salir en cada ciclo de simulación dependiendo de la cantidad de puertos disponibles y de que estén completamente cargados	Adimensional (0/1)	$\text{IF}(\text{CONTADOR} < 6 << \text{CAMIONES}>>; 1; 0)$
Auxiliar	ENTEROS_SALIDA_GIR	Restricción operativa de salida, limita el número de camiones que pueden salir en cada ciclo de simulación dependiendo de la cantidad de puertos disponibles y de que estén completamente cargados	Adimensional (0/1)	$\text{IF}(\text{INV_GUAYABAL} > 0 << \text{pallets}>>; 1; 0)$
Auxiliar	ENTEROS_SALIDA_RN	Restricción operativa de salida, limita el número de camiones que pueden salir en cada ciclo de simulación dependiendo de la cantidad de puertos disponibles y de que estén completamente cargados	Camiones	$\text{MIN}(\text{FLOOR}(\text{CAMIONES_CARGANDO} - \text{RN}; 1 << \text{CAMIONES}>>); 15 << \text{CAMIONES}>>)$
Auxiliar	ENVIO	Auxiliar que asegura que los primeros 6 camiones vayan directamente al flujo Guay_RN	Pallets/Hr	$\text{RN_GUAY} * 24 << \text{pallets} / \text{CAMIONES}>>$
Auxiliar	ENVIO_GUAY	Auxiliar que asegura que los primeros 4 camiones vayan directamente al flujo RN_GUAY	Adimensional (0/1)	$\text{IF}(\text{#VIAJE} < 4 << \text{CAMIONES}>>; 1; 0)$
Auxiliar	GIR_GUAY	Auxiliar unido a la variable de decisión que en caso de que esta salga a su favor envía el camión desde Girardota a Guayabal	Adimensional (0/1)	$\text{IF}(\text{INV_ENVIADO} < 144 << \text{pallets}>>; 1; 0)$
Auxiliar	GIR_RN	Auxiliar unido a la variable de decisión que en caso de que esta salga a su favor envía el camión desde Girardota a Río Negro	Adimensional (0/1)	$\text{ENVIO_GUAY} * \text{IF}(\text{RANDOM}() <= 0,99; 0; 1) + (1 - \text{ENVIO_GUAY}) * (\text{META_RN_GIR} * \text{IF}(\text{RANDOM}() <= 0,01; 0; 1) + (1 - \text{META_RN_GIR}) * \text{IF}(\text{RANDOM}() <= 0,99; 0; 1))$
Auxiliar	GUAY_GIRAR	Auxiliar unido a la variable de decisión que en caso de que esta salga a su favor envía el camión desde Guayabal a Girardota	Camiones/hr	$(1 - \text{DECISION_2}) * \text{SALIDA_RN}$
Auxiliar	GUAY_RN	Auxiliar unido a la variable de decisión que en caso de que esta salga a su favor envía el camión desde Guayabal a Río Negro	Camiones/hr	$\text{DECISION_2} * \text{SALIDA_RN}$
Auxiliar	HAY_INV	Verifica si existe inventario disponible en Guayabal; si el inventario es mayor a cero, habilita la operación de carga, de lo contrario la bloquea	Adimensional	$\text{STOPIF}(\text{HAY_INV} + \text{META_GIR_RN} + \text{META_RN_GIR} > 0; \text{TRUE}; \text{FALSE})$
Auxiliar	INV_REAL_2	Variable auxiliar conectada al flujo de retorno GIR_GUAY. Dado que Guayabal no recibe carga directamente desde otros CEDIS, esta variable garantiza que cualquier cantidad enviada por error a través de dicho flujo regrese al inventario inicial, asegurando la conservación del stock y la coherencia del modelo logístico.	Camiones	$\text{MIN}(\text{FLOOR}(\text{CAMIONES_CARGANDO_GIR}; 1 << \text{CAMIONES}>>); 2 << \text{CAMIONES}>>)$
Auxiliar	INVENTARIO_REAL	Variable auxiliar conectada al flujo de retorno RN_GUAY. Dado que Guayabal no recibe carga directamente desde otros CEDIS, esta variable garantiza que cualquier cantidad enviada por error a través de dicho flujo regrese al inventario inicial, asegurando la conservación del stock y la coherencia del modelo logístico.	Pallets/Hr	$\text{GIR_GUAY} * 24 << \text{pallets} / \text{CAMIONES}>>$
Auxiliar	META_GIR_RN	Variable lógica auxiliar que retorna un valor binario: 0 si se ha cumplido la meta de entrega combinada hacia los destinos de Río Negro y Girardota, y 1 en caso contrario. Su propósito es validar el cumplimiento de una de las tres condiciones para que el modelo se detenga	Camiones/hr	$(1 - \text{DECISION_3}) * \text{SALIDA_GIRAR}$
Auxiliar	META_RN_GIR	Variable lógica auxiliar que retorna un valor binario: 0 si se ha cumplido la meta de entrega combinada hacia los destinos de Río Negro y Girardota, y 1 en caso contrario. Su propósito es validar el cumplimiento de una de las tres condiciones para que el modelo se detenga	Camiones/hr	$\text{DECISION_3} * \text{SALIDA_GIRAR}$
Auxiliar	RN_GIRAR	Auxiliar unido a la variable de decisión que en caso de que esta salga a su favor envía el camión desde Río Negro a Girardota	Adimensional (0/1)	$\text{META_GIR_RN} * \text{IF}(\text{RANDOM}() <= 0,01; 0; 1) + (1 - \text{META_GIR_RN}) * \text{IF}(\text{RANDOM}() <= 0,99; 0; 1)$
Auxiliar	RN_GUAY	Auxiliar unido a la variable de decisión que en caso de que esta salga a su favor envía el camión desde Río Negro a Guayabal	Adimensional (0/1)	$\text{IF}(\text{INV_ENVIADO_RN} < 70 << \text{pallets}>>; 1; 0)$

