

ISSN: 2322-7672

# **III Encuentro de Investigación Formativa Ingeniería Industrial Medellín**

Memorias

---

Grupo de Investigación en Sistemas  
Aplicados en la Industria (GISAI)



**Universidad  
Pontificia  
Bolivariana**

© xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx

© Editorial Universidad Pontificia Bolivariana

**III Encuentro de Investigación Formativa - Memorias**

ISSN: 2322-7672

Primera edición, 2013

Escuela de Ingenierías

Facultad de Ingeniería Industrial

**Gran Canciller UPB y Arzobispo de Medellín:** Mons. Ricardo Tobón Restrepo

**Rector General:** xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx

**Vicerrector Académico:** Pbro. Jorge Iván Ramírez Aguirre

**Editor:** Juan José García Posada

**Coordinación de producción:** Ana Milena Gómez C.

**Diagramación:** Geovany Snehider Serna Velásquez

**Corrector de estilo:** Monica Patricia Ospina Toro

**Dirección editorial:**

Editorial Universidad Pontificia Bolivariana, 2013

Email: [editorial@upb.edu.co](mailto:editorial@upb.edu.co)

[www.upb.edu.co](http://www.upb.edu.co)

Telefax: (57) (4) 354 4565

A.A. 56006 - Medellín - Colombia

**Radicado:** 1117-22-03-13

Prohibida la reproducción total o parcial, en cualquier medio o para cualquier propósito sin la autorización escrita de la Editorial Universidad Pontificia Bolivariana.

# Modelo de simulación y optimización logística, caso de estudio: Satrack S.A.

---

## **David Torres**

Facultad de Ingeniería Industrial, UPB  
Colombia  
david.torres@alfa.upb.edu.co

## **Manuel Villegas**

Facultad de Ingeniería Industrial, UPB  
Colombia  
manuel.villegas@alfa.upb.edu.co

## **Javier Darío Fernández Ledesma**

Facultad de Ingeniería Industrial, UPB  
Colombia  
javier.fernandez@upb.edu.co

## **José Julián Hoyos**

Facultad de Ingeniería Industrial, UPB  
Colombia  
Jose.hoyos@alfa.upb.edu.co

## **Resumen**

---

El transporte en la cadena de suministro de las organizaciones se ha constituido como un proceso clave para garantizar que los demás procesos, como producción y ventas se realicen de manera eficiente y oportuna, esto con el fin de prestar un

excelente servicio al cliente. Para el caso concreto de Colombia es claro que se tienen deficiencias en la infraestructura vial del país y esto para las organizaciones representa un problema, que de no existir políticas claras del gobierno central debe ser abordado desde las opciones que la ingeniería ofrece, para hacer que los procesos de transporte sean más óptimos y eficientes, y de esta manera no comprometer los demás procesos que componen la cadena de suministro. En el presente estudio se analiza un proceso de carga-transporte-descarga desde los puertos de Barranquilla y Buenaventura hasta la ciudad de Bogotá, mediante la simulación discreta, buscando presentar alternativas que optimicen el proceso.

## Palabras clave

---

Cadena de suministro, transporte, simulación.

## Introducción

---

El siguiente trabajo es un modelo logístico realizado para representar un centro de distribución ubicado en la ciudad de Bogotá, el cual cuenta con una flota de dos (2) camiones que recogen bultos de cemento en las ciudades de Barranquilla y Buenaventura y posteriormente almacenan dichos bultos para redistribuirlos en varias direcciones de la ciudad de Bogotá.

El trabajo consta de dos partes, un modelo de simulación, el cual se realiza para el recorrido entre Bogotá- Barranquilla y Bogotá-Buenaventura y un modelo de optimización, el cual se realiza mediante programación dinámica para hallar la ruta más corta de repartición de la mercancía. Logrando disminuir de una manera importante los costos en los que se puede incurrir.

El trabajo tiene dos objetivos importantes: Simular el macrosistema (Bogotá-Buenaventura y Bogotá – Barranquilla), lo que nos permitirá hallar el tiempo promedio de las piezas en el sistema, la utilización de cada uno de los centros de distribución y la cantidad de unidades que se pueden almacenar en Bogotá después de 180 horas;

optimizar las rutas de repartición de la mercancía en el microsistema (cada una de las direcciones de los clientes en la ciudad de Bogotá) con el fin de minimizar los costos de transporte del centro de distribución.

## Antecedentes investigativos

La simulación como técnica nace en los años 40 cuando los científicos Von Neuman y Ulam, quienes trabajaron en el proyecto Montecarlo durante la Segunda Guerra Mundial, resolvieron problemas de reacciones nucleares cuya solución experimental sería excesivamente costosa y el análisis matemático demasiado complejo (Coss Bú, 2005).

Se define como una representación ficticia de una situación real determinada mediante modelos cuyos resultados son aplicados en el contexto del problema; así cuanto mayor sea el grado de aproximación de la simulación a la realidad, más útil será esta; por lo tanto, como prerrequisito para una correcta simulación es indispensable un conocimiento exhaustivo del sistema y de su comportamiento (Blanco Rivero & Fajardo Piedrahíta, 2003).

Thomas H. Naylor, referenciado por Coss Bú (2005), define la simulación como: "...Una técnica numérica para conducir experimentos en una computadora digital. Estos experimentos comprenden ciertos tipos de relaciones matemáticas y lógicas, las cuales son necesarias para describir el comportamiento y la estructura de sistemas del mundo real a través de largos períodos de tiempo".

Esta definición es muy amplia y comprende todo tipo de sistemas y modelos, como por ejemplo, una maqueta, un plano a mano alzada o simplemente un esbozo relacional de entidades; luego, la simulación provee herramientas para campos específicos como la economía, la producción, la biología, la química, la física, entre otros.

En este sentido, la importancia de la simulación radica en que, al hacer ensayos en sistemas productivos o logísticos reales se asumen altos costos y riesgos dado que tener información sobre estos es de vital importancia para una compañía, tarea que es facilitada, en gran medida, por los modelos de simulación (Blanco Rivero & Fajardo Piedrahíta, 2003)

Para desarrollar un modelo de simulación discreta se deben definir los siguientes elementos:

Las entidades (*entities*). Las cuales son objetos separados unos de otros y poseen atributos, características o propiedades que afectan el comportamiento de las entidades y procesos dentro del modelo. Generalmente, las entidades son materiales que circulan dentro del modelo y que sufren transformaciones.

Las locaciones (*locations*) en una simulación de eventos discretos son aquellos lugares en donde la entidad realizará algún tipo de actividad.

