

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN  
MATERIALES**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**ANÁLISIS DINÁMICO DEL IMPACTO DE LA PROPAGACIÓN  
DE EVENTOS DISRUPTIVOS EN CADENAS DE SUMINISTRO DE  
EXPORTACIÓN**

**POR**

**MC. ALFREDO BUENO SOLANO**

**TESIS**

**DOCTORADO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA CON ESPECIALIDAD EN  
INGENIERÍA INDUSTRIAL Y DE MANUFACTURA  
SALTILLO, COAHUILA**

**ANÁLISIS DINÁMICO DEL IMPACTO DE LA PROPAGACIÓN  
DE EVENTOS DISRUPTIVOS EN CADENAS DE SUMINISTRO DE  
EXPORTACIÓN**

*Por*

*MC. ALFREDO BUENO SOLANO*

*Tesis*

*Presentada al Posgrado Interinstitucional en Ciencia y Tecnología*

*Sede*

*Corporación Mexicana de Investigación en Materiales*

*Como requisito parcial para obtener el Grado Académico de*

*Doctorado en Ciencia y Tecnología*

*Especialidad en Ingeniería Industrial y de Manufactura*

*Posgrado Interinstitucional en Ciencia y Tecnología COMIMSA/CONACYT*

*Saltillo, Coahuila a octubre de 2013*

**Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, S.A de C.V**

**Gerencia de Desarrollo Humano**

**División de Estudios de Posgrado**

Los abajo firmantes, miembros del Comité Tutorial recomendamos que la Tesis “ANÁLISIS DINÁMICO DEL IMPACTO DE LA PROPAGACIÓN DE EVENTOS DISRUPTIVOS DE SEGURIDAD EN CADENAS DE SUMINISTRO DE EXPORTACIÓN”, realizada por el alumno **ALFERDO BUENO SOLANO** matrícula **1006IM3063** sea aceptada para su defensa como Doctor en Ciencia y Tecnología con Especialidad en Ingeniería Industrial y de Manufactura.

El Comité Tutorial

---

**Dr. Miguel Gastón Cedillo Campos**

Tutor Académico

Director de Tesis

---

**Dr. Carlos Martner Peyrelongue**

Tutor en Planta

---

**Dra. Rosa Guadalupe González Ramírez**

Co-Tutor

---

**Dr. David Salvador González**

**González**

Asesor

---

Vo. Bo

**Dr. Felipe Arturo Reyes Valdés**

Coordinación General de Estudios de

Posgrado

COMIMSA

**Corporación Mexicana de Investigación en Materiales**

**Gerencia de Desarrollo Humano**

**División de Estudios de Posgrado**

Los abajo firmantes, miembros del Jurado del Examen de Grado del alumno **ALFERDO BUENO SOLANO**, una vez leída y revisada la tesis titulada “**ANÁLISIS DINÁMICO DEL IMPACTO DE LA PROPAGACIÓN DE EVENTOS DISRUPTIVOS EN CADENAS DE SUMINISTRO DE EXPORTACIÓN**”, aceptamos que la referida tesis revisada y corregida sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Doctor en Ciencia y Tecnología con Especialidad en Ingeniería Industrial y de Manufactura durante el Examen de Grado correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente a los 28 del mes de octubre del año 2013.

---

**Dr. José Elías Jiménez Sánchez**

Presidente

---

**Dr. Pedro Pérez Villanueva**

Secretario

---

**Dr. Felipe Arturo Reyes Valdés**

Vocal

---

**Dr. Elías Gabriel Carrum Siller**

Vocal

---

**Dr. Miguel Gastón Cedillo Campos**

Vocal

## **AGRADECIMIENTOS**

Ser agradecido es un valor que nos permite recordar que nuestro progreso es resultado del esfuerzo y sacrificio de muchas personas. Sin embargo en ocasiones no nos detenemos a reflexionar lo importantes que son para nosotros y que es gracias a su ejemplo y enseñanza que hemos podido avanzar en todos los ámbitos y roles de la vida.

En este sentido, hoy que término esta etapa de formación, quiero dedicar este espacio para agradecer a aquellas personas que han contribuido a mi desarrollo, así como también, agradecer a Dios quien me ha brindado vida y salud. Así mismo le agradezco por haberme permitido crecer en el seno de una familia amorosa y unida.

Primeramente me gustaría, agradecer a mis padres Alfredo Bueno González y María Asunción Solano Zayas quienes fueron mis primeros amigos y maestros. Ha sido gracias a su amor de padres, su determinación y su ejemplo de perseverancia, trabajo honesto, respeto y tolerancia que aprendí a ser independiente y consiente de mi entorno, además de ser empático con los problemas de los demás y principalmente a no renunciar ante la adversidad y seguir adelante en la búsqueda de mi destino. Gracias.

