

Modelamiento de los Procesos Logísticos de una Empresa de Productos Lácteos en la Región Caribe

Modeling of the Logistics Processes of a Milk Products Manufacturer in the Caribbean Region

*Miguel Alzate Jiménez**
*Medardo Gonzalez Conde***
*Leidys Velaides Russo****

RESUMEN

Es este artículo se presenta el diseño de un modelo de simulación de eventos discretos aplicado a la logística de una empresa de productos lácteos de la Región Caribe Colombiana, el cual, al integrarse con el uso de modelos de optimización, funciona como una herramienta para la toma de decisiones en la configuración de los procesos y la programación de las operaciones.

Para el desarrollo del modelo se utilizó la teoría sobre simulación y el empleo del software Flexsim para el análisis estadístico de las variables, al igual que la estructuración del entorno, los recursos y el flujo de entidades; y la evaluación de las salidas, obteniendo a su vez una animación en tres dimensiones.

Con el estudio se plantean opciones de mejora a partir de las capacidades actuales y el manejo de las relaciones causa-efecto que se obtienen del modelo, a través del cual se prueban alternativas que buscan mejores resultados globales.

Palabras Claves: Flexsim, logística, modelo de optimización, simulación, toma de decisiones.

ABSTRACT

In this paper, the design of a model of discrete event simulation applied to the logistics of a milk products manufacturer in the Colombian Caribbean region is presented, which integrates the use of optimization models, giving as a result a complete tool for decision making for configuration of processes and operations programming.

In order to develop this model, theory of simulation and the use of Flexsim software was needed to perform a statistical analysis of the variables as well as to structure the environment, resources and the flow of entities, and evaluation of outputs, obtaining in turn a three-dimensional animation.

The study presents improvement options that arise from current capabilities and managing of the cause-effect relations obtained from the model, through which alternatives looking for better overall results are tested.

Key Words: Bioimpedance, spectroscopy, instrumentation amplifiers, Matlab, Protocol.

**Ingeniero Industrial de la Universidad del Atlántico. Correo electrónico: malzate@gmail.com*

***Ingeniero Industrial. Magíster en Administración de Empresas Universidad del Norte. Especialista en Administración Financiera. Especialista en Gestión Industrial. Consultor empresarial. Docente universitario. Correo electrónico: mgonzales@uniatlantico.edu.co*

****Ingeniera Industrial de la Universidad del Atlántico. Correo electrónico: lvelarus@gmail.com*

1. INTRODUCCIÓN

La logística es uno de los factores más importantes para la competitividad del sector lácteo [1] y, a su vez, es un campo en el que las empresas de este tipo se enfrentan a diversos retos: el manejo de un producto altamente perecedero, la cadena de frío, la competencia por la materia prima, la vigilancia de los activos retornables, los cambios estacionales, toda clase de clientes y una gran variedad de referencias, por mencionar sólo algunos desafíos. Quien logra liderar el mercado es aquel que sabe enfrentar estos retos, convirtiendo las soluciones en factores diferenciadores.

Por lo anterior, la solución de problemas logísticos en este sector se ha convertido en un caso de aplicación importante de las herramientas de la Ingeniería Industrial, de las cuales, para este estudio, se ha seleccionado la simulación de eventos discretos, por ser una metodología de apoyo a la toma de decisiones que permite abarcar las diferentes etapas de la logística, considera la complejidad de los procesos (aleatoriedad e interdependencia) y arroja resultados aceptables con una baja inversión, por no involucrar pruebas en la vida real [2].

Este estudio abarca dos necesidades focales: mejoras en el proceso de recogida de leche cruda y soporte a la toma de decisiones sobre activos retornables. El problema de configuración y programación de rutas para recolección en los centros de acopio lleva a la consolidación de los esquemas de abastecimiento de leche cruda, considerando las restricciones de materia prima, el uso eficiente de los recursos, los cambios estacionales, las largas distancias, y la importancia del tiempo para la calidad de la leche.

Con relación a los activos retornables, estos son necesarios para el movimiento y almacenamiento de los productos finales, por lo que una cantidad menor a la requerida genera paradas en los procesos, imposibilidad de realizar cuarentena, almacenamiento y despacho hacia los diferentes puntos, por lo cual es importante analizar y determinar cantidades adecuadas para que no exista desabastecimiento o sobredimensionamiento, ya que, por otro lado, son activos que requieren el desembolso de recursos monetarios.

2. MODELO CONCEPTUAL DEL SISTEMA LOGÍSTICO ESTUDIADO

Antes del diseño del modelo que busca simular las operaciones logísticas, se establece la lógica de constructo con la que se determinan las relaciones estructurales que conformaron el sistema real, definiendo las entidades, recursos y flujos [3].

De esta manera se obtuvo la caracterización del sistema, una representación estática (ver Figura 1) y unos supuestos que permitieron que el modelo fuese adecuado a la realidad.

El sistema mostrado en la Figura 1 inicia con el acopio de leche en centros que lo almacenan y envían la alerta de la cantidad acopiada a la planta. Se tiene un tiempo límite de 48 horas para el transporte a planta [4], pero a medida que pasa el tiempo, la calidad de la leche se afecta, por lo que la planeación se realiza para que se envíe toda la leche acopiada en el menor tiempo posible.