Los procesos (*processing*) son aquellas actividades u operaciones que realiza una locación sobre una entidad.

Las llegadas (*arrivals*) representan la manera en como una entidad aparece en una locación, la cantidad de ocurrencias y la frecuencia de estas.

Por otro lado, la optimización es una técnica que procura el mejoramiento de los sistemas bajo estudio con el fin de encontrar una solución, es decir, a un conjunto de variables de entrada deben corresponder un conjunto de variables de salida atravesadas por una relación matemática y lógica; por lo tanto, su planteamiento va a estar determinado por un conjunto de funciones objetivos y un conjunto de restricciones. De esta manera la optimización se centra en el análisis de la medida del comportamiento del sistema mediante modelos matemáticos y computacionales, sujetos a una serie de condiciones llamadas restricciones del modelo, el cual se mide a través de variables de decisión.

Uno de los caminos más eficaces para buscar el óptimo de una función objetiva asignada a un fenómeno económico fue presentado por el matemático americano Richard Bellman.

La programación dinámica de Bellman es una herramienta muy eficiente para la optimización global de los modelos que presentan una estructura en serie. Bellman asegura que la optimización parcial de cada proceso es insuficiente, puesto que las decisiones que se hacen en un proceso tienen influencia sobre los demás.

## Teorema de optimalidad de Bellman

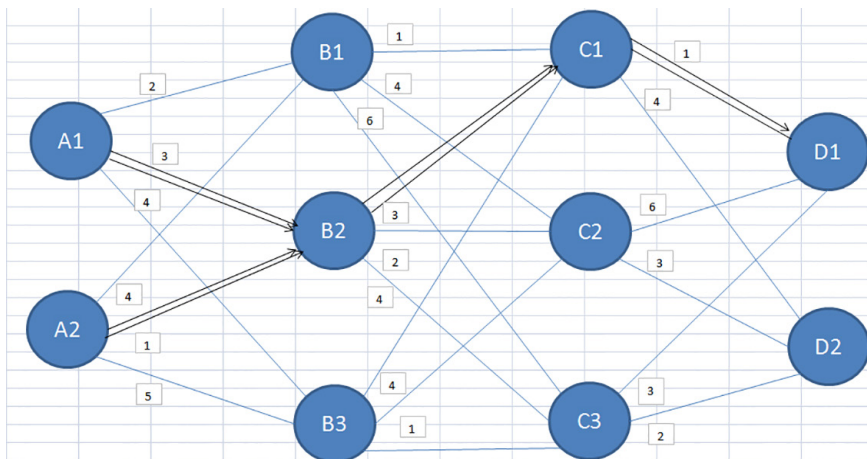
“La programación dinámica permite la optimización global del proceso aunque las diversas etapas se consideren aparte”.

Los problemas se pueden trabajar de dos formas: Estado inicial definido o estado final definido.

### Estado inicial definido

Se tiene definido el inicio (A1 y A2), el objetivo es encontrar la forma más rápida de llegar al final (D); por lo cual, se empieza a identificar la ruta más cercana a (D), que en este caso es (C1), después se encuentra la más cercana a esta y así sucesivamente hasta hallar la ruta más corta.

Figura 1. Programación dinámica estado inicial definido.

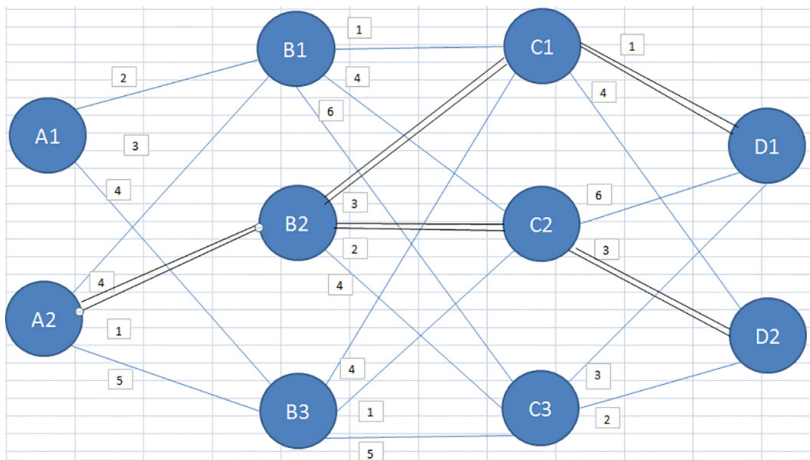


Fuente: Autoría propia.

## Estado final definido

Se tiene definido el final (D1 y D2), el objetivo es encontrar la forma más rápida de llegar al inicio (A); por lo cual, se empieza a identificar la ruta más cercana a (A), que en este caso es (B2), después se encuentra la más cercana a esta y así sucesivamente hasta hallar la ruta más corta.

Figura 2. Programación dinámica estado final definido.



Fuente: Autoría propia.

La programación dinámica se puede aplicar a problemas con variables discretas o continuas. También es muy utilizada para proponer políticas de inversión, compras, costos y reducir trayectos, entre otros.

## Planteamiento del problema

Un centro de distribución ubicado en la ciudad de Bogotá es el encargado de recibir órdenes de bultos de cemento por parte de los diferentes puntos de venta ubicados en la ciudad, dichos bultos de cemento deben ser traídos de dos puertos diferentes en Colombia; el primero, Puerto Colombia, ubicado en la ciudad de Barranquilla a 702 Km de distancia, y el segundo, el puerto de la ciudad de Buenaventura, a



473 Km de distancia. Para cumplir con los 9162 bultos de cemento solicitados por los puntos de venta el centro de distribución cuenta con dos tracto camiones, cada uno con una capacidad máxima de 720 bultos de cemento o 37 toneladas, cada camión se encarga de una ruta diferente, es decir, se tiene un tracto camión encargado de viajar al puerto de Barranquilla, cargar hasta su máxima capacidad, viajar de regreso y descargar en el centro de distribución su carga, de igual manera, este proceso es realizado por el segundo tracto camión que viaja a la ciudad de Buenaventura. El proceso termina cuando ambos tracto camiones han traído la cantidad necesaria de los puertos, lo cual implica realizar numerosos viajes por parte de los dos tracto camiones hacia su respectivo destino, por lo que este proceso de viaje hacia los puertos, cargue, regreso y descargue, con un solo tracto camión para cada ruta, da como resultado un proceso lento y costoso.

