

## **Simulación Discreta y por Agentes de una Cadena de Suministro Simple Incluyendo un Sistema de Información Geográfica (SIG)**

**Jaime A. Giraldo-García, Omar D. Castrillón-Gómez y Santiago Ruiz-Herrera**

Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Industrial, Campus La Nubia Bloque Q piso 2, Manizales - Colombia. (e-mail: [jaiagiraldog@unal.edu.co](mailto:jaiagiraldog@unal.edu.co), [odcastrillong@unal.edu.co](mailto:odcastrillong@unal.edu.co), [sruizhe@unal.edu.co](mailto:sruizhe@unal.edu.co))

*Recibido Dic. 13, 2018; Aceptado Ene. 29, 2019; Versión final Mar. 25, 2019, Publicado Dic. 2019*

---

### **Resumen**

Se presenta un modelo de simulación como plataforma de experimentación de la logística de operación de una cadena de fabricación/distribución de pequeña escala, dirigida especialmente a estudiantes y profesionales involucrados en su planeación, diseño y operación. En la construcción del modelo, se usó en conjunto de métodos: simulación basada en agentes y por eventos discretos, además del uso de un Sistema de Información Geográfica (SIG). El uso iterativo del modelo permite evaluar el desempeño de diversos escenarios que se presentan en el mundo real. Permite, además, analizar diferentes situaciones para el desarrollo de habilidades y competencias para la toma de decisiones bajo incertidumbre, relacionadas con tamaño de la flota de transporte, capacidad del sistema de producción, cobertura geográfica de servicio a la demanda y ubicación apropiada de la planta de fabricación/distribución utilizando un ejemplo típico de la industria.

*Palabras clave: simulación; logística; SIG; toma de decisiones; cadena de suministro*

## **Discrete Simulation and Agents of a Simple Chain Supply including a Geographic Information System (GIS)**

### **Abstract**

A simulation model is presented as a platform for experimentation in the logistics of the operation of a small-scale manufacturing / distribution chain, aimed especially at students and professionals involved in its planning, design and operation. In the construction of the model, several methods were involved: simulation based on agents and discrete events, in addition to the use of a Geographic Information System (GIS). The iterative use of the model allows evaluating the performance of different scenarios that are presented in the real world. It also allows analyzing different situations to develop skills and competencies for decision making under uncertainty related to size of the transport fleet, system capacity of production, geographical coverage of service to the demand and appropriate location of the manufacturing/distribution plant using a typical example of the industry.

*Keywords: simulation; logistics; GIS; decision making; chain supply*

## INTRODUCCIÓN

Para Ivanov (2018), la gestión de la cadena de suministro integra los procesos de producción y logística en varios niveles y lucha por mejorar resultados ambientales sociales y económicos globalmente (Koberg y Longoni, 2019), (Coca et al., 2019). Las cuestiones estratégicas incluyen decisiones como el tamaño y la ubicación de las plantas de fabricación o los centros de distribución, la estructura de las redes de servicios y el diseño de la cadena de suministro. Los temas tácticos incluyen producción, transporte y planificación de inventario. Finalmente, los problemas operativos se refieren a la programación y el control de la producción, el control de inventario y el enrutamiento de vehículos.

La complejidad en la comprensión de la gestión de este tipo de sistemas está dada por la presencia de incertidumbre en: la cantidad pedida, cliente que hará el siguiente pedido, los tiempos entre pedidos, las velocidades de desplazamiento de los camiones, los posibles mantenimientos preventivos y por fallos de estos últimos y el movimiento a través de carreteras que conectan al fabricante/distribuidor con c/u de los clientes y algunos otros aspectos como cadenas de suministros inversas las cuales contribuyen al sostenimiento ambiental (Kalverkamp y Young, 2019). Osorio et al. (2017) resumen los riesgos operacionales en tres categorías: la incertidumbre en la demanda del consumidor, incertidumbre en el suministro e incertidumbre sobre los costos. Es claro que la gestión de esta incertidumbre origina cierto nivel de riesgo que no puede ser modelado satisfactoriamente con matemática analítica. De hecho, y según Solver Inc. (2018) el análisis cuantitativo del riesgo es la práctica de crear un modelo matemático de un proceso que explícitamente incluye parámetros de incertidumbre que no pueden ser controlados y variables de decisión que pueden ser controladas. Por tanto, en la cadena descrita se puede dar el riesgo de no entregar a tiempo el pedido y la consiguiente pérdida económica por penalización y quizás pérdida de clientes, entre otros, más aún si se tienen presentes aspectos que pueden ser dramáticos como incertidumbres en la demanda y personalización de los productos (Oh y Jeong, 2019). Se espera entonces que un modelo cuantitativo de gestión del riesgo calcule el impacto de parámetros inciertos en el desempeño de un sistema.

La toma de decisiones para la operación de cadenas de suministro es un desafío para las empresas, más aún si se tiene presente la complejidad de la gestión de una cadena de suministro (Hennies et al., 2014). Experimentar con estos sistemas en la vida real es riesgoso, costoso y puede conllevar a decisiones erróneas. En Oliveira et al. (2016) se afirma que, por la complejidad de las cadenas de suministro, es necesario el uso de herramientas de modelamiento de apoyo a la decisión, las cuales son útiles para comprender las interacciones y mejorar el desempeño del sistema. Si bien en la actualidad el modelado basado en agentes inteligentes es una tendencia, las simulaciones híbridas son muy útiles para representar la realidad de una cadena de suministro (Oliveira et al., 2016). Una técnica bien conocida de modelado de sistemas lo constituye la simulación, la cual permite imitar la operación de varias clases de instalaciones y procesos del mundo real. La instalación o proceso de interés usualmente es llamado sistema, y en pro de estudiarlo, a menudo se establece un conjunto de suposiciones de cómo opera. Estas suposiciones usualmente toman la forma de relaciones matemáticas y lógicas, constituyendo lo que se denomina un modelo (con cierto nivel de abstracción) que es usado para intentar obtener algún entendimiento sobre como el correspondiente sistema se comporta a través del tiempo. Para Banks et al. (2014), al imitar la operación de un sistema real, la simulación genera una historia artificial del sistema y su observación permite inferir lo concerniente a las características de operación/desempeño del mismo, incluyendo las interrupciones inesperadas en el mismo, las cuales podrían afectar todo el sistema (Olivares y Elmaraghy, 2019).

Según Pujawan et al. (2015) el modelado mediante simulación es muy utilizado cuando las características de la cadena de suministro son difíciles de representar mediante sistemas analíticos, o cuando poseen variables inciertas. Una adecuada simulación y optimización podría analizar mejor el impacto de los riesgos y ayudar a seleccionar las estrategias de mitigación (Oliveira et al., 2019). Sin embargo, no existe una única forma de modelar mediante simulación, pues esto depende de las características del sistema, los objetivos del estudio y la información que se posea.

Para el estudio de diferentes aspectos en cadenas de suministro se han utilizado diferentes métodos de simulación, dado que la gestión de la cadena de suministro se ha convertido en un arma competitiva clave (Meng et al., 2017), así por ejemplo Hernández y Henriques (2014) utilizan la técnica de simulación de eventos discretos para la cadena logística de exportación de *commodities*, mientras que Sha y Sri Nivasan (2016) utilizan la técnica de simulación basada en agentes para estudiar el tamaño de la flota en cadenas de suministros de productos químicos. Surge acá la pregunta si el empleo de una sola técnica basta para representar correctamente la operación de una cadena de suministro. Para Borshchev (2013), la dinámica de sistemas y el modelado de eventos discretos (centrados en el proceso) son los dos paradigmas de modelado con simulación tradicionales con más de 50 años de historia. Existían y se desarrollaban en aislamiento casi total unos de otros: diferentes comunidades, diferentes conferencias, diferentes libros y diferentes herramientas de software con cero inter-operabilidad. A principios de la década de 2000, llegó el que podría

considerarse el tercer paradigma de modelado: modelado basado en agentes. Tiene sus raíces en la informática, en particular, en el modelado orientado a objetos. El modelado basado en agentes sugiere una visión completamente diferente que el modelador debería tomar al mapear un sistema del mundo real. Actualmente se puede encontrar muchos ejemplos alusivos a este tema en las revistas de corriente principal (Ghadim et al., 2019), (Othman et al., 2017), (Gharaei y Jolai, 2018).

