



Efecto de la competencia mayorista en las cadenas de abastecimiento: Análisis experimental con múltiples decisores

Yuly Andrea Arboleda Valencia

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Ciencias de la Computación y de la Decisión
Medellín, Colombia
2017

Efecto de la competencia mayorista en las cadenas de abastecimiento: Análisis experimental con múltiples decisores

Yuly Andrea Arboleda Valencia

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería de Sistemas

Director:

Ph.D., Santiago Arango Aramburo

Línea de Investigación:

Investigación de Operaciones

Grupo de Investigación:

Ciencias de la Decisión

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Ciencias de la Computación y de la Decisión

Medellín, Colombia

2017

Agradecimientos

Agradezco a mi mamá por su trabajo incansable, compañía, apoyo y enseñanzas.

Agradezco al director de esta tesis, Santiago Arango, por su paciencia infinita, su acompañamiento y ayuda constantes y su amistad incondicional.

Resumen

Uno de los problemas más frecuentes y costosos en las cadenas de suministro es el Efecto Látigo, que capta parcialmente la oscilación de órdenes en los eslabones de la cadena de suministro y cómo se amplifican hacia arriba de la cadena. La literatura muestra que aunque el comportamiento agregado en las cadenas de suministro está bien descrito, todavía hay preguntas asociadas la heterogeneidad de los actores, cómo se comportan en un ambiente de competencia y la posible existencia de múltiples reglas de decisión.

En este estudio se analiza el efecto látigo cuando la competencia se incluye al nivel mayorista considerando heterogeneidad en las reglas de decisión. Para esto se construye un modelo híbrido que combina las metodologías de simulación basada en agentes y dinámica de sistemas para mostrar cómo los clientes mayoristas inflan los pedidos a su único proveedor de un producto único, limitado y escaso; llevando al proveedor a invertir en capacidad para cumplir con los pedidos. Dada la dificultad para conocer las reglas de decisión, en esta investigación también se presenta el diseño de un experimento piloto de laboratorio que permita estudiar cómo son las decisiones de las personas asumiendo el rol de clientes mayoristas realizando pedidos a sus proveedores, en una cadena de abastecimiento caracterizada por tener un único proveedor de un producto único e insustituible.

Consistente con la literatura, nuestros resultados muestran que los clientes tienden a inflar sus pedidos cuando se enfrentan a productos agotados, competencia en el nivel y diferentes retardos en el sistema; a pesar de tener alta heterogeneidad de los decisores.

Palabras clave: Análisis de decisiones, administración de la cadena de abastecimiento, sistemas basados en agentes.

Abstract

One of the most frequent and costly problems in supply chains is the Bullwhip Effect, which captures the oscillation of orders in the steps of the supply chain and how it was amplified up the chain. The literature shows that while aggregate behavior in supply chains is well described, there are still questions associated with the heterogeneity of actors, how they behave in a competitive environment, and the possible existence of multiple decision rules.

In this study, the bullwhip effect is analyzed when competition is included at the wholesale level considering heterogeneity in decision rules. To achieve this, it is built a hybrid model that combines the methodologies of agent-based simulation and system dynamics to show how wholesale customers inflate orders to their sole supplier of a single, limited, and scarce product; taking the supplier to invest in capacity to fulfill orders. Given the difficulty of the rules of the decision, this research also presents the design of a laboratory pilot experiment that allows to study how the decisions of the people are assuming the role of the wholesale clients making orders to the suppliers, in a chain Of Supply characterized by having a single supplier of a unique and irreplaceable product. Given the difficulty in knowing the rules of the decision, this research also presents the design of a laboratory pilot experiment that allows to study how the decisions of the people are assuming the role of the wholesale clients making orders to the suppliers, in a Chain of Supply characterized by having a single supplier of a unique and irreplaceable product

Our results show that customers tend to inflate their orders when faced with exhausted products, competition in the level, and different delays in the system despite the high heterogeneity of decision makers

Keywords: decision analysis, supply chain management, agent systems

Contenido

	Pág.
Resumen	VII
Introducción	1
1.1 El efecto látigo	1
1.2 Causas y consecuencias del efecto látigo.....	3
1.3 Evidencia empírica del efecto látigo.....	6
2. Revisión de la literatura	11
2.1 Modelamiento y simulación.....	11
2.2 Estudios empíricos	14
2.3 Estudios experimentales.....	15
3. Planteamiento del problema	21
4. Objetivos	23
4.1 Objetivo general.....	23
4.2 Objetivos específicos	23
5. Metodología	25
5.1 Dinámica de sistemas.....	28
5.2 Simulación basada en agentes	28
5.3 Experimentos de laboratorio	30
6. Diseño del modelo	33
6.1 Visión general.....	33
6.2 Detalles	42
7. Resultados de simulación	51
8. Experimento piloto	60
8.1 Diseño del experimento piloto.....	60
8.2 Procedimiento experimental.....	66
8.3 Recompensa	67
8.4 Resultados del experimento piloto	68
9. Conclusiones y recomendaciones	75
9.1 Conclusiones	75
9.2 Recomendaciones	77

A. Anexo: Instrucciones para el tratamiento 2 del experimento de piloto de laboratorio	79
B. Anexo: Interfaz del experimento piloto	83
Bibliografía	85

Introducción

En la actualidad las empresas compiten a través de sus cadenas de abastecimiento (Gigola, 2001), las cuales están conformadas por redes de fábricas, proveedores, centros de distribución y clientes, y sus relaciones, los que se encuentran involucrados en los procesos de producción para satisfacer la demanda de los consumidores (Hwarng & Xie, 2008; Ponte, Sierra, de la Fuente, & Lozano, 2017; Rúa, 2008; S. Wu, Gan, & Wei, 2011). En las cadenas de abastecimiento se realizan operaciones de producción, abasto y distribución de bienes generando flujos de productos e información (Gigola, 2001; Ponte et al., 2017; Rúa, 2008).

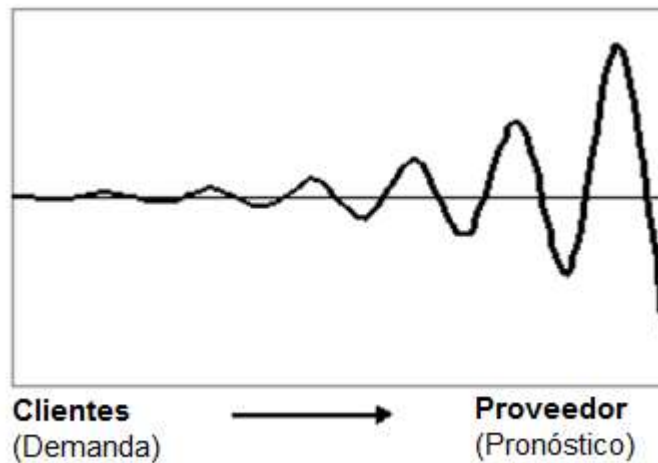
Las cadenas de abastecimiento son sistemas dinámicos complejos al ser caracterizadas por procesos de realimentación, no linealidades y retardos (Hwarng & Xie, 2008), en las que además hay varias formas de incertidumbre como la demanda y los tiempos de entrega (S. Wu et al., 2011). Cada agente posee su propia comprensión del sistema como un todo, lo que tiene implicaciones sobre el comportamiento (Gonçalves & Arango, 2010) y por lo tanto en la toma de decisiones sobre cuánto y cuándo abastecerse (Hwarng & Xie, 2008). La comprensión y complejidad de las cadenas de abastecimiento y la racionalidad en la toma de decisiones en éstas son importantes tanto para la mejora de los sistemas productivos, como para reducir los problemas que éstas puedan acarrear para la sociedad (Villa, 2011).

1.1 El efecto látigo

Uno de los problemas más frecuentes y costosos en las cadenas de abastecimiento es conocido como el Efecto Látigo (Armony & Plambeck, 2005; Gonçalves, 2003). El término “Látigo” se ha acuñado para describir el efecto que captura la oscilación de las órdenes en cada eslabón y la amplificación de estas oscilaciones a medida de que mueven arriba de la cadena (Croson & Donohue, 2002), de modo que una pequeña variación en la

demanda puede generar grandes oscilaciones en la producción para los proveedores en el otro extremo de la cadena (Wang & Disney, 2016) como se ilustra en la **Figura 1 - 1**. Tanto las oscilaciones como las amplificaciones son costosas para las cadenas de abastecimiento (Croson & Donohue, 2002).

Figura 1 - 1: Amplificación de las órdenes en cadenas de abastecimiento debido al efecto látigo.



Fuente: Adaptado de (Buchmeister, Pavlinjek, Palcic, & Polajnar, 2008)

El fenómeno comienza con la aparición de un déficit en algún lugar de la cadena, el que llevará a una reacción en el resto de los eslabones: ante una posible escasez de un producto, un cliente realizaría pedidos más elevados de los necesarios, dando una falsa impresión al proveedor de que la demanda está aumentando (Lee, Padmanabhan, & Whang, 1997a). La existencia de retardos provoca más inflación en los pedidos por parte de los clientes y mayor deseo de adquisición de capacidad por parte de los proveedores (Gonçalves, 2003). Este fenómeno es conocido como “órdenes fantasma”, que no son más que las órdenes colocadas por los eslabones intermedios de la cadena como respuesta a la escasez percibida y en un intento por obtener más productos y satisfacer su demanda (Gonçalves, 2002, 2003, Sterman, 2000, 2006).

De esta manera, el efecto látigo indica una falta de sincronización entre los miembros de la cadena de suministro, de modo que incluso un ligero cambio en las ventas de los clientes debajo de la cadena, genera oscilaciones amplificadas en los eslabones

superiores (Buchmeister et al., 2008). La variabilidad, junto con los retardos en los flujos de información y los retardos en la fabricación y el envío de mercancías en la cadena de suministro, crean el efecto látigo: En los períodos de demanda creciente, los eslabones abajo de la cadena aumentarán sus órdenes; en los períodos de caída de la demanda, los pedidos caerán o se detendrán para reducir el inventario (Buchmeister et al., 2008).

La situación expuesta lleva al proveedor a tomar la decisión de aumentar la capacidad de producción de acuerdo con la demanda que está percibiendo (Gérard P. Cachon & Lariviere, 1999). Sin embargo, una vez el proveedor tiene la suficiente capacidad para responder a la demanda percibida, los clientes paran de inflar sus pedidos, dejando al proveedor con una alta capacidad de producción (Villa, 2011). La discrepancia entre lo que el cliente requiere y la capacidad de producción excesiva del proveedor genera lo que se conoce como “burbuja especulativa de demanda” (Gonçalves, 2002), como resultado de los pedidos inflados de los clientes intermedios al estar enfrentados ante la escasez de un bien insustituible.

1.2 Causas y consecuencias del efecto látigo

En la literatura, las causas que explican el fenómeno del efecto látigo han sido categorizadas como operacionales y comportamentales.

Las causas operacionales son características estructurales que llevan a los agentes a amplificar la variación de la demanda (Croson, Donohue, Katok, & Sterman, 2014). Dentro de esta categoría están las expuestas por Lee et al., (1997a); Lee, Padmanabhan, & Whang, (1997b), las que influyen en la generación de variabilidad de la demanda asumiendo que los jugadores son completamente racionales: i. Ordenamiento por lotes, ii. Fluctuación de precios, iii. Déficit de capacidad que conduce a racionamiento por parte del proveedor (asignación de su capacidad de producción) y iv. Procesamiento de señales de demanda (La señal de demanda del mercado se distorsiona por el reordenamiento de los clientes). Por su parte Nienhaus, Ziegenbein, & Duijts, (2006) mencionan como causa operacional del efecto látigo el tiempo de entrega de información y material, de modo que la reacción de una cadena de suministro ante un cambio en la demanda de los clientes finales se retrasa en primer lugar porque se necesita tiempo para transmitir información sobre el cambio a los proveedores y en segundo lugar porque

estos proveedores necesitan tiempo para ajustar sus capacidades y entregas (Nienhaus et al., 2006).

Por otro lado, dentro de las causas comportamentales, las que son principalmente atribuidas a limitaciones cognitivas de los tomadores de decisiones, caben las encontradas por Sterman (1989). En su estudio el autor atribuyó la amplificación a la tendencia de los jugadores a pasar por alto las órdenes colocadas pero aún no recibidas, es decir, a no tener plenamente en cuenta la línea de suministro a la hora de tomar decisiones de pedidos, una causa de amplificación conocida como comportamiento irracional. Además de esto, en su estudio se evidenció una mala percepción de los ciclos de realimentación por parte de los tomadores de decisiones.

Más tarde, Wu & Katok, (2006) realizaron experimentos de laboratorio cuyos resultados indican que el efecto látigo es causado, al menos en parte, por la coordinación (comunicación) insuficiente entre los eslabones de la cadena de suministro. Por su parte, Nienhaus et al., (2006), encontraron que otra causa comportamental del fenómeno es que los eslabones de la cadena subestiman el valor de la información, de modo que cada eslabón actúa como un obstáculo para el flujo de información aumentando así los tiempos de entrega.

De esta manera, el comportamiento de los humanos contribuye a la amplificación de las órdenes y como tal es incluido dentro de las causas del efecto látigo (Bishop, Graham, & Jones, 1984; Nienhaus et al., 2006; Sterman, 1989). Las causas comportamentales enfatizan la racionalidad limitada de los tomadores de decisiones, particularmente por no tener en cuenta los ciclos de realimentación y los retardos (Croson et al., 2014; Sterman, 1989).

Figura 1 - 2: Causas del efecto látigo en las cadenas de abastecimiento

Fuente: Adaptado de (Bhattacharya & Bandyopadhyay, 2011)

Una vez conocida las causas del efecto látigo, que se resumen en la **Figura 1 - 2**, vale la pena mencionar las consecuencias del fenómeno, dentro de las que se destacan inversiones excesivas de capital, inventarios excesivos o insuficientes, altos niveles de inventarios de seguridad, baja utilización de la capacidad, contratación y despido de fuerza de trabajo, dificultades en el pronóstico de la demanda y programación de la producción, aumento en los costos logísticos, mayores retrasos y por lo tanto a un servicio deficiente que impacta las relaciones entre proveedores y clientes y la competitividad de las empresas (Armony & Plambeck, 2005; Gonçalves, 2003; Lee et al., 1997a; Nienhaus et al., 2006; Serman, 2000; Wang & Disney, 2016); en general hace más difícil administrar y operar eficientemente el sistema, ya que los recursos disponibles no se utilizan eficientemente (Kaminsky & Simchi-Levi, 1998).

Gonçalves, (2003) expone que los problemas asociados con las burbujas de demandas son agravados por varios aspectos como la competencia de los clientes, los retardos en la adquisición de capacidad por parte del proveedor y el tiempo que le toma a los clientes percibir y reaccionar a los retrasos de entrega del proveedor:

- i. Cuanto más feroz es la competencia entre los clientes, más fuerte es el incentivo para que los clientes respondan de manera más agresiva a la escasez de suministros, y mayor es el tamaño de la burbuja en las órdenes.

- ii. Cuanto más rápido el proveedor pueda añadir nueva capacidad, menor será el impacto de la burbuja, es decir, requerirá menos capacidad total y se enfrentará a un período más corto de bajo rendimiento caracterizado por menores atrasos y plazos de entrega más cortos.
- iii. Cuando un proveedor proporciona información en tiempo real sobre retrasos en la entrega, los clientes reaccionan instantáneamente para protegerse contra la escasez haciendo que el sistema sea altamente inestable, empeorando la situación. Por el contrario, cuando el proveedor proporciona información sobre los retrasos en la entrega con algún retraso a los clientes, el sistema es más estable, ya que tomará tiempo antes de que los clientes reaccionen exageradamente, dándole al proveedor la oportunidad de actuar para reducir los retrasos en la entrega.

1.3 Evidencia empírica del efecto látigo

El interés en estudiar el efecto látigo radica en que este fenómeno es un problema que ha tenido gran impacto a nivel industrial, de hecho, y como se muestra en esa sección, se han identificado múltiples casos donde se evidencia la presencia del efecto látigo.

Procter and Gamble fue el primero en acuñar el término de efecto látigo para describir el comportamiento sistemático de ordenamiento presentado entre los clientes y proveedores de pañales Pampers (Croson & Donohue, 2002; Lee et al., 1997a; Wang & Disney, 2016). En sus estudios, la empresa encontró que mientras que los pañales gozaban de una tasa de consumo relativamente constante, las órdenes del mayorista fluctuaban considerablemente a través del tiempo, y que las ordenes colocadas para materias primas con sus proveedores fluctuaban aún más que las órdenes del mayorista (Croson & Donohue, 2002; Lee et al., 1997a).

Otros casos destacables son los presentados en empresas como Intel y AMD, Hewlett-Packard, y Cisco. El primero de ellos, que tuvo lugar en 1995 durante el déficit de microprocesadores, hizo que proveedores como Intel y ADM tuvieran que asignar su capacidad de producción entre clientes como Dell, COMPAQ, HP y muchos otros (Gonçalves, 2003). Para mejorar sus posibilidades de suministro, los clientes realizaron pedidos múltiples con mayoristas, llevando a los fabricantes a confundir los pedidos

especulativos de los clientes con un aumento en la demanda del cliente final, a lo que los fabricantes respondieron aumentando las existencias de materias primas, acelerando la producción, agregando horas extras y construyendo capacidad de producción adicional (Gonçalves, 2003). Sin embargo, a medida que aumentaba la capacidad de producción, permitiendo satisfacer la demanda, la necesidad de los clientes mayoristas de protegerse contra la escasez de suministro desapareció, al igual que sus órdenes especulativas, dejando a los proveedores con exceso de capacidad y con precios bajos (Gonçalves, 2003).

Posteriormente, y dada la escasez en microprocesadores Pentium III en noviembre de 1999, Intel planeó construir una nueva planta de producción a principios del año 2000 (Foremsky, 1999). Sin embargo, a inicios del año 2001 se esperaba una gran caída en ventas, muy por debajo de lo pronosticado, debido a cancelaciones de pedidos por parte de grandes clientes con excesos de inventarios y a la desaceleración del mercado de los computadores y de la economía en general (Gaither, 2001). Como medidas para reducir estos costos Intel debió cerrar la planta de fabricación en Puerto Rico, eliminando 1.300 puestos de trabajo (Gaither, 2001; TheStreet, 2001).

Por su parte, Hewlett-Packard no pudo satisfacer la demanda de su impresora LaserJet III y racionó el producto, lo que llevó a que los pedidos aumentaran (Lee et al., 1997b). HP no pudo discernir si las órdenes reflejaban genuinamente las demandas reales del mercado o eran simplemente órdenes fantasmas de mayoristas que intentaban conseguir una mejor asignación del producto (Lee et al., 1997b). Cuando HP levantó sus restricciones de reabastecimiento de LaserJets, muchos mayoristas cancelaron sus pedidos, dejando a HP con exceso de inventario y de capacidad, perdiendo millones de dólares (Lee et al., 1997b). Análisis a posteriori muestran que las órdenes colocadas por los vendedores a la división de impresoras tenían más oscilaciones y variaciones que la demanda de los clientes, y las ordenes a la división de circuitos integrados de la empresa presentaba variaciones aún peores (Lee et al., 1997a).

Posteriormente, en el 2000, Cisco experimentó una escasez de varios de sus componentes clave, lo que llevó a sus clientes a esperar dos y hasta tres meses por algunos de los productos más populares. Esta situación conllevó a que los clientes y los minoristas comenzaran a ordenar a varios distribuidores con la intención de cancelar las

órdenes duplicadas tan pronto como un distribuidor enviara el producto (Armony & Plambeck, 2005). Cisco sobreestimó el pronóstico de ventas y realizó una fuerte expansión de la capacidad de producción a través de contratos a largo plazo con los fabricantes de equipos originales (Armony & Plambeck, 2005). Una vez que se puso a disposición la capacidad de producción y los tiempos de entrega volvieron a la normalidad, los clientes cancelaron pedidos duplicados, y los nuevos pedidos previstos por Cisco no llegaron a materializarse (Thurm, 2001), quedando con considerable exceso de capacidad, contratos a largo plazo y una alta cantidad de inventario (Armony & Plambeck, 2005). Esto tuvo como consecuencia que Cisco despidiera a más de 8.500 personas y tuviera unas millonarias pérdidas (Aldeman, 2001; Thurm, 2001).

En la **Tabla 1 - 1** se relacionan otros casos documentados del efecto látigo en la industria que aporta a la evidencia empírica sobre la recurrente existencia de este fenómeno. Esta evidencia ha incentivado al desarrollo de diferentes investigaciones para determinar las causas del fenómeno y proponer políticas de abastecimiento, producción y distribución que ayuden a mitigar las consecuencias.

Tabla 1 - 1: Evidencia empírica del efecto látigo en cadenas de abastecimiento

Referencia bibliográfica	Industria
(Bishop et al., 1984)	Turbomaquinaria para la producción de petróleo y gas natural
(Cannella, Ciancimino, Framinan, & Disney, 2010)	1923, Federal Trade Commission 1958, General Electric 1993, Motorola 2007, Tesco
(Doole, Yan, Mohan, & Golapalakrishnan, 2010)	Efecto látigo durante la recesión 2007-2009 en fabricantes, mayoristas y minoristas en Estados Unidos con datos mensuales de inventarios y ventas
Stalk & Hout (1990), citado por (Miragliotta, 2006)	Moda
Blackburn (1991), citado por (Miragliotta,	Varios, desde la industria automotriz

Referencia bibliográfica	Industria
2006)	hasta cámaras
Avery et al. (1993), citado por (Miragliotta, 2006)	Automotriz en ambiente MRP
Kurt Salmon (1993), citado por (Miragliotta, 2006)	Comestibles (EE.UU.)
Hammond (1994), citado por (Cannella et al., 2010; Miragliotta, 2006; Wang & Disney, 2016; Zotteri, 2013))	Caso Barilla – Comestibles (UE)
Holmstrom (1997), citado por (Miragliotta, 2006)	Comestibles (UE)
(Fisher, 1997)	Venta de sopa de pollo en polvo
Gill & Abend (1997), citado por (Miragliotta, 2006)	Venta al por menor (EE.UU.)
Taylor, (1999), citado por (Miragliotta, 2006; Wang & Disney, 2016)	Automotriz (UK)
(Mason-Jones & Towill, 1999)	Ventas de maquinaria para el sector automotriz
(Anderson, Fine, & Parker, 2000)	Industria de las máquinas herramientas.
Fransoo & Wouters (2000), citado por (Miragliotta, 2006)	Alimentos perecederos (UE)
McCullen & Towill (2001), citado por (Miragliotta, 2006)	Piezas mecánicas (UE)
(Carlsson & Fuller, 2001)	Celulosa para la producción de papel
El-Beheiry et al. (2004), citado por (Miragliotta, 2006)	Juguetes (UE y EE.UU.)
Hejazi & Hilmola (2004), citado por (Miragliotta, 2006)	Electrónica y mobiliario (UE)
(Terwiesch, Ren, Ho, & Cohen, 2005)	La industria de equipos semiconductores vs. la industria de computadores personales
(Lai, 2005)	Sebastián de la Fuente, cadena de supermercados de España

Referencia bibliográfica	Industria
(Zotteri, 2013)	Productos de gran consumo.
(Shan, Yang, Yang, & Zhang, 2014)	Empresas públicas en China de 2002 a 2009
(Klug, 2013)	Industria automotriz

Conocidos estos problemas, en esta investigación se plantea una estrategia que permita identificar comportamientos característicos en las personas a la hora de manejar un eslabón específico de una cadena de abastecimiento mediante el planteamiento de un modelo de simulación basada en agentes combinado con dinámica de sistemas y el desarrollo de un experimento piloto de laboratorio en red.