Tabla 5 Constantes del modelo

Tipo de Variable	Nombre de la Variable	Descripción	Unidad de Medida	Valor
Constante	CAPACIDAD_CAMION	Cantidad De Pallets Por Camión	Pallets	24
Constante	GOAL_GIR	Meta De envío De Rio Negro A Girardota	Pallets	144
Constante	GOAL_RN	Meta De Envío De Girardota A Rio Negro	Pallets	70
Constante	PUERTOS_GUAY	Cantidad De Puertos Disponibles Para Recibir Camiones En Guayabal	Camiones	2
Constante	PUERTOS_RN	Cantidad De Puertos Disponibles Para Recibir Camiones En Rionegro	Camiones	15
Constante	TIEMPO_CARGA	Tiempo Que Tarda En Cargar Los Camiones = Horas	Horas	1
Constante	TIEMPO_DESCARGA	Tiempo Que Tarda En Cargar Los Camiones	Horas	1
Constante	TIEMPO_VIAJE_GUAY_GIRAR	Duración Del Viaje De Guayabal A Girardota	Horas	1
Constante	TIEMPO_VIAJE_GUAY_RN	Duración Del Viaje De Guayabal A Rio Negro	Horas	1
Constante	VIAJE_GIRAR_GUAY	Duración Del Viaje De Girardota A Guayaba	Horas	1