En Grigoryev (2016) se considera que el modelamiento moderno con simulación usa tres métodos: por eventos discretos, basado en agentes y dinámica de sistemas. Como se muestra en la Tabla 1, cada método sirve a un específico rango de niveles de abstracción y su respectiva aplicación. En Dinámica de Sistemas (SD) se asume una muy alta abstracción y es típicamente usado para modelamiento estratégico. El método de modelamiento por Eventos Discretos (DE) soporta abstracción en el nivel medio y medio-bajo, mientras que la simulación Basada en Agentes (AB) puede variar desde modelos detallados en los cuales los agentes representan objetos físicos a modelos de alta abstracción en donde los agentes incluso representan empresas. Sarmiento y López (2017) hacen un estudio comparativo de los 3 métodos con el fin de facilitarle al lector la elección del más conveniente, sin tener en cuenta que ciertos sistemas del mundo real requieren el empleo simultaneo de varios métodos de simulación a fin de representar correctamente la problemática dada. En Borshchev (2013) se considera que la mejor manera de modelar diferentes partes de un sistema es usar simultáneamente varios de los métodos descritos (modelo híbrido), sugiriendo que se debe seleccionar el(los) método(s) después de cuidadosamente considerar el sistema a modelar y los objetivos del estudio a realizar con simulación. Un ejemplo de esta simulación puede ser encontrado en Rostamzadeh et al. (2015).

Tabla 1: Aplicaciones de la simulación según nivel de abstracción.

Nivel de Abstracción	Aplicación
Alto (nivel estratégico)	Sistemas sociales, Ecosistemas, Economía, Mercado y competencia, Gerencia de proyectos, Recursos humanos, Cadena de suministros
Medio (nivel táctico)	Transporte, Call centers, Procesos de negocio, Almacenes, Aeropuertos, Hospitales, Terminales multimodales
Bajo (nivel operacional)	Hardware, Campo de batalla, Tráfico (microscópico) Movimiento peatonal, Sistemas de control automático

De otro lado, un reto importante en simulación de cadenas de suministro lo constituye el modelamiento apropiado del desplazamiento de vehículos en áreas geográficas específicas. De hecho, en Zhang et al (2016) reportan un estudio que se centró en localizar instalaciones de biocombustibles y diseñar la cadena de suministro respectiva para minimizar el costo total, proponiendo una metodología integrada combinando la tecnología GIS con métodos de simulación y optimización. Para Dudko et al. (2017) los mapas GIS (*Geographical Information System*) en la actualidad son herramientas con mucho potencial en diferentes industrias, pues proporcionan información de primera mano de forma gráfica para la toma de decisiones, siendo muy empleados en los sistemas Big Data (Wang et al., 2019), agricultura de precisión, cadenas de suministros (Sharma et al., 2018), manejo de ineficiencias en cadenas agroalimentarias (Jonkman et al., 2019) entre otras. Por ejemplo, Google Inc. proporciona mapas muy completos, que para el caso de Colombia es utilizado en una aplicación llamada PLC (Portal Logístico de Colombia), que muestra los corredores logísticos y servicios a vehículos, entre otros. También se encuentra en la Internet aplicaciones para visualizar el tráfico aéreo y marítimo como Flight-Radar24 y Marine-Traffic, que muestran en tiempo real el flujo de aeronaves y buques en todo el mundo.

Es por esto que paquetes de simulación (por ejemplo, AnyLogic) proporcionan un constructo de modelamiento llamado *Mapa GIS*, el cual les permite a los usuarios exponer y manejar el mapa de la tierra en su modelo de simulación. Los mapas GIS son frecuentemente usados para definir el espacio en modelos basados en agentes. El tipo de espacio GIS permite colocar agentes en un espacio geoespacial cuyo soporte incluye la facilidad de establecer y recuperar la localización actual de un agente, mover el agente con la velocidad especificada desde un lugar a otro a través de rutas existentes (vías reales), ejecutar alguna acción al arribo de un agente y otros servicios útiles como en la administración de las cadenas de suministro (Irizarry et al., 2013).

La implementación usada por AnyLogic es basada en *OpenMap* la cual es una herramienta de visualización geoespacial. En términos geoespaciales, una proyección es la translación entre un modelo esférico de la tierra a una superficie plana en dos dimensiones. Específicamente en *OpenMap*, las proyecciones son componentes que manejan las translaciones entre coordenadas de latitud y longitud en puntos de la pantalla de un computador. Es conveniente señalar que *OpenMap* asume que las coordenadas de latitud y longitud son definidas en términos del sistema de coordenadas WGS 84 (Sistema Geodésico Mundial 1984).

Es importante asegurarse de que los datos sean compatibles con otros datos que se muestran en el mismo mapa. Actualmente, OpenMap no tiene un mecanismo para traducir coordenadas de otro dato a WGS 84, pero hay paquetes disponibles en Internet para realizar esta función (ver <https://help.anylogic.com/index.jsp>).

Finalmente se debe señalar que el objetivo de un modelo de simulación es imitar el comportamiento del sistema modelado a fin de estudiar bajo que parámetros y sus niveles de operación se obtiene un mejor desempeño. En términos de teoría de decisión los parámetros equivalen a las variables de decisión y el desempeño con las variables respuesta de interés, también llamados KPI (*Key Performance Indicators*), en el caso de las cadenas de suministros, estas variables, se consideran comportamientos de atributos múltiples en la toma de decisiones (Chan et al., 2019). En Ivanov (2017) se utilizan escenarios de experimentación que incluyen algunas variables de decisión típicas de una cadena simple de gestión logística de alistamiento y transporte de materias primas, al igual que algunos KPI de interés particular. Se considera que un escenario es un conjunto dado de valores de las variables de decisión establecidos por el usuario. El uso de escenarios permite hacer análisis “*que tal si...*” sin cambiar directamente el modelo. Igualmente, el uso de escenarios puede ayudar a otros usuarios a emplear un modelo sin que tengan experiencia usando la lógica del modelo. Específicamente en los paquetes de simulación AnyLogic, FlexSim y ProModel se ofrece al usuario la funcionalidad de efectuar la experimentación con el modelo empleando escenarios a un número dado de réplicas, lo que facilita al usuario centrarse en el modelo de decisión.

## METODOLOGIA

La propuesta metodológica apunta a crear un ambiente de experimentación virtual de operación de la cadena de suministro mediante un modelo de decisión soportado en simulación por eventos discretos (DE) y simulación basada en agentes (ABM) según se ilustra en la Figura 1. Se espera que el tomador de decisiones inicialmente establezca valores de operación (variables de decisión) de la cadena de suministro, seguidamente simule dicha operación en un ambiente geográfico dado y obtenga unos niveles de desempeño, los cuales debe considerar en implementar en el mundo real o probar otros conjuntos de valores de las variables de decisión hasta obtener resultados que conlleven a la toma de buenas decisiones.