También, quiero aprovechar este espacio para agradecer especialmente a mi amiga, pareja y esposa, Idalia Ilayannin Salceda Flores, quien con su amor y paciencia siempre me ha apoyado e impulsado en todos los proyectos que hemos emprendido juntos y que sin duda, su apoyo fue indispensable para la terminación de esta etapa. A mi hijo Daniel Alfredo Bueno Salceda, quien es mi inspiración para esforzarme día a día a dar lo mejor de mí y que junto con su mamá son la razón de mi vida. Gracias

Así mismo quiero agradecer el cariño de mis hermanos, Carolina, Fco. Javier y Verónica Ma. Bueno Solano, con quienes he crecido entre alegrías y enseñanzas mutuas y de quienes me siento muy orgulloso por sus logros. Gracias.

Finalmente quiero agradecer a mis abuelos y tíos, quienes con sus enseñanzas siempre me ayudaron a seguir adelante. A mis primos, suegros, cuñados y sobrinos, quienes directa e indirectamente han sido parte importante de mi formación y a quienes les agradezco su apoyo y confianza. Gracias.

Sin duda esta investigación no hubiera sido posible sin el apoyo de otras personas con las que he convivido en los últimos años y que también han sido parte importante en el desarrollo de este proyecto de vida y a quienes desde este espacio quiero aprovechar para brindarles mi gratitud.

A mi tutor académico, el Dr. Miguel Gastón Cedillo Campos, quien con su visión, sus consejos y sobretodo su confianza, me ayudó a sacar lo mejor de mí en este proyecto. Así mismo agradezco su amistad y apoyo brindados en todo este tiempo. Gracias.

A los miembros de mi comité tutorial, por sus valiosas observaciones y sus recomendaciones que contribuyeron a mejorar este proyecto de investigación. En especial al Dr. Elías Jiménez, quien promovió de manera especial el apoyo del IMT hacia la realización de esta investigación, y quien además, amablemente me recibió en una breve estancia en el instituto. Y a la Dra. Rosa González quien se involucró y promovió esta investigación de manera especial desde sus inicios. Gracias.

A mis maestros, compañeros y amigos con los que tuve la oportunidad de convivir y de quienes también aprendí muchas cosas, en especial quiero agradecerles a: José Luis de la Riva, Esmeralda Ramírez, Jorge Piña, Susana González, Evangelina Tapia, Manuel, Jesús de la Rosa, Darío, Karla Guajardo y Olga Luévano quien ya era mi compañera de profesión, pero fue gracias a esta etapa que logré conocerla y ganarme su amistad. Gracias.

También le dedico un espacio especial al apoyo de Flora Hammer, quien brindo su tiempo para ayudar con la traducción al inglés de la investigación para que pudiera ser publicada y difundida en otros idiomas. Gracias.

También quiero agradecer a todo el personal administrativo del posgrado en COMIMSA, por todo el soporte recibido durante mi formación académica. En especial a la maestra Claudia González, al Dr. Arturo Reyes, María Vega, María Eugenia Herrera, Pilar Granillo, Indira Mendoza, Paloma Mendoza y Blanca Valdés. Por su apoyo Gracias.

Finalmente, a las autoridades de la Universidad Politécnica de Gómez Palacio, y al programa de becas de posgrado de PROMEP quienes brindaron su apoyo y permitieron integrarme a un posgrado de alta calidad. Gracias.

## RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO DEL AUTOR



Alfredo Bueno Solano, nació en Ciudad Obregón Sonora, en el día 09 de enero de 1982. Es hijo de Alfredo Bueno González y de María Asunción Solano Zayas. En diciembre de 2007 se casó con Idalia Ilayannin Salceda Flores y desde noviembre de 2009 son orgullosos padres de Daniel Alfredo Bueno Salceda. Actualmente se desempeña como Profesor-Investigador en la Universidad

Politécnica de Gómez Palacio, Durango.

Se graduó con honores como Ingeniero Industrial y de Sistemas por el Instituto Tecnológico de Sonora. Obtuvo su grado de maestro en sistemas de calidad y productividad por la Universidad Virtual del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey.

El MI, Bueno, tiene una sólida formación en Ingeniería Industrial y de Sistemas. Tanto en el ámbito profesional como en el académico, ha participado en el desarrollo sistemas de calidad y productividad, aplicando herramientas de mejora continua y en la implementación de sistemas de manufactura esbelta. Ha dirigido con éxito proyectos de vinculación con el gobierno del estado de Durango y el programa de Fondos Mixtos del CONACYT, en pro del desarrollo productivo de la Región Laguna.