Tabla 6 Flujos del modelo

Tipo de Variable	Nombre de la Variable	Descripción	Unidad de Medida	Formula
Flujo	CAMIONES_ENTRANTES	Flujo que modela la llegada de los camiones a Rio Negro teniendo en cuenta los tiempos de viaje y los diferentes CEDIS desde donde pueden venir los camiones	Camiones/hr	$DELAYPPL(RN_GUAY; VIAJE_GIRAR_GUAY; 0 << CAMIONES/hr >>) + DELAYPPL(GIR_GUAY; VIAJE_GIRAR_GUAY + 1 << hr >>; 0 << CAMIONES/hr >>)$
Flujo	CAMIONES_ENTRANTES_GIR	Flujo que modela la llegada de los camiones a Girardota teniendo en cuenta los tiempos de viaje y los diferentes CEDIS desde donde pueden venir los camiones	Camiones/hr	$\frac{MIN(PUERTOS_GUAY / TIEMPO_CARGA ; CAMIONES_DISPONIBLES / TIEMPO_CARGA ; (INV_GUAYABAL / CAPACIDAD_CAMION) / TIEMPO_CARGA)}{}$
Flujo	CARGA_CAMIONES	calcula cuántos pallets por hora están siendo cargados en camiones, multiplicando la cantidad de camiones que inician carga por la capacidad de cada camión	Camiones/hr	$ENTEROS_SALIDA / TIEMPO_CARGA$
Flujo	CARGA_CAMIONES -RN	calcula cuántos pallets por hora están siendo cargados en camiones, multiplicando la cantidad de camiones que inician carga por la capacidad de cada camión	Camiones	$SALIDA_GUAY$
Flujo	CARGA_CAMIONES_GIR	calcula cuántos pallets por hora están siendo cargados en camiones, multiplicando la cantidad de camiones que inician carga por la capacidad de cada camión	Pallets/hr	$INICIO_CARGA * CAPACIDAD_CAMION$
Flujo	INICIO CARGA	Este Flujo asegura que el sistema solo cargue la cantidad de camiones que puede realmente manejar, dada la limitación más restrictiva entre Infraestructura (puertos), recursos logísticos (camiones) y disponibilidad de inventario.	Pallets/hr	$SALIDA_GUAY * CAPACIDAD_CAMION$
Flujo	INICIO_CARGA_GIR	Este Flujo asegura que el sistema solo cargue la cantidad de camiones que puede realmente manejar, dada la limitación más restrictiva entre Infraestructura (puertos), recursos logísticos (camiones) y disponibilidad de inventario.	Camiones/hr	$DELAYPPL(GUAY_RN; TIEMPO_VIAJE_GUAY_RN; 0 << CAMIONES/hr >>) + DELAYPPL(GIR_RN; TIEMPO_VIAJE_GUAY_RN + 1 << hr >>; 0 << CAMIONES/hr >>)$
Flujo	INICIO_CARGA_RN	Este Flujo asegura que el sistema solo cargue la cantidad de camiones que puede realmente manejar, dada la limitación más restrictiva entre Infraestructura (puertos), recursos logísticos (camiones) y disponibilidad de inventario.	Camiones/hr	$DELAYPPL(CAMIONES_ENTRANTES; Tiempo_carga_RN; 0 << CAMIONES/hr >>)$
Flujo	PRIMER_VIAJE	Contador acumulativo que registra la cantidad total de camiones despachados desde Rio Negro, calculado a partir del flujo SALIDA_RN	Camiones/hr	$\frac{MIN(PUERTOS_RN / TIEMPO_CARGA - Copy ; CAMIONES_DISPONIBLES - RN / TIEMPO_CARGA - Copy ; (INV_RN / CAPACIDAD_CAMION - Copy) / TIEMPO_CARGA - Copy)}{}$
Flujo	PRODUCCION_GIR	Flujo que modela el ingreso de pallets al inventario de Rionegro	Camiones/hr	$ENTEROS_SALIDA - RN / TIEMPO_CARGA - Copy$
Flujo	PRODUCCION_RN	Flujo que modela el ingreso de pallets al inventario de Rionegro	Camiones/hr	$SALIDA_RN$
Flujo	REGRESO_CAMIONES	Flujo que modela la llegada de los camiones a Guayabal teniendo en cuenta los tiempos de viaje y los diferentes CEDIS desde donde pueden venir los camiones	Pallets/hr	$RN_GIRAR * 24 << pallets/CAMIONES >>$
Flujo	REGRESO_CAMIONES -RN	Flujo que modela el proceso de descargar los camiones que arriban al CEDI	Pallets/hr	$(CAPACIDAD_CAMION - Copy * REGRESO_CAMIONES - RN) + INVENTARIO_REAL$
Flujo	REGRESO_CAMIONES_GIR	Flujo que modela el proceso de descargar los camiones que arriban al CEDI	Pallets/hr	$INICIO_CARGA_RN * CAPACIDAD_CAMION - Copy$
Flujo	RN_GIR	Flujo que calcula la cantidad de pallets enviados por hora desde Rio Negro a Girardota, multiplicando el número de camiones por su capacidad de carga (24 pallets por camión).	Pallets/hr	$SALIDA_RN * CAPACIDAD_CAMION - Copy$
Flujo	SALIDA_CAMIONES_GIR	calcula cuántos pallets por hora están siendo cargados en camiones, multiplicando la cantidad de camiones que inician carga por la capacidad de cada camión	Pallets/hr	$CAPACIDAD_CAMION - Copy * GIR_RN$
Flujo	SALIDA_CAMIONES_GUAY	Calcula la cantidad de pallets que salen por hora desde Guayabal, multiplicando el número de camiones que salen por la capacidad de carga de cada camión. Representa el flujo de salida de producto desde esta estación logística.	Camiones/hr	$DELAYPPL(GUAY_GIRAR; TIEMPO_VIAJE_GUAY_GIRA R; 0 << CAMIONES/hr >>) + DELAYPPL(RN_GIRAR; TIEMPO_VIAJE_GUAY_GIRAR + 1 << hr >>; 0 << CAMIONES/hr >>)$
Flujo	SALIDA_CAMIONES_RN	Calcula la cantidad de pallets que salen por hora desde Guayabal, multiplicando el número de camiones que salen por la capacidad de carga de cada camión. Representa el flujo de salida de producto desde esta estación logística.	Camiones/hr	$DELAYPPL(CAMIONES_ENTRANTES_GIR; Tiempo_carga_RN - Copy; 0 << CAMIONES/hr >>)$
Flujo	SALIDA_GIRAR	Este flujo modela una tasa de salida en unidades de camiones por hora, reflejando la eficiencia operativa de carga en función del tiempo requerido.	Camiones/hr	$\frac{MIN(PUERTOS_GIR / TIEMPO_CARGA_GIR ; CAMIONES_DISPONIBLES_GIR / TIEMPO_CARGA_GIR ; (INV_GIRAR / CAPACIDAD_CAMION - Copy 2) / TIEMPO_CARGA_GIR)}{}$
Flujo	SALIDA_GUAY	Este flujo modela una tasa de salida en unidades de camiones por hora, reflejando la eficiencia operativa de carga en función del tiempo requerido.	Camiones/hr	$ENTEROS_SALIDA_GIR / TIEMPO_CARGA_GIR$
Flujo	SALIDA_RN	Este flujo modela una tasa de salida en unidades de camiones por hora, reflejando la eficiencia operativa de carga en función del tiempo requerido.	Pallets/hr	$(CAPACIDAD_CAMION - Copy 2 * REGRESO_CAMIONES_GIR) + INV_REAL_2$
Flujo	TASA_1	Flujo que modela la cantidad de Pallets por hora que llegan a Rio Negro desde Girardota	Pallets/hr	$INICIO_CARGA_GIR * CAPACIDAD_CAMION - Copy 2$
Flujo	TASA_2	Flujo que modela la cantidad de Pallets por hora que llegan a Rio Negro desde Girardota	Pallets/hr	$SALIDA_GIRAR * CAPACIDAD_CAMION - Copy 2$
Flujo	VIAJES	Contador acumulativo que registra la cantidad total de camiones despachados desde Guayabal, calculado a partir del flujo SALIDA_GUAY.	Pallets/hr	$CAPACIDAD_CAMION - Copy 2 * RN_GIRAR$