Una vez, los dos tracto camiones han cumplido con su encargo, los 9162 bultos de cemento son almacenados en el centro de distribución y se ponen a disposición para ser entregados en los puntos de venta, ubicados en diferentes lugares de la ciudad de Bogotá, por lo cual para el centro de distribución se hace importante conocer qué tipo de camión contratar para cumplir con las solicitudes de los puntos de venta, esto teniendo presente, que se tiene una gran variedad de camiones con distintas capacidades de carga y con diferentes costos asociados, por lo que el centro de distribución desea conocer la ruta más óptima para la distribución del encargo y los camiones más indicados para este proceso.

## Metodología

Para establecer el comportamiento preciso del proceso, se recurrió a la simulación discreta, esto implica obtener datos acerca de las diferentes etapas del proceso, para ello se tomaron tiempos de recorrido de cada tracto camión hacia su destino, tiempos de carga en los puertos, tiempos de descarga en el centro de distribución y rapidez de viaje, estos datos pueden ser observados en las figuras 3 y 4.

Figura 3. Datos ruta Bogotá-Barranquilla.

<b>Distancia</b>	<b>Velocidad</b>	<b>tiempo deCarg</b>	<b>tiempo de Recorrid</b>	<b>tiempo de Descarg</b>	<b>Carga</b>
<b>KM</b>	<b>KM/H</b>	<b>Min</b>	<b>Min</b>	<b>Min</b>	<b>Bultos</b>
702	54	68.4	780	69	Cemento
702	46	68.4	916	76.8	Cemento
702	59	65.4	714	88.8	Cemento
702	60	79.2	702	55.8	Cemento
702	65	63.6	648	58.8	Cemento
702	64	65.4	658	82.8	Cemento
702	60	60.6	702	88.8	Cemento
702	51	87	826	68.4	Cemento
702	57	52.2	739	73.2	Cemento
702	47	87	896	78	Cemento
702	49	84.6	860	52.2	Cemento
702	55	90	766	73.8	Cemento
702	51	75	826	56.4	Cemento
702	56	49.8	752	79.8	Cemento
702	57	79.8	739	80.4	Cemento
702	56	49.8	752	82.8	Cemento
702	61	89.4	690	53.4	Cemento
702	63	61.2	669	78.6	Cemento
702	50	49.2	842	87	Cemento
702	59	70.2	714	52.2	Cemento
702	65	78	648	57	Cemento
702	55	66	766	55.8	Cemento
702	56	81	752	64.8	Cemento
702	45	86.4	936	48.6	Cemento
702	51	51.6	826	84.6	Cemento
702	46	63.6	916	48.6	Cemento
702	59	53.4	714	51.6	Cemento
702	46	66.6	916	70.2	Cemento
702	47	79.2	896	51	Cemento
702	64	85.8	658	79.8	Cemento
702	62	78.6	679	72	Cemento
702	55	62.4	766	55.2	Cemento
702	47	64.8	896	64.2	Cemento
702	56	76.2	752	79.8	Cemento
702	55	88.8	766	60	Cemento
702	65	52.2	648	53.4	Cemento
702	47	70.2	896	85.2	Cemento
702	49	85.8	860	64.8	Cemento
702	45	70.2	936	72.6	Cemento
702	62	61.8	679	60.6	Cemento

Fuente: Autoría propia.

Figura 4. Datos ruta Bogotá-Buenaventura.

PUERTO BUENAVENTURA - VALLE DEL CAUCA							
Tractom	Distancia	Velocidad	tiempo de Carga	tiempo de Recorri	tiempo de Descarg	Carga	
	KM	KM/H	HRs	HRs	HRs	Bultos	
SNN698	473	49	54.6	579.18	63.00	Cemento	
SNN698	473	56	81.6	506.79	69.60	Cemento	
SNN698	473	53	57.8	535.47	61.20	Cemento	
SNN698	473	56	82.8	506.79	66.00	Cemento	
SNN698	473	62	70.8	457.74	66.00	Cemento	
SNN698	473	60	66	473.00	70.20	Cemento	
SNN698	473	47	60	603.83	58.80	Cemento	
SNN698	473	48	81	591.25	60.60	Cemento	
SNN698	473	47	58.2	603.83	56.40	Cemento	
SNN698	473	59	52.8	481.02	69.00	Cemento	
SNN698	473	64	82.8	443.44	66.00	Cemento	
SNN698	473	48	79.2	591.25	50.40	Cemento	
SNN698	473	57	64.2	497.89	58.20	Cemento	
SNN698	473	59	64.2	481.02	85.80	Cemento	
SNN698	473	55	59.4	516.00	54.00	Cemento	
SNN698	473	57	81	497.89	81.00	Cemento	
SNN698	473	46	76.8	616.96	52.80	Cemento	
SNN698	473	55	76.8	516.00	72.00	Cemento	
SNN698	473	48	49.8	591.25	52.20	Cemento	
SNN698	473	49	75	579.18	81.60	Cemento	
SNN698	473	60	66	473.00	72.00	Cemento	
SNN698	473	58	66.8	489.31	50.40	Cemento	
SNN698	473	54	62.4	525.56	68.40	Cemento	
SNN698	473	62	76.2	457.74	69.60	Cemento	
SNN698	473	58	88.8	489.31	64.80	Cemento	
SNN698	473	47	67.8	603.83	77.40	Cemento	
SNN698	473	55	73.8	516.00	86.40	Cemento	
SNN698	473	46	88.8	616.96	73.20	Cemento	
SNN698	473	65	88.8	436.62	60.60	Cemento	
SNN698	473	62	64.2	457.74	64.80	Cemento	
SNN698	473	47	60	603.83	66.60	Cemento	
SNN698	473	55	68.4	516.00	75.60	Cemento	
SNN698	473	53	49.2	535.47	68.40	Cemento	
SNN698	473	47	67.8	603.83	58.80	Cemento	
SNN698	473	55	60	516.00	88.80	Cemento	
SNN698	473	59	82.8	481.02	80.40	Cemento	
SNN698	473	50	81.6	567.60	57.60	Cemento	
SNN698	473	63	89.4	450.48	84.00	Cemento	
SNN698	473	46	49.2	616.96	66.60	Cemento	
SNN698	473	48	52.2	591.25	84.60	Cemento	

Fuente: Autoría propia.

Para el segundo proceso que implica distribuir los bultos de cemento traídos, a los diferentes puntos de venta en la ciudad, se tomaron los diferentes requerimientos de material y ubicación de los puntos de venta, lo cual puede ser observado en la figura 5, además se consultó acerca de una amplia variedad de camiones de carga, con sus respectivos costos y restricciones, lo cual puede ser observado en la figura 6.

Figura 5. Datos puntos de venta.