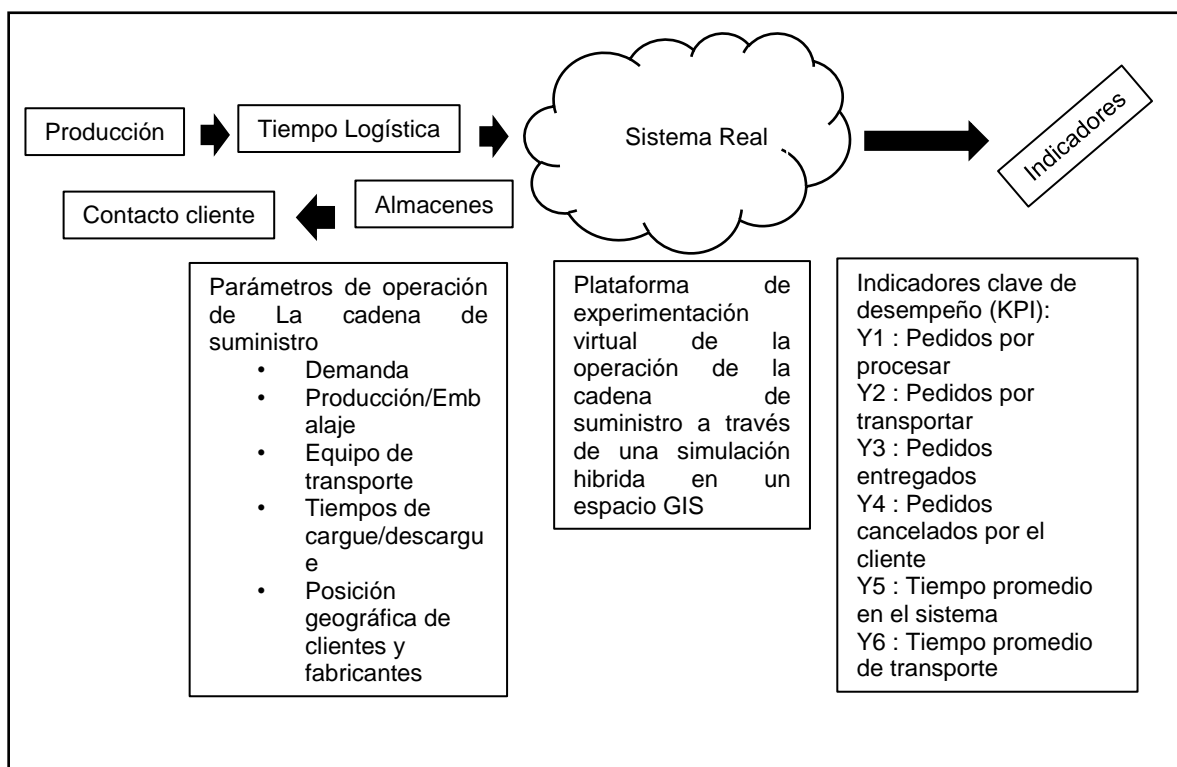


Fig. 1: Ambiente de experimentación virtual de operación de la cadena de suministro

A continuación, se describe el desarrollo requerido para obtener el ambiente de experimentación virtual de operación de la cadena de suministro.

El modelo de simulación: El objetivo es simular la operación logística involucrada en la producción y transporte de pedidos de productos solicitados por clientes dispersos geográficamente en una región. La cadena consta

de un centro de producción/distribución ubicado en determinadas coordenadas geográficas, una flota de pequeños camiones (camionetas) disponibles para el transporte de los pedidos y un conjunto de clientes, ubicado cada uno según unas coordenadas geográficas específicas. En razón a que el paquete de simulación seleccionado (Any Logic) ofrece la funcionalidad de desarrollar modelos híbridos, además de ofrecer soporte GIS, se ha seleccionado como la plataforma de desarrollo del modelo. Es importante mencionar que se ha utilizado la versión académica denominada PLE (*Personal Learning Edition*) dada su libre descarga y amigable al usuario al ofrecer una ayuda basada en tutoriales de fácil comprensión. Se describe a continuación la estructura del modelo híbrido desarrollado.

*Sub modelo por eventos discretos (DE):*

A fin de modelar el procesamiento de cada pedido de cliente, desde que se solicita hasta que se entrega, se emplearon los constructos de modelamiento ofrecidos por la librería de procesos (DE). En la Figura 2 se muestra una representación gráfica del sub modelo DE.

Se parte de un pedido solicitado por el agente *Cliente\_Detallista* (ver sub modelo AB más adelante), luego se encola según una disciplina FIFO, seguidamente se fabrica (asignando un procesador), se asigna un recurso camión para el transporte y finalmente se entrega con la consiguiente liberación del recurso.

Como se observa en la figura es posible que se descarte la fabricación del pedido si el tiempo de espera supera un límite previamente establecido por el usuario del modelo. Este último valor se pasa al sub modelo DE como un parámetro desde el agente *Main* (ver sub modelo AB más adelante).

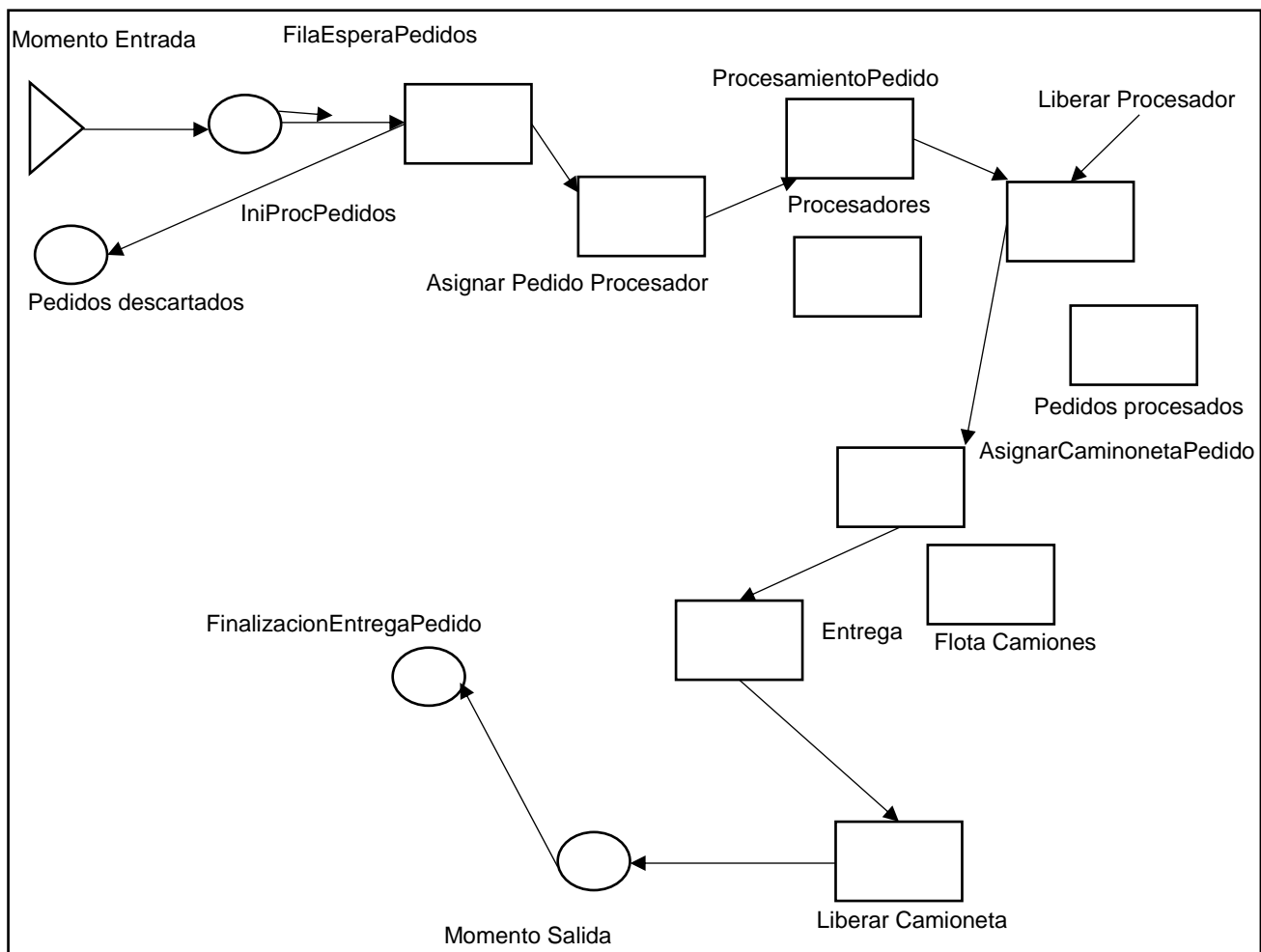


Fig. 2: Representación gráfica del sub modelo por eventos discretos (DE)

Con el fin de ilustrar el código asociado a los constructos mostrados en la Fig. 2, se muestra el asociado al constructo *Procesamiento\_Pedido* en la Figura 3. Este constructo se denomina *Delay* y tiene como función simular un tiempo de proceso, como por ejemplo el tiempo para fabricar una unidad de producto. Para el caso específico de la Figura 3, dicho tiempo sigue una distribución de probabilidad uniforme, cuyos parámetros de mínimo y máximo son pasados desde el agente *Main*. Este tiempo de proceso muestreado se

multiplica por la cantidad de productos solicitada en el respectivo pedido. Igualmente, la capacidad del procesador se pasa desde el agente *Main* mediante el parámetro *Cantidad\_Procesadores*.