El presente documento está organizado como sigue: Las siguientes secciones presentan la revisión de la literatura, el planteamiento del problema y los objetivos de la investigación. Luego se presenta la metodología de estudio. En la siguiente sección se describe y analiza el modelo matemático propuesto y los resultados del mismo. Luego se presenta un experimento de laboratorio piloto de toma de decisiones basado en el modelo propuesto. Posteriormente, se analizan los resultados del experimento piloto y el impacto de los retardos en el desempeño de los sujetos. Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones de trabajo futuro.

2.Revisión de la literatura

Las ampliaciones en las órdenes de las cadenas de abastecimiento han sido descritas en la literatura desde 1924, cuando Mitchell describió el caso de los minoristas que inflaban sus pedidos a los fabricantes a la hora de competir con otros minoristas para el suministro de un bien escaso (Mitchell, 1924). En el estudio del autor, los fabricantes informaban a los minoristas que eran capaces de cumplir sus órdenes sólo en la medida de 80 por ciento debido a una escasez de materiales que no les permitía producir al máximo de su capacidad. En consecuencia, si los minoristas querían 90 unidades de un artículo, ordenaban 100, a fin de estar seguros, cada uno, de conseguir 90. En el caso en que no recibieron lo que esperaban, aumentaron los márgenes de sus pedidos en una medida aún más superior a lo que deseaban, con el fin de recibir el 100 por ciento que realmente requerían (Mitchell, 1924).

Desde entonces, múltiples autores han estudiado el efecto látigo, sus causas y consecuencias utilizando múltiples metodologías de investigación. Duan, Yao, & Huo, (2015); Wang & Disney, (2016) clasifican las metodologías de investigación del efecto látigo en las cadenas de suministro en tres categorías: Modelamiento y simulación para analizar las causas del efecto y las maneras de mitigarlas, investigación empírica para medir y examinar el efecto del fenómeno, e investigación usando experimentos de laboratorio para analizar los aspectos comportamentales asociados al fenómeno.

2.1 Modelamiento y simulación

La simulación es una metodología de gran importancia para el estudio de las cadenas de abastecimiento ya que permite a la comprensión de sistemas complejos (Ponte et al., 2017). La técnica convencional para examinar el efecto látigo es modelando la cadena de abastecimiento como un sistema dinámico de inventario en el cual se puede investigar el

impacto de los elementos demanda, retardos, políticas de pronóstico, política de ordenamiento y mecanismos para compartir información (Wang & Disney, 2016). Todos estos podrían tener repercusiones positivas o negativas en la amplificación de la demanda.

El primer estudio formal que mostró la inestabilidad de la cadena de suministro fue desarrollado por Jay Forrester (1958). Representó la cadena de suministro como una secuencia de cuatro niveles, con flujos de información y productos, además de los retardos de fabricación y distribución. Forrester encontró que esta estructura del sistema era capaz de crear el comportamiento oscilatorio observado en las cadenas de suministros, más allá de las variaciones de la demanda final (Gonçalves, 2003). En 1958, Willard Fey convirtió los primeros modelos formales de dinámica de sistemas que se ocuparon de la inestabilidad de la cadena de suministro en un juego que posteriormente se convirtió en el "Juego de Cerveza" (Gonçalves, 2003; Sterman, 1989).

Más tarde, Lee et al., (1997a) desarrollaron un modelo para describir las causas operacionales del efecto látigo y demostrar cómo contribuían a la ocurrencia del fenómeno. En su estudio proponen que medidas como intercambio de información sobre el estado del inventario, coordinación de órdenes y esquemas de precios simplificados pueden ayudar a mitigar el efecto látigo (Lee et al., 1997a).

Posteriormente, en 1999 Cachon y Lariviere, construyeron un modelo donde los proveedores eligen el esquema de asignación de capacidad en el que los clientes hacen sus pedidos y luego los proveedores deciden cuánta capacidad construir. Examinaron cómo los mecanismos para la asignación de capacidad impactan el comportamiento y el desempeño de la Cadena de Abastecimiento, mostrando que esto permite a los proveedores mejorar sus ganancias a expensas del desempeño de los clientes y de la cadena en general (Cachon & Lariviere, 1999).

Luego, Baganha & Cohen, (1998) desarrollaron un modelo para comparar la variabilidad de la demanda con la variabilidad de los pedidos en diferentes eslabones de la cadena, y analizar el efecto de los inventarios en redes de distribución. Los autores encontraron

que el efecto látigo aparece en el eslabón del mayorista y argumentaron que el inventario del mayorista actúa como un estabilizador en la cadena.

Por otro lado, los modelos basados en agentes son una metodología apenas emergente para el estudio y administración de cadenas de abastecimiento. Los primeros en presentar la cadena de abastecimiento como una red de agentes inteligentes fueron Fox, Chionglo & Barbuceanu (1993) quienes descompusieron las funciones de la cadena de abastecimiento y las encapsularon en agentes, desarrollaron protocolos y estrategias para la comunicación de información, coordinación de las decisiones y administración del cambio, y desarrollaron algoritmos para la toma de las decisiones.

Posteriormente, Kimbrough, Wu, & Zhong, (2002) desarrollaron un modelo para explorar la capacidad de los agentes (Productor, mayorista, distribuidor y minorista) de administrar la cadena de abastecimiento basado en el juego de la cerveza. Encontraron que los agentes son capaces de jugar el juego de la cerveza de manera efectiva ante cambios de demanda y eliminar el efecto látigo encontrando buenas políticas de ordenamiento en escenarios complejos, creando así la posibilidad de que las empresas cuenten con una política de ordenamiento adaptable o dinámica que se gestione automáticamente mediante programas informáticos.

Más tarde Liang & Huang, (2006) usaron simulación basada en agentes para el juego de la cerveza con el fin desarrollar un sistema de pronóstico de demanda. En el modelo los agentes controlaban los pedidos de los cuatro eslabones de la cadena con diferentes sistemas de inventario, su propósito era coordinar todos los agentes y minimizar el costo total. Encontraron que el efecto látigo se reduce al compartir información y lograr coordinación entre los eslabones de la cadena.

Chatfield, Kim, Harrison, & Hayya, (2004) usaron SISCO, un sistema de soporte para la toma de decisiones basado en agentes (Chatfield, Harrison, & Hayya, 2006) para explorar el impacto de la calidad de la información, tiempos de entrega y el intercambio de la información en el efecto látigo.

Por último, y más recientemente, Ponte et al., (2017) estudiaron el efecto látigo a través de experimentos realizados con un modelo basado en agentes, cuyos agentes simulan el comportamiento de los diferentes actores de la cadena de suministro. Exploraron si la concurrencia de diferentes políticas de ordenación y métodos de pronóstico acentuaban o mitigaban la generación de ineficiencias en la cadena de suministro. Encontraron que la eficiencia de cada modelo de inventario depende no sólo del entorno externo sino también de las decisiones de los otros eslabones de la cadena.

2.2 Estudios empíricos

Los estudios empíricos consisten en la recolección y análisis de datos históricos de demanda, ventas, producción y envío de las industrias, frecuentemente detallan información de la empresa o cadena de suministro bajo investigación (Wang & Disney, 2016). Estos estudios son eficientes en la detección del efecto látigo y en la medición del desempeño de las soluciones implementadas.

Bishop et al., (1984) presentaron ejemplos empíricos que describían cómo las fluctuaciones en la demanda de combustibles fósiles causaron cambios precipitados en la demanda de maquinaria usada para la producción de petróleo y gas natural. En este estudio los autores explican que debido a la disminución en el precio de los combustibles durante los años 1974 – 1975, la demanda de petróleo y gas natural disminuyó el 5%, lo que se tradujo en una caída mayor del 30% en la demanda de la turbomaquinaria requerida para producir combustibles (turbinas de gas, bombas y compresores). La causa fue asignada al tiempo estimado en la inversión de capacidad y la velocidad de desgaste de la máquina.

Más tarde, Cachon, Randall, & Schmidt, (2007) usaron datos de inventario y ventas de la industria de los Estados Unidos incluyendo productores, minoristas y mayoristas desde enero de 1992 a febrero de 2006, con el objeto de identificar si la industria exhibía o no efecto látigo y determinar cuál eslabón de la cadena enfrenta mayor volatilidad. Los autores también encontraron que el efecto látigo aparece en primera instancia en el eslabón del mayorista antes que en el minorista o fabricante.

Posteriormente, (Doole et al., 2010) estudiaron el efecto látigo durante la recesión 2007-2009 en fabricantes, mayoristas y minoristas en Estados Unidos con datos mensuales de inventarios y ventas. Encontraron que los mayoristas responden más tarde y de una manera drástica en comparación con los otros eslabones de la cadena, mientras que los minoristas responden rápido y de manera adaptativa. Observaron además que los mayoristas pusieron mayor atención en la demanda del minorista y no la suficiente atención a la demanda del consumidor, aunque esa información estaba disponible para ellos.

2.3 Estudios experimentales

Además de los estudios empíricos, los estudios experimentales, ampliamente usados en psicología y economía, han sido soporte para probar y mejorar teorías en diferentes áreas de interés de la ciencia de la administración, incluyendo la toma de decisiones y los sistemas (Wang & Disney, 2016). El estudio experimental permite testear teorías en ambientes controlados, reduciendo el impacto de variables exógenas mediante experimentos de laboratorio y juegos de administración para examinar factores y mecanismos que afectan el efecto látigo. Usualmente se enfocan en los aspectos comportamentales, psicológicos y cognitivos de los tomadores de decisiones con respecto a predicciones, pedidos o configuración de la capacidad de producción (Wang & Disney, 2016), ayudando a determinar las causas del desempeño de los sujetos en ambientes dinámicos (Arango, Castañeda, & Olaya, 2012).

El enfoque experimental fue iniciado por Sterman, (1989) quien formalizó el juego de la cerveza en experimentos en el MIT con el fin de obtener modelos sobre comportamientos en la toma de decisiones para estudiar la volatilidad de las órdenes desde la perspectiva de la racionalidad limitada. El autor demostró que la oscilación y aumento de variabilidad de las órdenes se debe a que la mayoría de los participantes tienden a pasar por alto las ordenes en proceso a la hora de realizar pedidos evidenciando una mala percepción de los ciclos de realimentación por parte de los jugadores (Sterman, 1989). Su estudio se convirtió en el marco estándar para estudiar la dinámica de las cadenas de abastecimiento mediante el juego de la cerveza, en el que los participantes actúan como

firmas a lo largo de una cadena de distribución de cerveza y toman decisiones de pedidos y producción (Wang & Disney, 2016).

Diehl y Sterman (1995) continuaron los trabajos de Sterman (1989), realizaron experimentos para determinar cómo la complejidad de realimentación afecta el proceso de toma de decisiones en Cadenas de Abastecimiento, encontraron que los sujetos tienden a excluir efectos secundarios, retardos y otros elementos de la complejidad dinámica incluso cuando estos elementos son conocidos, la capacidad de las personas para inferir correctamente el comportamiento de sistemas de realimentación es pobre (Diehl & Sterman, 1995).

Posteriormente, y como se muestra a continuación, se introdujeron variaciones al juego de la cerveza: demanda estacional o aleatoria, variaciones en los tiempos de entrega y adquisición de capacidad, compartir información de la demanda e inventario, capacitación antes del experimento, confianza entre los participantes. El efecto látigo persiste en la mayoría de los casos. (Croson & Donohue, 2005, 2006; Croson et al., 2014; Gonçalves, 2003; Kaminsky & Simchi-Levi, 1998; Nienhaus et al., 2006; D. Y. Wu & Katok, 2006).

En 1998, Kaminsky y Simchi-Levi encontraron, por medio de la experimentos de laboratorio computarizados del juego de la cerveza, que mayor información y un control centralizado de la cadena reduce los costos totales del sistema; si bien el control centralizado no es aplicable a muchas cadenas de abastecimiento, se puede pensar como estrategia el compartir información de la demanda e inventario para obtener estos beneficios. Los autores también encontraron que la reducción de los tiempos de entrega lleva a la misma amplificación de la burbuja de variabilidad de las órdenes, pero lleva a menores costos totales de la cadena de abastecimiento (Kaminsky & Simchi-Levi, 1998).

En 2001 Gupta, Steckel, and Banerji demostraron experimentalmente que menores tiempos de entrega de los productos traducen en menores costos, mientras que compartir información de los puntos de venta, conduce a iguales o menores costos en la cadena de suministro. Los autores usan una cadena de abastecimiento de tres eslabones con participantes en cada nivel de la cadena interactuando a través de un sistema

informático en red, los participantes no fueron informados de la demanda del minorista (Gupta, Steckel, & Banerji, 2001). A diferencia de otros investigadores en el área, los autores no analizan los patrones de ordenamiento de los participantes, en su lugar se enfocan en los costos de la cadena de abastecimiento y por lo tanto, no reportan la existencia o reducción del efecto látigo (Croson & Donohue, 2002).

Por su parte, Croson y Donohue estudiaron el impacto de compartir la información de los puntos de venta e inventario en el efecto látigo en 2003 y 2006 respectivamente. Encontraron que el efecto látigo se presenta aun cuando las causas operacionales son removidas y la distribución de la demanda es conocida por todas las partes. Así mismo demostraron que compartir la información de los puntos de venta o inventarios reduce el efecto látigo al ayudar a los miembros de la cadena a anticiparse y estar mejor preparados para las fluctuaciones en las órdenes abajo de la cadena. Sus resultados experimentales apoyan la teoría de que los miembros de la cadena de abastecimiento pueden beneficiarse de las iniciativas de intercambio de información. (Croson & Donohue, 2003, 2006).

Croson y Donohue en 2005 realizaron experimentos para estudiar el efecto de compartir información del inventario hacia abajo versus hacia arriba de la cadena para mitigar el efecto látigo. Sus experimentos pretendían determinar si brindar acceso a la información de inventario a los eslabones debajo de la cadena es más efectivo en la reducción del efecto látigo y sus costos asociados que tener acceso similar a información de inventario hacia arriba de la cadena. Encontraron que compartir información hacia abajo de la cadena lleva a una significativamente menor oscilación de las ordenes a través de la cadena reduciendo el efecto látigo, beneficiando así a todos los eslabones de la cadena. (Croson & Donohue, 2005).

Por su parte, Paulo Gonçalves (2003) investigó cómo diferentes parámetros como retardos en la adquisición de capacidad y competencia entre clientes, influyen el tamaño de la burbuja de demanda (Gonçalves, 2003). Oliva y Gonçalves (2005), realizaron experimentos con el juego de la cerveza donde encontraron una evidencia fuerte de que los jugadores subestiman la línea de suministro, lo que lleva a una política

más inestable de pedido, además de demostrar la racionalidad limitada de los jugadores (Oliva & Gonçalves, 2005).

Nienhaus et al., (2006) desarrollaron un modelo de simulación del juego de la cerveza en línea con cuatro eslabones. El juego, en el que participaron más de 400 personas, permitió a los autores analizar cómo actúan las personas en una cadena de suministro concluyendo que el comportamiento de los tomadores de decisiones también contribuye a la amplificación de las órdenes, y como tal debe ser incluido dentro de las causas del efecto látigo.

D. Y. Wu & Katok, (2006) estudiaron el efecto del aprendizaje y la comunicación sobre el efecto látigo en las cadenas de suministro usando experimentos de laboratorio del juego de cerveza. Encontraron que si bien el entrenamiento puede mejorar el conocimiento y la comprensión del sistema, no mejora el desempeño de la cadena de suministro a menos que los eslabones de la cadena puedan comunicarse y compartir este conocimiento. Sus resultados indican que el efecto látigo es, al menos en parte, causado por una coordinación insuficiente entre los socios de la cadena de suministro.

Croson et al (2014) presentan un conjunto de experimentos de laboratorio con una cadena de suministro en serie en que ponen a prueba las causas del comportamiento del efecto látigo, en particular, la posible influencia del riesgo de coordinación. Existe riesgo de coordinación cuando las decisiones de los individuos contribuyen a un resultado colectivo y las reglas de decisión que sigue cada individuo no se conocen con certeza. Los autores concluyen que el efecto látigo es un fenómeno comportamental tanto como operacional, por lo tanto, métodos para reducir la inestabilidad de la cadena de suministro deben abordar tanto el comportamiento así como las causas estructurales del problema. Una mayor inestabilidad de la cadena puede ser resultado del desconocimiento del comportamiento impredecible de los homólogos; de modo que la coordinación se propone como mecanismo eficaz para moderar el efecto látigo (Croson et al., 2014).

Por su parte, Gonçalves y Arango (2010) realizaron experimentos en cadenas de abastecimientos en las cuales analizaron el efecto que tienen las decisiones de los

proveedores enfrentando diferentes longitudes de retardos y de competencia mayorista, encontrando la presencia de bajo rendimiento de los sujetos a medida en que los retardos aumentan (Gonçalves & Arango, 2010).

Para el caso específico de cadenas de abastecimiento caracterizadas por tener un único proveedor de un producto escaso vendiendo a clientes mayoristas, Villa (2011) estudió el efecto de las decisiones de pedidos de clientes mayoristas. Sus resultados experimentales muestran que los cuando los clientes mayoristas enfrentan agotados de sus productos tienden a inflar sus pedidos por encima de lo percibido, en especial cuando el sistema en el cual toman sus decisiones cuenta con mayores retardos.

Finalmente, Villa, Gonçalves y Arango. (2015) utilizan un experimento para probar las decisiones de pedidos de los sujetos bajo diferentes retardos de ordenamiento y adquisición de capacidad de producción del proveedor. Los sujetos del experimento muestran una capacidad limitada para procesar el impacto de los retardos y la retroalimentación. Las trayectorias de ordenamiento siguen un patrón de rebasamiento y posterior caída hasta llegar a un equilibrio, sin embargo, el rebasamiento inicial es menos intenso y dura más que el comportamiento óptimo cuando los sujetos se enfrentan a retardos más largos. Además, los sujetos inflan sus órdenes cuando el proveedor se enfrenta a retardos de adquisición de la capacidad de producción y cuando los pedidos tardan más en ser percibidos por el proveedor. Las estimaciones econométricas muestran que el heurístico de anclaje y ajuste propuesto es un posible heurístico para explicar el comportamiento de pedido de los sujetos (Villa, Gonçalves, & Arango, 2015).

3.Planteamiento del problema

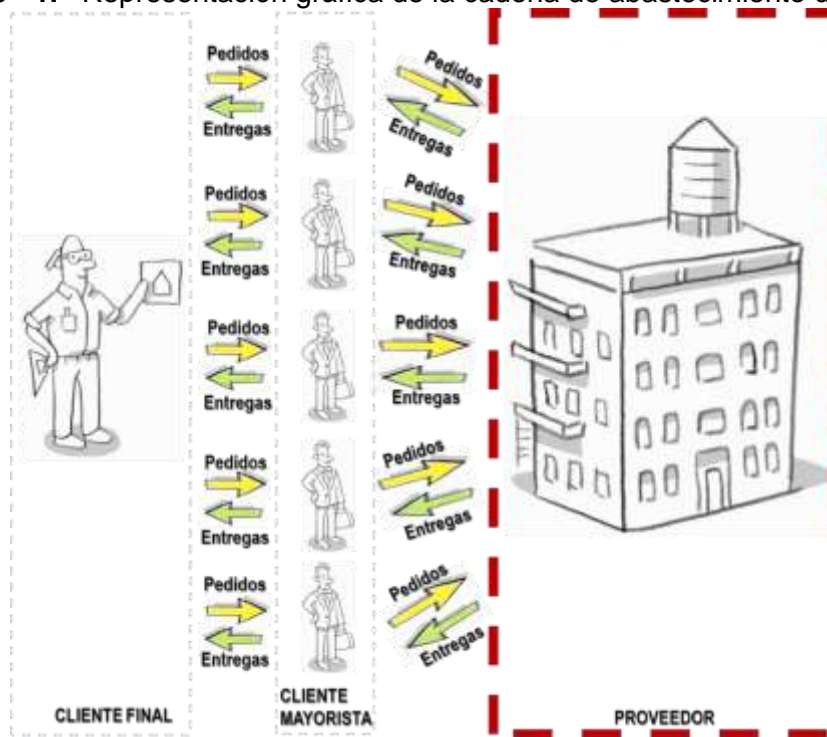
Como se ha mostrado en la revisión de la literatura, el problema de la variabilidad de las órdenes en las cadenas de abastecimiento se ha estudiado desde el punto de vista comportamental por diversos autores. Entre ellos Gonçalves, (2003) estudió la influencia de diferentes parámetros como retardos y competencia entre clientes en el tamaño de la burbuja de demanda, mientras que Gonçalves & Arango, (2010) estudiaron el efecto de las decisiones de pedido de los proveedores enfrentando diferentes retardos y competencia mayorista.

Por su parte, Villa, (2011) y Villa et al., (2015) estudiaron el efecto de pedidos de clientes mayoristas en cadenas de abastecimiento caracterizadas por tener un cliente mayorista y un solo proveedor de un producto único e insustituible. Los autores desarrollaron un experimento de laboratorio en el cual los participantes asumían el rol de cliente mayorista cuya labor era la de tomar decisiones de pedidos al proveedor mientras enfrentaban un incremento repentino de la demanda final. Sus resultados evidencian la presencia del efecto látigo y la existencia de racionalidad limitada cuando los seres humanos se enfrentan a un ambiente dinámico complejo.

La literatura muestra que si bien se conoce el comportamiento agregado en cadenas de suministro, es posible que el conocimiento no sea suficiente debido a la heterogeneidad de los actores, a la forma como se comportan en ambientes de competencia y la posible existencia de múltiples reglas de decisión como se observa en Delgado, van Ackere, Larsen, & Arango (2017), quienes estudiaron el proceso de toma de decisiones de los administradores en un problema de expansión de capacidad con retardos. Los autores encontraron tres tipos de administradores de acuerdo a sus reglas de decisión: incrementales, por lotes y reactivos.