CLIENTE	DESTIN	DESTINARIODIRECCION	CANTIDAD	PESO
1	BOGOTA	DIAG 47 # 77B - 09	5700	8550
2	BOGOTA	CRA41 NRO 167-27	26	1560
3	BOGOTA	CRA 97# 24-C-51 BODEGA 15	6	60
4	BOGOTA	CRA 97# 24-C-51 BODEGA 15	1	10
5	BOGOTA	CRA 97# 24-C-51 BODEGA 15	52	520
6	BOGOTA	CRA 97# 24-C-51 BODEGA 15	3	30
7	BOGOTA	CRA 97# 24-C-51 BODEGA 15	6	60
8	BOGOTA	CRA 97# 24-C-51 BODEGA 15	1	10
9	BOGOTA	CRA 97# 24-C-51 BODEGA 15	52	520
10	BOGOTA	CRA 97# 24-C-51 BODEGA 15	3	30
11	BOGOTA	CRA 97# 24-C-51 BODEGA 15	32	320
12	BOGOTA	CRA 97# 24-C-51 BODEGA 15	8	80
13	BOGOTA	CRA 97 #24C- 51 MUELLE 2BODEGA 5	54	540
14	BOGOTA	CRA 97 #24C- 51 MUELLE 2BODEGA 5	39	390
15	BOGOTA	CRA 97 #24C- 51 MUELLE 2BODEGA 5	56	560
16	BOGOTA	CRA 97 #24C- 51 MUELLE 2BODEGA 5	20	200
17	BOGOTA	CRA 85D # 46A-65 PARQUIINDU SAN CAYETANO 0	6	500
18	BOGOTA	CRA 85D # 46A-65 PARQUIINDU SAN CAYETANO 0	1	10
19	BOGOTA	CRA 85D # 46A-65 PARQUIINDU SAN CAYETANO 0	1	10
20	BOGOTA	CRA 69Q # 7B - 86 LAS FERIAS	226	2560
21	BOGOTA	CRA 51 # 97A - 08 LA CASTELLANA	10	140
22	BOGOTA	CRA 23 # 75 A -13	94	1500
23	BOGOTA	CR 68 # 19 - 20	6	4500
24	BOGOTA	CR 62 No 12-40Zona Industrial	48	480
25	BOGOTA	CR 62 No 12-40Zona Industrial	12	120
26	BOGOTA	CR 62 No 12-40Zona Industrial	1	10
27	BOGOTA	CR 62 No 12-40Zona Industrial	1	10
28	BOGOTA	CR 127 NO 22 G - 15 INTERIOR 8.FONTIBON HB BODEGAS DE SALIDA 1	1	5
29	BOGOTA	CLL17F #128-90	50	750
30	BOGOTA	CLL17F #128-90	10	150
31	BOGOTA	CLL 87 N° 7-52	1396	1000
32	BOGOTA	CLL 71 # 69A - 27	177	670
33	BOGOTA	CL 49 SUR 72B-39	10	2160
34	BOGOTA	CARRERA 60 No 10-68/72 LC 2B	5	50
35	BOGOTA	CARRERA 60 No 10-68/72 LC 2B	5	50
36	BOGOTA	CALLE 53 NO. 23-30 CC. GALERIAS	20	500
37	BOGOTA	CALLE 46A NO 82 - 54 INT 11 PARQUE INDUSTRIAL SAN CAYETANO II	1	4500
38	BOGOTA	CALLE 20 N 82-52	15	500
39	BOGOTA	CALL 24B # 24-36	1	60
40	BOGOTA	AVENIDA 68 CALLE 3A	60	3000
41	BOGOTA	AVENIDA 68 CALLE 3A	833	1500
42	BOGOTA	AV CALLE 6 # 31A38	25	1500
522	BOGOTA	AUT NORTE CLL 183 CC SANTA FE	88	1500

Fuente: Autoría propia.

Figura 6. Datos tipos de cargas y soporte de camiones.

VALOR DIA	TIPO VEHICULO	CAPACIDAD CARGA (kg)	RESTRICCION VEHICULAR
\$ 90.000	Carry	500	SIN RESTRICCION
\$ 90.000	Carry	500	SIN RESTRICCION
\$ 90.000	Carry	500	SIN RESTRICCION
\$ 90.000	Carry	500	SIN RESTRICCION
\$ 130.000	Camioneta	2000	SIN RESTRICCION
\$ 135.000	NKR	500	SIN RESTRICCION
\$ 130.000	Camioneta	3500	SIN RESTRICCION
\$ 135.000	NPR	500	SIN RESTRICCION
\$ 135.000	NPR	3500	SIN RESTRICCION
\$ 135.000	NPR	500	SIN RESTRICCION
\$ 135.000	NPR	3500	SIN RESTRICCION
\$ 135.000	NPR	3500	SIN RESTRICCION
\$ 135.000	NPR	500	SIN RESTRICCION
\$ 135.000	NPR	500	SIN RESTRICCION
\$ 145.000	NPR	500	SIN RESTRICCION
\$ 145.000	NPR	4500	SIN RESTRICCION
\$ 145.000	NKR	3500	SIN RESTRICCION
\$ 135.000	NKR	3500	SIN RESTRICCION
\$ 145.000	NPR	4500	SIN RESTRICCION
\$ 145.000	NPR	4500	SIN RESTRICCION
\$ 145.000	NPR	4500	SIN RESTRICCION
\$ 145.000	NPR	4500	SIN RESTRICCION
\$ 145.000	NPR	4500	SIN RESTRICCION
\$ 145.000	NPR	4500	SIN RESTRICCION
\$ 145.000	NPR	500	SIN RESTRICCION
\$ 145.000	NPR	4500	SIN RESTRICCION
\$ 135.000	NKR	3500	SIN RESTRICCION
\$ 145.000	NKR	3500	SIN RESTRICCION
\$ 145.000	NPR	4500	SIN RESTRICCION
\$ 114.200	Luv	1200	SIN RESTRICCION
\$ 135.000	NHR	2000	SIN RESTRICCION
\$ 135.000	NKR	3500	SIN RESTRICCION
\$ 120.000	Sencillo	8000	CON RESTRICCION DE MOVILIDAD DE 6 A 10
\$ 120.000	Sencillo	8000	CON RESTRICCION DE MOVILIDAD DE 6 A 11
\$ 136.000	Sencillo	8000	CON RESTRICCION DE MOVILIDAD DE 6 A 12
\$ 136.000	Sencillo	8000	CON RESTRICCION DE MOVILIDAD DE 6 A 13

Fuente: Autoría propia.