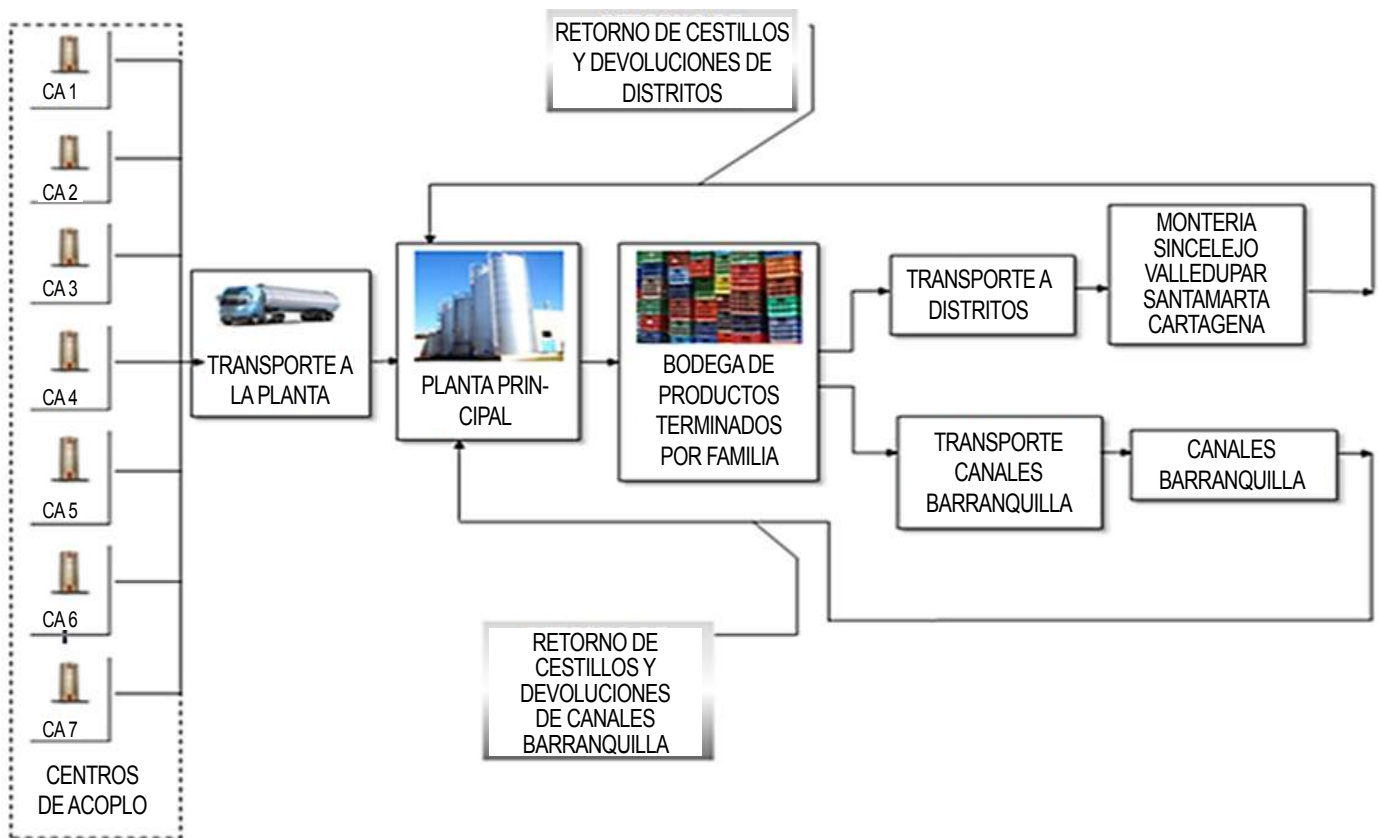


Figura 1. Modelo conceptual.

Fuente: Elaboración de los autores.

Se asignan las rutas de manera intuitiva, de acuerdo a lo acopiado y a los camiones cisternas disponibles. El 85% de la leche se acopia a primera hora y la operación de recogida toma 24 horas, un camión cisterna puede hacer varios viajes en un día, en los cuales se les asigna un único destino y regresan a la planta. La recepción cuenta con dos servidores, con capacidad de descarga de 11.500 L/h. Luego el camión es lavado.

La producción, almacenamiento y transporte de productos terminados son cajas negras que entregan unos datos de uso de materia prima y cantidad de productos finales obtenidos, almacenados y transportados. El transporte se toma como un continuo.

La producción posee restricción de materia prima y no existen restricciones de demanda, todo lo que se produce se vende.

Las referencias se trasladan a los cestillos para su almacenamiento y cuarentena durante tres días, antes de ser repartidos a los canales de distribución.

Por último, se envían camiones para la recogida de cestillos que se han acumulado en los distintos canales durante los días anteriores.

2.1. Supuestos del modelo

- a) El total de la leche se acopia a primera hora del día.
- b) Los tiempos de traslado de un camión a cada centro no dependen de su peso.
- c) Sólo se incluye el acopio de los principales centros.
- d) La planta posee la capacidad para almacenar toda la leche que se recepciona.
- e) El tiempo de lavado de los camiones no depende de la capacidad del mismo.
- f) Toda la leche que se acopia se procesa.
- g) Se tiene capacidad de almacenamiento para la cuarentena y toda la producción.
- h) Siempre hay camiones disponibles para el traslado de los productos a los destinos.
- i) Los cestillos tienen una medida estándar.
- h) Todos los cestillos con productos terminados son distribuidos.

3. FORMULACIÓN DEL MODELO

Para formular el modelo con base en lo establecido por M. Azarang y E. García [5], se dividió en dos partes con el fin de simplificar el modelo para trabajar bajo los parámetros de capacidad del software.

3.1. Parte I– Evacuación de leche cruda.

Objetivo. Simular el acopio de leche, el flujo de camiones cisterna y la descarga de leche cruda en planta.

Medidas de desempeño. Los indicadores de interés para la administración fueron:

- % leche recogida: Cantidad de leche evacuada sobre el total acopiado.
- Cantidad de leche sin evacuar en los centros de acopio: en cientos de litros, sumatoria de la leche que queda en los centros luego de un día de recolección.
- % ocupación de las cisternas: promedio de la cantidad de leche transportada sobre la capacidad máxima de las cisternas programadas.
- Tiempo total de recogida: duración de la operación en horas, desde que sale el primer camión, hasta que el último es completamente descargado en planta.

- Tiempo de llegada de la leche a la planta: horas utilizadas para el traslado de cien litros de leche desde que llega al centro de acopio hasta que pasa a la planta.
- Tiempo promedio en cola para la evacuación de leche: horas promedio en que un camión debe esperar para descargar la leche en planta.
- Tiempo en cola para evacuación: máxima espera de un camión para la descarga.
- Capacidad necesaria para almacenar la leche sin evacuar: máxima cantidad de leche que quedó sin evacuar.

Variables de decisión. Se determinan las magnitudes de las siguientes variables:

- a) Número de camiones cisterna por aforo para la evacuación de leche: Con los resultados se define la flota de camiones para la recogida de leche.
- b) Tasa de evacuación de la leche en la plataforma de recepción de la planta: velocidad de la maquinaria para descargar toda la cisterna.
- c) Número de servidores para la evacuación de la leche en la planta: Se evalúa el efecto de la adición y eliminación de un servidor en la recepción.

Restricciones.

- a) Se cuenta con tres turnos diarios, de 8 horas cada uno.
- b) Los camiones cisterna deben transportar como mínimo el 60% de su capacidad.

Variables no controlables.

- a) Leche acopiada: Resultado de funciones de probabilidad.
- b) Tiempo de viaje de los camiones para el transporte de leche cruda: Las horas de traslado responden a una distribución de probabilidad.

3.2. Parte II - Movimiento de cestillos con productos terminados

Objetivo. Simular las entregas de producto terminado a los centros de distribución, la cuarentena, y el movimiento de cestillos en el sistema.

Medidas de desempeño. Son de interés para la empresa:

- a) Tiempo acumulado en que se para la producción por falta de cestillos: Total de horas acumuladas en que paró el proceso.

b) Cantidad máxima de cestillos en cuarentena: con ello se conoce qué capacidad de almacenamiento será necesaria para la cuarentena de todos los productos.

Variables de decisión. Se determinan la magnitud de las siguientes variables:

a) Cantidad de cestillos: total de cestillos para el traslado y almacenamiento de los productos dentro y fuera de la planta.

b) Días para la liberación de productos terminados: Se evalúa cómo se comporta el sistema cuando se realiza una cuarentena de 3 días.

Variables no controlables.

a) Cantidad de leche utilizada para producir cada familia de productos: está definida en porcentajes, y depende de la receta determinada y la programación de producción.

b) Cestillos por familia: Con los resultados de la primera parte se obtiene la cantidad de cestillos obtenidos de acuerdo a los litros de leche destinados a cada familia.

c) Cantidad de cestillos enviados a cada canal por familia: se determinan con la distribución de probabilidad obtenida a partir de los históricos de envío a cada canal.

d) Desperdicio: cantidad de leche que se pierde en el proceso de producción.

e) Productos no conforme: responde a una distribución de probabilidad empírica, entregada por el área de calidad.