De esta manera, se hace necesario plantear un experimento con sujetos en competencia por un bien escaso en una cadena de suministro caracterizada por tener múltiples clientes mayoristas y un único proveedor vendiendo un producto único e insustituible, tal como se representa en la **Figura 3 - 1**. En el experimento propuesto, que pretende estudiar el comportamiento de los sujetos a la hora de asumir rol de clientes mayoristas, que deben tomar decisiones de pedidos a su único proveedor considerando competencia por un producto escaso, estudio propuesto en este proyecto de tesis de maestría.

Figura 3 - 1. Representación gráfica de la cadena de abastecimiento de estudio.



Fuente: Adaptado de Gonçalves, (2003)

4. Objetivos

4.1 Objetivo general

Evaluar, por medio de simulación y economía experimental, el proceso de toma de decisiones de varios agentes mayoristas en una cadena de suministro.

4.2 Objetivos específicos

- I. Estudiar la literatura de las Cadenas de Abastecimiento y de experimentos de laboratorio con el fin de obtener el diseño y la realización de un experimento de laboratorio piloto.
- II. Desarrollar un modelo de simulación que capture la estructura básica de una Cadena de Abastecimiento, incorporando la toma de decisiones de diferentes clientes mayoristas.
- III. Diseñar y realizar un experimento *piloto* de laboratorio que permita analizar el comportamiento en la toma de decisiones de pedidos del cliente mayorista a partir del modelo desarrollado.
- IV. Analizar los resultados de laboratorio, incluyendo la estimación de reglas de decisión utilizadas por los sujetos en el experimento.

5. Metodología

El Efecto Látigo es descrito por dos regularidades: la oscilación de las órdenes en cada nivel de la cadena de suministro y la amplificación de estas oscilaciones a medida de que mueven más arriba de la cadena (Croson & Donohue, 2002). Aunque las causas del efecto látigo no son comprendidas completamente, investigaciones actuales sugieren una combinación de factores operacionales y comportamentales.

Desde el punto de vista operacional, Lee et al., (1997a, 1997b) exponen que los agentes racionales pueden generar variabilidad de las órdenes por cuatro causas operacionales: *i.* Ordenamiento por lotes, *ii.* Fluctuación de precios, *iii.* Déficit de capacidad que conducen a racionamiento por parte del proveedor (asignación de su capacidad de producción) y *iv.* Procesamiento de señales de demanda. Como formas para mitigar estas causas, en la literatura se encuentran: esquemas para mejorar la asignación de capacidad (Cachon & Lariviere, 1999), dosificación escalonada de las ordenes (Cachon, 1999) y precios bajos todos los días (Sogomonian & Tang, 1993).

Por su parte, los factores comportamentales del Efecto Látigo han sido estudiados recientemente mediante experimentos de laboratorio, demostrando que este fenómeno permanece incluso en cadenas de abastecimiento idealizadas, en las que los factores operacionales son eliminados (Croson & Donohue, 2002). Uno de los primeros experimentos data de 1989, año en el que John Sterman estudió las reglas de decisión del juego de la cerveza, encontrando mala percepción de los ciclos de realimentación por parte de los jugadores (Sterman, 1989). Posteriormente, otros experimentos han sido realizados por diferentes autores, que han estudiado, entre otros tópicos, el efecto de disponibilidad de información de los puntos de venta e inventarios en el efecto látigo (Croson & Donohue, 2003, 2006), el impacto de la reducción de los tiempos de entrega en la amplificación de la burbuja (Kaminsky & Simchi-Levi, 1998) y en los costos totales

de la cadena de abastecimiento (Gupta et al., 2001), la influencia de diferentes parámetros como retardos y competencia entre clientes en el tamaño de la burbuja de demanda (Gonçalves, 2003), el efecto de las decisiones de pedido de los proveedores enfrentando diferentes retardos y competencia mayorista (Gonçalves & Arango, 2010) y el efecto de pedidos de clientes mayoristas en cadenas de abastecimiento caracterizadas por tener un cliente mayorista y un solo proveedor de un producto único e insustituible (Villa, 2011; Villa et al., 2015).

Los experimentos relacionados demuestran un interés creciente de la literatura concerniente a las limitaciones cognitivas de los administradores de negocios (Croson & Donohue, 2002); sin embargo, los estudios revisados no han tratado el impacto de la competencia mayorista en el comportamiento de los tomadores de decisiones de este eslabón de la cadena. Estos estudios podrán brindar elementos básicos que permitan definir mejores políticas de abastecimiento, producción y distribución en las cadenas de suministro.

Considerando que el objetivo planteado para esta investigación es entender el comportamiento de las personas a la hora de tomar decisiones, se hace necesario el uso de metodologías experimentales, fundadas en el entendimiento de las relaciones causales y realimentaciones de las cadenas de abastecimiento, y la construcción de un modelo de simulación de la línea de suministro que reproduzca el comportamiento del fenómeno a estudiar.

La investigación de operaciones, desde el enfoque de la simulación y la economía experimental junto a las ciencias de administración y la estadística han desarrollado metodologías tanto para la construcción y validación de modelos con realimentaciones complejas, como para validación de políticas y teorías (Smith, 2002) que permiten analizar diferentes comportamientos.

La simulación parte de la construcción de un modelo que reproduzca un determinado comportamiento problemático global, mediante el funcionamiento interrelacionado de la multiplicidad de mecanismos parciales que lo componen (Cassar & Friendman, 2004). De este modo se dispone de una herramienta que permite evaluar el impacto de distintas

estrategias sobre las variables de interés y poder plantear estrategias de solución a diferentes tipos de problemas (Garayalde & Rodriguez, 1985).

Para el desarrollo de esta tesis, la simulación será utilizada para el diseño de un modelo combinado de dinámica de sistemas y simulación basada en agentes, que permita comprender la estructura del sistema y modelar las reglas de decisión de los diferentes agentes.

Desde el punto de vista de la simulación, se partirá de la construcción de un diagrama causal que permita encontrar las causas principales que están llevando a que las personas reflejen determinado comportamiento (Sterman, 2000). Así mismo, se desarrollará un modelo matemático basado en ecuaciones diferenciales parciales acopladas, que permitan reproducir el comportamiento problemático global, para así disponer de una herramienta que permita evaluar el impacto de distintas estrategias sobre las variables de interés y poder plantear estrategias de solución a estos tipos de problemas (Cassar & Friendman, 2004). El modelo combinará las metodologías de dinámica de sistemas y simulación basada en agentes, la primera permitirá modelar la cadena de abastecimiento caracterizada por tener ciclos de realimentación, retardos, relaciones no lineales y procesos de acumulación y flujo, mientras que la segunda permitirá modelar a los mayoristas como agentes heterogéneos con sus respectivas reglas de decisión.

Posteriormente, se utilizarán un experimento piloto en red que permita determinar los comportamientos de las personas a la hora de tomar decisiones (Friendman & Sunder, 1994), asumiendo el rol de clientes mayoristas en una cadena de abastecimiento caracterizada por tener un único proveedor vendiendo un producto único e insustituible a varios clientes mayoristas. Se plantea la realización de un experimento piloto de laboratorio que conserve el precepto de paralelismo entre el laboratorio y el mundo real (Smith, 1982) y que se encuentren fundados en la teoría de economía experimental, cuya idea básica es que las personas simplemente “jueguen” por medio de un computador tratando de dar lo mejor de cada uno; lo cual se logra usando un incentivo o pago como medio que permita al experimentador inducir características específicas en los sujetos participantes de los experimentos (Friendman & Sunder, 1994).

5.1 Dinámica de sistemas

La técnica convencional para examinar el efecto látigo analíticamente es modelando los participantes de la cadena de abastecimiento como un sistema dinámico de inventario mediante el cual pueda ser estudiado el impacto de los elementos como demanda, retardos, políticas de pronóstico, política de ordenamiento y mecanismos para compartir información (Wang & Disney, 2016). Para esto, la dinámica de sistemas es adecuada para el estudio de sistemas socioeconómicos inestables, porque dentro de los modelos se tienen en cuenta características como ciclos de realimentación, retardos, modelación de variables cualitativas, relaciones no lineales y procesos de acumulación y flujo, que hacen a los sistemas complejos y difíciles de estudiar con otro tipo de modelación (Dyner, Peña, & Arango, 2008).

El objeto de los modelos de Dinámica de Sistemas es llegar a comprender cómo la estructura del sistema es responsable de su comportamiento, y su principal ventaja consiste en que las políticas a implementar en el sistema pueden ser simuladas a bajo costo, con lo que es posible valorar sus resultados sin necesidad de ponerlas en práctica sobre el sistema real (Dyner et al., 2008). Con esta metodología, se han realizado aportaciones de interés en terrenos tan diversos como sistemas sociológicos, sistemas ecológicos y ambientales, sistemas energéticos, sistemas logísticos de defensa, entre muchos otros (Aracil, 1995), y ha sido utilizada para estudiar la dinámica de las cadenas de abastecimiento, entre otros por Gonçalves (2003); Villa (2011); Villa et al. (2015).

5.2 Simulación basada en agentes

Por otro lado, la simulación basada en agentes es una metodología apenas emergente para el estudio de cadenas de abastecimiento. Se trata de construir un modelo que consiste en agentes capaces de interactuar entre sí y percibir su entorno; además ofrece la posibilidad de modelar la heterogeneidad de los individuos, representando explícitamente las reglas de decisión de los agentes (Gilbert, 2008).

La simulación basada en agentes ha sido utilizada en múltiples campos:

- i.* Modelos urbanos como el desarrollado por Schelling (1971) y (1978) para explicar la segregación racial observada en las ciudades americanas.
- ii.* Modelos para la comprensión del desarrollo de las opiniones políticas dentro de una población (Deffuant, 2006; Deffuant, Amblard, Weisbuch, & Faure, 2002; Hegselmann & Krause, 2002; Lorenz, 2006; Mckeown & Sheehy, 2006; Stauffer, Sousa, & Schulze, 2004).
- iii.* Modelos para entender el comportamiento del consumidor (Izquierdo & Izquierdo, 2007; Janssen & Jager, 1999).
- iv.* Modelos para simulación de redes industriales o clústeres (Albino, Carbonara, & Giannoccaro, 2003, 2006; Boero, Castellani, & Squazzoni, 2004; Borrelli, Ponsiglione, Iandoli, & Zollo, 2005; Squazzoni & Boero, 2002).
- v.* Modelos para estudiar los mercados de electricidad (Bagnall & Smith, 2005; Bunn & Oliveira, 2003; Esmaili Aliabadi, Kaya, & Sahin, 2017; Haghnevis, Shinde, & Askin, 2011; Koesrindartoto, Sun, & Tesfatsion, 2005; Ringler, Keles, & Fichtner, 2016; Zhou, Chan, & Chow, 2007).
- vi.* Modelos participativos, como soporte a la negociación y toma de decisiones de las poblaciones (O. Barreateau, Bousquet, & Attonaty, 2001; Oliver Barreateau, 2003; Oliver Barreateau, Bousquet, Étienne, Souchère, & D'Aquino, 2013; D'Aquino, Le Page, Bousquet, & Bah, 2003).
- vii.* Modelos para el estudio de la cadena de suministro como el desarrollado por (Strader, Lin, & Shaw, 1998), para estudiar el impacto de compartir información de las cadenas de abastecimiento. Otros modelos basados en agentes para el estudio de cadena de abastecimiento han sido desarrollados como los de Chatfield et al. (2006) (2004); Kimbrough et al.,(2002); Liang & Huang (2006); Ponte et al. (2017).

Modelar las cadenas de suministro es una buena manera de estudiar los procesos de cumplimiento de pedidos e investigar la eficacia de las políticas de gestión, y los modelos basados en agentes se utilizan cada vez más para este propósito (Gilbert, 2008; S. Wu et al., 2011). Un modelo de simulación basado en agentes encaja bien con la tarea de simular las cadenas de suministro porque las empresas implicadas pueden ser modeladas como agentes, cada una con sus propias reglas de gestión de inventario (Gilbert, 2008), así mismo, y según estudios desarrollados por Wu et al., (2011), la

simulación basada en agentes es una manera efectiva para estudiar el efecto látigo en las cadenas de abastecimiento.

5.3 Experimentos de laboratorio

Los experimentos de laboratorio contribuyen a la investigación mediante el control de la información y la complejidad dinámica, en las siguientes maneras (Arango et al., 2012): *i.* Provee explicaciones claras del pobre desempeño de las personas en ambientes dinámicos, *ii.* Los datos experimentales son útiles para modelar el comportamiento, por ejemplo, de las reglas de decisión y heurísticos como anclaje y ajuste, o heurístico correlacional.

En cuanto a la utilidad de los experimentos de laboratorio para investigar los comportamientos en las cadenas de abastecimiento, Croson & Donohue, (2002) exponen cuatro razones fundamentales:

- i.* Los experimentos permiten medir el grado en que factores comportamentales causan regularidades empíricas, como el efecto látigo; en particular es posible diseñar entornos desprovistos de las posibles causas operacionales del fenómeno.
- ii.* Los experimentos pueden ayudar a entender la influencia relativa de las múltiples causas, como las operacionales o comportamentales, del efecto látigo en datos empíricos.
- iii.* Es posible usar los experimentos de laboratorio para probar la teoría de operaciones, así como se usa para probar la teoría económica, por ejemplo, es posible usar experimentos para comparar el grado del efecto látigo cuando las relaciones de las cadenas de abastecimiento son uno a uno (un proveedor, un cliente) o uno a muchos (un proveedor, varios clientes) como es el caso de estudio de la presente tesis.
- iv.* Es posible usar experimentos para medir el impacto de variar factores operacionales sin la presencia de factores de comportamiento, por ejemplo examinar el impacto de reducir los retardos en el comportamiento.

Por otra parte, los experimentos de laboratorio son útiles para entender comportamientos de los mercados y subastas, como aquellos con un único vendedor y múltiples compradores (Katok, 2011) objeto de estudio de esta investigación, que se pretende lograr mediante un experimento de laboratorio en red. En cuanto al software para la realización de este experimento, la comunidad de dinámica de sistemas se tiene una ventaja al respecto, ya que los diferentes software especializados del campo permiten el desarrollo para experimentos (Arango & Moxnes, 2008), en particular, Powersim Constructor permite la realización de juegos en red, y por lo tanto permite el modelamiento de mercados experimentales y subastas (Arango & Moxnes, 2008), como los desarrollados por Arango (2006); Arango & Moxnes (2007); Villa (2011); Villa et al., (2015).

Es así como la habilidad para comprender el sistema completo y la de analizar las interacciones entre diferentes componentes de los sistemas integrados y, eventualmente las realimentaciones del abastecimiento, hacen de la simulación y la experimentación unas metodologías ideales para analizar la toma de decisiones en las cadenas de abastecimiento.

Esta experimentación se desarrollará teniendo un entorno realista, considerando aspectos como:

- Tiempo continuo
- Restricciones en capacidad.
- Retardos endógenos y variables
- Percepciones del comportamiento del sistema y retardos en los ajustes.

En conclusión, a través de un diagrama causal se expresará la relación proveedor-cliente y se explora la comprensión de las burbujas de demanda. Luego, a través de un modelo matemático de simulación utilizando las metodologías de dinámica de sistemas y simulación basada en agentes, se pretende capturar de manera formal la relación proveedor-cliente en la cadena de abastecimiento. Este modelo matemático se tomará como base para la creación de un experimento de toma de decisiones. A través de experimentos se investigará el impacto que tiene cada una de las decisiones en pedidos de los agentes – asumiendo el rol de clientes mayoristas– en la cadena de

abastecimiento. Finalmente estos resultados serán analizados de modo que permitan ajustar adecuadamente el modelo matemático inicialmente propuesto.

.

6. Diseño del modelo

En este capítulo se presenta el modelo matemático de simulación utilizando un modelo híbrido de dinámica de sistemas y simulación basada en agentes, que captura de manera formal la relación proveedor-cliente en la cadena de abastecimiento. El modelo contiene la cadena de suministro de acuerdo al estudio realizado por Gonçalves (2003). En este se reemplaza por la toma de decisiones de los clientes mayoristas por agentes heterogéneos, siendo este la componente de simulación basada en Agentes. A continuación se formula el modelo de acuerdo al protocolo ODD planteado por Grimm et al., (2006) y revisado posteriormente en el documento The ODD protocol: A review and first update de Grimm et al., (2010).

6.1 Visión general

El propósito del presente protocolo es diseñar un modelo que capture la estructura básica de una Cadena de Abastecimiento, incorporando la toma de decisiones de diferentes clientes mayoristas. La cadena de abastecimiento está caracterizada por tener un único proveedor, de un producto único e insustituible vendiendo a múltiples clientes mayoristas. El modelo simula periodos semanales, asumiendo pedidos semanales de producto por parte de los mayoristas a sus proveedores.

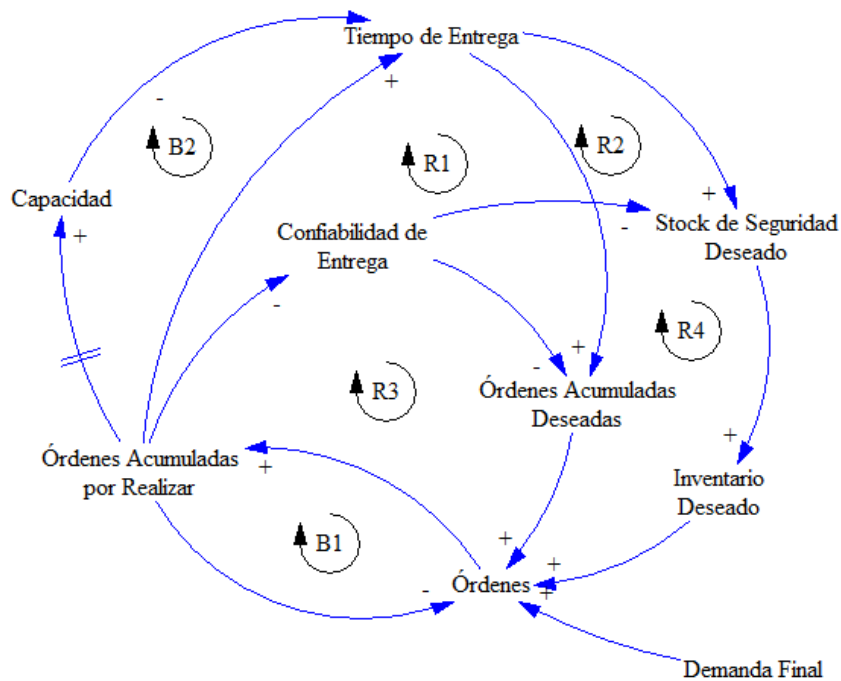
El principal resultado del modelo es evidenciar el comportamiento característico del fenómeno del efecto látigo que muestre la variabilidad de los pedidos de los clientes. Para esto se hacen experimentos donde se estudia la respuesta a un incremento en la demanda final del 20%, que permita mostrar cómo esta variabilidad en los pedidos afecta la capacidad de producción de los proveedores. Estos comportamientos emergen del uso de diferentes reglas de decisión utilizadas por los clientes para realizar los pedidos de producto. De esta manera, el objetivo de los agentes mayoristas es minimizar los costos totales incurridos durante la simulación. Los costos totales son la sumatoria de los costos

por ordenamiento y los costos por almacenamiento o déficit que se explican más adelante.

Las principales salidas del modelo que son necesarias para observar la dinámica interna son los pedidos de los clientes y el resultante cambio en la capacidad del productor. De esta manera es útil observar gráficos que permitan comparar los pedidos de los clientes mayoristas versus capacidad de producción del proveedor y así observar si los cambios en esta capacidad responden a incrementos o decrementos de los pedidos de los clientes.

Para comprender el problema de estudio, Gonçalves (2003) plantea que en una cadena de abastecimiento caracterizada por tener un único proveedor, de un producto único e insustituible y múltiples clientes mayoristas; el cliente mayorista infla sus órdenes cuando un abastecimiento insuficiente es asignado en proporción con su demanda final. Para entender la dinámica de la cadena de abastecimiento se presenta la **Figura 6 – 1**.

Figura 6 – 1. Diagrama Causal del Problema de Estudio



Fuente: Gonçalves, (2003)

Gonçalves (2003) explica los ciclos de realimentación y balance que se esquematizan en el diagrama causal así:

Ajuste de la línea de abastecimiento (B1): El cliente mayorista ajusta sus órdenes hasta que las órdenes acumuladas por recibir del proveedor se ajusten con sus niveles deseados.

Ordenando por Adelantado (R1): Ante un incremento en los tiempos de entrega, inclusive en la ausencia de competencia, los clientes tienen que incrementar sus pedidos con el fin de ajustar su línea de abastecimiento con el nuevo retardo percibido en las entregas. Ante presencia de competencia, los mayoristas tienden a sobre-compensar los incrementos en los retardos de las entregas ordenando por adelantado mucho más de lo necesario.

Ajuste de Capacidad (B2): El proveedor puede incrementar su capacidad con el fin de equilibrar el efecto del ciclo positivo en el sistema.

Ajuste de Inventario (R2): Es el deseo de los clientes por tener mayores inventarios de seguridad, lo cual crea la necesidad de aumentar órdenes realizadas al proveedor, aumentando las ordenes por recibir y, por lo tanto, aumentando los tiempos futuros de retardo.

Ordenar defensivamente (R3): Si los clientes esperan recibir sólo una fracción de sus órdenes totales, ellos inflan sus órdenes con la esperanza de obtener exactamente lo que ellos desean, sin embargo esto se traduce en un aumento de las órdenes acumuladas e inventarios deseados.

Confiablez en la entrega (R4): Los clientes ordenan más de lo necesario para compensar la desconfianza ocasionada por recibir únicamente una fracción de sus pedidos.

De esta manera el modelo explora el comportamiento característico del efecto látigo al representar el aumento y un colapso en las órdenes, como la respuesta de los clientes ante un déficit en el abastecimiento. Ante este aumento de los pedidos por parte de los

clientes mayoristas, los proveedores se verán motivados a invertir en capacidad para cumplir con las órdenes. Sin embargo, una vez logre abastecerse el cliente dejará de inflar sus pedidos, dejando al proveedor con excesiva capacidad instalada, grandes inventarios entre otras consecuencias mencionadas anteriormente en esta tesis.

Para mejorar el entendimiento de la dinámica del efecto látigo, a continuación se describen los procesos del modelo que involucran la dinámica de la línea de suministro, la construcción de capacidad y la dinámica de ordenamiento de cinco clientes mayoristas al mismo proveedor de un producto único e insustituibles, estos clientes mayoristas, debido a la heterogeneidad de sus reglas de decisión, son considerados los agentes del modelo construido.