### Sub modelo por agentes (AB)

En la plataforma de desarrollo empleada es posible modelar un tipo especial de agente denominado *Main*, desde el cual se puede controlar las interacciones entre agentes. Para el caso de la cadena logística simple se ha modelado además los siguientes agentes en particular: *Cliente\_Detallista* (agente que genera ordenes de pedido), *Empresa\_XYZ* (agente que fabrica), *Pedido\_Cliente* (agente que describe cual cliente pide y la cantidad pedida) y *Camioneta* (agente que transporta). Se describe cada uno de ellos a continuación:

ProcesamientoPedido – Delay	
Nombre	<input type="text" value="ProcesamientoPedido:"/> <input checked="" type="checkbox"/> Mostar Nombre <input type="checkbox"/> Ignorar:
Tipo	<input checked="" type="radio"/> Tiempo Especificado: <input type="radio"/> Hasta que Stop delay () sea llamado:
Tiempo de Retraso:	<input type="text" value="Uniform (main.TiempoMinimoProcesoProducto, Main.TiempoMaximoProcesoProducto) * Agent.CantidadPedida"/> <input type="text" value="Segundos"/>
Capacidad:	<input type="text" value="Main.CantidadProcesadores"/>

Fig. 3: Código asociado a constructo *Delay* en el sub modelo DE

### Sub modelo por agentes (AB)

En la plataforma de desarrollo empleada es posible modelar un tipo especial de agente denominado *Main*, desde el cual se puede controlar las interacciones entre agentes. Para el caso de la cadena logística simple se ha modelado además los siguientes agentes en particular: *Cliente\_Detallista* (agente que genera ordenes de pedido), *Empresa\_XYZ* (agente que fabrica), *Pedido\_Cliente* (agente que describe cual cliente pide y la cantidad pedida) y *Camioneta* (agente que transporta). Se describe cada uno de ellos a continuación:

#### Agente *Main*

Este es el agente por defecto al crear un nuevo modelo. Dado que la cadena logística opera sobre un área geográfica específica, se emplea el agente *Main* para representar el espacio geográfico en el cual interactúan los demás agentes. Para modelar este espacio se utilizó el constructo de modelamiento *GIS Map* con el fin de representar un área específica del mapamundi, que para el caso de experimentación se seleccionó la región centro-occidente de Colombia, como se muestra en la Figura 4.

Se espera que en dicho agente “residan” e interactúen los demás agentes. Dado que el modelo se generalizo para representar cualquier área geográfica, se explicará más adelante (sección de experimentación) como se parametrizan por parte del usuario las coordenadas geográficas del área sobre la cual se desea simular la cadena de suministro. Igualmente, desde este agente se establecen otros parámetros (variables de decisión) de operación de los demás agentes del modelo a fin de simular sus interacciones.

#### Agente *Cliente\_Detallista*

Mediante este agente se representa cada uno de los clientes en la cadena. Se modela como un tipo de agente cuya población (instancias del agente) se crea al momento de simular el modelo. Las coordenadas de la posición geográfica (en coordenadas de latitud y longitud) de cada uno de los clientes involucrados en la

cadena las configura el usuario desde un archivo en Excel. En la Figura 4 los clientes se muestran gráficamente como edificaciones en color azul.

Igualmente, para este agente se modela el evento *Generar\_Pedido* a fin de representar la interacción de solicitar productos al agente que fabrica. El código asociado define que dicho evento se desencadena cíclicamente (distribuido uniformemente) cada que transcurre un tiempo entre un mínimo y un máximo de horas, siendo estos últimos valores pasados desde el agente *Main*.

El evento genera como acción una nueva orden de pedido en términos de cantidad pedida y cliente. Los datos de la orden se envían al agente *Empresa\_XYZ*.

#### *Agente Empresa\_XYZ*

Representa al fabricante en la cadena logística. Se modela como un solo agente (una instancia del agente). Igualmente, las coordenadas de la posición geográfica (en coordenadas de latitud y longitud) las configura el usuario desde un archivo en Excel. En la Figura 4 el fabricante se muestra como una edificación en color rojo. La lógica interna de procesamiento de este agente se muestra en la Figura 3.

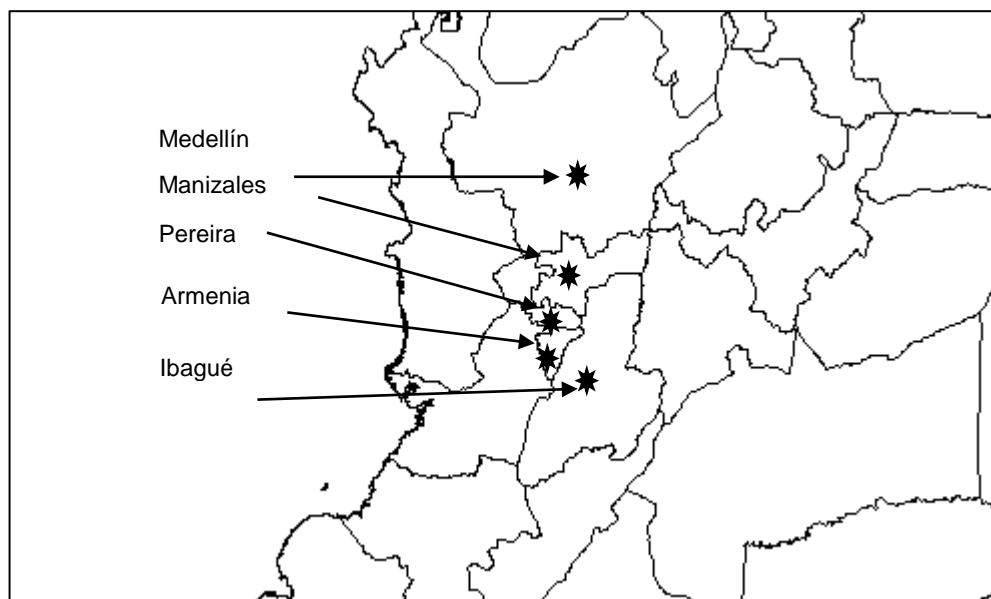


Fig. 4: Representación gráfica del agente *Main* en el sub modelo AB. Adaptado de (Mapas para colorear .com, 2019)

#### *Agente Empresa\_XYZ*

Representa al fabricante en la cadena logística. Se modela como un solo agente (una instancia del agente). Igualmente, las coordenadas de la posición geográfica (en coordenadas de latitud y longitud) las configura el usuario desde un archivo en Excel. En la Figura 4 el fabricante se muestra como una edificación en color rojo. La lógica interna de procesamiento de este agente se muestra en la Figura 3.

La interacción de este agente con los clientes se da a través del agente denominado *Pedido\_Cliente* y *Camioneta* los cuales se describen a continuación.

#### *Agente Pedido\_Cliente*

Representa cada uno de los pedidos hechos por los clientes al fabricante. Para cada pedido se originan dos datos: cantidad pedida y cliente que pide. El pedido se origina eventualmente desde el agente *Cliente\_Detallista*.

La cantidad pedida se encuentra delimitada entre un valor mínimo y máximo. Estos últimos valores son pasados desde el agente *Main* y proporcionados por el usuario del modelo según se explica más adelante.

#### *Agente Camioneta*

Representa cada uno de los vehículos que utiliza el fabricante para transportar los pedidos a los clientes y cuyo espacio de desplazamiento ocurre en un ambiente GIS (ver Figura 4). La capacidad de la flota de

transporte se encuentra delimitada entre un valor mínimo y máximo, cuyos valores son pasados desde el agente *Main* y proporcionados por el usuario del modelo.

Dicha flota de camiones es empleada como recurso desde el sub modelo de simulación discreta (ver Figura 2) para realizar las entregas a los clientes. El comportamiento principal de este tipo de agente es controlado mediante el diagrama de estados mostrado en la Figura 5. Según este diagrama el estado inicial de cada camión es parqueado en la fábrica (estado *EnFabrica*) en las mismas coordenadas GIS del agente *Empresa\_XYZ*.