4. DESARROLLO DEL MODELO

A través de *Expertfit* de *Flexsim* se obtuvieron las distribuciones de probabilidad de las cantidades acopiadas. Las distribuciones estimadas permitieron generar los escenarios de la manera en que el sistema se desempeña, a partir de la corriente de números aleatorios de *Flexsim*.

La figura 2 muestra la evaluación de los modelos candidatos para uno de los centros de acopio, la cual concluye que la mejor distribución es la gamma por tener el mayor puntaje. A la derecha se puede ver el ajuste del modelo con los datos reales.

Cada corrida representa un día y las entidades están dadas primero en litros de leche y luego en cestillos por familia. De manera general, estos fueron los pasos para la construcción del modelo:

a) Recolección de leche en el centro de acopio: Con un *UserEvent* se generó la cantidad de leche que llega a un silo, representado por medio de una cola con un patrón de comportamiento que obedece a la distribución de probabilidad del *Expertfit*.

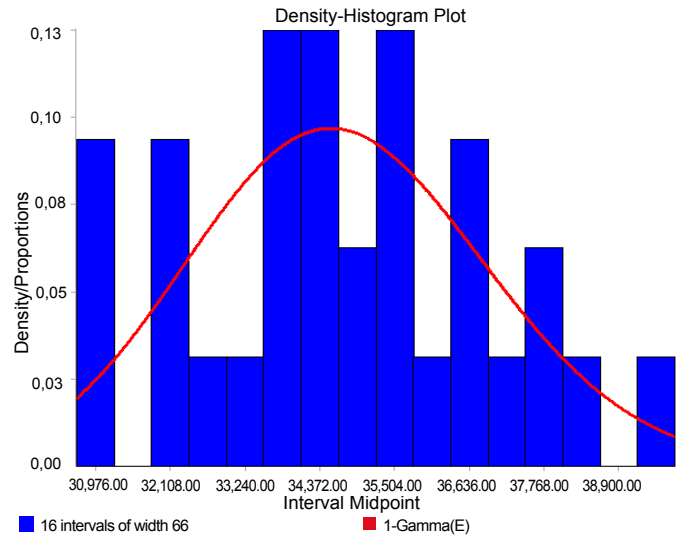
b) Camiones disponibles: Con un *UserEvent* se configuró el *Source* para que generara uno de

los arreglos de la tabla del modelo, la cual tiene la forma de la Tabla 1.

Relative Evaluation of Candidate Models

Model	Relative Score	Parameters
1-Gamma(E)	89.17	Location 3,016.98831
		Scale 161.14301
		Shape 196.66269
2 - R a n d o m Walk	85.83	Location 0.00000
		Scale 2.89345 e -5
		Shape 0.00680
3-Weibull(E)	85.83	Location 27,828.70162
		Scale 7,670.08600
		Shape 3.37070

31 models are defined with scores between 1.67 and 89.17



Absolute Evaluation of Model 1 - Gamma(E)
 Evaluation: Good
 Suggestion: Additional evaluations using comparisons Tab might be informative. See Help for more information.

Figura 2. Evaluación relativa de los modelos candidatos.

Fuente: Elaboración de los autores en software Flexsim.

Tabla 1. Configuración de camiones (capacidad en cientos de litros).

Conf. 1	Conf. 2	Conf. 3	Conf. 4	Conf. 5	Conf. 6
50	50	50	70	70	50
70	70	70	100	85	70
85	85	85	100	85	85
100	85	100	115	100	100
100	100	100	180	100	100
115	100	115	330	115	115
180	115	115	330	115	115
330	115	180	330	115	180
330	115	180		180	180
330	180	330		180	330
	180	330		210	330
	330	330		210	330
	330			330	
				330	

Fuente: Elaboración de los autores.

c) Programa de recogida de leche: En este punto se solucionó una de las problemáticas del sistema, la cual consistía en que el área de logística no contaba con un procedimiento estándar para la planificación de las rutas.

El modelo de simulación por sí sólo no permitía realizar una planeación de rutas ya que esta es una herramienta de evaluación y no de búsqueda de una configuración que acercara los resultados al óptimo [6].

De esta manera se recurrió a *Premium Solver for Education*, disponible para Excel, el cual permitió tomar decisiones [7] evaluando tanto porcentaje de leche recogida, cantidad de leche que queda sin acopiar, como el porcentaje de utilización de las cisternas y los diferentes tiempos críticos de la operación. A continuación se presenta el modelo planteado en la optimización de *Solver*.

Parámetros de entrada:

C_i = Capacidad del camión cisterna i .

A_j = Cantidad de leche acopiada en el centro j .

T_j = Tasa de evacuación en el centro j .

V_j = Tiempo de viaje total para la recolección en el centro j .

E = Tasa de evacuación en planta principal.

S = Tiempo adicional.

Variables de salida:

X_{1i} = Porcentaje de ocupación de la cisterna i .

X_{2ij} = Cantidad de viajes del camión i al centro de acopio j .

Objetivo:

$$\text{Max } Z = \sum_{n=1}^{n=j} \sum_{n=1}^{n=i} (C_i \cdot X_{1i}) \quad (1)$$

Sujeto a:

Restricción evacuación: La cantidad evacuada debe ser menor a la cantidad acopiada,

$$\sum_{n=1}^{n=j} \sum_{n=1}^{n=i} (C_i \cdot X_{1i} \cdot X_{2ij}) \quad (2)$$

Restricción de tiempo: El tiempo acumulado del camión debe ser menor al día,

$$\sum_{n=1}^{n=j} \sum_{n=1}^{n=i} \left(X_{2ij} \cdot \left(\frac{C_i}{T_j} + \frac{C_i}{E} + 2 \cdot V_j + S \right) \right) \quad (3)$$

Restricción de llenado de camiones: El camión debe tener asegurada la ocupación de al menos el 60% de su capacidad,

$$100\% \geq X_{1i} \geq 60 \quad (4)$$

Restricción de valor positivo:

$$X \geq 0 \quad (5)$$

En la Figura 3 se muestra el modelo desarrollado para la planeación de las rutas.