Una vez entendidas las relaciones causales que explican la ocurrencia del efecto látigo en las cadenas de abastecimiento, presentamos el modelo formal a través de las principales ecuaciones diferenciales que permitirán que el modelo capture el fenómeno y la relación entre el proveedor y múltiples clientes mayoristas ordenando un producto escaso. Como se mencionó anteriormente, el modelo está basado en Gonçalves (2003), donde en primer lugar y en cuanto a la línea de suministro, las ordenes pendientes por entregar (OP) por el proveedor aumentan con las órdenes o pedidos del cliente mayorista (P) y disminuyen con los envíos (E).

$$OP = P - E$$

A la hora de que el cliente mayorista realiza las órdenes, éste ajusta sus pedidos considerando tanto la demanda final (D) como un término de ajuste del nivel deseado de ordenes pendientes por recibir (OP^*) y las ordenes pendientes reales del proveedor (OP) en un tiempo de entrega (τ_E).

$$P = \text{Max} \left(0, D + \frac{OP^* - OP}{\tau_E} \right)$$

Por otro lado, la capacidad de producción (C) del proveedor es limitada, de modo que esta determina el flujo de envíos.

$$E = C$$

La capacidad de producción deseada del proveedor para dar abasto a las órdenes recibidas por parte de sus clientes sin excederse (C^*), depende de la relación entre las órdenes pendientes por entregar (OP) y el tiempo de entrega deseado (τ_E^*):

$$C^* = \frac{OP}{\tau_E^*}$$

El proveedor puede ajustar su capacidad de producción (C), considerando su capacidad deseada (C^*) para dar respuesta a los pedidos de los clientes, su capacidad actual (C) y el tiempo que le toma la construcción de capacidad τ_c :

$$\Delta C = \frac{C^* - C}{\tau_c}$$

El nivel deseado de órdenes pendientes por recibir (OP^*) depende de la demanda del cliente final (D), y de una función de los retrasos esperados de las entregas $f(x)$ que captura el ajuste realizado por los mayoristas sobre los retrasos reales, es decir, cuando un cliente mayorista se enfrenta a altos retrasos, éste ajusta sus expectativas por encima de los retrasos reales. Los retardos esperados en las entregas se determinan a partir de una función de los retrasos reales $g(y)$, mientras que los retrasos reales son la relación entre las órdenes pendientes por entregar (OP) y los envíos.

$$OP^* = D * f(\text{Retrasos esperados})$$

$$OP^* = D * g(\text{Retrasos reales})$$

$$OP^* = D * g\left(\frac{OP}{\text{Envíos}}\right)$$

Este modelo asume que los clientes mayoristas ajustan los retrasos esperados siguiendo tres reglas de decisión, las que se plantean con base en los trabajos de Villa (2011); Villa et al., (2015):

- a. El cliente mayorista realiza el ajuste de los retrasos esperados proporcionalmente a los retrasos reales percibidos del proveedor.

$$f(\text{Retrasos esperados}) = \alpha * g(\text{Retrasos reales}), \quad \text{donde } \alpha \geq 1$$

El parámetro α es un coeficiente lineal que muestra la agresividad de los clientes a la hora de realizar sus pedidos al proveedor.

- b. El cliente mayorista realiza el ajuste de los retrasos esperados como el promedio entre el tiempo de entrega deseado, y los retrasos reales del proveedor.

$$f(\text{Retrasos esperados}) = \text{Promedio}(\text{Tiempo de entrega deseado}, \text{retrasos reales})$$

- c. Los retrasos esperados del cliente mayorista coinciden con los retrasos reales del proveedor

$$f(\text{Retrasos esperados}) = \text{Retrasos Reales}$$

Por último se incluyen las variables de nivel para los envíos acumulados y la demanda acumulada, que servirán para el cálculo de los costos incurridos por inventarios o déficit.

$$D_{CF} = d$$

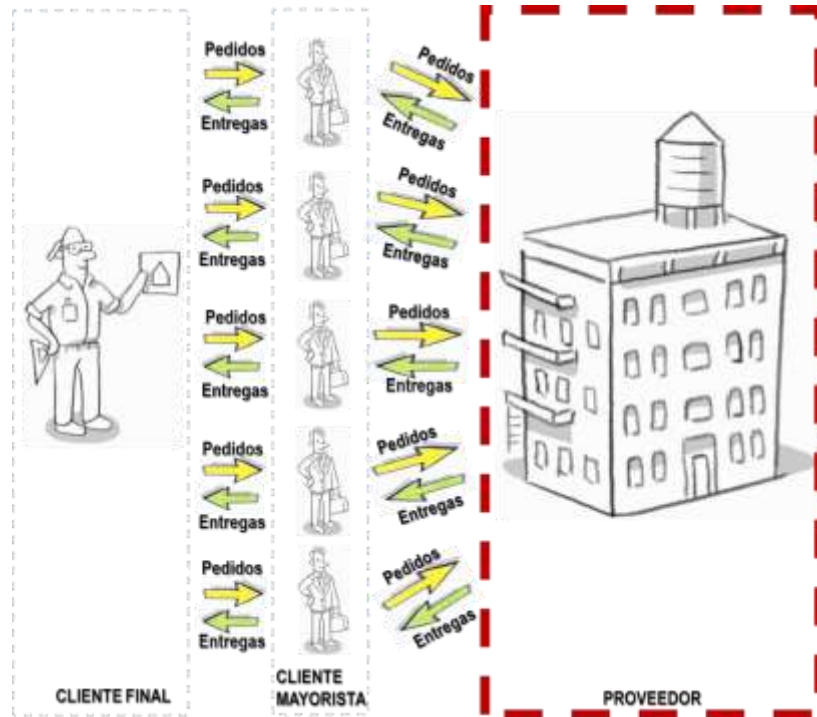
$$E_{Totales} = E$$

A continuación se presentan las entidades proveedor y cliente mayorista, sus variables de estado y las escalas de las mismas.

Proveedor

El modelo cuenta con un único fabricante del producto único e insustituible que vende a cinco clientes mayoristas en competencia por la adquisición del producto como se muestra en la **Figura 6 - 2**. Con el fin de abastecer a los clientes mayoristas, el proveedor cuenta con la habilidad de ajustar su capacidad de producción con un retardo, explicado por el tiempo que toma la construcción de nueva capacidad. No cuenta con reglas de decisión sobre cómo y cuándo construir capacidad, sólo la aumenta o la disminuye en respuesta a la demanda percibida de los mayoristas.

Figura 6 - 2. Representación gráfica de la entidad proveedor



Fuente: Elaboración propia

En la **Tabla 6 - 1** se presentan las variables y las escalas del proveedor del producto único e insustituible, vendiendo a cinco mayoristas:

Tabla 6 - 1. Variables y escalas del proveedor asociadas el modelo

Variables	Descripción	Escala	Tipo de variable
Ordenes Pendientes	Ordenes pendientes por entregar por el proveedor	Unidades	Estado o nivel
Capacidad Actual	Capacidad de Producción del Proveedor en el periodo de simulación específico	Unidades/Semana	Estado o nivel

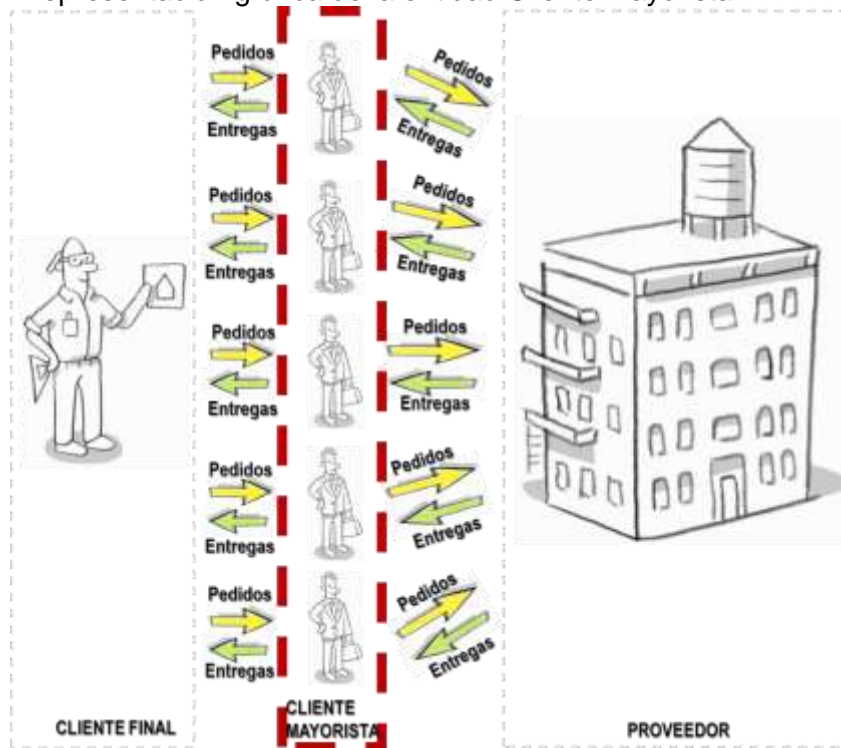
VARIABLES	DESCRIPCIÓN	ESCALA	TIPO DE VARIABLE
Capacidad Deseada	Capacidad deseada de producción del proveedor, para atender los pedidos de los clientes. Es de la relación entre las órdenes pendientes por entregar y el tiempo de entrega deseado.	Unidades/Semana	Auxiliar
Cambio en la Capacidad	Ajuste en la capacidad de producción del proveedor considerando la diferencia entre la capacidad actual y la deseada para dar respuesta a los pedidos de los clientes. El proveedor podrá ajustar su capacidad considerando los tiempos de construcción de la misma.	Unidades/Semana ²	Auxiliar Flujo de entrada
Despachos	Cantidades de producto enviadas a los mayoristas	Unidades/Semana	Auxiliar Flujo de salida

Cliente Mayorista

El modelo cuenta con cinco clientes mayoristas pidiendo al mismo proveedor de un producto único e insustituible de acuerdo a la demanda recibida por parte del cliente final, tal como se esquematiza en la **Figura 6 - 3**.

Las decisiones de pedidos están regidas por el ajuste a los retrasos esperados por parte del cliente mayorista, de manera que estos agentes se comportan siguiendo reglas de decisión que son consideradas heterogéneas.

Figura 6 - 3. Representación gráfica de la entidad Cliente Mayorista



Fuente: Elaboración propia.

En la **Tabla 6 - 2** se detallan las variables de estado y escalas utilizadas para la entidad clientes mayoristas:

Tabla 6 - 2. Variables principales y escalas de la entidad Clientes Mayoristas

Variables	Descripción	Escala	Tipo de variable
Pedidos	Ordenes de productos que colocan los clientes mayoristas al proveedor	Unidades/Semana	Variable auxiliar
Corrección	Término de ajuste del nivel deseado de ordenes pendientes por recibir y las ordenes pendientes reales del proveedor en un tiempo de entrega	Unidades/Semana	Variable auxiliar
Ajuste en el tiempo de entrega	Retrasos esperados en los tiempos de entrega	Semanas	Variable auxiliar

Variables	Descripción	Escala	Tipo de variable
Costos por ordenar	Costos en los que incurre el mayorista por el ordenamiento de un producto	\$/Semana	Auxiliar
Costos por déficit o almacenamiento	Costos en los que incurre el mayorista por mantener productos en inventario o por no satisfacer la demanda	\$/Semana	Auxiliar
Costos finales acumulados	Suma de los costos por ordenar y los costos por déficit o almacenamiento en todo el periodo de la simulación	\$	Estado o nivel

6.2 Detalles

En esta sección se presentan los sub-modelos de las diferentes entidades, construidos para reproducir el fenómeno del efecto látigo, es decir, la variación en los pedidos y el cambio en la capacidad de producción del proveedor en respuesta a la demanda percibida.

Proveedor

A continuación, en la **Figura 6 - 4** se presenta el diagrama de flujos y niveles del sub-modelo del proveedor y las variables asociadas al mismo (**Tabla 6 - 3**). En este sub-modelo, el proveedor recibe los pedidos de los cinco clientes mayoristas y realiza despachos de acuerdo a su capacidad de producción, la cual puede cambiar en respuesta a la dinámica de pedidos recibida.

Este sub modelo cuenta con dos niveles, uno relacionado con las órdenes pendientes por entregar y el segundo de capacidad actual de producción.

Figura 6 - 4. Sub-modelo del proveedor

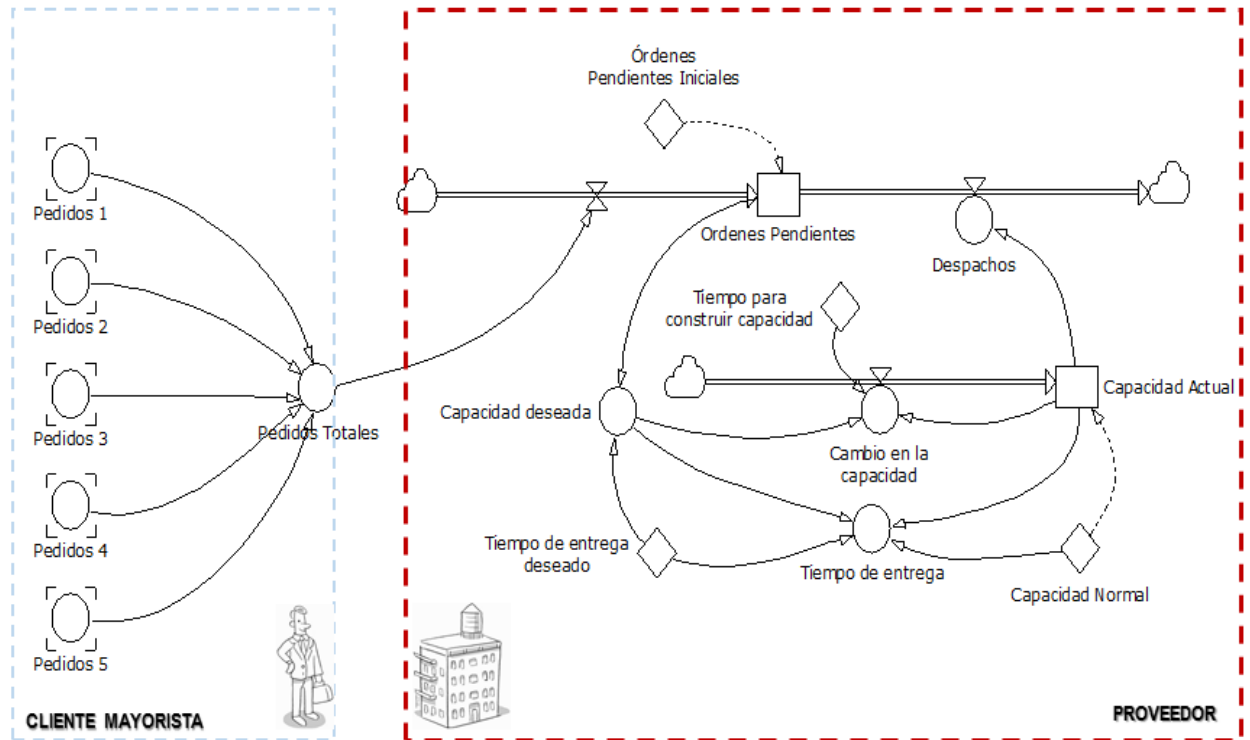


Tabla 6 - 3. Variables asociadas al sub-modelo del proveedor

	Variables Asociadas
○	Cambio en la capacidad = ('Capacidad deseada'-'Capacidad Actual')/'Tiempo para construir capacidad'
○	Capacidad deseada = 'Ordenes Pendientes'/'Tiempo de entrega deseado'
○	Tiempo de entrega = 'Tiempo de entrega deseado'*(1+MAX(0;('Capacidad deseada'-'Capacidad Actual')/'Capacidad Normal'))

Cliente Mayorista

En la **Figura 6 - 5** se presenta el diagrama de flujos y niveles del sub-modelo del cliente mayorista. En este sub-modelo, el cliente mayorista realiza un ajuste a los pedidos de acuerdo al tiempo de entrega de los pedidos por parte del proveedor.

En la figura se evidencia la relación entre los sub-modelos del proveedor y del cliente mayorista, así mismo, se observa la variable *demanda* del cliente final, la que es

Tabla 6 - 4. Variables asociadas al sub-modelo del cliente mayorista

	Variables Asociadas
<input type="radio"/>	Ajuste en el tiempo de entrega = $IF('Tiempo de entrega' <= 'Tiempo de entrega deseado'; 'Tiempo de entrega'; 'Coeficiente Lineal' * 'Tiempo de entrega')$
<input type="radio"/>	Corrección = $('Demanda Final' * 'Ajuste en el tiempo de entrega' - 'Ordenes Pendientes') / 'Tiempo Ajuste Ordenes Pendientes'$
<input type="radio"/>	Pedidos = $'Demanda Final' + Corrección$
<input type="radio"/>	Diferencia en el abastecimiento = $'Demanda acumulada' - 'Despachos acumulados'$
<input type="radio"/>	Costos por ordenar = $('Coeficiente de Ordenar' * 'Pedidos' * 'Pedidos') / (1000 <<und>>)$
<input type="radio"/>	Costos por déficit = $'Diferencia en el abastecimiento' * 'Diferencia en el abastecimiento' * 'Coeficiente de Suministro' / (1000 <<und>>)$
<input type="radio"/>	Costos Semanales = $'Costos por déficit' + 'Costos por ordenar'$

En cuanto a la demanda del cliente final, ésta es constante y presenta un aumento del 20% en la cuarta semana de simulación, a partir de ese momento se mantiene constante. La demanda es única y se divide en partes iguales a los diferentes clientes mayoristas, de modo que todos perciben la misma demanda, con el comportamiento antes descrito.

La simulación posee como valores iniciales los mostrados en la **Tabla 6 - 5**. Estos valores son similares con los modelos base de este trabajo, para conservar la consistencia.

Tabla 6 - 5. Variables del modelo y sus valores iniciales.

	Variables asociadas al modelo
<input type="checkbox"/>	Ordenes Pendientes = $'Órdenes Pendientes Iniciales'$
<input type="checkbox"/>	Despachos Acumulados = $0 <<und>>$
<input type="checkbox"/>	Demanda Acumulada = $0 <<und>>$
<input type="checkbox"/>	Capacidad Actual = $'Capacidad Normal'$
<input type="checkbox"/>	Costos Finales Acumulados = $0 <<\$>>$
<input type="checkbox"/>	Órdenes Pendientes Iniciales = $1000 <<und>>$
<input type="checkbox"/>	Tiempo para construir capacidad = $3 <<wk>>$
<input type="checkbox"/>	Capacidad Normal = $100 <<und/wk>>$

◇	Tiempo de entrega deseado = 10 <<wk>>
◇	Tiempo Ajuste Ordenes Pendientes = 3
◇	Coeficiente Lineal = 1.1
◇	Coeficiente de Suministro =2<<\$/und>>
◇	Coeficiente de Ordenar = 1<<\$/und>>
◇	Demanda Inicial = 100<<und/wk>>
○	Demanda Final = 'Demanda Inicial'+STEP(20<<und/wk>>;STARTTIME+3<<wk>>)
○	Despachos = 'Capacidad Actual'

De esta manera, se describe el modelo de simulación basado en agentes y dinámica de sistemas que permite el estudio del fenómeno del efecto látigo en las cadenas de abastecimiento.

Validación

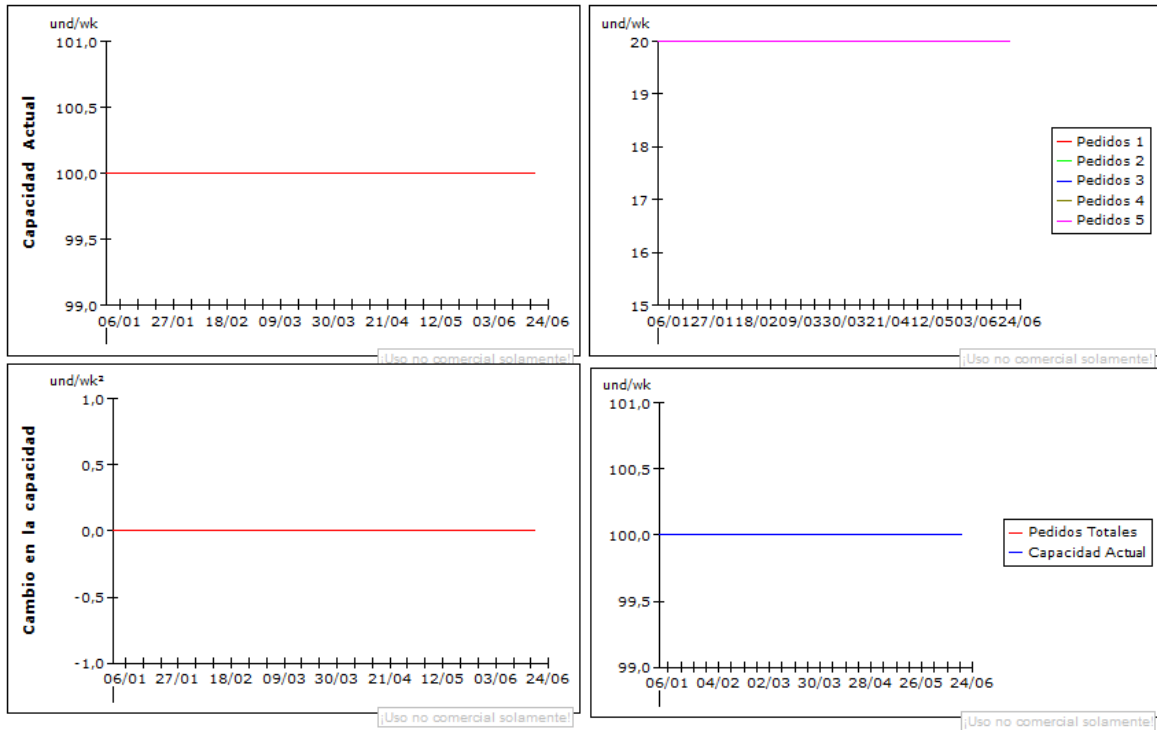
El validación de un modelo en dinámica de sistemas es un proceso de construcción de confianza que busca evaluar que tan apropiada en la representación del modelo respecto a la realidad, verificando tanto la estructura como el comportamiento (Barlas, 1996). El modelo planteado ha sido ampliamente verificado en Gonçalves (2003); Villa (2011); Villa et al., (2015). En estos se muestra como uno de los elementos particulares que generaban necesidades adicionales de investigación son las regla de decisión de los clientes mayoristas. De esta manera, en este modelo se plantearon las reglas basados en la racionalidad limitada de los clientes mayoristas de las cadenas de abastecimiento.