Desde este último agente se envía un mensaje al agente *Camioneta* cuando hay un pedido listo para transportarse a un cliente específico (ver bloque *AsignarCamionetaPedido* en Figura 2). Cuando este mensaje se recibe por parte de un agente *Camioneta*, (que esté disponible) se origina la transición hacia el estado *TrámiteAdministrativo*, el cual tiene una duración en tiempo (similarmente los estados *Cargando* y *Descargando*). Los estados *ViajandoAlDetallista* y *ViajandoAlFabricante* terminan cuando la *Camioneta* arriba al agente *Cliente\_Detallista* y al agente *Empresa\_XYZ*, respectivamente.

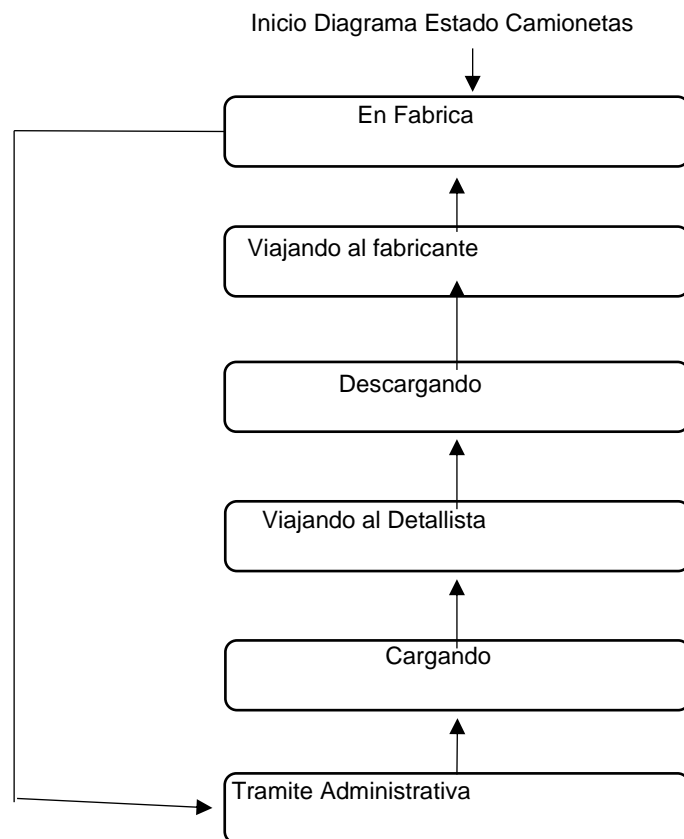


Fig. 5: Diagrama de estados para el agente *Camioneta*

El modelo de decisión logística: La expresión (1) denota el modelo lógico-matemático representado a través de la simulación. En este los niveles de las  $m$  variables de respuesta o medidas de desempeño ( $y_j$ ) dependen de las relaciones lógicas de las  $n_j$  variables de decisión ( $x_{i,j}$ ) descritas por la función  $f_j(x_{i,j})$ .

$$y_j = f_j(x_{i,j}) \text{ donde } 1 \leq i \leq n_j; 1 \leq j \leq m \quad (1)$$

Es claro que el modelo de simulación desarrollado hace el papel de la función  $f_j$  que permite obtener los  $y_j$  a partir de las entradas  $x_{i,j}$ . Igualmente se deja a criterio de los usuarios del modelo cuales variables de decisión  $x_i$  consideran que impactan la respectiva medida de desempeño  $y_j$  (relaciones causa-efecto).

Para el caso de la cadena logística modelada, los  $y_j$  son representados por los siguientes indicadores clave (entre otros) de desempeño (*Key Performance Indicators: KPI*):  $y_1$ : Pedidos por procesar;  $y_2$ : Pedidos por transportar;  $y_3$ : Pedidos entregados;  $y_4$ : Pedidos cancelados por el cliente;  $y_5$ : Tiempo promedio en el sistema;  $y_6$ : Tiempo promedio de transporte. Estos KPI básicamente miden el desempeño del sistema en términos de nivel de atención a los clientes (pedidos). Las variables de decisión (VD) consideradas comprenden aspectos relacionados con: demanda, procesamiento de pedidos, tiempos de cargue/descargue y equipo de transporte, según se puede ver en la Tabla 2. El objetivo central del modelo de simulación es permitir al usuario (estudiante de logística o profesional en entrenamiento) establecer ciertos niveles de las VD a fin de evaluar



el desempeño del sistema en términos de algunos KPI de interés, con el fin de entrenarse en toma de decisiones logísticas mediante una herramienta virtual.

Tabla 2: Variables de decisión (VD)

$x_i$	Descripción	Niveles permitidos (medida)
$x_1$	Tamaño del pedido	Entre 50 y 900 (Unidad)
$x_2$	Tiempo entre pedidos	1 y 72 (Horas)
$x_3$	Número de procesadores	Entre 1 y 50 (Unidad)
$x_4$	Tiempo de proceso	Entre 1 y 600 (Segundo)
$x_5$	Número de vehículos	Entre 1 y 50 (Unidad)
$x_6$	Velocidad vehículo	Entre 10 y 120 (Km/Hora)
$x_7$	Tiempo entre fallos vehículo	Entre 7 y 180 (Hora)
$x_8$	Tiempo reparación vehículo	Entre 1 y 72 (Hora)
$x_9$	Tiempo de cargue	Entre 1 y 80 (Minuto)
$x_{10}$	Tiempo de descargue	Entre 1 y 90 (Minuto)
$x_{11}$	Tiempo cancelación pedido	Entre 1 y 96 (Hora)

**RESULTADOS: EXPERIMENTACION CON EL MODELO**

Con el fin de mostrar el funcionamiento del modelo se ha considerado una cadena logística simple, caracterizada por:

*Una topología tipo estrella.* Consta de 1 fabricante que distribuye directamente sus productos a un número dado de clientes dispersos geográficamente. En la Figura 4 se representa al fabricante mediante una edificación roja y a cada uno de los clientes mediante una azul. Dicha figura representa el área geográfica en la cual opera la cadena logística. Esta área la determina automáticamente el modelo de simulación a partir de las coordenadas geográficas de cada uno de los agentes (fabricante y clientes) proporcionadas por el usuario a través de una hoja electrónica MS-Excel, según se muestra en la Figura 6.