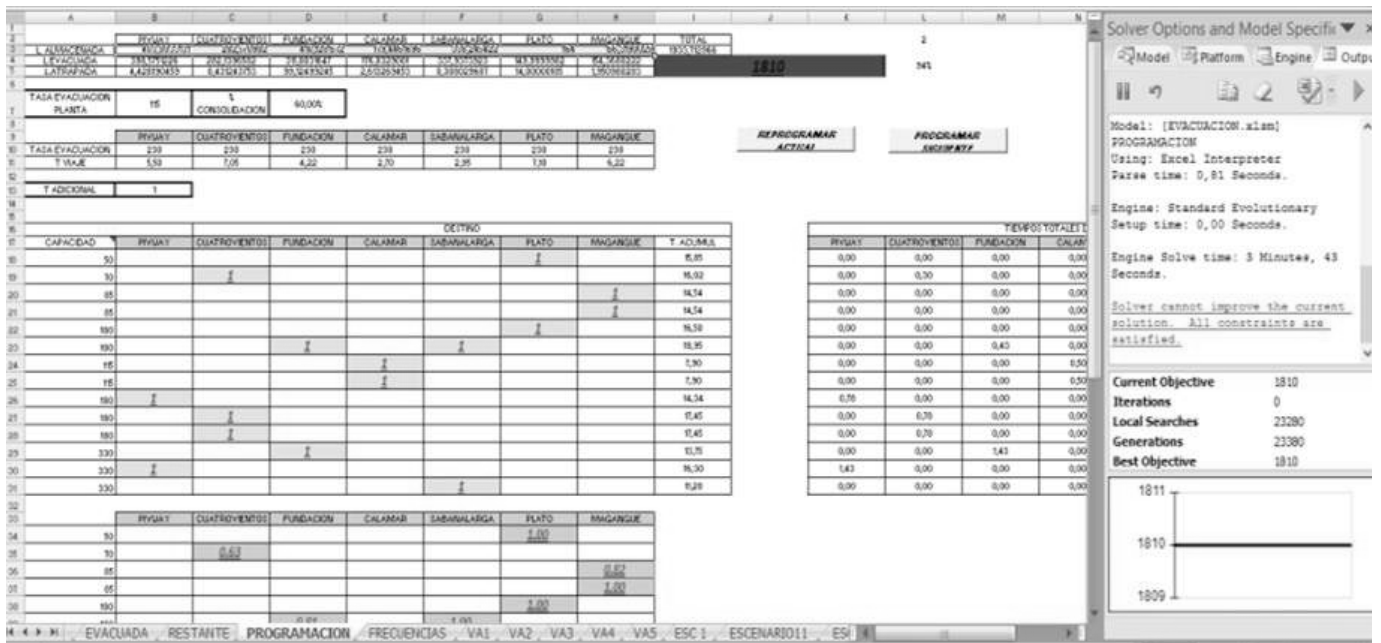


Figura 3. Programación de camiones y entorno de solver.

Fuente: Elaboración de los autores en software Microsoft Excel.

Luego de correr el modelo y hacer varias réplicas, la asignación de rutas que se obtuvo se probó en la simulación en *Flexsim* para validar los resultados obtenidos.

d) Viajes a los centros de acopio: A través de un *Processor* se simuló el viaje desde y hacia el centro de acopio, teniendo en cuenta las distribuciones de probabilidad de los tiempos de viaje que se obtuvieron, la cual se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Distribuciones de probabilidad para tiempos de viaje.

Horas	Centro 1	Centro 2	Centro 3	Centro 4	Centro 5	Centro 6	Centro 7
2	0,00%	0,00%	0,00%	26,70%	73,30%	0,00%	0,00%
3	3,20%	0,00%	0,00%	46,70%	20,00%	0,00%	0,00%
4	12,90%	0,00%	53,80%	20,00%	6,70%	0,00%	0,00%
5	29,00%	0,00%	15,40%	6,70%	0,00%	16,70%	0,00%
6	32,30%	62,50%	23,10%	0,00%	0,00%	66,70%	100,00%
7	9,70%	37,50%	7,70%	0,00%	0,00%	16,70%	0,00%
8	12,90%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Fuente: Elaboración de los autores.

Según la tabla, el 3,2% de las veces un camión demora 3 horas en viajar desde Centro 1 hasta Barranquilla y viceversa, 12,9% de las veces 4 horas, 32,3% 6 horas, etc.

e) Llenado del camión: Para cargar el camión se usó un *Combiner* con una duración que dependía de la capacidad del camión y la tasa de llenado. La vista del camión y el silo del centro de acopio se presenta en la Figura 4.

**Figura 4. Cargue de camión**

Fuente: Elaboración de los autores en software Flexsim.

f) Evacuación en planta: Se usó un *Processor* con una demora calculada con la tasa de evacuación y la cantidad contenida en el vehículo. Luego con un *Separator* se separó el camión de la leche, enviando la leche al silo representado por un *Sink* y el camión a lavado (*Processor*), para que luego terminara en cola para un nuevo viaje.

g) Salidas de producción: Con los datos de recolección se obtuvo la distribución de probabilidad de porcentaje de evacuado que se muestra en la Tabla 3. Este valor se multipli-

có con la cantidad acopiada, para dar el total de leche que llegó a planta. Al resultado se le restó la leche desperdiciada, y la pulverizada. De esta manera, se obtuvo los litros de leche que entraban en el proceso, a través de un *UserEvent*.

Tabla 3. Porcentajes de evacuación de leche.

% Evacuado	% Probabilidad de ocurrencia
81%	1,30%
85%	1,30%
89%	1,30%
90%	1,30%
91%	3,80%
92%	5,00%
93%	6,30%
94%	11,30%
95%	10,00%
96%	12,50%
97%	10,00%
98%	12,50%
99%	18,80%
100%	5,00%

Fuente: Elaboración de los autores.

h) Generación y distribución de cestillos: Los cestillos se generaron con un *UserEvent* y se le indicó hacia qué familia debía ir a partir de la data histórica.

Tabla 4. Porcentaje diario de distribución de cestillos (la tabla completa tiene 20 columnas).

Día	1	2	3	4	5	6
Arequipe	0,40%	0,20%	0,00%	0,10%	0,00%	0,00%
Avena	0,00%	0,10%	0,00%	0,00%	0,00%	17,70%
Yogurt bolsa	6,30%	3,60%	0,00%	1,00%	1,70%	0,00%
Leche saborizada	0,00%	0,10%	0,90%	1,00%	1,30%	12,70%
Leche deslactosada	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Leche entera	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Leche UHT	80,00%	87,70%	88,70%	88,20%	97,00%	20,80%
Mantequilla	3,10%	0,00%	5,50%	2,50%	0,00%	15,00%
Queso	0,00%	0,50%	0,00%	0,90%	0,00%	0,00%
Suero	0,00%	0,10%	0,00%	0,00%	0,00%	26,10%
Yogurt	10,30%	7,80%	4,80%	6,30%	0,00%	7,70%

Fuente: Elaboración de los autores.

La Tabla 4 muestra que para el día uno el 0,35% de los cestillos se destinó a la producción de arequipe, ninguno a avena, el 80,01% a UHT, etc.

Después de asignar el cestillo a una familia, se determinó la cantidad de leche con la que se uniría este, lo cual dependía de la familia. Con la Tabla 5 se muestra, por ejemplo, que para el día uno se requirió en promedio 33 litros de leche para un cestillo de la familia arequipe, en el tres no se generó ninguna referencia de esta familia, etc.

Tabla 5. Litros utilizados para producir un cestillo de cada familia.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Arequipe	33	33	0	33	0	0	0	32	0	32
Avena	0	24	0	0	0	29	0	36	24	20
Yogurt Bolsa	15	16	22	13	19	0	0	16	25	24
Leche Saborizada	0	14	15	15	15	14	14	0	14	15
Leche Deslactosada	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13
Leche Entera	0	0	0	12	0	0	0	0	0	0
Leche UHT	26	25	26	26	26	27	26	26	27	26
Mantequilla	5	0	36	125	0	12	0	0	9	125
Queso	0	88	88	88	0	0	88	0	88	0
Suero	0	164	164	0	0	124	0	135	125	0
Yogurt	19	17	17	18	14	17	13	19	17	18

Fuente: Elaboración de los autores.