Tabla 7 Niveles del Modelo

Tipo de Variable	Nombre de la Variable	Descripción	Unidad de Medida
Nivel	#VIAJE	Numero de viajes realizados desde Rio Negro	Camiones
Nivel	CAMIONES_CARGANDO	Camiones en proceso de carga en Guayabal	Camiones
Nivel	CAMIONES_CARGANDO_GIR	Camiones en proceso de carga en Girardota	Camiones
Nivel	CAMIONES_CARGANDO_RN	Camiones en proceso de carga en Rio Negro	Pallets
Nivel	CAMIONES_DESCARGANDO_GIRAR	Camiones que arriban al puerto de Girardota	Pallets
Nivel	CAMIONES_DESCARGANDO_RN	Camiones que arriban al puerto de Rio Negro	Camiones
Nivel	CAMIONES_DISPONIBLES	Camiones disponibles para ser cargados en Guayabal	Camiones
Nivel	CAMIONES_DISPONIBLES_GIR	Camiones descargados a la espera de ser utilizados en el puerto de Girardota	Camiones
Nivel	CAMIONES_DISPONIBLES_RN	Camiones descargados a la espera de ser utilizados en el puerto de Rio Negro	Camiones
Nivel	CONTADOR	Numero de viajes realizados desde Guayabal	Pallets
Nivel	INV_ENVIADO	Pallets enviados a Girardota desde Rio Negro	Pallets
Nivel	INV_ENVIADO_RN	Pallets enviados a Rio Negro desde Girardota	Pallets
Nivel	INV_GIRAR	Inventario de Girardota	Pallets
Nivel	INV_GUAYABAL	Inventario de Guayabal	Camiones
Nivel	INV_RN	Inventario de Rio Negro	Camiones
Nivel	META_GIR	Meta de envío de Pallets entre Girardota y Rio Negro	Camiones
Nivel	META_RN	Meta de envío de Pallets entre Rio Negro y Girardota	Pallets
Nivel	PALLETS_CAMIONES_GIR	Cantidad de Pallets por camiones	Pallets
Nivel	PALLETS_CAMIONES_GUAY	Cantidad de Pallets por camiones	Pallets
Nivel	PALLETS_CAMIONES_RN	Cantidad de Pallets por camiones	Pallets

5. Análisis de resultados

Con el fin de identificar intervenciones efectivas para optimizar el flujo logístico entre los CEDIs de Guayabal, Rionegro y Girardota, se realizó una evaluación comparativa de cuatro escenarios operativos. La comparación se efectuó empleando como variable de desempeño el indicador horas totales del proceso y el comportamiento temporal del inventario en cada CEDI respecto a sus metas operativas.

El análisis integra los resultados de simulación bajo formulaciones estandarizadas, buscando establecer el impacto estructural de cada política sobre la reducción de tiempos, la estabilidad del sistema y la eliminación del cuello de botella principal.

2. Metodología de comparación

Para cada escenario se ejecutó una simulación de dos días operativos, evaluándose:

1. Tiempo total del proceso, medido desde el inicio hasta la estabilización del inventario en todos los CEDIs.
2. Comportamiento del inventario (stock dinámico) en Guayabal, Rionegro y Girardota frente a sus respectivas metas.
3. Comportamientos críticos (congestión en Guayabal, retrasos en retorno de flota, asincronía entre nodos).

Cada curva fue interpretada contrastando la velocidad de abatimiento del inventario en Guayabal, identificado en el escenario base como el cuello de botella estructural.