Considerando lo anterior, se plantearon reglas hipotéticas de decisión con la componente de simulación basada en agentes. Con esta inclusión, se evaluó el comportamiento del modelo con miras a verificar la estructura, mediante algunas pruebas de simulación orientadas a validarla. Adicional, el modelo posee consistencia dimensional y se verificó la estructura del mismo.

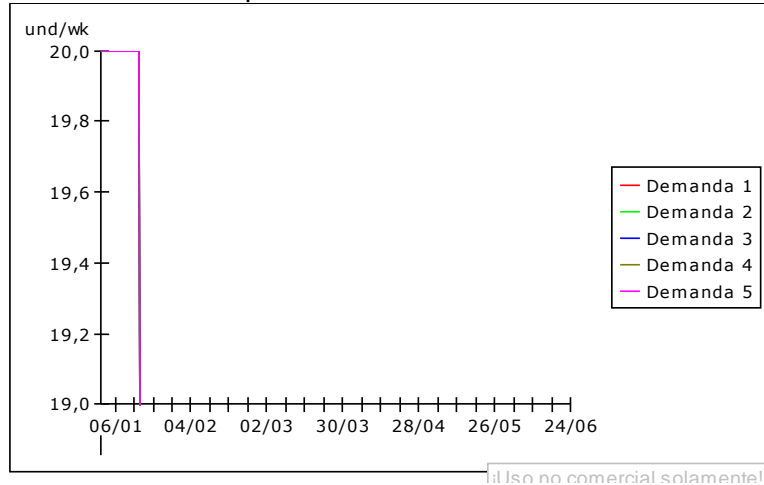
Inicialmente el modelo es dejado en equilibrio dinámico, la demanda se mantiene constante, y, en la **Figura 6 - 6** se observa que tantos los pedidos, como los cambios en la capacidad se mantienen constantes. Este comportamiento es esperado debido a que al no existir un cambio repentino en la demanda que dé lugar a un agotado, los agentes

mayoristas seguirán pidiendo lo equivalente a la demanda, y el proveedor podrá suplir esta necesidad sin realizar ajustes a su capacidad de producción.

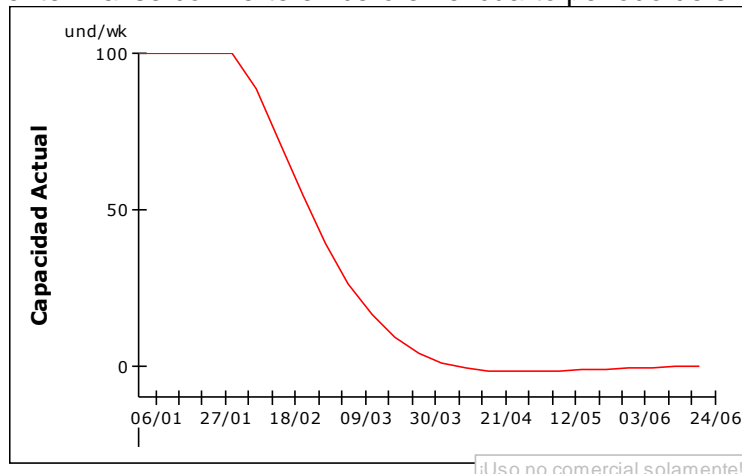
Figura 6 - 6. Resultados del modelo en equilibrio dinámico



Por otro lado, otra forma de validar el comportamiento del modelo es evaluando el caso en el que el producto no se compre más en la semana cuatro es decir, que a partir de la semana cuatro de simulación la demanda del cliente final sea cero, tal como se muestra en la **Figura 6 - 7**.

Figura 6 - 7. Validación del comportamiento con la demanda del cliente final en cero.

Bajo estas condiciones, se espera que el proveedor disminuya su capacidad de producción a cero, debido a que en la cadena de abastecimiento no existe una demanda del cliente final por suplir, este comportamiento esperado se observa en la **Figura 6 - 8** que esquematiza el cambio en la capacidad del productor resultante de la simulación.

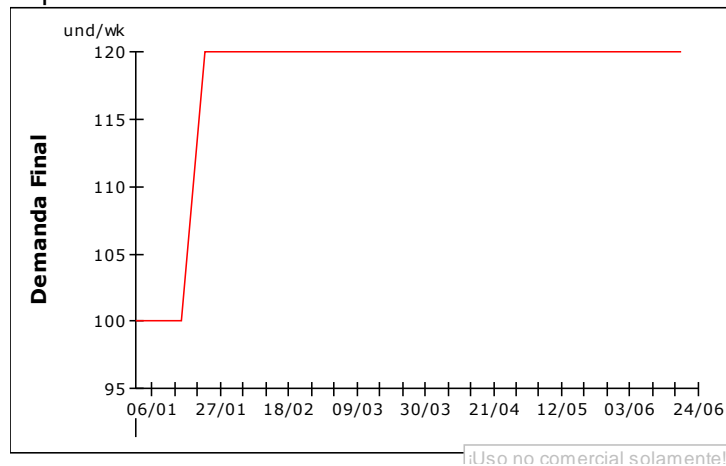
Figura 6 - 8. Comportamiento del cambio de la capacidad del proveedor cuando la demanda del cliente final se convierte en cero en el cuarto periodo de simulación

La finalidad de esta sección es la validación del modelo propuesto, considerando que este es un modelo genérico que no responde a un sistema particular de aplicación. Por lo tanto, no aplica la validación del comportamiento histórico entendida como la capacidad del modelo de replicar datos históricos, sino la capacidad de representar los patrones de comportamiento como efectivamente se logra con el modelo. Además, considerando que

las reglas de decisión son hipótesis de posibles comportamientos, se plantea un experimento de toma de decisiones para su análisis. El experimento planteado es presentado más adelante en la tesis, cuyo objetivo es entender mejor la racionalidad de los agentes en las cadenas de suministro y por lo tanto mejorar la validez del modelo.

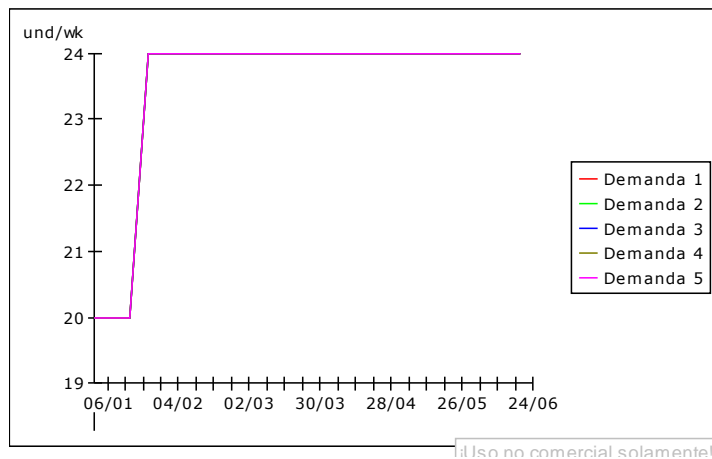
Una vez validado el comportamiento del modelo, y con el fin de estudiar el efecto látigo, el cual, como ya se había mencionado antes ocurre ante la aparición de un agotado, se realiza la simulación del comportamiento de la cadena de abastecimiento ante un cambio repentino en la demanda total del 20% en el cuarto periodo de la simulación de 25 semanas, tal como se muestra en la **Figura 6 - 9**.

Figura 6 - 9. Comportamiento de la demanda del cliente final en el tiempo



Esta demanda final es dividida en partes iguales entre los 5 agentes clientes mayoristas, tal como se muestra en la **Figura 6 - 10**, esto se realiza con el objeto de observar los resultados de las reglas de decisión bajo las mismas condiciones exógenas.

Figura 6 - 10. Demanda percibida por cada uno de los agentes clientes mayoristas en el tiempo

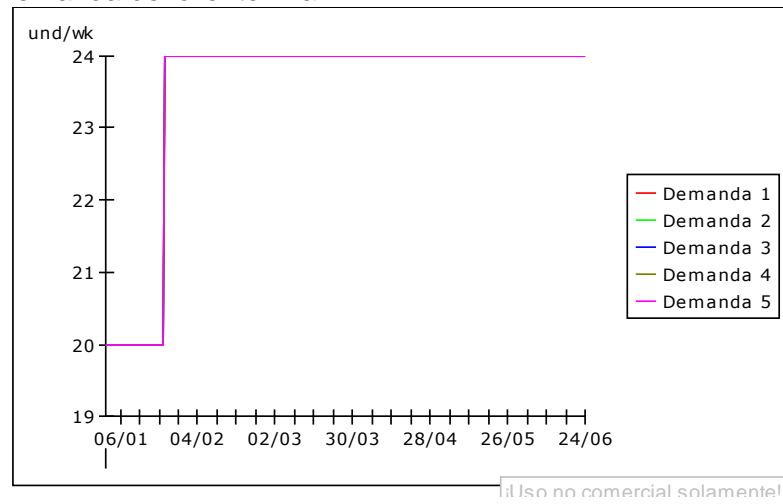


Dadas estas condiciones, en la siguiente sección se muestra el comportamiento de los pedidos arrojados por el modelo, de acuerdo a las reglas de decisión planteadas para los agentes mayoristas en el modelo para realización de pedidos y ajuste del tiempo de entrega esperado.

7. Resultados de simulación

Una vez diseñado el modelo, se realizan simulaciones, por un periodo de 25 semanas, que permitan reflejar el comportamiento del efecto látigo en la cadena de abastecimiento propuesta, caracterizada por tener un proveedor de un producto único e insustituible vendiendo a cinco mayoristas en competencia por el producto.

El objetivo de las simulaciones es observar la respuesta de los agentes mayoristas a un incremento en la demanda final del 20%. De esta manera, la variable entrada del modelo es la demanda del cliente final, la cual presenta un comportamiento estable durante los primeros cuatro periodos y luego sufre un incremento como se muestra en la **Figura 7 - 1**. El incremento ocurre con el fin de que se presenten agotados en el sistema, que permita mostrar las decisiones de pedido de los clientes mayoristas en respuesta al aumento de la demanda y cómo esta variabilidad en los pedidos afecta la capacidad de producción de los proveedores.

Figura 7 - 1. Demanda del cliente final

A continuación se presentan las simulaciones que arroja el modelo ante el incremento de la demanda del cliente final.

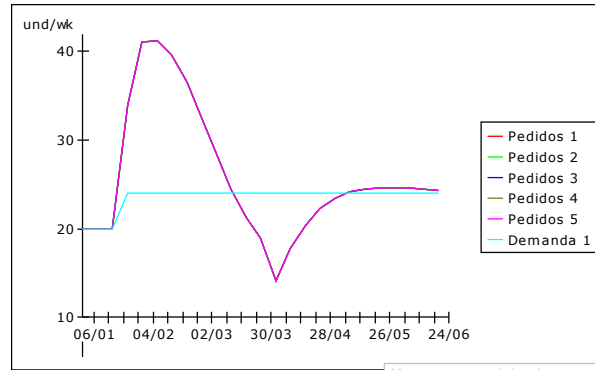
Para el análisis se considera importante observar el comportamiento de los pedidos de los clientes mayoristas en comparación con la demanda recibida del cliente final, así mismo entender la relación de los pedidos de los clientes con el cambio de la capacidad de producción del proveedor.

Regla de decisión

Regla de decisión 1

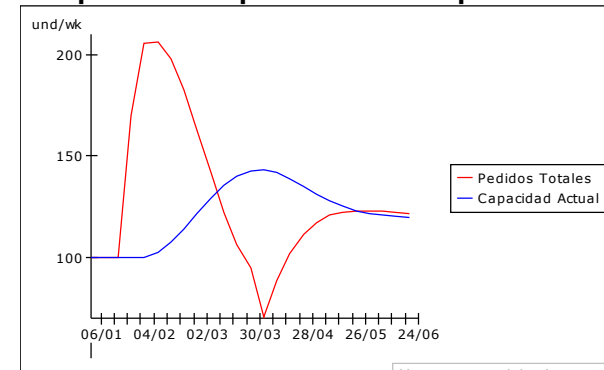
El agente mayorista realiza el ajuste de los retrasos esperados proporcionalmente a los retrasos reales del proveedor

Pedidos vs. demanda del cliente fina



¡Uso no comercial solamente!

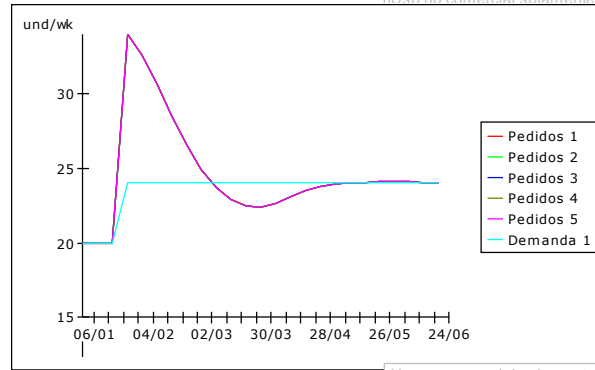
Pedidos totales de los mayoristas vs. Capacidad de producción del proveedor



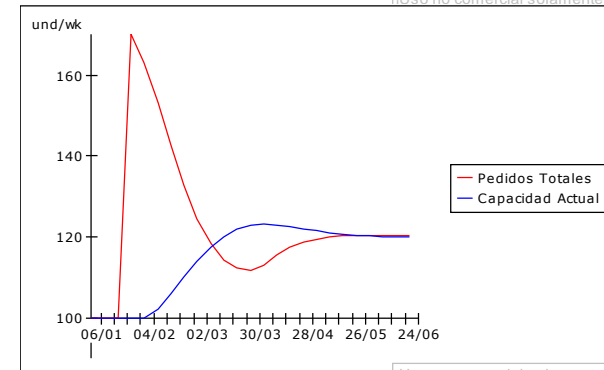
¡Uso no comercial solamente!

Regla de decisión 2

El agente mayorista realiza el ajuste de los retrasos esperados como el promedio entre el tiempo de entrega deseado, y los retrasos reales del proveedor.



¡Uso no comercial solamente!

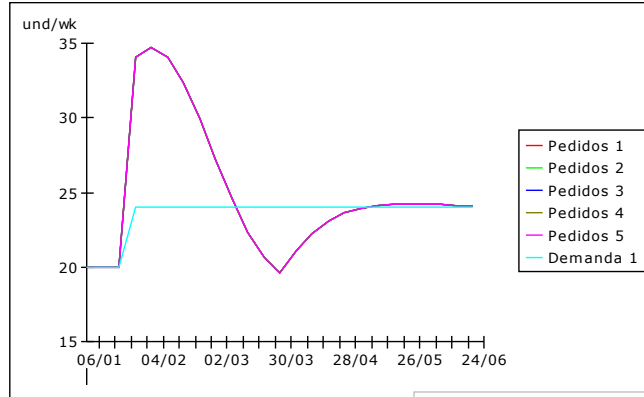


¡Uso no comercial solamente!

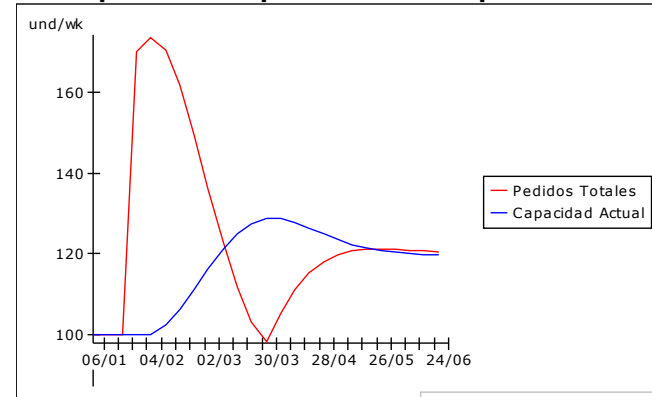
Regla de decisión

Regla de decisión 3
Los retrasos esperados del agente mayorista coinciden con los retrasos reales del proveedor

Pedidos vs. demanda del cliente fina

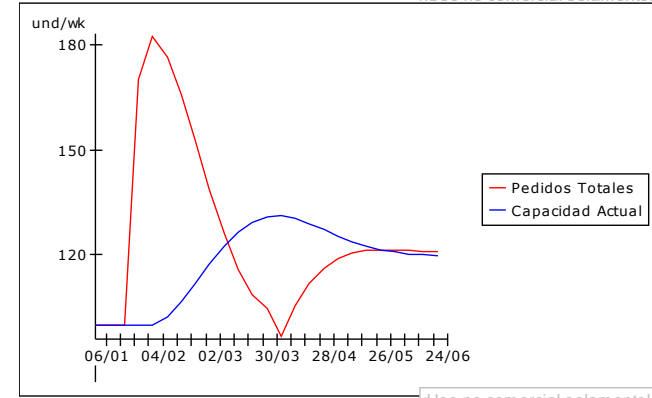
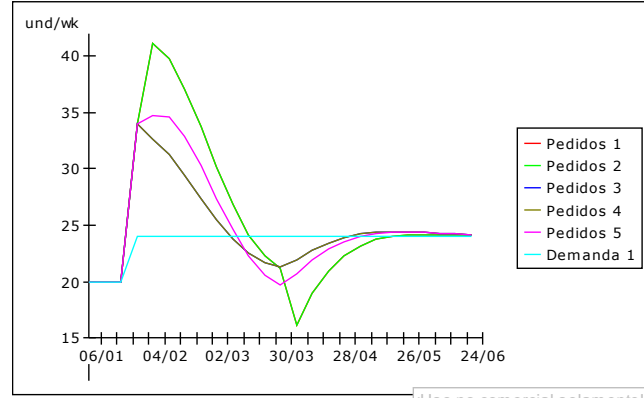


Pedidos totales de los mayoristas vs. Capacidad de producción del proveedor



Interacción de reglas de decisión

Los mayoristas 1 y 2 ajustan el tiempo esperado y consecuentemente los pedidos siguiendo la regla 1; los mayoristas 3 y 4 siguiendo la regla 2 y el mayorista 5 siguiendo la regla 3.



¡Uso no comercial solamente!

¡Uso no comercial solamente!

¡Uso no comercial solamente!

¡Uso no comercial solamente!

En los cuatro casos se observa que ante un incremento de la demanda final, los agentes, clientes mayoristas, incrementan sus pedidos al proveedor, incluso realizando pedidos mucho más altos en comparación con la demanda percibida, presentándose pedidos que inclusive llegan a doblar la demanda. Este comportamiento se da bajo la posible creencia de que la demanda continuará aumentando en el tiempo, de modo que los agentes aumentan sus pedidos, ordenando por adelantado, con el fin de abastecerse y suplir la demanda del cliente final que se espera sea creciente en el tiempo.

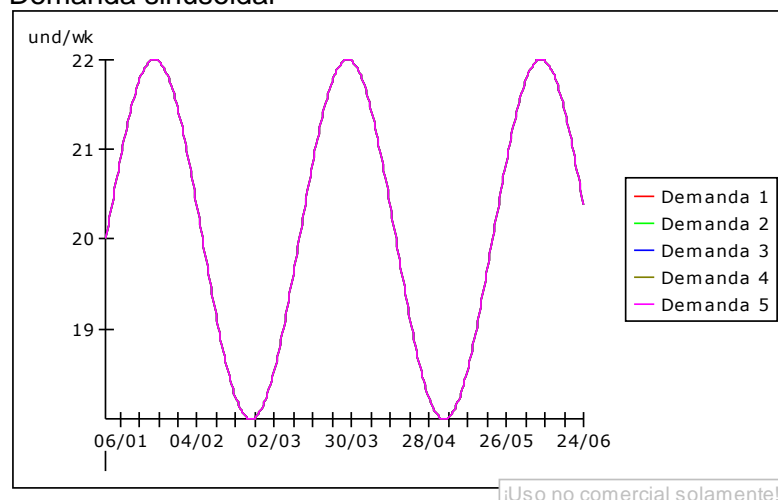
En cuanto a la relación entre los pedidos totales, es decir, la sumatoria de los pedidos de los clientes mayoristas, y la capacidad de producción del proveedor, en los cuatro casos se observa que el proveedor ajusta su capacidad de producción en respuesta a los pedidos totales realizados por los agentes mayoristas.

Para el caso de la segunda regla de decisión, se puede observar que el cambio en la capacidad del proveedor es más suave que en el resto de los casos, esto se puede explicar porque el comportamiento de las decisiones de pedido de los clientes mayoristas es más agresivo al momento de percibir el cambio en la demanda, de modo que realiza pedidos altos para abastecerse. Una vez el agente mayorista puede suplir la demanda, se observa que disminuye los pedidos, no en niveles tan bajos como lo hacen los agentes que se comportan siguiendo las otras reglas de decisión, y de manera rápida encuentra el equilibrio para abastecerse y suplir la demanda de su cliente final, de modo que no obliga al proveedor a hacer cambios drásticos en capacidad.

Finalmente, en los cuatro casos se observa el comportamiento característico del efecto látigo, donde los clientes aumentan sus pedidos por encima de la demanda final percibida, y en respuesta el proveedor reacciona incrementando su capacidad de producción. Una vez el proveedor es capaz de suplir los pedidos de los agentes mayoristas, éstos paran de aumentar sus órdenes, debido a que a su vez pueden suplir la demanda del cliente final. Una vez los agentes mayoristas disminuyen sus pedidos, el proveedor se encuentra con una capacidad de producción excesiva e innecesaria, construida para abastecer la demanda fantasma de los agentes mayoristas.

Por otro lado, y con el interés de explorar las simulaciones resultantes del modelo ante otros comportamientos de la demanda, la cual es la variable entrada del modelo, se corrieron simulaciones con la demanda del cliente final fluctuando como una onda sinusoidal con una amplitud de 10 unidades a la semana y un periodo de tiempo de 10 semanas, tal como se muestra en la **Figura 7 - 2**. Este comportamiento fue pensado como una aproximación a los pedidos de los clientes finales que aumentan o disminuye dependiendo la temporada del año y las características del producto.

Figura 7 - 2. Demanda sinusoidal

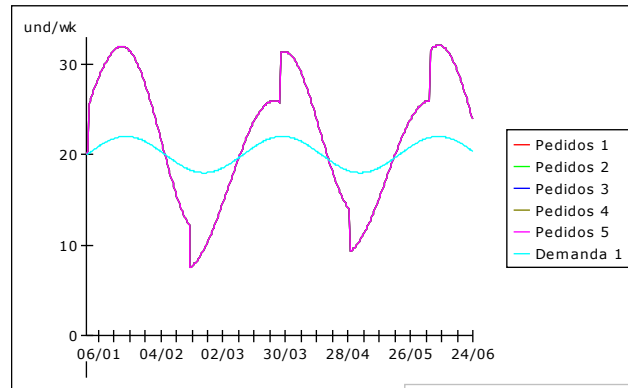


A continuación se presentan los resultados que arroja el modelo considerando el comportamiento sinusoidal de la demanda para cada una de las reglas de decisión. De manera similar a los resultados anteriores, es de interés observar el comportamiento de los pedidos ante la demanda percibida, y el cambio en la capacidad de producción del proveedor ante los pedidos totales.