Al tener estos datos se hizo una validación estadística para su posterior entrada en el modelo de simulación, el cual fue realizado usando el *software* ProModel V.7.

Para la óptima distribución de los bultos de cemento en la ciudad de Bogotá, se usó la programación dinámica como herramienta para minimizar las rutas. Como primer paso se ubicó en un mapa de Bogotá las direcciones en donde se tenían que hacer las respectivas entregas, después se asignaron coordenadas cartesianas a cada una de las direcciones y se trazaron líneas rectas entre ellos.

La razón por la cual se trazan líneas rectas entre los puntos es porque en una ciudad las esquinas y curvas son puntos de dispersión que tienden a una línea recta, así la distancia que esta represente es un promedio aproximado de la distancia real entre los puntos.

El valor numérico de la distancia entre cada punto de entrega se obtuvo con la siguiente ecuación conocida como distancia euclidiana.

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

Que es la longitud del segmento de recta que une los dos puntos.

Teniendo las distancias entre los puntos se procedió a buscar la ruta más corta para realizar las entregas.

Finalmente, se realizó un análisis del costo por cargar un bulto de cemento en cada tipo de camión para poder saber cuál tipo de camión trae más beneficio a la empresa; es decir, cual camión tiene capacidad de llevar una cantidad óptima de bultos y su costo sea mínimo.

En la figura 7 se registra la capacidad de cada camión, el valor que se paga por contratarlo un día y finalmente el costo por bulto de cemento.

Figura 7. Datos de costo asociados a camiones.

CAPACIDAD	INDICADOR	VALOR DIA
160	\$ 750	\$ 120.000
160	\$ 750	\$ 120.000
160	\$ 850	\$ 136.000
160	\$ 850	\$ 136.000
90	\$ 1.611	\$ 145.000
90	\$ 1.611	\$ 145.000
90	\$ 1.611	\$ 145.000
90	\$ 1.611	\$ 145.000
90	\$ 1.611	\$ 145.000
90	\$ 1.611	\$ 145.000
90	\$ 1.611	\$ 145.000
90	\$ 1.611	\$ 145.000
90	\$ 1.611	\$ 145.000
90	\$ 1.611	\$ 145.000
90	\$ 1.611	\$ 145.000
70	\$ 1.857	\$ 130.000
70	\$ 1.929	\$ 135.000
70	\$ 1.929	\$ 135.000
70	\$ 1.929	\$ 135.000
70	\$ 1.929	\$ 135.000
70	\$ 1.929	\$ 135.000
70	\$ 1.929	\$ 135.000
70	\$ 1.929	\$ 135.000
70	\$ 2.071	\$ 145.000
70	\$ 2.071	\$ 145.000
40	\$ 3.250	\$ 130.000
40	\$ 3.375	\$ 135.000
24	\$ 4.758	\$ 114.200
10	\$ 9.000	\$ 90.000
10	\$ 9.000	\$ 90.000
10	\$ 9.000	\$ 90.000
10	\$ 9.000	\$ 90.000
10	\$ 13.500	\$ 135.000
10	\$ 13.500	\$ 135.000
10	\$ 13.500	\$ 135.000
10	\$ 13.500	\$ 135.000
10	\$ 13.500	\$ 135.000
10	\$ 14.500	\$ 145.000
10	\$ 14.500	\$ 145.000

Fuente: Autoría propia.

## Validación estadística

Para la validación estadística de los datos se utilizó el módulo *statfit* del Pro-Model V.7. Este proceso es indispensable para proceder a la realización del modelo que representa el caso de estudio.

Los resultados arrojados por este *software* fueron interpretados mediante la prueba de Kolmogorov-Smirnov, con la cual comparamos el valor p arrojado por esta y la significancia preestablecida (0,05). Si el valor P es mayor que el valor de

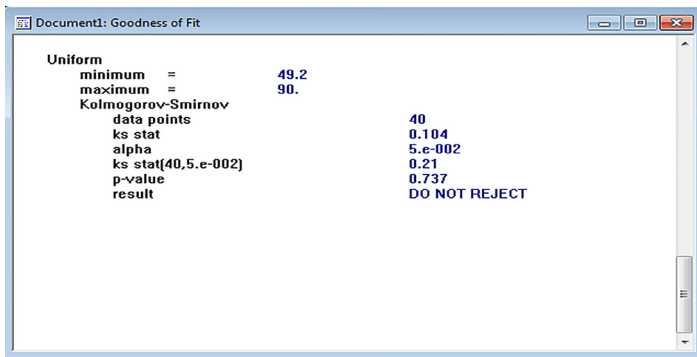


significancia entonces se puede aceptar la hipótesis nula, es decir, que con un nivel de confianza del 95% los datos siguen la distribución evaluada.

## Tiempo de cargue del camión Bogotá – Barranquilla

Los datos recolectados de cargue del camión Bogotá – Barranquilla se encuentran en la figura 8.

Figura 8. Validación de datos de cargue Bogotá-Barranquilla.



Fuente: Autoría propia.

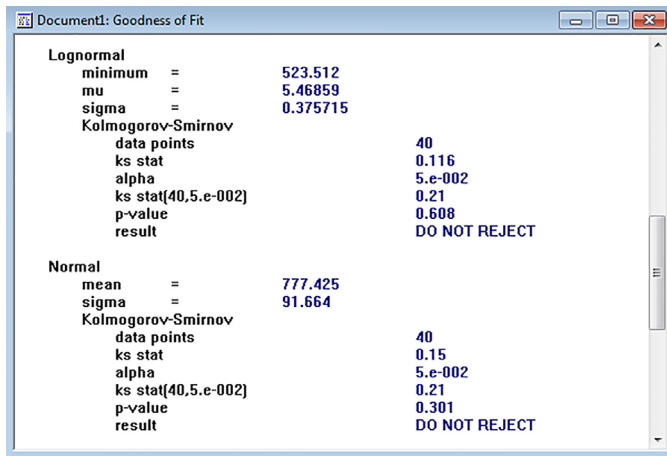
Con este resultado, se pudo establecer que la distribución estadística que más se ajusta a los datos relacionados es la uniforme con parámetros  $90 \pm 49.2$  (minutos).



## Tiempo de recorrido Bogotá-Barranquilla

Los datos recolectados de tiempo de recorrido Bogotá–Barranquilla se encuentran en la figura 9.

Figura 9. Validación de datos transporte Bogotá-Barranquilla.