Resultados

Escenario Base (operación sin cambios)

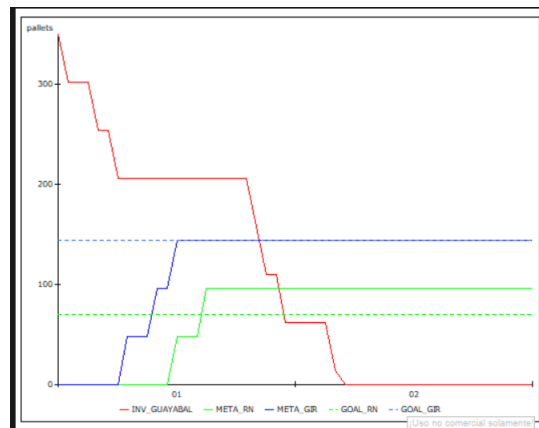


Figura 10 Resultados de corrida del escenario base

Los resultados del escenario base evidencian un comportamiento altamente restrictivo en Guayabal. El inventario se reduce de manera lenta y presenta periodos prolongados por encima de la meta operativa, alcanzando su estabilización hasta aproximadamente 29 horas después del inicio del proceso. Rionegro y Girardota se estabilizan antes, lo que confirma que Guayabal concentra el cuello de botella principal.

En términos sistémicos, este escenario sirve como línea base para analizar las mejoras relativas introducidas por las políticas posteriores.

Política 1: Incorporación de dos camiones adicionales en Rionegro

La adición de dos camiones en Rionegro genera una mejora moderada en el flujo de retorno hacia Guayabal. Las curvas muestran una recuperación más rápida del inventario de Rionegro y una reducción parcial en los tiempos de espera previos al reinicio de ciclos productivos.

El tiempo total del proceso se reduce aproximadamente de 29 horas a 22 horas, lo que representa una disminución del 24.1 %. Aunque la mejora es apreciable, la congestión inicial en Guayabal persiste, indicando que la limitación primaria no se encontraba en la disponibilidad de flota en Rionegro

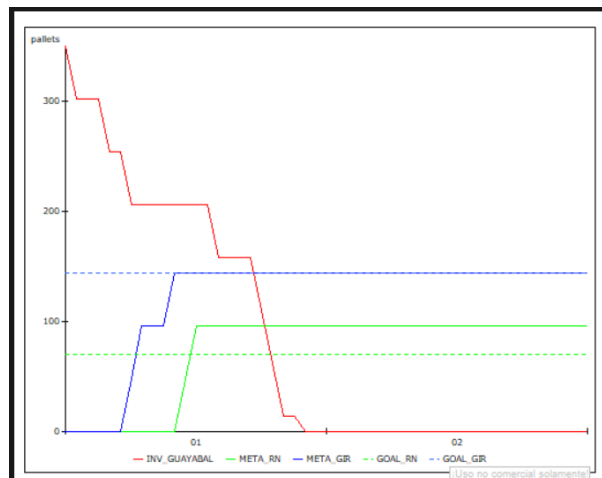


Figura 11 Resultados de la corrida aplicando la política numero 1

Política 2: Dos camiones y dos puertos adicionales en Guayabal

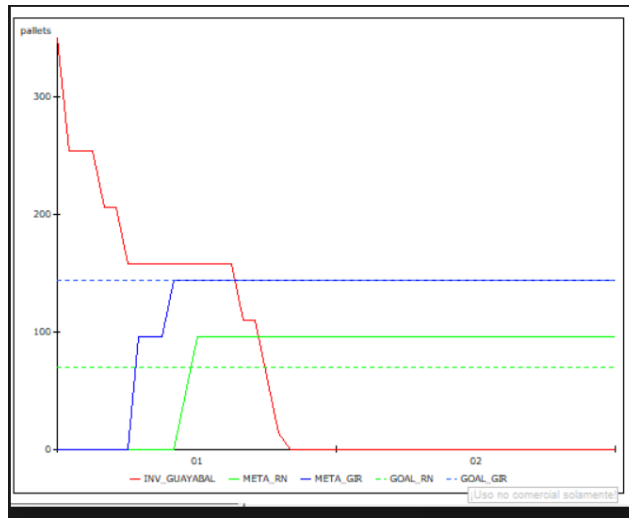


Figura 12 Resultados de la corrida aplicando la política numero 2

Este escenario interviene directamente sobre el cuello de botella del sistema. Las simulaciones evidencian una reducción del tiempo requerido para evacuar el inventario acumulado en Guayabal, pasando de 29 horas en el escenario base a 21 horas con la política propuesta, lo que equivale a una disminución del 27,5% en el tiempo total del proceso. En términos dinámicos, la acumulación en Guayabal se reduce con mayor rapidez y el sistema presenta menor persistencia de inventario en cola, mejorando la sincronización entre nodos y alcanzando la estabilización en un horizonte temporal más corto. Aunque esta alternativa implica una mayor inversión, es la política con mayor impacto cuantificable sobre la eficiencia global del sistema.