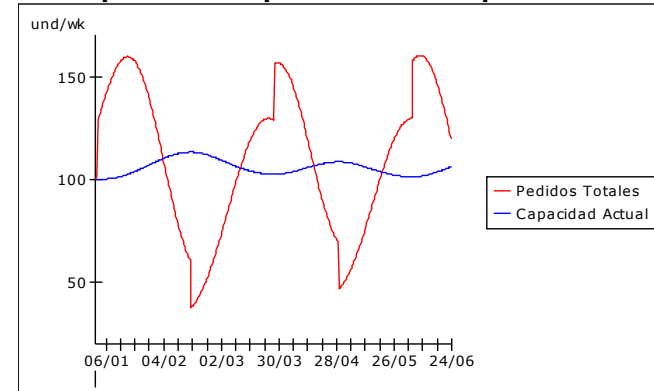
Regla de decisión

Regla de decisión 1
 El agente mayorista realiza el ajuste de los retrasos esperados proporcionalmente a los retrasos reales del proveedor

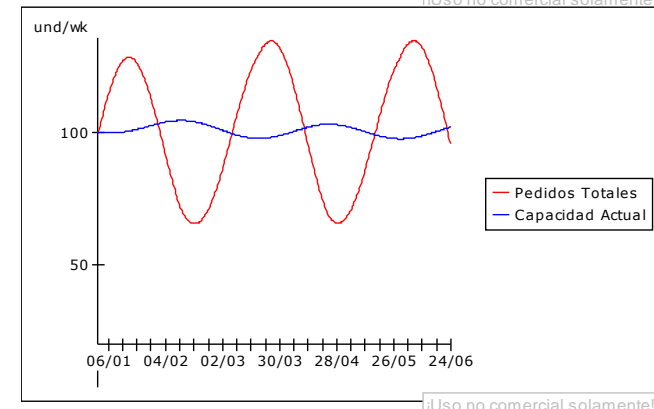
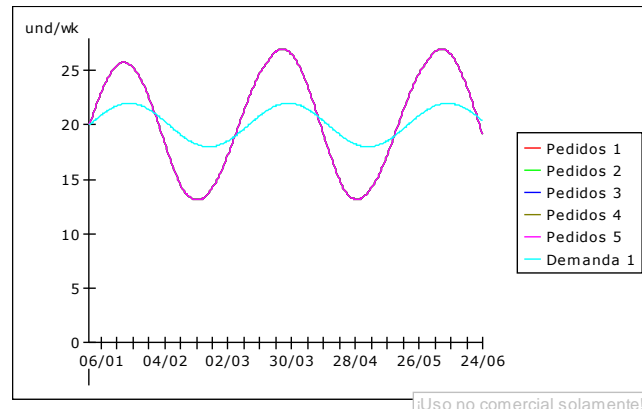
Pedidos vs. demanda del cliente final



Pedidos totales de los mayoristas vs. Capacidad de producción del proveedor



Regla de decisión 2
 El agente mayorista realiza el ajuste de los retrasos esperados como el promedio entre el tiempo de entrega deseado, y los retrasos reales del proveedor.

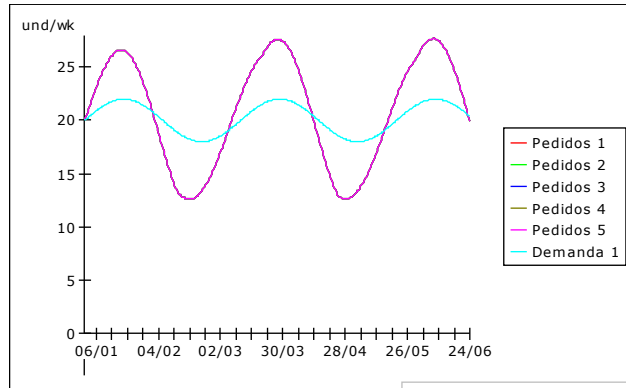


Regla de decisión

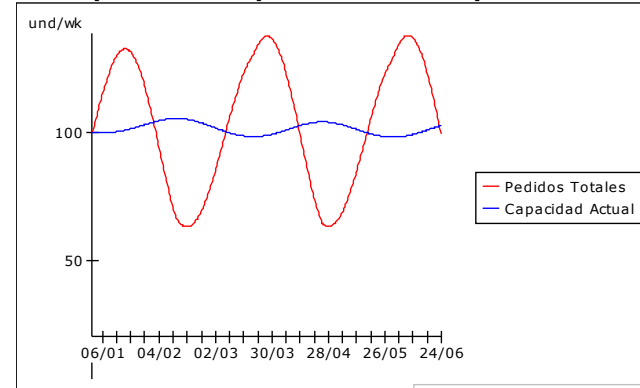
Regla de decisión 3

Los retrasos esperados del agente mayorista coinciden con los retrasos reales del proveedor

Pedidos vs. demanda del cliente final

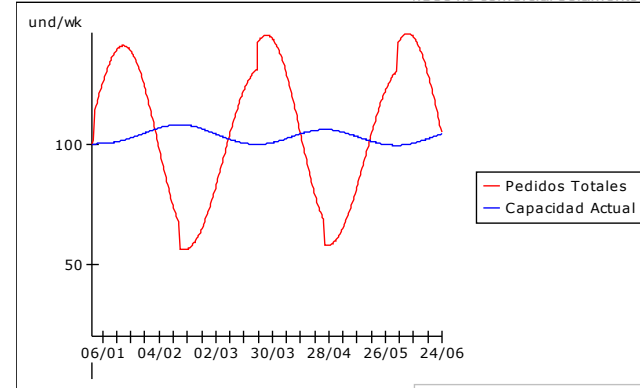
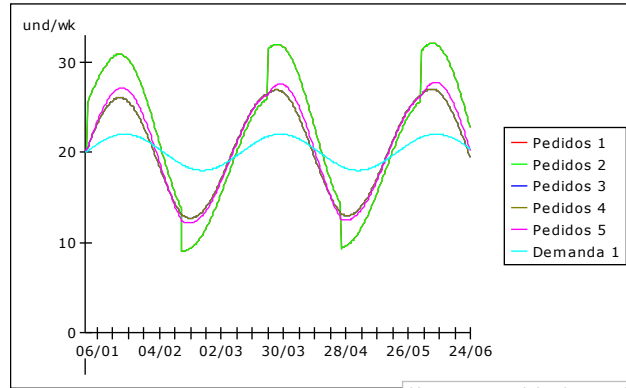


Pedidos totales de los mayoristas vs. Capacidad de producción del proveedor



Interacción de reglas de decisión

Los mayoristas 1 y 2 ajustan el tiempo esperado y consecuentemente los pedidos siguiendo la regla 1; los mayoristas 3 y 4 siguiendo la regla 2 y el mayorista 5 siguiendo la regla 3.



En los cuatro casos de esta simulación se pueden observar las amplificaciones de las órdenes colocadas al proveedor en comparación con la demanda percibida. Si bien la demanda del cliente final tiene un comportamiento sinusoidal, se evidencia que los pedidos tienen un comportamiento similar amplificado en gran magnitud, de modo que ante picos de demanda coloca al proveedor pedidos mucho más altos, y en caso contrario, frente a disminuciones de la demanda, los pedidos son mucho menores, debido a que cuentan con el inventario necesario para abastecer la baja demanda. Una vez la demanda del cliente final aumenta de nuevo, el agente mayorista amplifica los pedidos, dando al proveedor una errada señal de demanda.

Por otro lado, en cuanto a la construcción de capacidad, si bien las órdenes colocadas por los clientes mayoristas son muy amplificadas en comparación con las órdenes del cliente final, este no experimenta cambios drásticos en la capacidad de producción. Este comportamiento se explica por los retardos que son considerados en el modelo, los cuales, como se había mencionado previamente en este estudio, son los asociados al tiempo que se demoran las ordenes en ser recibidas por el proveedor y al tiempo de construcción en la capacidad. Estos retardos ayudan a que el proveedor no construya de manera inmediata la capacidad para abastecer las órdenes que está percibiendo, lo cual es además facilitado por el comportamiento sinusoidal de la demanda y las consecuentes órdenes de los agentes mayoristas, ya que cuando llega el momento de construir capacidad, el proveedor ya ha percibido la caída en las órdenes.

8. Experimento piloto

8.1 Diseño del experimento piloto

Según Croson & Donohue (2002), los experimentos de laboratorio son útiles para investigar comportamiento en cadenas de abastecimiento por que permiten medir el grado en que los factores comportamentales causan el efecto látigo, permiten controlar el entorno que cada eslabón de la cadena enfrenta y permite diseñar entornos desprovistos de las posibles causas operacionales del fenómeno.

De esta manera, en esta investigación se diseña un experimento **piloto** que permita explorar las decisiones de los clientes mayoristas en una cadena de abastecimiento caracterizada por tener un único proveedor de un producto escaso e insustituible y varios clientes mayoristas realizándole pedidos, y la posible ocurrencia del efecto látigo. Así mismo, el experimento piloto busca analizar la influencia de dos características básicas, identificadas previamente por Gonçalves (2003) y Gonçalves & Arango (2010) y evaluadas por Villa (2011), de las cadenas de abastecimiento:

- Retardos entre el momento en que el cliente mayorista hace una orden y el momento en que esta es recibida por el proveedor.
- Retardos en la adquisición de capacidad por parte del proveedor.

Para esto, se diseña un experimento de una cadena de abastecimiento en el que se analiza el comportamiento de las personas a la hora de asumir el rol de clientes mayoristas y enfrentarse a la existencia de competencia en este eslabón de la cadena. El experimento se realiza mediante la construcción de una cadena de abastecimiento en red, conformada por un único proveedor y cinco clientes mayoristas realizando pedidos.

El experimento consta de cuatro tratamientos en el cual el proveedor cuenta con un retardo para construir capacidad de una o tres semanas, y un retardo en que las decisiones de los clientes mayoristas son recibidas al proveedor de dos o tres semanas.

El experimento es realizado por tiempo de simulación de 35 periodos (semanas), en el cual cada jugador o cliente mayorista toma decisiones semana a semana sobre cuántas unidades del producto escaso ordenar a su proveedor, con el fin de cubrir la demanda de sus clientes. La finalización del experimento no es comunicada a los sujetos participantes del experimento, esto con el fin de evitar un comportamiento en el fin de juego que pueda desencadenar un sobre o un sub ordenamiento (Croson & Donohue, 2006).

Las decisiones de pedidos que los cinco sujetos realizan son recibidas por su único proveedor a los dos o tres periodos siguientes de realizada la orden y son acumuladas en las órdenes pendientes.

El comportamiento del proveedor es simulado por computador, su capacidad inicial de producción del es de 100 unidades por semana, sin embargo, tiene la facultad de cambiarla (aumentarla o disminuirla) en respuesta a las órdenes totales que los cinco sujetos asumiendo el rol de clientes mayoristas, le realicen. El tiempo de construcción de capacidad del proveedor es de una o tres semanas dependiendo el tratamiento al que estén sometidos los sujetos.

En la siguiente tabla se muestran los casos experimentales del diseño planteado

Tabla 8 - 1: Casos experimentales del experimento piloto

CASOS EXPERIMENTALES		Retardos en las decisiones de los clientes mayoristas	
		2 semanas	3 semanas
Retardos del proveedor para invertir en capacidad	1 semana	Tratamiento 1	Tratamiento 3
	3 semanas	Tratamiento 2	Tratamiento 4

En caso de que el proveedor no tenga la capacidad suficiente para satisfacer las necesidades del cliente mayorista, comenzará a presentar retrasos en las entregas de los

pedidos, las que son asignadas a los clientes mayoristas en proporción a las órdenes recibidas por cada uno.

Una vez los clientes mayoristas perciban estos incumplimientos, también les incumplirán a sus clientes finales. Se espera que este comportamiento lleve a que el desempeño de los sujetos no sea el adecuado, incurriendo en altos costos por ordenamiento, déficit o inventario.

En cuanto al desempeño de los sujetos, como ya se mencionó anteriormente, el modelo calcula los costos totales acumulados, que no son más que la sumatoria de los costos semanales. Los costos en que los sujetos incurren cada semana tienen dos componentes:

- Costos por Ordenar:

$$CO = \frac{1 * (Decisión de Pedidos)^2}{1000}$$

- Costos por Déficit o Inventario:

$$CD = \frac{2 * (Decisión de Pedidos)^2}{1000}$$

De esta manera, el costo total acumulado CTA en los que incurre cada cliente mayorista en el experimento es la suma de los costos por ordenar y los asociados al déficit o inventario en toda la simulación:

$$CTA = \sum_{t=1}^T (CO_t + CD_t)$$

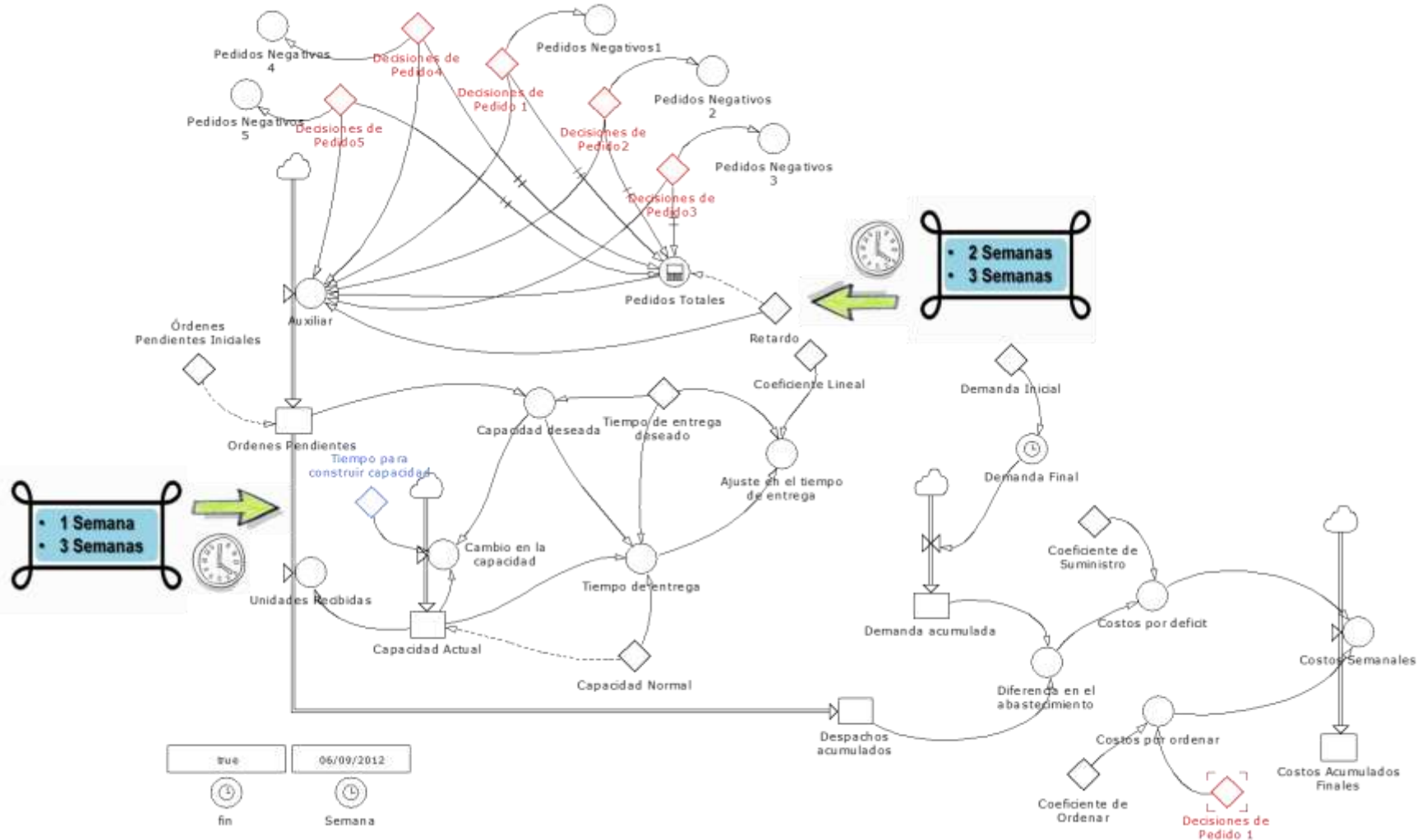
En el inicio del experimento, los clientes mayoristas ordenan 20 unidades por semana durante las tres primeras semanas, luego los sujetos toman las decisiones sobre cuántas

unidades de producto ordenar (mayores o iguales a cero) a su proveedor para satisfacer la demanda del cliente final.

En cuanto a la demanda, esta tiene el comportamiento descrito en el modelo de simulación, es decir, es constante y en el cuarto periodo de la simulación presenta un incremento del 20% y luego se mantiene constante, de este modo los sujetos actuando como clientes mayoristas, se enfrentan al incremento repentino de la demanda, y su objetivo es suplirla a lo largo de la experimentación incurriendo en los menores costos totales.

El modelo experimental, que se muestra en la **Figura 8 - 1**, es desarrollado en PowerSim Constructor. En este las decisiones de pedido de los cinco mayoristas se esquematizan como parámetros sin estructuras de realimentación, ya que serán las decisiones tomadas por los sujetos actuando como clientes mayoristas durante el experimento, objeto del estudio. Las decisiones de pedido son sumadas y recibidas por el proveedor en la línea de suministro.

Figura 8 - 1. Modelo experimental para el desarrollo del piloto en red.



8.2 Procedimiento experimental

El experimento piloto fue desarrollado siguiendo la metodología y protocolo usados en economía experimental (Cassar & Friendman, 2004; Friendman & Sunder, 1994):

Los sujetos fueron reclutados de la misma población de estudiantes de octavo semestre en adelante de los programas de Ingeniería Industrial, administrativa y economía de la Universidad Nacional de Colombia, Medellín, durante el segundo semestre de 2013. Cada uno de los estudiantes que participó en la experimentación informó no haber participado previamente en algún tipo de experimento relacionado.

En cuanto a la validez de los resultados de los experimentos que cuentan con la participación de los estudiantes, Croson & Donohue (2006) corrieron experimentos de laboratorio con estudiantes y administradores, encontrando que los resultados del grupo de profesionales son consistentes con los resultados obtenidos de los experimentos con los estudiantes. Los autores mencionan que si bien son los profesionales los tomadores de decisiones de las empresas, los estudiantes de administración de hoy son los tomadores de decisiones en formación, de modo que se presume que los experimentos que se ejecutan con estudiantes extraen la misma muestra poblacional que los profesionales de inventarios de las empresas.

Una vez los estudiantes se encontraron en el entorno del laboratorio, les fueron asignadas las instrucciones del experimento del que participaban, en las que se describía la cadena de abastecimiento de estudio, su papel como cliente mayorista, las decisiones de pedido que debían tomar semanalmente y el objetivo del juego. Así mismo, en las instrucciones los sujetos son informados de que hacían parte de un mercado en el que competían con otros clientes mayoristas, ordenando al mismo proveedor, por el abastecimiento de los productos.

Antes de iniciar el experimento, los participantes contaban con un periodo de tiempo en el que podían leer detalladamente las instrucciones y, una vez concluido el tiempo de lectura, se les permitió formular públicamente preguntas tanto de las instrucciones como

de la interfaz a la que se enfrentaban durante el experimento, las que fueron resueltas igualmente de manera pública, esto con el fin de que toda la información fuera conocida por todos los participantes.

Los experimentos fueron realizados en el software de simulación Powersim Constructor, en el cual se diseñó el modelo experimental, el software permite la ejecución de experimentos en red, es decir, permite que varios sujetos actuando como clientes mayoristas (cinco como en este caso), realicen decisiones de pedidos en tiempo real al mismo proveedor (servidor) usando diferentes computadores. En la sala de cómputo fueron corridos los cuatro tratamientos al tiempo, de modo que los clientes mayoristas no conocieron sus competidores directos, ya que las cadenas de abastecimiento estaban distribuidas de manera aleatoria en el espacio.

El software usado para los experimentos permite guardar los históricos de las variables de interés, incluyendo las decisiones de pedido de los clientes mayoristas. Sin embargo, también se solicitó a los sujetos que escribieran en una hoja de papel cada una de las decisiones que tomaran, y los costos totales incurridos, esto con el fin de tener un respaldo físico de las decisiones y conocer el desempeño de los sujetos para el pago de la recompensa.

8.3 Recompensa

Cada uno de los estudiantes participantes del experimento piloto recibió una recompensa monetaria por su participación y desempeño en el experimento, con el fin de inducir un comportamiento adecuado a la hora de asumir su rol como clientes mayoristas de una cadena de abastecimiento. En su trabajo, los autores Croson & Donohue (2006) mencionan que es de gran importancia recibir una recompensa monetaria ya que es un incentivo para que los participantes de los experimentos minimicen los costos del juego.

Para el cálculo de la recompensa monetaria, se utilizó la estimación usada por Villa (2011) en su trabajo de investigación:

$$Recompensa [\$] = 1000 * Rmax * \frac{1}{1 + Rmin^{-CTA}}$$

Donde R_{max} y R_{min} son las recompensas máximas y mínimas para el desarrollo del experimento, y CTA son los costos totales acumulados de cada sujeto actuando como clientes mayoristas en el desarrollo de los experimentos. De esta manera, la recompensa monetaria promedio recibida por los participantes fue de \$25.000.