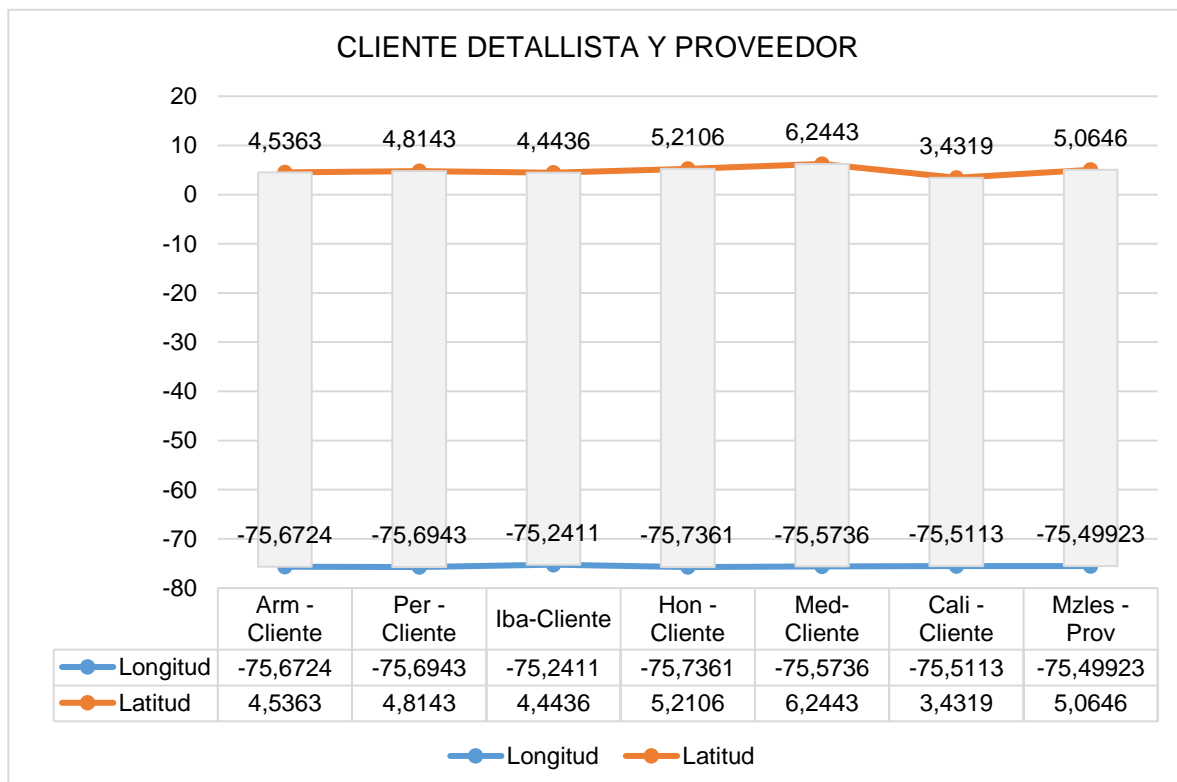


Fig. 6: Coordenadas geográficas de ubicación de los clientes y fabricante

*Comportamiento incierto en cantidad y tiempo de la demanda de los clientes.* A través de la interfaz ofrecida por el modelo de simulación, el usuario proporciona la cantidad pedida de producto variando entre un mínimo y un máximo a fin de simularla según una distribución de probabilidad uniforme. Igualmente se solicita el tiempo entre pedidos según se muestra en la Figura 7.

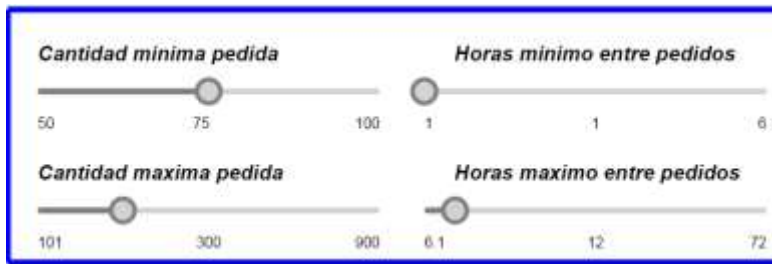


Fig. 7: Parámetros de comportamiento de la demanda en tiempo y cantidad

*Tiempos inciertos de procesamiento/embalaje.* El usuario proporciona el tiempo de proceso unitario variando entre un mínimo y un máximo a fin de simularlo según una distribución de probabilidad uniforme. Igualmente se solicita el número de procesadores (maquinas u operarios) y el máximo tiempo transcurrido que considera el cliente para cancelar su pedido, según se muestra en la Figura 8.

*Velocidad de desplazamiento, tiempos inciertos entre fallos y de reparación del equipo de transporte.* A través de la interfaz mencionada el usuario proporciona estos parámetros a fin de simularlos según una distribución de probabilidad triangular, además del número de vehículos que se quiere emplear en la simulación (ver Figura 9).



Fig. 8: Parámetros de comportamiento del procesamiento de pedidos en tiempo y número de procesadores



Fig. 9: Parámetros de comportamiento del equipo de transporte

*Tiempos inciertos de cargue/descargue.* La Figura 10 ilustra como la interfaz permite al usuario establecer en la simulación estos tiempos, muestrándolos desde una distribución de probabilidad uniforme, oscilando entre un mínimo y máximo número de minutos.

Como se puede inferir de lo anteriormente expuesto, es posible experimentar muy diversos escenarios de operación de la cadena logística mediante el modelo de simulación desarrollado. Se puede definir cada escenario según los niveles o valores dados a las variables de decisión, incluyendo entre estas últimas la ubicación geográfica tanto del fabricante/distribuidor como de los clientes.

La evaluación de cual escenario de operación dado es el apropiado, puede ser realizada por el usuario mediante comparación de uno o más de los KPI descritos. A efectos de demostración, en la Tabla 3 se

muestran los valores de las variables de decisión para un escenario que considera una demanda que fluctúa con tamaños de pedidos entre 75 y 300 unidades de producto y tiempos entre pedidos de 1 y 12 horas. Igualmente se consideraron las coordenadas geográficas de los clientes, mostradas en la Figura 6.

Se realizó una simulación con una longitud de corrida de 1 mes, empleando como parámetros de operación los fijados en las figuras 7, 8, 9 y 10 a fin de mostrar al lector el comportamiento dinámico de la cadena logística, con los siguientes resultados en formato grafico (igualmente estos resultados se pueden obtener en formato tabular). En cualquier momento (por ejemplo, comienzo del día 3) de la simulación el usuario puede ver el comportamiento de la cadena logística en términos de algunos indicadores de desempeño. En la Figura 11, se muestran los valores alcanzados por los KPI  $y_5$  y  $y_6$  que corresponden a los tiempos promedio de permanencia y transporte de pedidos. En la Figura 12, se muestran los valores alcanzados por los KPI  $y_1$ ,  $y_2$  y  $y_3$  que corresponden a los porcentajes de pedidos en espera de procesamiento y transporte. En la figura 13 se muestran otros KPI de interés en gestión logística como lo es conocer hasta un periodo dado la cantidad de pedidos demandados vs los pedidos entregados.

En la Figura 14 se puede observar el desempeño alcanzado por el sistema en los KPI:  $y_1$ : Cantidad de pedidos por procesar;  $y_2$ : Cantidad de pedidos por transportar;  $y_3$ : Cantidad de pedidos entregados;  $y_4$ : Cantidad de pedidos cancelados al comienzo del día 3, mientras que la Figura 15 los muestra al final del día 30.