3.4 Política 3: Prioridad dinámica al CEDI más rezagado

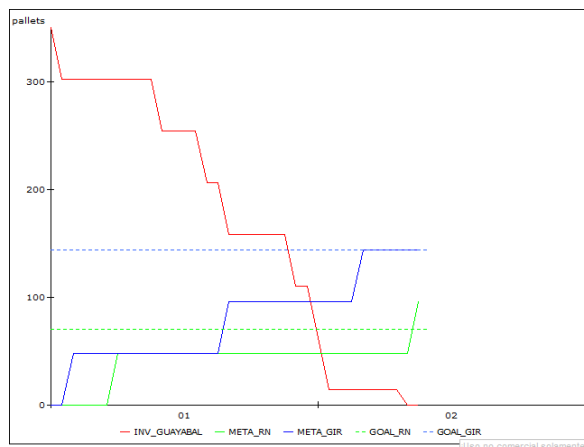


Figura 13 Resultados de la corrida aplicando la política numero 3

La tercera política evaluada consistió en implementar una asignación dinámica basada en la identificación continua del CEDI con mayor nivel de rezago, de manera que los recursos logísticos disponibles (camiones y secuencia de despacho) respondieran de forma prioritaria al punto más crítico del sistema. Los resultados muestran que, bajo esta formulación aislada, la estrategia no mejora el desempeño operativo; por el contrario, el tiempo total del proceso se incrementa de manera significativa, pasando de 29 horas en el escenario base a aproximadamente 33 horas.

Este aumento evidencia que una lógica estrictamente reactiva de “seguir al rezago” introduce oscilaciones estructurales propias de los sistemas dinámicos, en las que el despacho se concentra excesivamente en un único nodo mientras se descuidan otros puntos de la red. Como resultado, se generan ciclos de sobrecompensación y subabastecimiento que deterioran la estabilidad del flujo logístico, reducen la eficiencia global del uso de la flota y aumentan tanto los tiempos medios como los extremos del proceso.

No obstante, el análisis también permitió identificar que esta pérdida de efectividad no se debe a la política de priorización en sí misma, sino a su aplicación sin un refuerzo adecuado de capacidad. Al combinar esta política con una intervención adicional —específicamente, la incorporación de dos camiones adicionales al sistema— se observa una mejora sustancial en el desempeño operativo, reduciendo los tiempos totales y estabilizando el comportamiento del sistema a un tiempo promedio de 26 horas para completar el ciclo. Esto indica que la asignación dinámica puede convertirse en una estrategia efectiva cuando se encuentra respaldada por una capacidad logística suficiente que permita absorber la variabilidad inducida por las decisiones adaptativas.

En consecuencia, se concluye que las políticas de priorización dinámica deben implementarse como estrategias híbridas, complementadas con incrementos controlados de capacidad o con reglas de suavizamiento, tales como umbrales mínimos de inventario o ventanas operativas, para evitar decisiones abruptas que afecten la sincronización general del sistema. Este resultado refuerza la importancia de diseñar políticas integradas que equilibren inteligencia operativa y capacidad física dentro de redes logísticas con múltiples nodos interdependientes.

5. Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

El desarrollo del modelo de Dinámica de Sistemas permitió analizar de manera integral el comportamiento de la red logística conformada por los CEDIs de grupo Essity evidenciando las interdependencias operativas y los factores estructurales que determinan el desempeño global del sistema. A partir del escenario base, se identificó que el CEDI de Guayabal constituye el principal cuello de botella operativo, al concentrar la mayor generación de carga y presentar restricciones significativas en capacidad de despacho, lo que impacta directamente el tiempo total del proceso logístico.

La evaluación de las políticas planteadas demostró que las intervenciones orientadas al nodo crítico generan los mayores beneficios sistémicos. En particular, la ampliación simultánea de flota y puertos de carga en Guayabal junto con una priorización de produjo la reducción más significativa en los tiempos totales del proceso, confirmando que la eliminación de restricciones estructurales en los puntos dominantes de la red es un factor clave para mejorar la eficiencia logística global.

La incorporación de camiones adicionales en el CEDI de Rionegro evidenció mejoras moderadas en el desempeño del sistema, reflejadas principalmente en una mayor fluidez del retorno de flota y una ligera reducción en los tiempos de ciclo. No obstante, estos beneficios resultaron limitados frente a las restricciones persistentes en Guayabal, lo que refuerza la conclusión de que las mejoras en nodos secundarios no son suficientes cuando el nodo principal continúa operando bajo condiciones de saturación.

La política de asignación dinámica basada exclusivamente en la priorización del CEDI más rezagado mostró resultados contraproducentes, incrementando el tiempo total del proceso de 29 a aproximadamente 33 horas. Este comportamiento se explica por la generación de oscilaciones propias de los sistemas dinámicos complejos, donde la concentración excesiva de recursos en un solo nodo provoca desbalances temporales, pérdida de sincronización y sobrecompensaciones operativas. Sin embargo, al combinar esta política con un refuerzo adicional de capacidad, se

observó una mejora en el desempeño, lo que evidencia que las políticas dinámicas requieren respaldo estructural para ser efectivas.