8.4 Resultados del experimento piloto

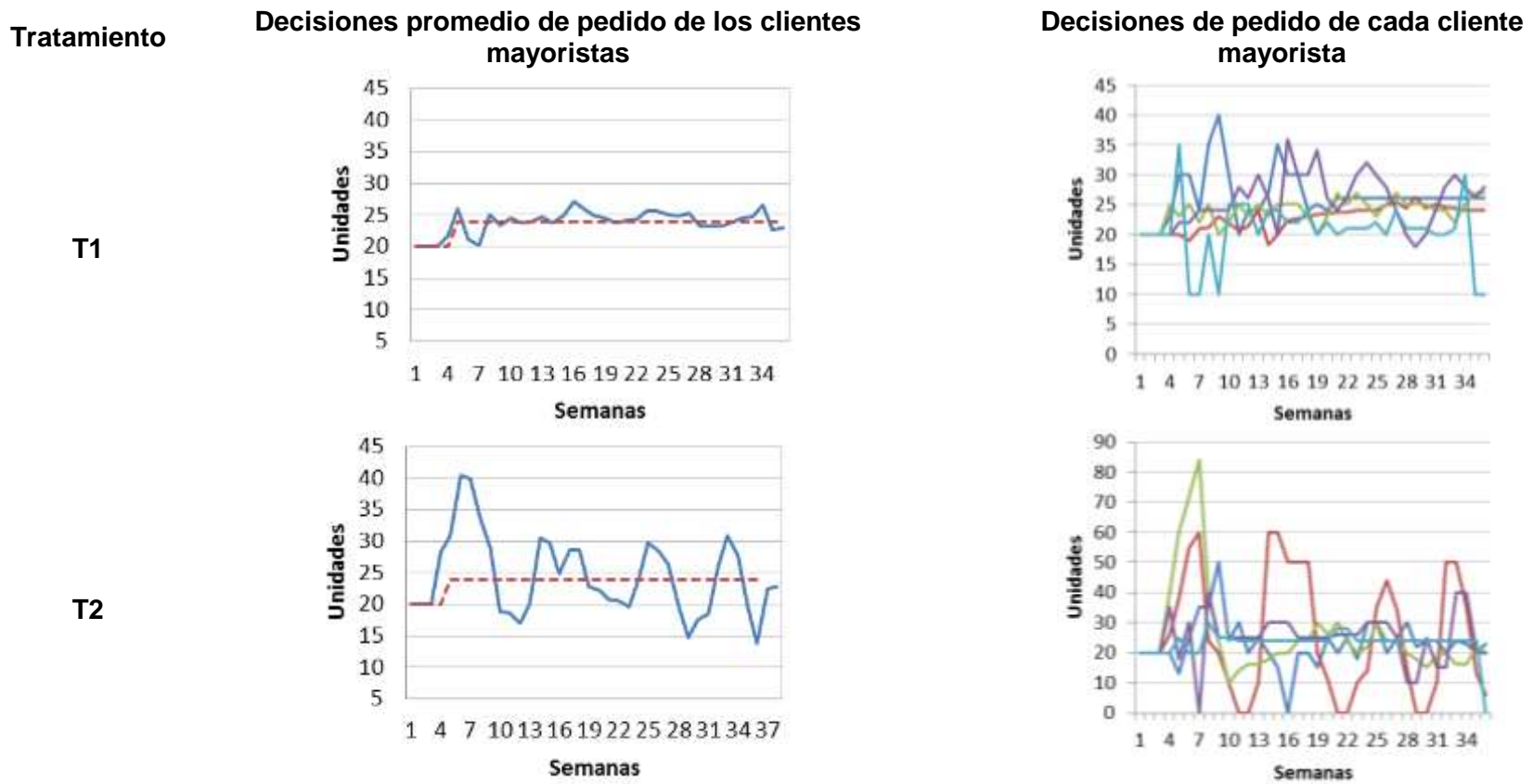
En esta sección se presentan los principales resultados de las decisiones de pedido de los sujetos asumiendo el rol de clientes mayoristas de la cadena de abastecimiento de estudio. El foco de un experimento piloto es el diseño per se, por lo tanto los resultados numéricos son sólo indicativos preliminares de posibles resultados, y sirven como paso fundamente a la realización de un experimento formal.

Cabe resaltar que para este piloto fue realizado un experimento por cada uno de los tratamientos experimentales descritos en la **Tabla 8 - 1** del diseño, de modo que se muestran los comportamientos de los pedidos de los participantes sin excepciones siguiendo análisis estadísticos, por lo tanto, los resultados aquí presentados son meramente indicativos sobre los resultados del experimento y servirán como punto de partida para proponer mejoras al mismo.

A continuación se presentan las decisiones de pedido por cada uno de los tratamientos del experimento de laboratorio en la **Figura 8 - 2**. Se muestra el comportamiento de las decisiones de pedido de cada participante, así como los pedidos promedio por cada tratamiento.

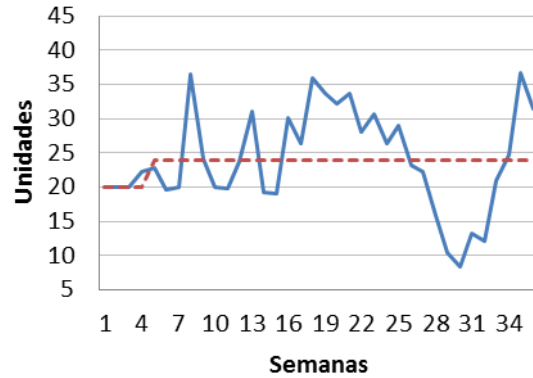
Es importante resaltar que cada tratamiento constaba de un experimento en el que cinco personas, asumiendo el rol de clientes mayoristas realizaban pedidos a un solo proveedor de un producto escaso.

Figura 8 - 2. Resultados del experimento piloto

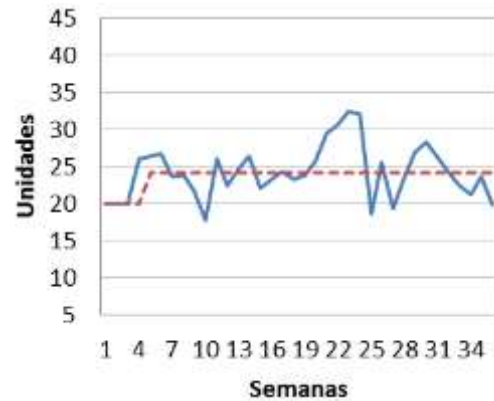


Tratamiento

Decisiones promedio de pedido de los clientes mayoristas

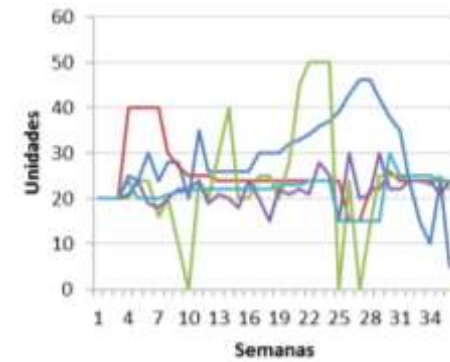
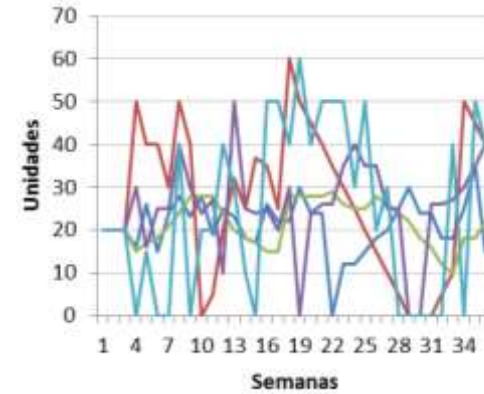


T3



T4

Decisiones de pedido de cada cliente mayorista



Leyendas

- PEDIDOS PROMEDIO
- - - DEMANDA

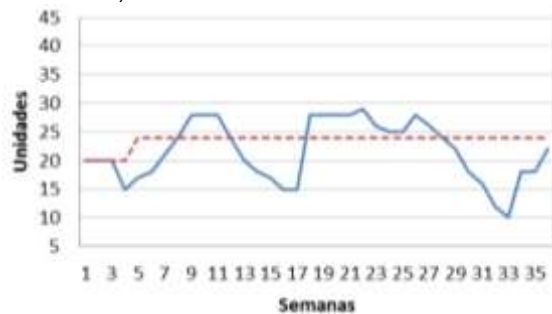
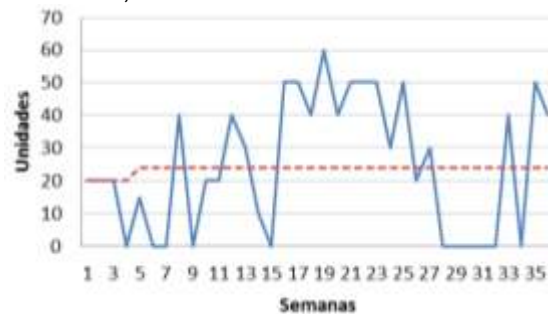
- DECISOR 1
- DECISOR 2
- DECISOR 3
- DECISOR 4
- DECISOR 5

8. Experimento piloto

En primer lugar, se presenta el comportamiento del promedio de las decisiones de los cinco clientes mayoristas para cada tratamiento, se observa que en tres de los cuatro tratamientos (1, 2 y 3) se presenta un comportamiento esperado de acuerdo a los resultados de las simulaciones: una vez los sujetos perciben el aumento de la demanda final inflan sus pedidos por encima del valor de la demanda que aumenta a 24 unidades por semana. Para el caso de los tratamientos uno y cuatro, este aumento sólo alcanza las 26 unidades, equivalente a 106% sin embargo, el segundo tratamiento presenta un comportamiento más agresivo, llegando a pedir hasta 40 unidades a la semana, lo que implica un aumento en los pedidos promedio del 166%.

Se observa que una vez el proveedor es capaz de suplir su demanda, los clientes mayoristas disminuyen las decisiones de pedidos con el fin de agotar sus inventarios y reducir los costos, sin embargo en periodos posteriores se ven en la necesidad de aumentar los pedidos para abastecerse porque los pedidos bajos no fueron suficientes para suplir la demanda del cliente final.

Por otro lado, los pedidos promedio del tercer tratamiento no presentan el incremento esperado al inicio del experimento, por el contrario realizan pedidos promedio por debajo de la demanda del cliente final, inflando los pedidos sólo hasta la octava semana de simulación, en la que realizan pedidos de producto de 36 unidades. Este comportamiento se presenta por las decisiones de pedido bajas de los decisores 3 y 5; el primero realiza pedidos por debajo de la demanda durante los periodos 4 al 7, luego se presenta el esperado incremento y posterior decremento sus pedidos según se muestra en la **Figura 8 - 3**. Por su parte, y como se muestra en la **Figura 8 - 4**, el decisor 5 lleva sus pedidos a cero una vez terminan los tres periodos de aprendizaje en los que se les solicitó realizar pedidos del orden de 20 unidades a la semana, a partir de la semana 8 incrementa sus pedidos por encima de la demanda

Figura 8 - 3. Decisiones de pedido del decisor 3, tratamiento 3**Figura 8 - 4.** Decisiones de pedido del decisor 5, tratamiento 3

Finalmente, en cuanto a las decisiones de pedido cada uno de los sujetos en los diferentes tratamientos, no es posible evidenciar el efecto de los retardos que caracterizan los tratamientos experimentales, en los que los tratamientos 3 y 4 presentan mayores retardos. La **Figura 8 - 2** muestra que el tercer tratamiento es tal vez el que presenta mayores inestabilidades, sin embargo el tratamiento cuatro no presenta el mismo comportamiento, de modo que no es posible atribuir las causas de la inestabilidad al hecho de que los clientes mayoristas se vean enfrentados a mayores retardos en el sistema.

8.5 Consideraciones de diseño

A partir de la realización del experimento piloto se plantean, adicional a lo previamente mencionado, las siguientes consideraciones para la realización de un experimento formal.

- Recompensar económicamente a los participantes del experimento para motivar a su buen desempeño.
- Si bien la plataforma tecnológica usada para el desarrollo del experimento funcionó apropiadamente y permite el diseño y ejecución de experimentos en red, tiene como restricción que funciona en computadores con sistemas operativos de 32 bits, poco usuales ya que la mayoría de los computadores actualmente cuentan con sistemas operativos de 64 bits. Para la realización del experimento formal, se propone explorar otros

softwares que ofrezcan las mismas o mejores prestaciones de modo que se elimine esta barrera tecnológica.

- Desarrollar una interfaz, como la usada en el experimento piloto, que brinda toda la información necesaria para la toma de decisiones de pedidos de los sujetos actuando como clientes mayoristas de la cadena de abastecimiento.
- Como el interés es estudiar las reglas de decisiones individuales de los tomadores de decisiones en un ambiente de competencia por un producto escaso, es importante asegurar que no sea posible la comunicación entre los participantes del experimento formal, de modo que no se presenten estrategias conjuntas o de competencia para la toma de decisiones.
- Seguir todos los protocolos de economía experimental para el desarrollo del experimento formal según Cassar & Friendman (2004), y que fueron aplicados para el desarrollo del experimento piloto del que trata esta tesis, dentro de los que cabe resaltar las condiciones de reclutamiento de los sujetos que participan del experimento, la entrega de instrucciones detalladas sobre sus tareas y el sistema de estudio y la resolución de inquietudes a todos los participantes de manera que todos dispongan de la misma información para la toma de decisiones.

9. Conclusiones y recomendaciones

9.1 Conclusiones

En esta tesis, se estudió la literatura de las Cadenas de Abastecimiento, específicamente la relacionada con aparición de un fenómeno frecuente y costoso en la industria conocido como efecto látigo. La revisión realizada permitió identificar evidencia empírica suficiente de la ocurrencia e importancia del fenómeno, además de identificar las metodologías por medio de las cuales los autores han abordado el entendimiento del efecto látigo, sus causas y consecuencias.

Para el análisis , se desarrolló un modelo de simulación basado en el construido por Gonçalves (2003) y posteriormente estudiado por Villa (2011) y Villa et al. (2015). El modelo busca complementar el problema de la homogeneidad de la regla de decisión del cliente mayorista, por medio de reglas heterogéneas. De esta manera, el modelo desarrollado combina las metodologías de simulación basada en agentes, apenas emergente para el estudio de las cadenas de abastecimiento, y dinámica de sistemas, que ha sido ampliamente utilizada para el entendimiento de sistemas complejos. La primera metodología fue seleccionada debido a las reglas de decisión heterogéneas de los agentes clientes mayoristas. La segunda debido a que las cadenas de abastecimiento son caracterizadas por procesos de realimentación, no linealidades y retardos.

El modelo fue utilizado para plantear la hipótesis sobre el comportamiento de los agentes clientes mayoristas en una cadena de abastecimiento caracterizada por tener un proveedor de un producto escaso vendiendo a cinco clientes mayoristas. Las simulaciones del modelo permitieron evidenciar el comportamiento característico del efecto látigo ante un incremento de la demanda. Así mismo, y a manera exploratoria, se estudiaron los resultados al incluir la demanda del cliente final con un comportamiento

sinusoidal, encontrando resultados coherentes de acuerdo al comportamiento esperado del fenómeno bajo estudio.

El comportamiento de los agentes y el tipo de heterogeneidad son supuestos que se deben hacer en un modelo de simulación. Para aportar a su comprensión, se plantea un experimento de toma de decisiones. Una vez desarrollado el modelo, se desarrolló un diseño experimental de toma de decisiones que permita capturar y comprender el comportamiento de las decisiones de pedido de los sujetos actuando como clientes mayoristas de una cadena de abastecimiento caracterizada por tener un único proveedor de un producto escaso e insustituible. Esta información empírica permite dar más validez al modelo de simulación.

El experimento *piloto* se ejecutó con estudiantes de la Universidad Nacional de Colombia. Para mayor validación, se realizó con una compensación económica, cuya tarea era decidir cuánto ordenar al proveedor ante un repentino cambio de la demanda intentando minimizar los costos totales asociados al ordenamiento, inventario y déficit. Indicativamente y sin poder ser conclusivos, el experimento piloto mostró consistencia con los supuestos del modelo. En general, cuando los sujetos se veían enfrentados al cambio de demanda, tendían a inflar las órdenes por encima de la demanda real del cliente final para abastecer la demanda, obligando al proveedor a invertir en capacidad. Adicional, se presentaron los lineamientos para el desarrollo de un experimento formal.

En esta tesis se evaluó la manera como las personas, asumiendo el rol de clientes mayoristas y viéndose enfrentados a competencia en este eslabón de la cadena, toman decisiones diferentes de pedidos a su único proveedor. Se evidenció además, que el desarrollo de modelos híbridos de dinámica de sistemas y simulación basada en agentes, son una aproximación metodológica que permite estudiar la forma en la que los clientes toman decisiones y se presenta el efecto látigo. Así mismo, la economía experimental permite evaluar los comportamientos de las personas asumiendo el rol de cliente mayoristas a la hora de realizar pedidos a su proveedor y viéndose enfrentado a un aumento en la demanda y competencia en ese nivel de la cadena.

9.2 Recomendaciones

Después del desarrollo de esta tesis y los resultados obtenidos del experimento de laboratorio piloto, se plantean las siguientes recomendaciones para el desarrollo de los experimentos formales e investigación futura que permitan una mejor comprensión del efecto de la competencia en el eslabón del mayorista en las cadenas de abastecimiento:

- Desarrollar experimentos formales con tratamientos que presenten una mayor diferencia de los retardos que los caracterizan, de modo que arrojen resultados concluyentes sobre el efecto de los retardos en las decisiones de pedido y en la amplificación de las órdenes colocadas por parte de los mayoristas.
- El experimento piloto desarrollado no limita la capacidad de producción del proveedor, de manera que sería interesante estudiar cómo es el comportamiento de las decisiones de pedido de los mayoristas al verse enfrentados un mayor desabastecimiento dado por la capacidad limitada, y más realista, de producción del proveedor.
- En futuras experimentaciones, sería de interés adicionar un parámetro que permita medir la agresividad de los mayoristas al verse enfrentados a diferentes niveles de competencia en el nivel mayorista de la cadena.
- En esta tesis se realizaron, de manera exploratoria, simulaciones considerando un nuevo patrón de demanda. Es de interés investigativo construir patrones de demanda realistas que permitan entender desde otras ópticas el comportamiento del fenómeno.
- Explorar nuevos heurísticos en las reglas de decisión de los agentes mayoristas que consideren otros factores más allá del tiempo de entrega, como el nivel de inventario o los agotados.
- Si bien el software PowerSim Constructor permite la realización de experimentos en línea, se hace necesario explorar otro tipo de software que tenga mejores prestaciones, debido a que el software utilizado exige sistemas operativos de 32 bits, poco usuales en la actualidad.

A. Anexo: Instrucciones para el tratamiento 2 del experimento de piloto de laboratorio

INSTRUCCIONES –T2

POR FAVOR NO TOCAR EL COMPUTADOR HASTA QUE NO SE LE INDIQUE

Bienvenido, a partir de este momento usted hace parte de un experimento de toma de decisiones, en el cual asumirá el papel de gerente de una empresa mayorista, perteneciente a un mercado competitivo. Su responsabilidad es **minimizar los costos acumulados** al final de la simulación del juego (50 semanas), y de acuerdo a su desempeño obtendrá un pago en dinero en efectivo, de un proyecto de investigación patrocinado por la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

Usted es uno de los cinco mayoristas en un mercado y no sabe cuáles son sus competidores, ni cómo se desempeñan individualmente; éstos, al igual que usted, realizan pedidos al mismo proveedor.

Su decisión semanal es definir **cuántas unidades ordenar** a su proveedor, con el fin de cubrir toda la demanda de sus clientes (en el experimento, esta decisión se toma en la casilla ubicada al frente de “*Pedido*”). La decisión que usted toma será recibida por su proveedor **dos semanas** después de realizada la orden y serán acumuladas en un canal de órdenes pendientes. La capacidad inicial de producción de su proveedor es de 100 unidades por semana, sin embargo él tiene la habilidad de cambiar su capacidad de producción según las órdenes que usted y sus competidores le realicen, a más órdenes mayor inversión en capacidad por parte del productor. El tiempo de construcción de la capacidad de su proveedor es de **tres semanas**. En caso de que su proveedor no tenga capacidad suficiente para satisfacer sus necesidades, este va a empezar a tener retrasos

en las entregas de los pedidos (mayores a 10 semanas) y por lo tanto usted también les incumplirá a sus clientes.

Se incurre en costos cada semana por dos componentes:

1. Costos por ordenar (CO)

Es el costo en el que usted incurre por ordenar cada semana

$$CO = \frac{1 * (Decisión\ de\ pedidos)^2}{1000}$$

2. Costos por déficit o inventario (CD)

Es el costo en el que usted incurre por no abastecer su demanda o por tener unidades de producto en su inventario

$$CD = \frac{2 * (Déficit)^2}{1000}$$

De ésta manera, el costo total acumulado (CTA) es la suma de los costos en toda la simulación, así:

$$CTA = \sum_{t=1}^T (CO_t + CD_t)$$

Inicialmente usted ordena 20 unidades por semana, lo cual le permite a su proveedor conservar un tiempo de entrega objetivo de 10 semanas como condición inicial. Recientemente, aplicaciones novedosas del producto crearon un aumento en su demanda. El incremento en la demanda será permanente y del orden de 4 unidades por semana. Dado que usted no estaba atento a estas nuevas aplicaciones, el aumento en la demanda lo tomó por sorpresa y se da cuenta que su déficit está aumentando, y por lo tanto perdiendo clientes y prestigio.

Usted iniciará por 3 semanas decidiendo 20 unidades como periodo de aprendizaje. Después su tarea es manejar la compañía durante la simulación,

decidiendo cuánto ordenar a su proveedor mientras **minimiza** el costo total acumulado *CTA*.

Pago: El pago será en efectivo al final del experimento. Corresponde a una suma variable entre \$0 y \$30.000 en función del costo total acumulado *CTA*, es decir, a menor costo total acumulado *CTA* mayor pago.

TENGA CUIDADO DE NO PRESIONAR “aceptar las decisiones” a menos que realmente lo desee. Después de haber pulsado “aceptar decisiones”, su decisión para esa semana en particular ya no puede ser cambiada.

NOTA: por favor no divulgar información del experimento con sus compañeros para no perder la validez científica del mismo.