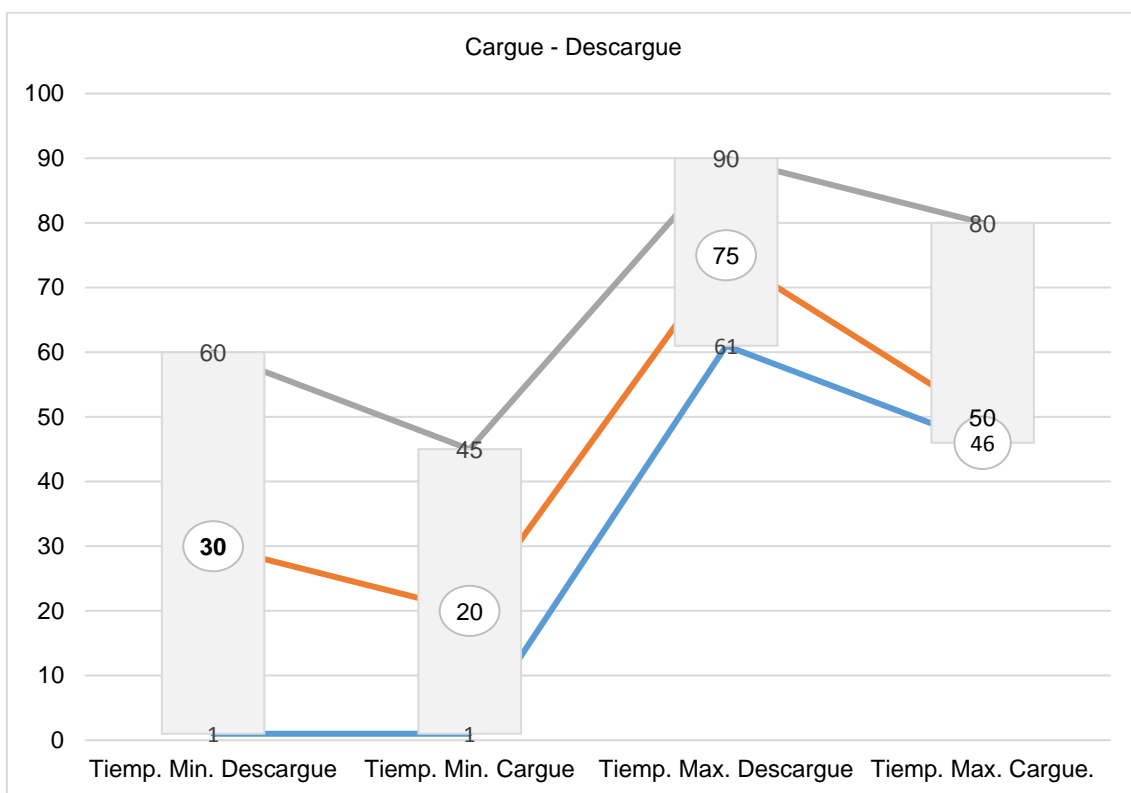


Figura 10: Parámetros de tiempo de cargue/descargue

Tabla 3: Nivel de las variables de decisión para un escenario dado

$x_i$	Descripción	Escenario 1
$x_1$	Tamaño del pedido	Entre 75 y 300 unidades
$x_2$	Tiempo entre pedidos	Entre 1 y 12 horas
$x_3$	Número de procesadores	1
$x_4$	Tiempo de proceso	Entre 10 y 120 segundos
$x_5$	Número de vehículos	5
$x_6$	Velocidad vehículo	Entre 20 y 81, siendo más probable 60 km/hora
$x_7$	Tiempo entre fallos vehículo	Entre 7 y 90, siendo más probable 30 horas
$x_8$	Tiempo reparación vehículo	Entre 3 y 36, siendo más probable 12 horas
$x_9$	Tiempo de cargue	Entre 20 y 50 minutos
$x_{10}$	Tiempo de descargue	Entre 30 y 75 minutos
$x_{11}$	Tiempo cancelación pedido	Después de transcurridas 6 horas

Finalmente se espera que el usuario siga un proceso iterativo que partiendo del establecimiento de varios escenarios según las variables de decisión relacionadas en la Tabla 3, vaya mejorando los niveles alcanzados por los KPI, en pro de mejorar su competencia y habilidades en la toma de decisiones relacionadas con la logística de gestión de una cadena de suministro.

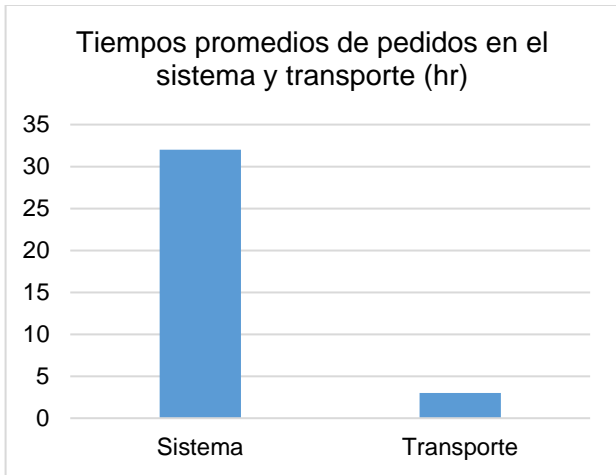


Fig. 11: Nivel de las medidas de desempeño  $y_5, y_6$

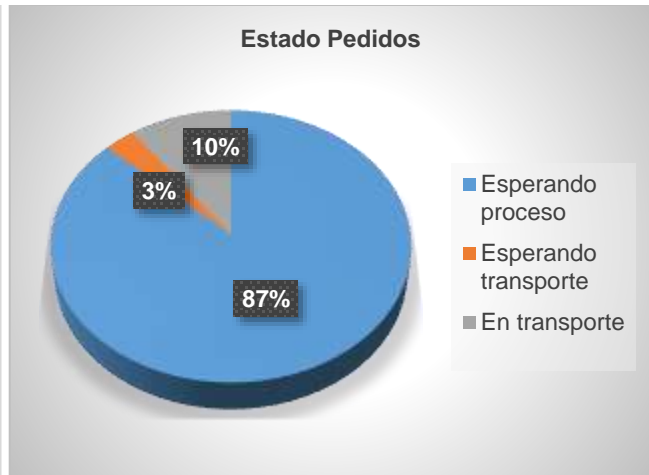


Fig. 12: Estado actual de los pedidos en la cadena

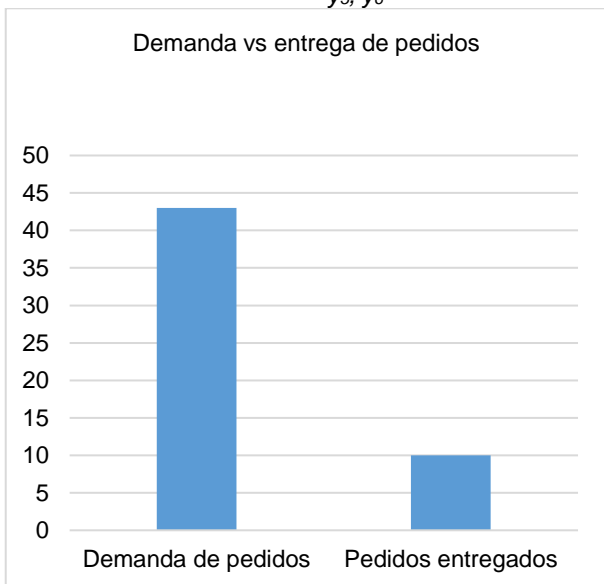


Fig. 13: Demanda de pedidos vs pedidos entregados

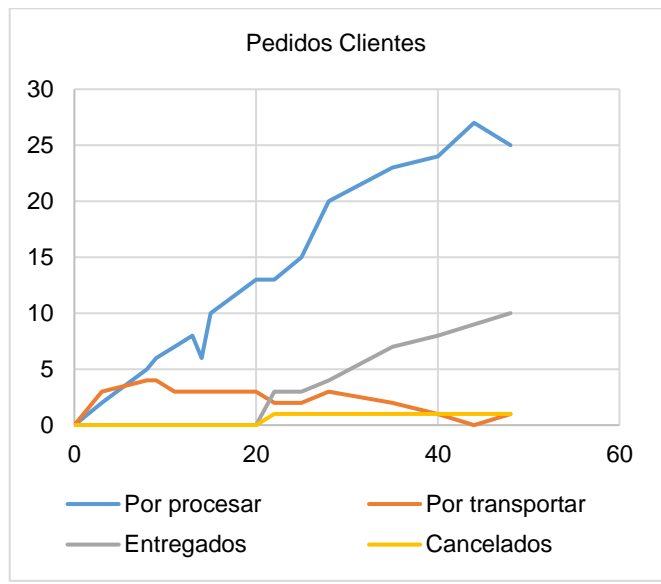


Fig. 14: Nivel actual de las medidas de desempeño  $y_1, y_2, y_3, y_4$

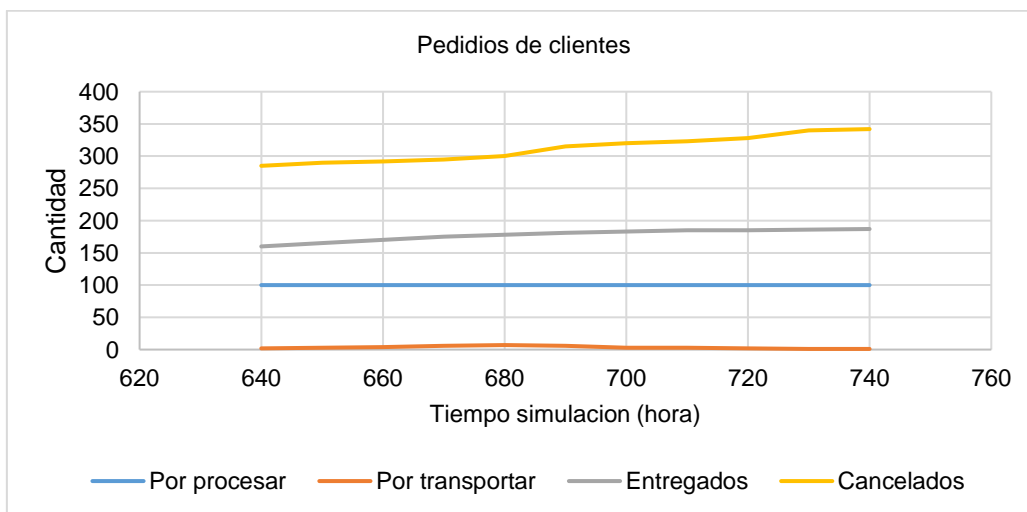


Fig. 15: Nivel final de las medidas de desempeño  $y_1, y_2, y_3, y_4$

## CONCLUSIONES

La operación de la cadena de suministro (SC) se enfrenta a grandes incertidumbres en el lado de la demanda, así como a un complejo proceso de distribución en una geografía dada, con esperas no deterministas en el lado de la producción. Comprender, por parte de los decisores de las interdependencias y procesos de una SC, es esencial para aprovechar las oportunidades y mitigar los riesgos.