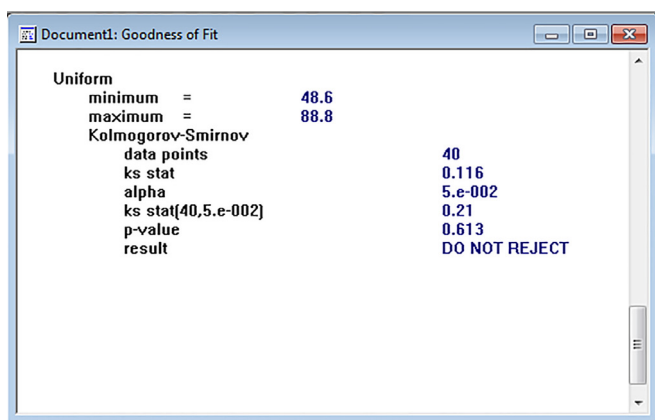
Fuente: Autoría propia.

Luego, se puede interpretar que según la prueba de kolmogorov-smirnov los datos de tiempo de recorrido entre Bogotá y Barranquilla sigue una distribución lognormal con media 777.425 (minutos) y desviación estándar de 91.664 (minutos).

## Tiempo de descarga del camión Bogotá – Barranquilla

Los datos de descarga del camión Bogotá – Barranquilla se encuentran en la figura 10.

Figura 10. Validación de datos de descarga Bogotá-Barranquilla.



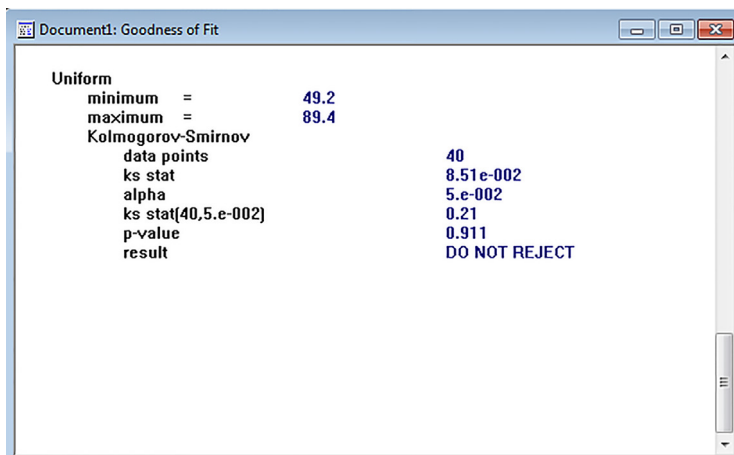
Fuente: Autoría propia.

Se puede interpretar que los datos recolectados en el tiempo de descarga del camión Bogotá – Barranquilla siguen una distribución uniforme con parámetros  $88.8 \pm 48.6$ .

## Tiempo de carga del camión Bogotá – Buenaventura

Los datos recolectados de descarga del camión Bogotá – Barranquilla se encuentran en la figura 11.

Figura 11. Validación de datos de cargue Bogotá-Buenaventura.



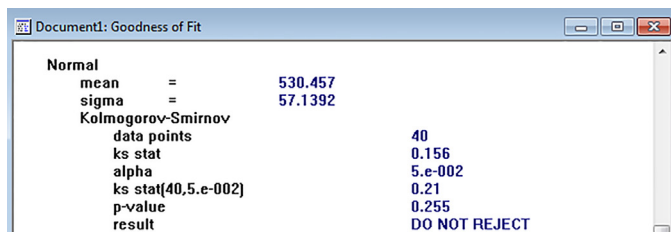
Fuente: Autoría propia.

Se puede interpretar que según la prueba de kolmogorov-smirnov los datos de tiempo de cargue para la ruta Bogotá - Buenaventura sigue una distribución uniforme con parámetros  $89.4 \pm 49.2$  (minutos).

## Tiempo de recorrido Bogotá-Buenaventura

Los datos recolectados de tiempo de recorrido Bogotá–Buenaventura se encuentran en la figura 12.

Figura 12. Validación de datos transporte Bogotá-Buenaventura.



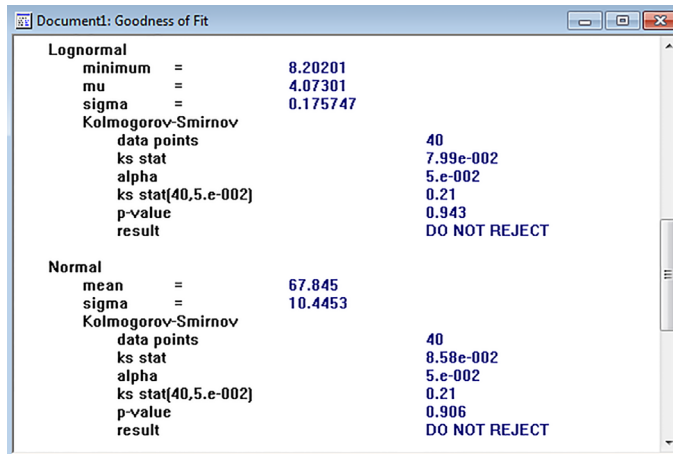
Fuente: Autoría propia.

Se puede interpretar que según la prueba de kolmogorov-smirnov los datos de tiempo de recorrido entre Bogotá y Buenaventura sigue una distribución normal con media 530.45 (minutos) y desviación estándar de 57.13 (minutos).

## Tiempo de descargue del camión Bogotá – Buenaventura

Los datos recolectados de descargue del camión Bogotá – Buenaventura se encuentran en la figura 13.

Figura 13. Validación de datos de descargue Bogotá-Buenaventura.



Fuente: Autoría propia.

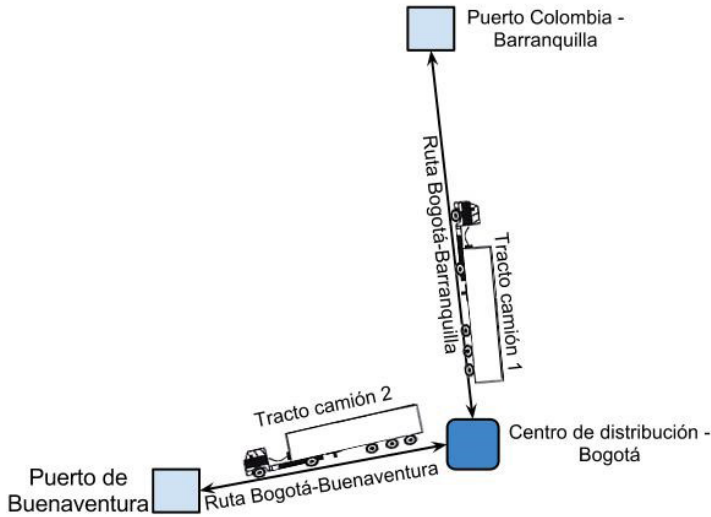
Se puede interpretar que los datos recolectados en el tiempo de descargue del camión Bogotá – Buenaventura siguen una distribución lognormal con media 67.845 (minutos) y desviación estándar 10.44 (minutos).