En términos generales, el modelo permitió confirmar que la eficiencia logística no depende únicamente del incremento de recursos, sino del diseño coherente de políticas que integren capacidad física, reglas de decisión y mecanismos de retroalimentación basados en desempeño. De esta manera, el estudio aporta una visión sistémica que trasciende el análisis aislado de cada CEDI y resalta la importancia de la coordinación global de la red logística.

Recomendaciones

Con base en los resultados obtenidos, se recomienda priorizar intervenciones estructurales en el CEDI de Guayabal, dado su rol dominante como cuello de botella del sistema. En escenarios donde se disponga de recursos de inversión, la ampliación de capacidad en este nodo, ya sea mediante el aumento de flota, la habilitación de nuevos puertos de carga o una combinación de ambos, constituye la estrategia más efectiva para reducir los tiempos totales y mejorar la estabilidad operativa del sistema.

Asimismo, se recomienda que las políticas de asignación dinámica no se implementen de manera aislada. Estas deben complementarse con incrementos controlados de capacidad o con reglas adicionales de suavizamiento, tales como umbrales mínimos de inventario, límites de despacho por nodo o ventanas operativas, con el fin de evitar comportamientos oscilatorios que deterioren el desempeño global de la red.

Desde una perspectiva de costo–beneficio, se sugiere evaluar políticas híbridas que integren inteligencia operativa y capacidad física, dado que estas demostraron ser más robustas frente a la variabilidad del sistema y más eficientes en el uso de los recursos disponibles. Este enfoque permite balancear flexibilidad operativa y estabilidad estructural, reduciendo el riesgo de decisiones reactivas subóptimas.

Finalmente, se recomienda que futuros trabajos amplíen el modelo incorporando elementos adicionales como variabilidad estocástica en la demanda, costos operativos, restricciones laborales y métricas de sostenibilidad. La inclusión de estos factores permitiría enriquecer el análisis y

aumentar la aplicabilidad del modelo como herramienta de apoyo a la toma de decisiones estratégicas en contextos logísticos reales.

Referencias

- Angerhofer, B. J., & Angelides, M. C. (2000). *System dynamics modelling in supply chain management: Research review*. En J. A. Joines, R. R. Barton, K. Kang, & P. A. Fishwick (Eds.), *Proceedings of the 32nd Winter Simulation Conference* (pp. 324–351). IEEE. <https://doi.org/10.1109/WSC.2000.899737>
- Aracil, J. (1995). *Dinámica de sistemas*. Isdefe
- Bertsekas, D. P. (2005). *Dynamic programming and optimal control* (Vol. 1, 3rd ed.). Athena Scientific.
- Castrillón-Ocampo, J. (2025). *Trazabilidad en la gestión de operaciones y la cadena de abastecimiento de los planes colectivos colombianos enmarcados en la responsabilidad extendida del productor* [Tesis de maestría]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
- Chopra, S., & Meindl, P. (2016). *Supply chain management: Strategy, planning, and operation* (6th ed.). Pearson Education.
- Forrester, J. W. (1961). *Industrial dynamics*. MIT Press.
- Georgiadis, P., Vlachos, D., & Iakovou, E. (2005). *A system dynamics modeling framework for the strategic supply chain management of food chains*. *Journal of Food Engineering*, 70(3), 351–364. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.06.030>

- Grupo Familia. (s. f.). *Somos Grupo Familia*. Recuperado el 30 de julio de 2025, de <https://www.grupofamilia.com/somos-grupo-familia/>
- Huang, K., Chen, W.-T., Wu, Y.-C., & Chen, J.-R. (2025). *A stochastic programming approach to the location of distribution centers for multinational enterprises under demand uncertainty*. *Supply Chain Analytics*, 11, Article 100147. <https://doi.org/10.1016/j.sca.2025.100147>
- P&M. (2025, mayo 5). *Grupo Familia ahora es Essity y presenta nuevo centro de distribución en Colombia*. <https://www.revistapym.com.co/articulos/comunicacion/85650/grupo-familia-ahora-es-essity-y-presenta-nuevo-centro-de-distribucion-en-colombia>
- Rodrigue, J. P. (2024). *La geografía de los sistemas de transporte*. Texas A&M University at Galveston. <https://transportgeography.org>
- Shikhzadeh, M. A., Motazedian, R., Moradzahipour, M., & Mirzaei, M. G. (2012). *Application of system dynamics in public policy*. *International Journal of Advanced Studies in Humanities and Social Science*, 1(3), 201–208. https://www.ijashss.com/article_83368_d7d999c0228c5a5924fd72d1f37e2396.pdf
- Sterman, J. D. (2000). *Business dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world*. McGraw-Hill Higher Education. <https://www.mheducation.com/highered/product/business-dynamics-sterman.html>