El modelo de simulación desarrollado aboga por un enfoque basado en agentes combinado con un enfoque por eventos discretos, apoyado en tecnología GIS, que permita comprender el impacto de la incertidumbre en decisiones relacionadas, entre otras con: tamaño de la flota de transporte, capacidad del sistema de producción, cobertura geográfica de servicio a la demanda y ubicación apropiada de la planta de fabricación/distribución, en pro de mejorar los procesos de planificación, diseño y operación de la cadena de suministro utilizando un ejemplo típico de la industria.

Se espera que los tomadores de decisiones al realizar una simulación iterativa de varios escenarios mejoren su competencia y habilidad para alcanzar niveles de los KPI aceptables por la alta gerencia, a fin de implementar los cambios sugeridos por las variables de decisión en la cadena de suministro real.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración a la Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales y al Departamento de Ingeniería Industrial de esta misma sede.

## REFERENCIAS

- Banks, J., J. Carson, L.N. Barry y D. Nicol, *Discrete-Event System Simulation*, 5ª ed., 1, Pearson Education Limited, London, England (2014)
- Borshchev, A, *The Big Book of Simulation Modeling: Multimethod Modeling with AnyLogic 6*, 2ª ed., 3-4, AnyLogic North America, 2-3, (2013)
- Chan, C.K, Y. Zhou y K. Hung, *An equilibrium model of the supply chain network under multi-attribute behaviors analysis*, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.11.068>, European Journal of Operational Research, (275), 514-535 (2019)
- Coca, G., O. Castrillon y otros tres autores, *Sustainable evaluation of environmental and occupational risks scheduling flexible job shop manufacturing systems*, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.193>, Journal of Cleaner Production, (209), 146 -168 (2019)
- Mapas para colorear .com, *Mapas de colombia*, Tomado de: <http://www.mapasparacolorear.com/colombia/mapa-colombia.php> (2019)
- Dudko, Y., D. Robey, E. Kruger y M. Tennant, *Selecting a location for a primary healthcare facility: combining a mathematical approach with a Geographic Information System to rank areas of relative need*, doi: 10.1071/PY17093, Australian Journal of Primary Health, 24(2), 130-134,(2017)
- Ghadimi, P., C. Wang, M. Lim y C. Heavey, *Intelligent sustainable supplier selection using multi-agent technology : Theory and application for Industry 4.0 supply chains*, <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.10.050>, Computers & Industrial Engineering, (127), 588-600 (2019)
- Gharaei, A. y F. Jolai, *A multi-agent approach to the integrated production scheduling and distribution problem in multi-factory supply chain*, <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.02.002>, Applied Soft Computing, (65), 577 – 589 (2018)
- Grigoryev I., *AnyLogic in Three Days: a Quick Course in Simulation Modeling*, 2ª ed., 11-12, AnyLogic North America, (2016)
- Hennies, T., R. Tobias, J. Tolujew y P. Piccut, *Mesoscopic supply chain simulation*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jocs.2013.08.004>, Journal of Computational Science, (5), 463 – 470 (2014)
- Guerrero, M. y A. Henriques, *Simulación de eventos discretos de la cadena logística de exportación de commodities*, Ingeniare. Rev. chil. Ing (22), 257-262 (2014)
- Irizarry, J., E. Karan y F. Jalaei, *Integrating BIM and GIS to improve the visual monitoring of construction supply chain management*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2012.12.005>, Automation in Construction, (31), 241 – 254 (2013)
- Ivanov D. *Supply chain simulation and optimization with anyLogistix: Teaching notes*. 2ª ed., 8. Berlín School of Economics and Law, Germany (2018)
- Jonkman, J., A. Barbosa-Póvo y J. Bloemhof, *Integrating harvesting decisions in the design of agro-food supply chains*, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.12.024>, European Journal of Operational Research, (276), 247-258 (2019)

- Kalverkamp, M. y S. Young, *In support of open-loop supply chains: Expanding the scope of environmental sustainability in reverse supply chains*, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.006>, Journal of Cleaner Production, (214), 573-582 (2019)
- Koberg, E. y A. Longoni, *A systematic review of sustainable supply chain management in global supply chains*, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.033>, Journal of Cleaner Production, (207), 1084 - 1098 (2019)
- Meng, Q., Z. Li, H. Liu y J. Chen, *Agent-based simulation of competitive performance for supply chains based on combined contracts*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.08.031>, International Journal of Production Economics, (193), 663-676 (2017)
- Oh, J. y B. Jeong, *Tactical supply planning in smart manufacturing supply chain*, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.04.003>, Robotics and Computer Integrated Manufacturing, (55), 217-233 (2019)
- Olivares, J. y W. Elmaraghy, *Supply Chain resilience and structure: An evaluation framework*, [10.1016/j.promfg.2018.12.008](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.12.008), Procedia Manufacturing, (28), 43-50 (2019)
- Oliveira, J., M. Jin, y otros tres autores, *The role of simulation and optimization methods in supply chain risk management: Performance and review standpoints*, <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2018.11.007>, Simulation Modelling Practice and Theory, (92), 17-44 (2019)
- Oliveira, J., R. Silva y J. Barra, *Perspectives and relationships in Supply Chain Simulation: A systematic literature review*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.simpat.2016.02.001>, Simulation Modelling Practice and Theory, (62), 166 – 191 (2016)
- Oliveira, J.B., R. Silva y J. Barra, *Perspectives and relationships in Supply Chain Simulation: A systematic literature review*, Simulation Modelling Practice and Theory (62), 166-191 (2016)
- Osorio, J., D. Manotas y L. Rivera, *Priorización de Riesgos Operacionales para un Proveedor de Tercera Parte* *Logística - 3PL. Inf. tecnol.* vol.28 (4) 135-144 (2017)
- Othman, S., H. Zgaya, M. Dotoli y S. Hammadi, *An agent-based Decision Support System for resources' scheduling in Emergency Supply Chains*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conengprac.2016.11.014>, Control Engineering Practice, (59), 27-43 (2017)
- Pujawan, N., M. Maturidi, B. Tjahjono, y D. Kritchanhai, *An integrated shipment planning and storage capacity decision under uncertainty: A simulation study*, International J. of Phys. Distribution & Logistics Management (45), 913-937 (2015)
- Rostamzadeh, R., S. Sofian y Z. Ismail, *Hybrid GA for material routing optimization in supply chain*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2014.09.033>, Applied Soft Computing, (26), 107-122 (2015)
- Sarmiento, A., y E. López, *Una comparación cualitativa de la dinámica de sistemas, la simulación de eventos discretos y la simulación basada en agentes* Ingeniería Industrial (35), 27-52, Editorial Universidad de Lima (2017)
- Sharma, R., S. Kamble y A. Gunasekaran, *Big GIS analytics framework for agriculture supply chains: A literature review identifying the current trends and future perspectives*, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.10.001>, Computers and Electronics in Agriculture, (155), 103-120 (2018)
- Solver, Inc., *"Montecarlo Simulation Tutorial,"* consultado desde <https://www.solver.com/monte-carlo-simulation-example>, enero (2018)
- Wang, S., y. Zhong, E. Wang, *An integrated GIS platform architecture for spatiotemporal big data*, <https://doi.org/10.1016/j.future.2018.10.034>, Future Generation Computer Systems, (94), 160-172 (2019)
- Zhang, F., D. Johnson, y otros cuatro autores, *Decision support system integrating GIS with simulation and optimisation for a biofuel supply chain*, Renewable Energy (85), 740-748 (2016)