## Modelo de simulación y asignación de rutas

Teniendo en cuenta el problema del centro de distribución, anteriormente mencionado, se optó por dividir este en dos partes, la primera parte del modelo co-

responde al proceso de transporte, cargue y descargue de los dos tracto camiones en los puertos, este modelo se encuentra representado en la figura 14.

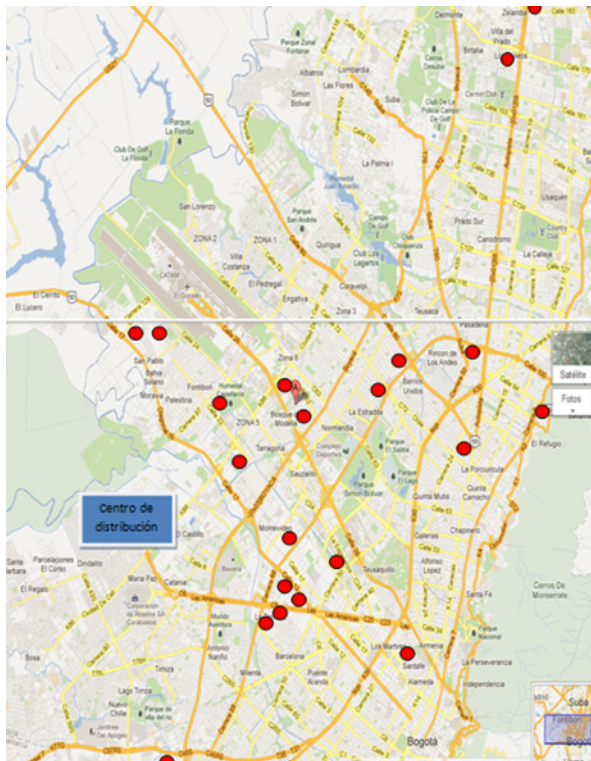
Figura 14. Flujo del proceso del modelo.



Fuente: Autoría propia.

La segunda parte del modelo representa el segundo proceso, donde el material que han transportado los tracto camiones producto del modelo 1 ya se encuentra en el centro de distribución y se hace necesario encontrar una ruta para entregar el material a los puntos de venta reduciendo costos. La figura 15, muestra una representación gráfica de la ubicación del centro de distribución y los puntos de venta en la ciudad de Bogotá.

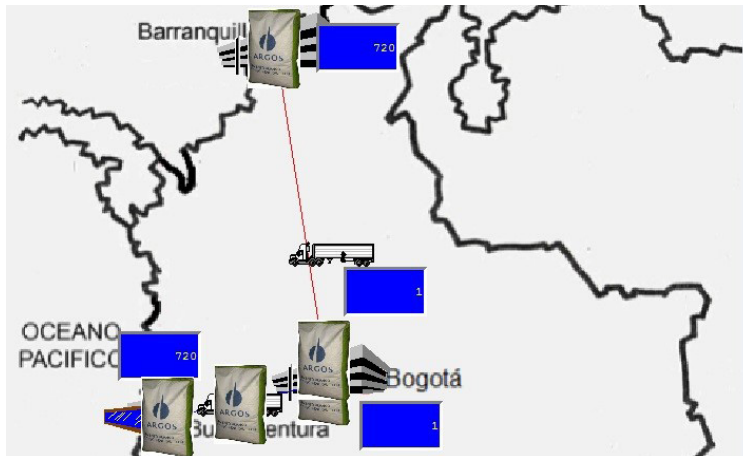
Figura 15. Puntos de distribución.



Fuente: Autoría propia.

Una vez se tuvo claridad acerca de los procesos, el modelo del primer proceso fue creado en el ProModel 7 y para el segundo proceso se realizaron cálculos analíticos que permitieran encontrar la ruta más corta para la distribución del centro de distribución a los puntos de venta como se muestra en la figura 16.

Figura 16. Modelo de simulación propuesto.

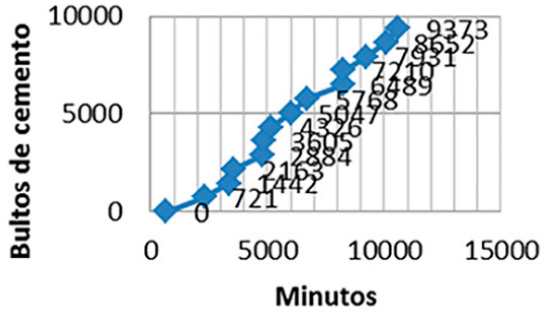


Fuente: Autoría propia.

## Resultados

Al realizar la simulación del proceso 1 en ProModel se analiza que los dos tracto camiones se toman 180 horas (10800 minutos, 7.5 días) para viajar a los puertos y traer al centro de distribución 9373 bultos de cemento, un valor aproximado a los 9162 bultos solicitados por los puntos de venta, en el figura 17 se observa la cantidad de bultos de cemento en el centro de distribución a medida que avanzan los minutos.

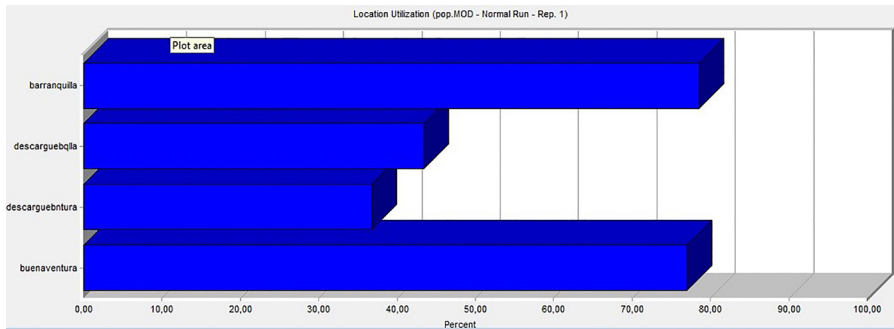
Figura 17. Comportamiento del modelo propuesto.



Fuente: Autoría propia.