Se usó el promedio ponderado dado que cada familia estaba constituida por varias referencias. La Tabla 6 muestra la equivalencia entre leche y arequipe.

Tabla 6. Datos de equivalencias entre litros de leche y cestillos de arequipe.

Familia	Referencia	L/cest
Arequipe	arequipe x 250 g	33,33
	arequipin x 50 g x 6 u	32
Familia	Referencia	%Prod
Arequipe	arequipe x 250 g	55,56%
	arequipin x 50 g x 6 u	44,44%

Fuente: Elaboración de los autores.

Para la equivalencia entre leche y cestillos se realizó el promedio ponderado:

$$\text{Promedio} = 33,33 \cdot 55,56\% + 32 \cdot 44,44\% = 33 \text{ litros} \quad (6)$$

Cuarentena: Se usó un *Processor* con una demora de 72 h. Después de ese periodo existía la

probabilidad de que aparecieran productos defectuosos, dato que se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Porcentajes de probabilidad de aparición de defectos.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril
Arequipe	0,67%	1,00%	0,50%	0,70%
Avena	0,33%	0,17%	0,40%	0,33%
Yogurt Bolsa	0,33%	0,67%	1,00%	1,33%
Leche Saborizada	0,77%	0,50%	0,33%	0,67%
Leche Deslactosada	0,67%	0,43%	0,40%	0,50%
Leche Entera	0,47%	0,57%	0,53%	0,47%
Leche UHT	0,30%	0,60%	0,63%	0,37%
Mantequilla	0,50%	0,47%	0,47%	0,63%
Queso	0,57%	0,60%	0,60%	0,50%
Suero	0,77%	0,50%	0,43%	0,40%
Yogurt	0,67%	0,43%	0,67%	0,60%

Fuente: Elaboración de los autores.

Distribución a distritos: Para definir el destino, se usaron tablas con las distribuciones de probabilidad definidas con la data histórica. Los valores se muestran en la Tabla 8, la cual es una de las 11 resultantes (11 familias).

Tabla 8. Distribución familia leche UHT a los distritos.

Día		1	2	3	4	5	6
Leche UHT	CEDIS 1	0,00%	6,30%	0,00%	4,10%	0,00%	0,00%
	CEDIS 2	18,00%	12,30%	6,90%	2,30%	28,40%	5,50%
	CEDIS 3	13,10%	5,60%	4,10%	7,50%	0,00%	5,90%
	CEDIS 4	10,10%	5,90%	1,60%	11,40%	0,00%	9,60%
	CEDIS 5	16,80%	7,40%	9,50%	3,00%	13,30%	3,80%
	CEDIS 6	42,10%	62,50%	77,90%	71,80%	58,30%	75,30%

Fuente: Elaboración de los autores.

En la Figura 5 se observa el diseño en *Flexsim* de los traslados a distritos.

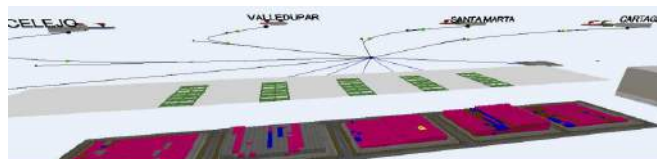


Figura 5. Traslado a distritos.

Fuente: Elaboración de los autores en software Flexsim.

k) Retorno de cestillos. Se usa una distribución uniforme entre 1 y 5 (tiempo de retorno) para representar esta demora para cada distrito, y después de terminada, el cestillo nuevamente va al stock en planta como en la Figura 6.

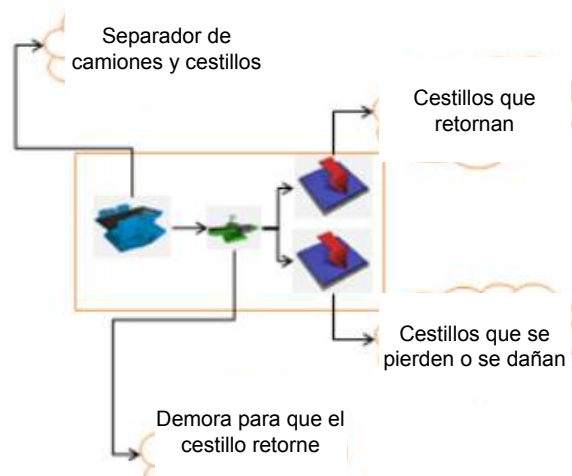


Figura 6. Objetos Flexsim para el retorno.

Fuente: Elaboración de los autores.

5. VALIDACIÓN

Posterior a la construcción del modelo, se realiza una depuración de todas sus partes y de los cálculos realizados en él, para luego comprobar que el modelo proporcione resultados válidos para el sistema que busca representar valiéndose del juicio de expertos de la empresa [8].

6. ANÁLISIS DE ESCENARIOS

Los escenarios se seleccionaron con la ayuda de los expertos [9], se definieron primero el período de inestabilidad y el tamaño de la corrida, incluyendo la cantidad de réplicas. La parte I-evaluación de leche cruda, está conformada por eventos que no tienen continuidad en el tiempo, por lo que no presentan inestabilidad. La parte II–movimiento de cestillos con productos terminados, se definen condiciones para un proceso que perdura en el tiempo, por lo cual, para lograr la estabilidad, con cada configuración se realizaron corridas largas para eliminar los resultados con comportamiento inestable.

Para calcular el número de simulaciones se utilizó el teorema de Tchebycheff [5]:

$$n = \frac{m^2}{\alpha} \quad (7)$$

Donde:

α = probabilidad de error permitida.

$\frac{1}{m}$ = número de desviaciones estándar máximo permitido sobre la media de la distribución a simular.

Con una media que no se diferencia más de $\pm 1,15\sigma$ del valor real y una confiabilidad del 95%, se obtuvo un valor de 16. En la segunda parte, se amplió el tamaño a 20 teniendo en cuenta el período de inestabilidad. Se realizan 5 réplicas con diferentes corrientes de números aleatorios de acuerdo a Azarang y Dunna [5]. Los escenarios evaluados se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9. Configuración de los escenarios.