GLOSARIO

ACERCA DE LOS RESULTADOS QUE SE OBSERVAN EN REPORTE

Información de la semana: da información sobre el sistema mayorista (usted)

1. Pedidos pendientes: son los pedidos que ya se han realizado en periodos anteriores a su proveedor.
2. Son las órdenes que usted recibe de sus clientes finales. Esta es la demanda que se debe cubrir cada periodo.
3. Despachos de la semana pasada: son las unidades del producto que usted recibió la semana pasada por parte de su proveedor.
4. Capacidad de proveedor: Indica la capacidad de producción del proveedor en el periodo simulado.
5. Costo por ordenar: Coeficiente en el que incurre por hacer el pedido. \$1
6. Costo por déficit: Coeficiente en el que incurre por déficit o inventario. \$2

Su desempeño: Da información sobre los costos en los que usted incurre a medida que toma decisiones

7. Costos por ordenar de la semana pasada, costos por déficit en la semana pasada: Son los costos en los que usted incurrió en la decisión tomada en el tiempo $t-1$

8. Déficit de abastecimiento: En caso de ser negativo son las unidades de producto que usted no entrega a su cliente, en caso de ser positivo son productos que tiene en inventario.
9. Costos de la semana: costos totales en los que usted incurre en la semana simulada
10. Costos acumulados: costos totales acumulados en todo el periodo simulado (50 semanas)

B. Anexo: Interfaz del experimento piloto

Información de la semana	
Pedidos pendientes (Unidades)	380,0
Demanda (Unidades)	20,0
Despachos semana pasada (Unidades)	20,0
Capacidad proveedor (Unidades)	100,0
Costo por ordenar (\$/Unid)	1,0
Costo por déficit (\$/Unid)	2,0

Decisión	
Pedido (Unidades/Semana)	<input type="text" value="0,0"/>
Período	1

Su desempeño	
Costos por ordenar de la semana pasada (\$)	0,0
Déficit de abastecimiento (Unidades)	0,0
Costos por déficit de la semana pasada (\$)	0,0
Costos de la semana (\$)	0,0
Costos acumulados (\$)	40,0

Game Control -- Player 1	
<input type="button" value="Tip Decisions"/>	
<input type="button" value="Revert to Game"/>	
<input type="button" value="Accept Decisions"/>	

Bibliografía

- Albino, V., Carbonara, N., & Giannoccaro, I. (2003). Coordination mechanism based on cooperation and competition within Industrial Districts: An agent-based computational approach. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 6(4). Retrieved from <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/6/4/3.html>
- Albino, V., Carbonara, N., & Giannoccaro, I. (2006). Innovation in industrial districts: An agent-based simulation model. *International Journal of Production Economics*, 104(1), 30–45. <http://doi.org/10.1016/j.ijpe.2004.12.023>
- Aldeman, D. (2001, May 9). First Loss Sets Gloomy Tone at CISCO. *Wall Street Journal*, p. B1.
- Anderson, E. G., Fine, C. H., & Parker, G. G. (2000). Upstream Volatility in the Supply Chain: the Machine Tool Industry As a Case Study. *Production and Operations Management*, 9(3), 239–261. <http://doi.org/10.1111/j.1937-5956.2000.tb00136.x>
- Aracil, J. (1995). *Dinámica de sistemas* (Primera). Madrid.
- Arango, S. (2006). *Essays on commodity cycles based on expanded Cobweb experiments of electricity markets*. The University of Bergen.
- Arango, S., Castañeda, A., & Olaya, Y. (2012). Laboratory experiments in the system dynamics field. *System Dynamics Review*, 28(1), 94–106. <http://doi.org/10.1002/sdr>
- Arango, S., & Moxnes, E. (2007). Cyclical Behaviour in Electricity markets: An Experimental study. In *International System Dynamics Conference*,. MIT, Boston, USA.
- Arango, S., & Moxnes, E. (2008). Experimentos de Laboratorio en Dinámica de Sistemas.

En I. Dyner Y L. Rodríguez (Eds.), Dinámica de Sistemas: Casos Y Aplicaciones En Latinoamérica, 100–124.

Armony, M., & Plambeck, E. L. (2005). The Impact of Duplicate Orders on Demand Estimation and Capacity Investment. *Management Science*, 51(10), 1505–1518. <http://doi.org/10.1287/mnsc.1050.0371>

Baganha, M. P., & Cohen, M. A. (1998). The Stabilizing Effect of Inventory in Supply Chains. *Operations Research*, 46(3), S72–S83.

Bagnall, A., & Smith, G. D. (2005). A multiagent model of the UK market in electricity generation. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 9(5), 522–536. <http://doi.org/10.1109/TEVC.2005.850264>

Barlas, Y. (1996). Formal aspects of model validity and validation in system dynamics. *System Dynamics Review*, 12(3), 183–210. [http://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1727\(199623\)12:3<183::AID-SDR103>3.0.CO;2-4](http://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1727(199623)12:3<183::AID-SDR103>3.0.CO;2-4)

Barreteau, O. (2003). Our Companion Modelling Approach. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 6(1), 1–6. Retrieved from <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/6/2/1.html>

Barreteau, O., Bousquet, F., & Attonaty, J. M. (2001). Role playing game for opening the black box of multi-agent systems: method and lessons of its application to Senegal River Valley irrigated systems. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 4(2), 12. Retrieved from <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/4/2/5.html>

Barreteau, O., Bousquet, F., Étienne, M., Souchère, V., & D'Aquino, P. (2013). Chapter 2: Companion Modelling: A Method of Adaptive and Participatory Research Olivier. In *Companion Modelling: A Method of Adaptive and Participatory Research* (pp. 233–262). <http://doi.org/10.1007/978-94-017-8557-0>

Bhattacharya, R., & Bandyopadhyay, S. (2011). A review of the causes of bullwhip effect in a supply chain. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 54(9–12), 1245–1261. <http://doi.org/10.1007/s00170-010-2987-6>

- Bishop, W. S., Graham, J. L., & Jones, M. H. (1984). Volatility of Derived Demand in Industrial Markets and Its Management Implications. *Journal of Marketing*, 48(4), 95–103. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/1251514> Accessed:
- Boero, R., Castellani, M., & Squazzoni, F. (2004). Micro behavioural attitudes and macro technological adaptation in industrial districts: An agent-based prototype. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 7(2), 1–20. Retrieved from <http://jasss.surrey.ac.uk/7/2/1.html>
- Borrelli, F., Ponsiglione, C., Iandoli, L., & Zollo, G. (2005). Inter-Organizational Learning and Collective Memory in Small Firms Clusters : an Agent-Based Approach. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 8(3), 1–15.
- Buchmeister, B., Pavlinjek, J., Palcic, I., & Polajnar, a. (2008). Bullwhip effect problem in supply chains. *Advances in Production Engineering and Management*, 3(1), 45–55.
- Bunn, D. W., & Oliveira, F. S. (2003). Evaluating individual market power in electricity markets via Agent-Based simulation. *Annals of Operations Research*, 121(1), 57–77. <http://doi.org/10.1023/A:1023399017816>
- Cachon, G. P. (1999). Managing supply-chain demand variability with scheduled ordering policies. *Management Science*, 45(6), 843–856. <http://doi.org/doi:10.1287/mnsc.45.6.843>
- Cachon, G. P., & Lariviere, M. (1999). Capacity allocation using past sales: When to turn-and-earn. *Management Science*, 45(5), 685–703.
- Cachon, G. P., Randall, T., & Schmidt, G. M. (2007). In Search of the Bullwhip Effect. *Manufacturing & Service Operations Management*, 9(4), 457–479. <http://doi.org/10.1287/msom.1060.0149>
- Cannella, S., Ciancimino, E., Framinan, J., & Disney, S. (2010). Los cuatro arquetipos de cadenas de suministro. *Universia Business Review*.
- Carlsson, C., & Fuller, R. (2001). Reducing the bullwhip effect by means of intelligent, soft computing methods. *Proceedings of the 34th Annual Hawaii International*

-
- Conference on System Sciences*, 10. <http://doi.org/10.1109/HICSS.2001.926321>
- Cassar, A., & Friendman, D. (2004). *Economics Lab: An Intensive Course in Experimental Economics*. Routledge Advances in Experimental and Computable Economics.
- Chatfield, D. C., Harrison, T. P., & Hayya, J. C. (2006). SISCO : An object-oriented supply chain simulation system. *Decision Support Systems*, 42, 422–434. <http://doi.org/10.1016/j.dss.2005.02.002>
- Chatfield, D. C., Kim, J. G., Harrison, T. P., & Hayya, J. C. (2004). The Bullwhip Effect- Impact of Stochastic Lead Time, Information Quality, and Information Sharing: A Simulation Study. *Production and Operations Management*, 13(4), 340–353. <http://doi.org/10.1111/j.1937-5956.2004.tb00222.x>
- Croson, R., & Donohue, K. (2002). Experimental Economics and Supply-Chain Management. *Interfaces*, 32(5), 74–82. <http://doi.org/10.1287/inte.32.5.74.37>
- Croson, R., & Donohue, K. (2003). Impact of POS data sharing on supply chain management: An experimental study. *Production and Operations Management*. Retrieved from <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1937-5956.2003.tb00194.x/abstract>
- Croson, R., & Donohue, K. (2005). Upstream versus downstream information and its impact on the bullwhip effect. *System Dynamics Review*, 21(3), 249–260. <http://doi.org/10.1002/sdr.320>
- Croson, R., & Donohue, K. (2006). Behavioral Causes of the Bullwhip Effect and the Observed Value of Inventory Information. *Management Science*, 52(3), 323–336. <http://doi.org/10.1287/mnsc.1050.0436>
- Croson, R., Donohue, K., Katok, E., & Sterman, J. (2014). Order stability in supply chains: Coordination risk and the role of coordination stock. *Production and Operations Management*, 23(2), 176–196. <http://doi.org/10.1111/j.1937-5956.2012.01422.x>
- D'Aquino, P., Le Page, C., Bousquet, F., & Bah, A. (2003). Using Self - Designed Role -

- Playing Games and a Multi - Agent System to Empower a Local Decision - Making Process for Land Use Management: The SelfCormas Experiment in Senegal. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 6(3), 1–14. Retrieved from <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/6/3/5.html>
- Deffuant, G. (2006). Comparing extremism propagation patterns in continuous opinion models. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation Vol.*, 9(3), 29–52. <http://doi.org/Article>
- Deffuant, G., Amblard, F., Weisbuch, G., & Faure, T. (2002). How can extremism prevail? A study based on the relative agreement interaction model. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 5(4). Retrieved from <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/5/4/1.html>
- Delgado, C. A., van Ackere, A., Larsen, E. R., & Arango, S. (2017). Managing capacity at a service facility: An experimental approach. *European Journal of Operational Research*, 259(1), 216–228. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2016.09.056>
- Diehl, E., & Sterman, J. (1995). Effects of feedback complexity on dynamic decision making. *Organizational Behavior and Human Decision ...*, 62(2), 19dd8-215. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0749597885710436>
- Doole, K. J., Yan, T., Mohan, S., & Golapalakrishnan, M. (2010). Inventory Management and the Bullwhip Effect During the 2007-2009 Recession: Evidence From the Manufacturing Sector*. *Journal of Supply Chain Management*, 46(1), 12–18. <http://doi.org/10.1111/j.1745-493X.2009.03183.x>
- Duan, Y., Yao, Y., & Huo, J. (2015). Bullwhip effect under substitute products. *Journal of Operations Management*, 36, 75–89. <http://doi.org/10.1016/j.jom.2015.03.002>
- Dyner, I., Peña, G., & Arango, S. (2008). *Modelamiento para la simulación de sistemas socio-económicos y naturales*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Esmaeili Aliabadi, D., Kaya, M., & Sahin, G. (2017). Competition, risk and learning in

-
- electricity markets: An agent-based simulation study. *Applied Energy*, 195, 1000–1011. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.121>
- Fisher, M. (1997). What Is the Right Supply Chain for Your Products.Pdf. *Harvard Business Review*, mar-abr, 105–116.
- Foremsky, T. (1999, November 18). Intel struggles to meet strong demand for chips. *Financial Times*, p. 42. Londres.
- Forrester, J. W. (1958). Industrial Dynamics – A Major Breakthrough for Decision Makers. *Harvard Business Review*, 36(4), 37–66.
- Fox, M. S., Chionglo, J. F., & Barbuceanu, M. (1993). The Integrated Supply Chain Management System. *Department of Industrial Engineering (University of Toronto), Internal r*, 1–12.
- Friendman, D., & Sunder, S. (1994). *Experimental Methods: A primer for Economists*. Cambridge University Press.
- Gaither, C. (2001, January 17). Intel Beats Forecast; Warns of Revenue Shortfall. *The New York Times*, p. T1. New York.
- Garayalde, I., & Rodriguez, L. (1985). PERSPECTIVAS DEL MERCADO DE TRABAJO EN LA C.A.P.V.: APLICACIÓN DE UN MODELO DE SIMULACIÓN AD HOC. *Ekonomiaz: Revista Vasca de Economía*, 1, 169–194.
- Gigola, C. (2001). Bullwhip Effect . Los efectos de una mala sincronización de la Cadena de Suministro. *Escuela de Negocios. Instituto Tecnológico Autónomo de Mexico*, 5(ITAM).
- Gilbert, N. (2008). Agent-based models. *Quantitative Applications in the Social Sciences*, 153, 112.
- Gonçalves, P. (2002). Why do shortages inflate to huge bubbles. In *Proceedings of the 2002 International System Dynamics Conference*. Albany, NY: System Dynamics

- Society.
- Gonçalves, P. (2003). *Demand bubbles and phantom orders in supply chains*. Massachusetts Institute of Technology. Retrieved from <http://moya.bus.miami.edu/~pgoncalves/PhD Thesis Goncalves.PDF>
- Gonçalves, P., & Arango, S. (2010). Supplier Capacity Decisions Under Retailer Competition and Delays : Theoretical and Experimental Results Supplier Capacity Decisions Under Retailer Competition and Delays : Theoretical and Experimental Results. *Proceedings of the 28th International Conference of the System Dynamics Society*, 1–28.
- Grimm, V., Berger, U., Bastiansen, F., Eliassen, S., Ginot, V., Giske, J., ... DeAngelis, D. L. (2006). A standard protocol for describing individual-based and agent-based models. *Ecological Modelling*, 198(1–2), 115–126. <http://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.04.023>
- Grimm, V., Berger, U., DeAngelis, D. L., Polhill, J. G., Giske, J., & Railsback, S. F. (2010). The ODD protocol: A review and first update. *Ecological Modelling*, 221(23), 2760–2768. <http://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.08.019>
- Gupta, S., Steckel, J., & Banerji, A. (2001). Dynamic decision making in marketing channels: An experimental study of cycle time, shared information and customer demand patterns. In *Experimental Business Research*. (p. 32). Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Haghnevis, M., Shinde, A., & Askin, R. G. (2011). An integrated optimization and agent-based framework for the U.S. power system. *Procedia Computer Science*, 6, 451–456. <http://doi.org/10.1016/j.procs.2011.08.084>
- Hegselmann, R., & Krause, U. (2002). Opinion dynamics and bounded confidence: Models, analysis and simulation. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 5(3). <http://doi.org/citeulike-article-id:613092>
- Hwarng, H. B., & Xie, N. (2008). Understanding supply chain dynamics: A chaos

-
- perspective. *European Journal of Operational Research*, 184(3), 1163–1178.
<http://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.12.014>
- Izquierdo, S. S., & Izquierdo, L. R. (2007). The impact of quality uncertainty without asymmetric information on market efficiency. *Journal of Business Research*, 60(8), 858–867. <http://doi.org/10.1016/j.jbusres.2007.02.010>
- Janssen, M., & Jager, W. (1999). An integrated approach to simulating behavioural processes: A case study of the lockin of consumption patterns. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 2(2), 21.
- Kaminsky, P., & Simchi-Levi, D. (1998). A new computerized beer game: A tool for teaching the value of integrated supply chain management. *Global Supply Chain and Technology Management. POMS Series in Technology and Operations Management*, 1, 216–225. Retrieved from http://www.ieor.berkeley.edu/~kaminsky/Reprints/PK_DSL_98b.pdf
- Katok, E. (2011). Laboratory Experiments in Operations Management. *Tutorials in Operations Researchals in Operations Research*, 1–21.
<http://doi.org/10.1287/educ.1053.0000>
- Kimbrough, S. O., Wu, D. J., & Zhong, F. (2002). Computers play the beer game : can artificial agents manage supply chains ? *Decision Support Systems*, 33, 323–333.
- Klug, F. (2013). The internal bullwhip effect in car manufacturing. *International Journal of Production Research*, 51(1).
- Koesrindartoto, D., Sun, J., & Tesfatsion, L. (2005). An Agent-Based Computational Laboratory for Testing the Economic Reliability of Wholesale Power Market Designs. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 3, 2818–2823.
<http://doi.org/10.1109/PES.2005.1489273>
- Lai, R. (2005). Bullwhip in a Spanish Shop. *Munich Personal RePEc Archive*. Retrieved from <http://mpa.ub.uni-muenchen.de/4758/>

- Lee, H. L., Padmanabhan, V., & Whang, S. (1997a). Information Distortion in a Supply Chain: The Bullwhip Effect. *Management Science*, 43(4), 546–558. <http://doi.org/10.1287/mnsc.43.4.546>
- Lee, H. L., Padmanabhan, V., & Whang, S. (1997b). The Bullwhip Effect In Supply Chains. *Sloan Management Review*, 38(3), 93–102.
- Liang, W.-Y., & Huang, C.-C. (2006). Agent-based demand forecast in multi-echelon supply chain. *Decision Support Systems*, 42, 390–407. <http://doi.org/10.1016/j.dss.2005.01.009>
- Lorenz, J. (2006). Consensus strikes back in the Hegselmann-Krause model of continuous opinion dynamics under bounded confidence. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 9(1), 105–120. <http://doi.org/10.1142/S0129183107011789>
- Mason-Jones, R., & Towill, D. R. (1999). Using the Information Decoupling Point to Improve Supply Chain Performance. *The International Journal of Logistics Management*, 10(2), 13–26. Retrieved from doi: 10.1108/09574099910805969
- Mckeown, G., & Sheehy, N. (2006). Mass media and polarisation processes in the bounded confidence model of opinion dynamics. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 9(1), 33–63. <http://doi.org/Article>
- Miragliotta, G. (2006). Layers and mechanisms: A new taxonomy for the Bullwhip Effect. *International Journal of Production Economics*, 104(2), 365–381. <http://doi.org/10.1016/j.ijpe.2005.10.001>
- Mitchell, T. W. (1924). Competitive Illusion as a Cause of Business Cycles. *The Quarterly Journal of Economics*, 38(4), 631–652.
- Nienhaus, J., Ziegenbein, A., & Duijts, C. (2006). How human behaviour amplifies the bullwhip effect - a study based on the beer distribution game online. *Production Planning & Control*, 17(6), 547–557. <http://doi.org/10.1080/09537280600866587>
- Oliva, R., & Gonçalves, P. (2005). Behavioral Causes of the Bullwhip Effect: “Satisficing”

Policies with Limited Information Cues. *Proceedings of the 23rd International Conference of the System Dynamics Society*, (118–119).

Ponte, B., Sierra, E., de la Fuente, D., & Lozano, J. (2017). Exploring the interaction of inventory policies across the supply chain: An agent-based approach. *Computers and Operations Research*, 78(September 2016), 335–348. <http://doi.org/10.1016/j.cor.2016.09.020>

Ringler, P., Keles, D., & Fichtner, W. (2016). Agent-based modelling and simulation of smart electricity grids and markets - A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 205–215. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.169>

Rúa, G. (2008). *Modelación de una cadena de suministro considerando múltiples objetivos y múltiples parámetros bajo incertidumbre*. Universidad Nacional de Colombia.

Schelling, T. C. (1971). Dynamic Models of Segregation. *Journal of Mathematical Sociology*, 1, 143–186. <http://doi.org/10.1080/0022250X.1971.9989794>

Schelling, T. C. (1978). *Micromotives and macrobehavior*. New York: W. W. Norton. <http://doi.org/10.2307/2989930>

Shan, J., Yang, S., Yang, S., & Zhang, J. (2014). An empirical study of the bullwhip effect in China. *Production and Operations Management*, 23(4), 537–551. <http://doi.org/10.1111/poms.12034>

Smith, V. (1982). Microeconomic systems as an experimental science. *The American Economic Review*, 72(5), 923–955. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/10.2307/1812014>

Smith, V. (2002). Method in experiment: Rhetoric and reality. *Experimental Economics*, 5(2), 91–110. Retrieved from <http://www.springerlink.com/index/qq482rrh400t7215.pdf>

Sogomonian, A. G., & Tang, C. S. (1993). A modeling framework for coordinating

- promotion and production decisions within a firm. *Management Science*, 39(2), 191–203. <http://doi.org/doi:10.1287/mnsc.39.2.191>
- Squazzoni, F., & Boero, R. (2002). Economic performance, inter-firm relations and local institutional engineering in a computational prototype of industrial districts. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 5(1), 1–27.
- Stauffer, D., Sousa, A., & Schulze, C. (2004). Discretized opinion dynamics of the Deffuant model on scale-free networks. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 7(3), 15.
- Sterman, J. D. (1987). Testing behavioral simulation models by direct experiment. *Management Science*, 33, 1572–1592. Retrieved from <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cbdv.200490137/abstract>
- Sterman, J. D. (1989). Misperceptions of feedback in dynamic decision making. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 43(3), 301–335. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0749597889900411>
- Sterman, J. D. (2000). *Business Dynamics Systems Thinking and Modeling for a Complex World* (Irwin-McGr). Chicago, IL.
- Sterman, J. D. (2006). Operational and behavioral causes of supply chain instability. In O. Carranza & F. Villegas (Eds.), *The Bullwhip Effect in Supply Chains: A Review of Methods, Components and Cases*. UK: Palgrave MacMillan.
- Strader, T. J., Lin, F.-R., & Shaw, M. J. (1998). Simulation of Order Fulfillment in Divergent Assembly Supply Chains. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 1(2). Retrieved from <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/4/2/5.html>
- Terwiesch, C., Ren, Z. J., Ho, T. H., & Cohen, M. A. (2005). An Empirical Analysis of Forecast Sharing in the Semiconductor Equipment Supply Chain. *Management Science*, 51(2), 208–220. <http://doi.org/10.1287/mnsc.1040.0317>
- TheStreet. (2001, January 16). Intel to Close Puerto Rico Plant With 1 , 360 Workers. *The Street*, pp. 5–6. Retrieved from <https://www.thestreet.com/story/1258137/1/intel-to->

close-puerto-rico-plant-with-1360-workers.html

- Thurm, S. (2001, April 18). Missed Signals : Behind Cisco's Woes Are Some Wounds Of Its Own Making User Response. *The Wall Street Journal*.
- Villa, S. (2011). *Efecto de las Decisiones de Pedidos de Clientes Mayoristas en Cadenas de Abastecimiento: Un análisis experimental . Tesis de Maestría. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia*.
- Villa, S., Gonçalves, P., & Arango, S. (2015). Exploring retailers' ordering decisions under delays. *System Dynamics Review*, 31(1–2), 1–27. <http://doi.org/10.1002/sdr>
- Wang, X., & Disney, S. M. (2016). The bullwhip effect: Progress, trends and directions. *European Journal of Operational Research*, 250(3), 691–701. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.07.022>
- Wu, D. Y., & Katok, E. (2006). Learning, communication, and the bullwhip effect. *Journal of Operations Management*, 24(6), 839–850. <http://doi.org/10.1016/j.jom.2005.08.006>
- Wu, S., Gan, W., & Wei, F. (2011). Analysis of bullwhip effect based on ABMS. *Procedia Engineering*, 15, 4276–4281. <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.08.802>
- Zhou, Z., Chan, W. K., & Chow, J. H. (2007). Agent-based simulation of electricity markets: A survey of tools. *Artificial Intelligence Review*, 28(4), 305–342. <http://doi.org/10.1007/s10462-009-9105-x>
- Zotteri, G. (2013). An empirical investigation on causes and effects of the Bullwhip-effect: Evidence from the personal care sector. *International Journal of Production Economics*, 143(2), 489–498. <http://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.06.006>