En la figura 18, se puede observar el porcentaje de utilización de la carga en ambos puertos y su respectivo descargue en el centro de distribución, y gracias a él se puede decir que el proceso de carga en comparación con la descarga es un proceso mucho más lento, lo cual provoca que el camión retrase su regreso hacia el centro de distribución en Bogotá.

Figura 18. Utilizaciones según el modelo.

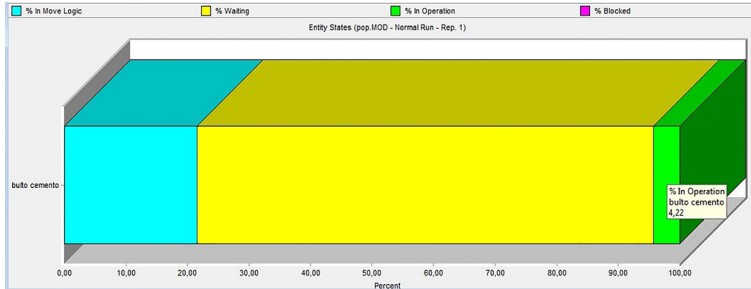


Fuente: Autoría propia.

Es importante mencionar que en la figura 19 se puede analizar que los bultos de cemento pasan el 21,58% del tiempo total en movimiento en los camiones, el 74,21% del tiempo en espera, y un 4,22% del tiempo en carga y descarga, por lo cual se puede decir que los camiones tardan mucho tiempo en recoger los bultos de cemento y en transportarlos.



Figura 19. Comportamiento de las operaciones según el modelo.



Fuente: Autoría propia.

Otro punto importante es el tipo de uso de los tracto camiones, y en la figura 20 se observa que el tracto camión 1 pasa en uso un 51.37% del tiempo total y 48.63% en viaje, mientras que el tracto camión 2 pasa en uso 52,43% del tiempo y 47,57% en viaje, esta pequeña diferencia se debe a que el tracto camión 2 recorre una distancia menor (473 Km) que el tracto camión 1 (702 Km), por lo cual se puede decir que el tracto camión 2 recoge bultos de cemento con mayor frecuencia que el tracto camión 1.

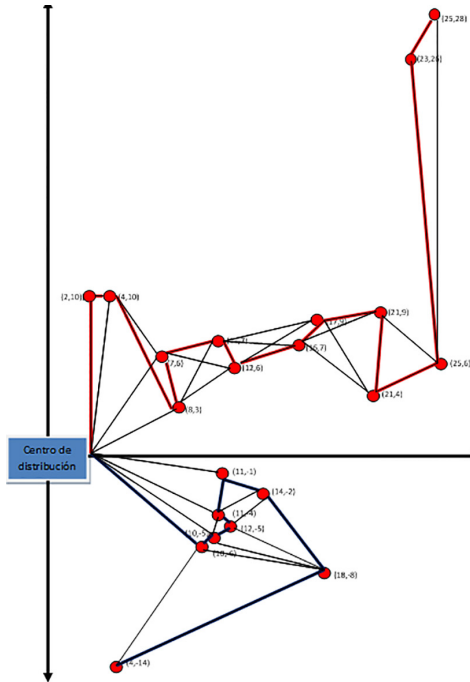
Figura 20. Comportamiento de las operaciones según el modelo.



Fuente: Autoría propia.

Después de analizar los diferentes recorridos y sus distancias se seleccionaron las dos rutas más cortas, estas fueron señaladas en color rojo y azul en la figura 21.

Figura 21. Selección de la ruta óptima.



Fuente: Autoría propia.

Al minimizar el recorrido de los camiones se mejora el servicio al cliente por entregas a tiempo, aumenta el tiempo disponible del camión para realizar más entregas programadas, también se incrementa el costo/ beneficio de los camiones contratados porque con la cantidad de dinero que se les paga por día, el camión realiza más entregas.

Se puede ver claramente que hay descuentos por volumen, lo que es un gran beneficio para la empresa porque se reducen los costos; esta necesita que el camión pueda transportar el mayor número de bultos de cemento para que realice menos viajes en las entregas y así poder asignarle otras.

Como resultado se eligen dos camiones con capacidad de 160 bultos a los cuales se les paga 120.000 por día; en caso de que los camiones con capacidad de 160 bultos tengan algún tipo de restricción en las horas de entrega se recomienda elegir los camiones con capacidad de 90 bultos.

## Conclusiones

Al realizar la simulación en ProModel se encontró que los dos camiones tardan 7 días en traer la cantidad solicitada por el centro de distribución, y que los bultos de cemento pasan mucho tiempo en espera de ser cargados por los tracto camiones, por lo que se tiene un proceso lento y seguramente costoso; una de las maneras de lograr que los bultos de cemento pasen menos tiempos en espera, será contratar un mayor número de tracto camiones que apoyen los dos tracto camiones existentes, esto con el fin de agilizar el proceso de llegada de los bultos de cemento al centro de distribución.

La simulación en ProModel ha permitido modelar de manera acertada el sistema real, sin embargo, el modelo planteado, presenta ciertas limitaciones, ya que los tiempos de descanso de los camiones no fueron tenidos en cuenta en el modelo, por lo que si se tuvieran en cuenta, los bultos de cemento seguramente tardarían mucho más en llegar al centro de distribución.

Al analizar los procesos de carga en los puertos y la descarga en el centro de distribución se encontró que los procesos de carga toman mucho más tiempo que los procesos de descarga, por lo que al compararlos se puede decir que el proceso de carga es un cuello de botella en el sistema, esto sin tener en cuenta el hecho de que el viaje a los puertos y el regreso toma mucho tiempo.

Encontrar la ruta más corta permitió definir que eran necesarios dos camiones como mínimo, uno para realizar las entregas del sur de Bogotá y otro para las entregas del norte.

Con la minimización de la ruta la organización puede aumentar el porcentaje de utilización de los camiones y realizar un mayor número de entregas.

## Referencias

1. Blanco Rivero, L. E., & Fajardo Piedrahíta, I. D. (2003). Simulación con promodel. Bogotá: Escuela colombiana de ingeniería.

2. Coss Bú, R. (2005). Simulación: Un enfoque práctico. Monterrey, México: Limusa. 160 p.
3. Universitat de lleida. (s.f.). Universitat de lleida. Recuperado el 27 de abril de 2012, de <http://web.udl.es/usuaris/MatFDiE/OptiSim/MonteCarlo.pdf>
4. Kaufman, A. (1966). Métodos y modelos de la programación dinámica. Editorial CECSA. Madrid. Pág. (107-119)
5. Conde, A. (1970). Optimización. México: Limusa. Pág. (92-102)