ESCENARIO ATRIBUTO	CONFIGURACIÓN DE CAMIONES					SERVIDORES		TASA DE EVACUACIÓN		ESTACIONALIDAD		
	ESC. 1 (SITUACIÓN ACTUAL)	ESC. 2	ESC. 3	ESC. 4	ESC. 5	ESC. 6	ESC. 7	ESC. 8	ESC. 9	ESC. 10	ESC. 11	ESC. 12
Número de servidores	2	2	2	2	2	1	3	2	2	2	2	2
Ratio de descargue (L/h)	11.500	11.500	11.500	11.500	11.500	11.500	11.500	21.000	30.000	11.500	11.500	11.500
Capacidad total de la flota (L)	169.000	185.500	198.500	155.500	222.500	198.500	198.500	198.500	198.500	198.500	249.500	217.000
Cantidad de camiones	10	13	12	8	14	12	12	12	12	12	14	14
# Tipos de camiones	7	7	7	5	7	7	7	7	7	7	7	7
Capacidad camión 1 (L)	5.000	5.000	5.000	7.000	7.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
Capacidad camión 2 (L)	7.000	7.000	7.000	10.000	8.500	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000
Capacidad camión 3 (L)	8.500	8.500	8.500	10.000	8.500	8.500	8.500	8.500	8.500	8.500	8.500	8.500
Capacidad camión 4 (L)	10.000	8.500	10.000	11.500	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	8.500
Capacidad camión 5 (L)	10.000	10.000	10.000	18.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000
Capacidad camión 6 (L)	11.500	10.000	11.500	33.000	11.500	11.500	11.500	11.500	11.500	11.500	11.500	10.000
Capacidad camión 7 (L)	18.000	11.500	11.500	33.000	11.500	11.500	11.500	11.500	11.500	11.500	11.500	10.000
Capacidad camión 8 (L)	33.000	11.500	18.000	33.000	11.500	18.000	18.000	18.000	18.000	18.000	18.000	11.500
Capacidad camión 9 (L)	33.000	11.500	18.000	N.A.	18.000	18.000	18.000	18.000	18.000	18.000	18.000	11.500
Capacidad camión 10 (L)	33.000	18.000	33.000	N.A.	18.000	33.000	33.000	33.000	33.000	33.000	18.000	18.000
Capacidad camión 11 (L)	N.A.	18.000	33.000	N.A.	21.000	33.000	33.000	33.000	33.000	33.000	33.000	18.000
Capacidad camión 12 (L)	N.A.	33.000	33.000	N.A.	21.000	33.000	33.000	33.000	33.000	33.000	33.000	33.000
Capacidad camión 13 (L)	N.A.	33.000	N.A.	N.A.	33.000	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	33.000	33.000
Capacidad camión 14 (L)	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	33.000	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	33.000	33.000

Fuente: Elaboración de los autores.

Bajo las condiciones definidas para cada escenario, se obtuvieron los resultados que se resumen en la Tabla 10, la cual permite hacer un paralelo entre las diferentes configuraciones. El escenario ganador se encuentra resaltado.

Se selecciona el escenario 3 por tener el mejor resultado global. En la mejora del porcentaje de recolección de leche, se diferencia sólo en un 1% del escenario 2 y 5 que son escenarios que requieren más recursos. A través de él se tiene el mejor resultado en la ocupación de las cisternas que se envían con leche cruda a la planta y su desempeño es satisfactorio en los demás indicadores. No es recomendable un cambio en el número de servidores y o en la tasa de descarga, ya que a pesar de que se aumentan las capacidades no se logran mejoras considerables.

Para reflejar los cambios por el efecto estacional, se corrieron los últimos tres escenarios, eligiéndose así la configuración número 11 para los meses de mayor producción por su mayor desempeño global.

Tabla 10. Resultados de las simulaciones.

Medida de Desempeño	Medidas	Esc. 1	Esc. 2	Esc. 3	Esc. 4	Esc. 5	Esc. 6	Esc. 7	Esc. 8	Esc. 9	Esc. 10	Esc. 11	Esc. 12
% Leche recogida	Promedio	92,46%	97,09%	95,73%	86,83%	97,18%	95,66%	95,91%	95,86%	95,86%	87,13%	97,76%	96,04%
	Desviación	0,66%	0,74%	1,06%	1,56%	0,22%	1,16%	0,84%	0,88%	0,88%	1,88%	1,31%	1,65%
	Intervalo mayor	93,28%	98,00%	97,04%	88,76%	97,45%	97,10%	96,95%	96,96%	96,96%	89,47%	99,39%	98,08%
	Intervalo menor	91,65%	96,17%	94,41%	84,89%	96,90%	94,22%	94,87%	94,77%	94,77%	84,79%	96,13%	94,00%
Cantidad sin evacuar (cientos de litros)	Promedio	125,66	46,51	69,20	234,50	44,29	70,44	65,86	66,71	66,71	242,47	42,40	77,08
	Desviación	15,84	12,55	17,90	33,89	3,33	19,92	13,90	14,67	14,67	18,95	24,58	34,59
	Intervalo mayor	140,77	58,48	86,27	266,81	47,47	89,43	79,12	80,69	80,69	263,09	65,84	110,05
	Intervalo menor	110,56	34,55	52,13	202,19	41,11	51,44	52,61	52,73	52,63	221,84	18,96	44,11
% Ocupación cisternas	Promedio	90,70%	80,62%	85,33%	84,94%	84,91%	85,86%	85,36%	85,25%	85,38%	73,96%	84,16%	85,56%
	Desviación	2,36%	2,03%	1,62%	1,93%	2,42%	1,85%	1,64%	1,54%	1,62%	2,30%	1,04%	1,69%
	Intervalo mayor	93,62%	83,14%	87,33%	87,33%	87,92%	88,16%	87,39%	87,17%	87,39%	76,82%	85,46%	87,66%
	Intervalo menor	87,78%	78,11%	83,32%	82,54%	81,91%	83,57%	83,33%	83,33%	83,33%	71,10%	82,86%	83,46%
Tiempo total de recogida (h)	Promedio	21,12	20,29	20,15	20,15	19,41	21,42	20,04	19,86	19,66	21,44	21,05	19,99
	Desviación	0,28	0,28	0,60	0,20	0,52	0,30	0,68	0,58	0,44	0,52	0,73	0,38
	Intervalo mayor	21,41	20,57	20,76	20,35	19,93	21,72	20,72	20,11	20,11	21,95	21,95	20,46
	Intervalo menor	20,77	19,93	19,40	19,90	18,76	21,05	19,20	19,11	19,11	20,15	20,15	19,51
Tiempo de llegada de la leche a la planta (h)	Promedio	13,76	13,06	13,25	13,97	13,04	14,51	11,78	12,45	12,22	14,28	13,50	13,23
	Desviación	0,28	0,19	0,26	0,22	0,19	0,40	0,30	0,22	0,13	0,35	0,30	0,31
	Intervalo mayor	144,11	13,29	13,58	14,25	13,27	15,00	12,73	12,73	12,39	14,71	13,87	13,62
	Intervalo menor	13,41	12,83	12,92	13,69	12,81	14,02	12,18	12,18	12,06	13,13	13,13	12,85
Tiempo en cola (h)	Promedio	0,18	0,15	0,18	0,17	0,20	1,51	0,05	0,03	0,01	0,31	0,35	0,27
	Desviación	0,05	0,03	0,05	0,03	0,03	0,09	0,01	0,01	0,00	0,09	0,06	0,12
	Intervalo mayor	0,25	0,19	0,24	0,21	0,25	1,63	0,07	0,05	0,01	0,41	0,42	0,42
	Intervalo menor	0,12	0,11	0,11	0,13	0,16	1,40	0,03	0,02	0,01	0,21	0,27	0,13
Tiempo max. en cola (h)	Promedio	0,92	0,78	0,88	0,86	0,93	3,95	0,32	0,23	0,08	1,36	1,49	1,14
	Desviación	0,19	0,11	0,15	0,25	0,10	0,15	0,04	0,04	0,02	0,26	0,13	0,38
	Intervalo mayor	1,16	0,92	1,07	1,07	1,06	4,14	0,37	0,29	0,11	1,68	1,65	1,61
	Intervalo menor	0,68	0,64	0,69	0,69	0,81	3,76	0,27	0,18	0,06	1,04	1,32	0,67

Fuente: Elaboración de los autores.