Anexos

Anexo 1. Poster

Departamento de Ingeniería Industrial

Optimización del transporte entre centros de distribución mediante dinámica de sistemas: un estudio en el Valle de Aburrá



UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA
Facultad de Ingeniería

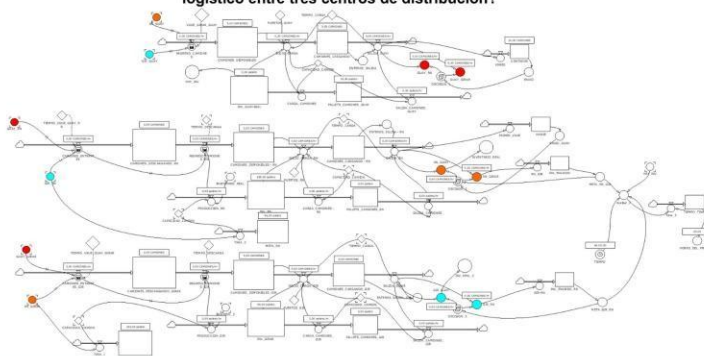
PRACTICANTE: Eduardo Polanco Rodríguez
ASESORES: Juan Sebastian Jaen Posada

PROGRAMA: Ingeniería Industrial
MODALIDAD DE PRÁCTICA: Trabajo De Grado

Introducción

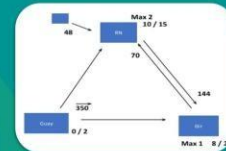
En la operación de transporte entre los CEDIS de Guayabal, Rionegro y Girardota del grupo Essity, las decisiones de asignación de flota y los tiempos operativos generan congestión y retrasos que afectan el tiempo total del ciclo logístico. A partir de esta necesidad se plantea la pregunta:

¿Cómo afectan las políticas de asignación de flota y los tiempos operativos al tiempo total del ciclo logístico entre tres centros de distribución?



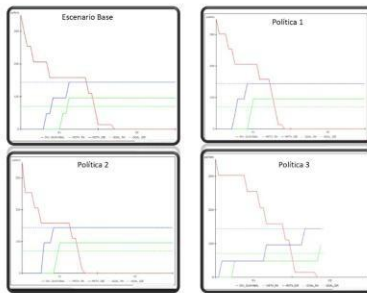
Objetivos

- ✓ Evaluar el impacto de políticas de asignación de flota y tiempos operativos sobre el tiempo total del ciclo logístico entre CEDIS, mediante un modelo de Dinámica de Sistemas
- ✓ Identificar variables, parámetros y restricciones operativas necesarias para formular el modelo de transporte inter-CEDIS
- ✓ Construir y validar un modelo de simulación en Powersim que represente el comportamiento del transporte entre los tres CEDIS



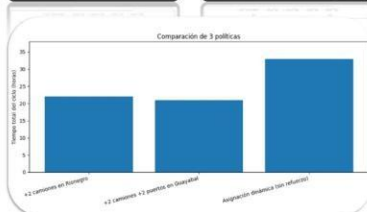
Metodología

Se realizó un estudio cuantitativo aplicado con información operativa real para caracterizar la red entre CEDIS. Con estos insumos se construyó un modelo de Dinámica de Sistemas en Powersim, se verificó su coherencia y se simularon políticas operativas. El desempeño se evaluó con el tiempo total del ciclo (horas) y la estabilización del inventario en el sistema.



Resultados

Guayabal se identificó como el principal cuello de botella (≈29 h). La política de +2 camiones en Rionegro redujo el ciclo a ≈22 h (-24,1%), y la mejor intervención fue +2 camiones +2 puertos en Guayabal, logrando ≈21 h (-27,5%). La priorización dinámica por sí sola pierde efectividad si no se refuerza la capacidad; al combinarla con +2 camiones, el sistema mejora y se estabiliza en ≈26 h, mostrando que es útil cuando está respaldada por recursos suficientes.



Conclusiones

- ✓ El modelo de Dinámica de Sistemas permitió entender el desempeño global de la red logística de Essity y sus interdependencias operativas.
- ✓ En el escenario base, Guayabal se confirmó como el cuello de botella que determina el tiempo total del proceso (≈29 h).
- ✓ Las intervenciones en el nodo crítico generan el mayor impacto: +2 camiones y +2 puertos en Guayabal logra la mejor reducción del tiempo total (≈21 h, -27,5%).
- ✓ La asignación dinámica sin refuerzo fue contraproducente (≈33 h), pero puede ser efectiva si se respalda con capacidad adicional, evitando desbalances y oscilaciones.

DATOS DE CONTACTO DEL AUTOR:

+57 3147774621

+57 3147774621

Eduardo.polanco@udea.edu.co

EDPOLA25

<https://www.linkedin.com/in/eduardo-polanco-rodriguez-41782a170/>