La decisión central en la segunda parte es la cantidad de cestillos que se necesitan para que el sistema opere de manera efectiva. Los escenarios definidos fueron de 20.000, 25.000 (situación actual), 30.000 y 35.000 cestillos.

La Tabla 11 muestra las horas que el sistema deja de funcionar con los diferentes totales de cestillos, se presenta el valor medio con los intervalos de confianza, con un porcentaje de confiabilidad del 90%.

Tabla 11. Duración de las paradas por desabastecimiento de cestillos

	H.SIN FUNCIONAR					
	Mean (90% Confidence)			Sample Standard Deviation	Min	Max
Scenario 1	249.18	< 278.13	< 307.07	30.36	223.89	293.04
Scenario 2	71.92	< 86.55	< 101.19	15.35	71.4	108.79
Scenario 3	7.98	< 16.97	< 25.97	9.43	5.01	23.83
Scenario 4	0	< 0	< 0	0	0	0

Fuente: Elaboración de los autores en software Flexsim.

De acuerdo a los resultados, el escenario 4 es el ganador por presentar 0 horas de paradas en el sistema.

Se determinó la capacidad para el almacenamiento de productos terminados cuando se realiza la cuarentena. Esto se obtuvo con la segunda variable de salida, definida como la cantidad máxima de cestillos en cuarentena. Los resultados se dan en la Tabla 12.

Tabla 12. Cantidad máxima de cestillos en cuarentena

	MAX CUARENTENA					
	Mean (90% Confidence)			Sample Standard Deviation	Min	Max
Scenario 1	9833.22	< 10073.8	< 10314.38	252.32	9884	10454
Scenario 2	12034.72	< 12419.2	< 12803.68	403.25	11876	12972
Scenario 3	12313.42	< 12540	< 12766.58	237.64	12191	12792
Scenario 4	11924.67	< 12347.6	< 12770.53	443.57	11772	12788

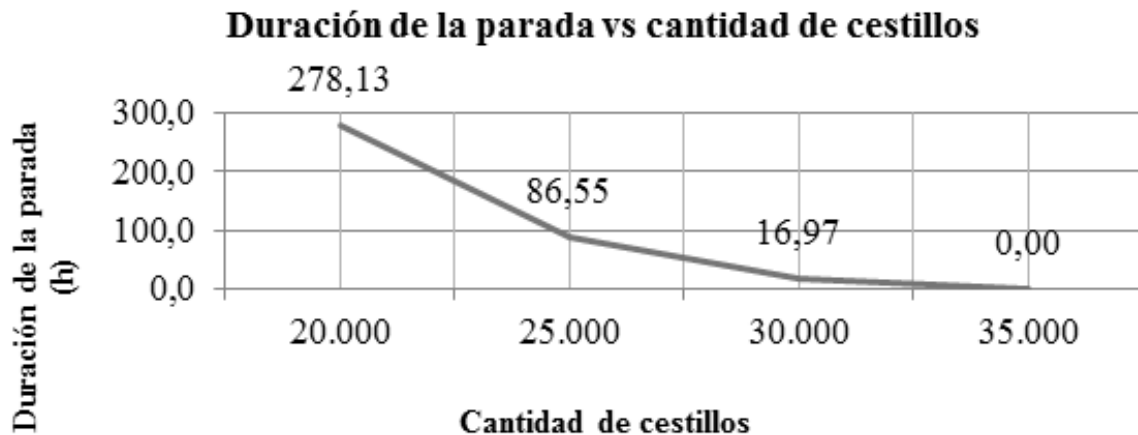
Fuente: Elaboración de los autores en software Flexsim.

Para el escenario seleccionado se hace necesaria una capacidad aproximada de bodegaje de 12.347 cestillos para realizar la cuarentena.

7. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Se analizó el impacto que tienen las variables de decisión sobre los indicadores de desempeño, haciendo uso de gráficos lineales [10]. Sólo se presentan las relaciones que demostraron sensibilidad.

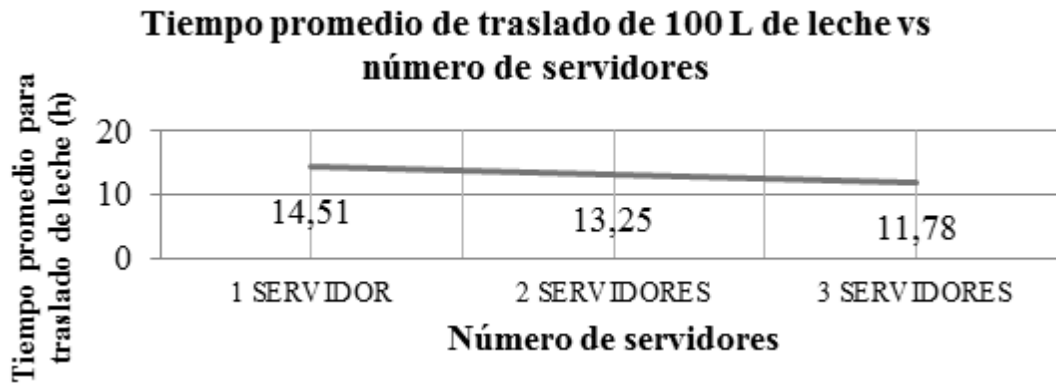
Análisis de sensibilidad de las horas de parada en el sistema por desabastecimiento de cestillos. La Gráfica 1 muestra que los cestillos son un recurso crítico en la operación. Al disminuir en un 43% la cantidad, las horas de espera por desabastecimiento de los mismos aumentan en más del 200%. El escenario 4 se encuentra en la mejor posición.



Gráfica 1. Horas de parada con diferentes cantidades de cestillos disponibles en el sistema.

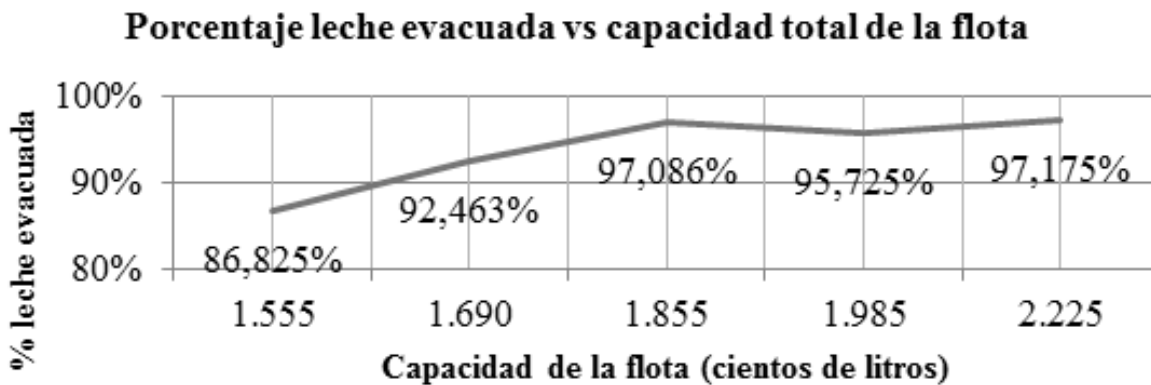
Fuente: Elaboración de los autores.

Análisis del tiempo promedio de traslado de leche cruda hasta la planta. Al variar la cantidad de servidores de uno a tres, el tiempo de traslado disminuye en un 19% aprox. Los dos servidores actuales generan un buen resultado, por lo que no se recomienda tomar la decisión de pasar a tres servidores, teniendo en cuenta el nivel de exigencia que representa un aumento de capacidad de recursos, el cual no se justifica con una disminución de 11% aprox. En la Gráfica 2 se muestra el gráfico de sensibilidad.



Gráfica 2. Tiempo promedio de traslado de leche al variar el número de estaciones de descargue.
Fuente: Elaboración de los autores.

Análisis de la evacuación de leche acopiada en los centros. De acuerdo a la Gráfica 3, de la configuración 1 a la 3 se obtiene un aumento aprox. del 12% en el porcentaje de leche evacuada, mientras que del tercer al quinto escenario se obtienen resultados que no difieren el uno del otro de forma considerable, al tener un porcentaje de variación promedio aprox. del 1%, por lo que es muy probable que se trate de la región en la que un mayor aumento de la flota ya no es factible por representar una mejora mínima del nivel de recolección de leche cruda. Con esta gráfica se comprueba la conveniencia del escenario ganador por estar en la región con el mejor perfil de mejora.



Gráfica 3. Porcentaje de leche evacuada de los centros al variar la capacidad total de la flota.
Fuente: Elaboración de los autores.

8. CONCLUSIÓN

Con el desarrollo de una simulación que integró aspectos claves del sistema logístico se lograron determinar de acciones de mejora con resultados confiables, sin tener que realizarlas de forma real, lo cual implicaría altos costos por el estudio de pruebas.

Con la ayuda de *Flexsim* se probó la viabilidad de las opciones de mejora con respecto a las medidas de desempeño, evaluando configuraciones que pueden adoptarse en el sistema y que permitirían contar con una mayor efectividad en los resultados de la recogida de leche, almacenamiento y despacho de los productos. La efectividad está definida en los términos de los indicadores establecidos por la dirección logística, apuntando hacia la obtención de ventajas competitivas.

El diseño recomendado consiste en mantener para la evacuación de leche en planta, los dos servidores para la descarga de los camiones que se tienen actualmente, con las bombas de 11.500 L/h, y establecer una flota conformada como lo detalla la Tabla 13:

Tabla 13. Configuración recomendada para la operación de recolección de leche.

Configuración del escenario ganador	
Atributo	Valor
Número de servidores	2
Ratio de descargue (L/h)	11.500
Capacidad total de la flota (L)	198.500
Cantidad de camiones	12
# Tipos de camiones	7
Capacidad camión 1 (L)	5.000
Capacidad camión 2 (L)	7.000
Capacidad camión 3 (L)	8.500
Capacidad camión 4 (L)	10.000
Capacidad camión 5 (L)	10.000
Capacidad camión 6 (L)	11.500
Capacidad camión 7 (L)	11.500
Capacidad camión 8 (L)	18.000
Capacidad camión 9 (L)	18.000
Capacidad camión 10 (L)	33.000
Capacidad camión 11 (L)	33.000
Capacidad camión 12 (L)	33.000

Fuente: Elaboración de los autores.

El programa creado para solucionar los problemas de la planeación de la recogida de leche cruda representó un reto en el desarrollo de este proyecto, por cuanto se debía integrar de modo eficiente mecanismos de búsqueda (optimización) con mecanismos de evaluación, que permitieran, con una metodología estandarizada para la empresa y con resultados que se mantienen, dar respuesta a las necesidades de asignación de rutas para la mejora de la competitividad en

tiempo y costos, en un mercado sometido a restricciones y constantes cambios en ritmo de producción de materias primas.

Los resultados de la simulación permitieron recomendar la capacidad que deben tener los tanques alternos para almacenar la leche que queda sin evacuar en los centros, de manera que no se mezcle con la que se obtiene el mismo día. Las capacidades en litros se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 14. Volúmenes de los tanques para almacenar la leche sin recoger

Centro de acopio	Capacidad para almacenar la leche sin evacuar (L)
C1	11.600
C2	7.200
C3	9.800
C4	3.900
C5	2.400
C6	12.000
C7	11.000

Fuente: Elaboración de los autores.

Por otro lado, el estudio arrojó que para mejorar las operaciones de almacenamiento y despacho es necesario adquirir una mayor cantidad de cestillos, aumentando las unidades a 35.000, con lo cual el sistema dejaría de presentar paradas por desabastecimiento de este recurso y permitiría contar con la cantidad suficiente para aplicar cuarentena a todos los productos, sin llegar al sobredimensionamiento. Las bodegas deben tener la capacidad para almacenar alrededor de 12.347 cestillos.

Queda abierta la posibilidad de que se realicen otros estudios de gestión logística sobre la base del modelo desarrollado, para cualquier rubro de empresas que puedan llevar su abastecimiento, producción y demanda a las características que pide el modelo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Junta de Castilla y León y Fundetec, "Libro blanco de las TIC en el Sector Agroalimentario. Subsector lácteo", Junta de Castilla y León y Fundetec, 2013, Disponible en: <http://www.fundetec.es/wp-content/uploads/2012/02/LACTEO-LIBRO-BLANCO TIC.pdf>.
- [2] Quiñones, L. y Duque, C., "La simulación de eventos discretos como técnica fundamental en la toma de decisiones de alto impacto", *Perspectiva y logística*, No. 12, Año 2013, Disponible en: <http://www.vaticgroup.com/perspectiva-logistica/ediciones-anteriores/simulacion-de-eventos-discretos/>.

- [3] Beaverstock, M. *et. al. Applied Simulation, Modeling and Analysis using Flexsim. Orem, Flexsim software products, 2011.*
- [4] Presidencia de la República de Colombia, Decreto 616 de 2006, Diario Oficial, Bogotá, 2006.
- [5] M. Azarang y E. García, *Simulación y análisis de modelos estocásticos*. México D.C: Editorial McGraw-Hill, 1996.
- [6] Flores, I., “Simulación y Optimización Aplicada a Problemas Industriales”. En Memorias del Seminario AMCS, Universidad Nacional Autónoma de México, 2013, Disponible en: <http://www.ingenieria.unam.mx/sistemas/PDF/Avisos/Seminarios/Problemas%20Industriales.pdf>.
- [7] Frontline Systems, “Simulation Optimization”, *Frontline Solvers, 2013*, Disponible en: <http://www.solver.com/simulation-optimization>.
- [8] C. Chung, “Simulation modeling handbook. A practical approach”. CRC Press LLC, Florida, 2004.
- [9] F. Hillier y G. Lieberman, *Introducción a la investigación de operaciones*. 9 ed. Ciudad de México: Editorial McGraw-Hill, 2010.
- [10] E. Turban, J. Aronson and T. Liang, *Decision support systems and intelligent systems*. 7 ed. New Delhi: Prentice Hall, 2005.