Es miembro fundador de la Asociación Mexicana de Logística y Cadena de Suministro, fungiendo como representante de la misma en la Región Laguna. Además ha participado con la editorial de la Universidad de Oxford en Inglaterra como revisor de capítulos de libro en el área de logística y cadena de suministros. Actualmente realiza investigación en el área de cadenas de suministros. Mostrando interés particular por el complejo dinamismo de las interrelaciones de los elementos de la cadena de suministros. La cual es estudiada con una visión sistémica y con un enfoque en procesos, característica fundamental para la evaluación del impacto de la propagación de los riesgos disruptivos de seguridad en cadenas de suministros de globales.

## **RESUMEN**

Las cadenas de suministro son sistemas dinámicos que tienen como objetivo eficientar y garantizar el flujo de recursos tanto financieros como los insumos primarios necesarios para la transformación materia prima en bienes de consumo. Contrario a lo que podría pensarse, esta no es una tarea sencilla ya que intervienen diferentes factores como son el número de participantes dentro de la cadena, la competencia y los efectos de la globalización, que implican competir en distintos mercados y distintas formas de legislar y de importación por aduanas, entre otros. Además, conforme los diferentes eslabones de la cadena de suministros crecen y se involucran en otras cadenas de suministro, la administración de los mismos se vuelve más compleja y vulnerable al riesgo. En este contexto, para el presente trabajo de investigación, se realizó una búsqueda crítica y exhaustiva del estado del arte para identificar los esfuerzos actuales por mitigar la vulnerabilidad al riesgo.

Dentro de los principales resultados se pudo identificar un creciente interés por analizar cómo la materialización del riesgo y sus posibles efectos pueden influir en el comportamiento de la cadena de suministros. El interés de la comunidad internacional se centra principalmente en el estudio de tres riesgos de seguridad específicos (desastres naturales, ataques criminales y ataques terroristas). Sin embargo, debido a que es un área relativamente inexplorada, aún no existe un consenso sobre que variables deben incluirse en el estudio del riesgo, así como tampoco es posible identificar una metodología que evalúe el impacto del riesgo de manera simultánea y dinámica en los diferentes eslabones de la cadena de suministro.

En este sentido, se presenta una propuesta para la evaluación dinámica del impacto que tiene la materialización del riesgo en el comportamiento de la cadena de suministro de exportación. Para la evaluación dinámica se utiliza la técnica de dinámica de sistemas como una herramienta; que gracias a su enfoque sistémico (holístico), permite analizar el comportamiento global de la cadena de suministro y en consecuencia, medir la propagación de los impactos. Dentro de las aportaciones que se alcanzaron con la investigación se encuentran i) Proponer un grupo de variables a considerar para realizar análisis de riesgo en



cadena de suministro, ii) presentar conclusiones sobre los efectos que tiene la materialización de los diferentes tipos de riesgo de seguridad evaluados en la cadena de suministros y finalmente iii) exponer líneas futuras de investigación enfocadas a la inclusión de nuevos subsistemas a los escenarios de evaluación.

## ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS .....	5
RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO DEL AUTOR.....	7
RESUMEN .....	8
ÍNDICE.....	10
LISTA DE TABLAS .....	14
LISTA DE FIGURAS .....	14
Capítulo 1 .....	16
Introducción.....	16
<b>1.1. Introducción</b> .....	17
<b>1.2. Planteamiento del problema</b> .....	20
<b>1.2.1. Descripción del problema y justificación</b> .....	21
<b>1.2.2. Preguntas de investigación</b> .....	23
<b>1.3. Hipótesis de investigación</b> .....	24
<b>1.4. Objetivos</b> .....	24
<b>1.4.1. Objetivos específicos</b> .....	24
<b>1.5. Aportaciones y limitaciones</b> .....	25
<b>1.6. Organización del documento</b> .....	25
Capítulo 2 .....	27
Marco teórico.....	27
<b>2.1. Introducción</b> .....	28
<b>2.2. Logística y cadena de suministros</b> .....	28
<b>2.3. Riesgo en cadenas de suministros</b> .....	31
<b>2.4. Administración de riesgo en cadena de suministro</b> .....	32

<b>2.5. Herramientas para el análisis del riesgo en la cadena de suministro .....</b>	<b>34</b>
<b>2.6. Conclusiones.....</b>	<b>35</b>
Capítulo 3 .....	36
Enfoque metodológico.....	36
<b>3.1. Introducción.....</b>	<b>37</b>
<b>3.2. Metodología de investigación.....</b>	<b>37</b>
<b>3.3. Enfoque sistémico .....</b>	<b>40</b>
<b>3.4. Metodología de Dinámica de Sistemas .....</b>	<b>40</b>
<b>3.4.1. Diagrama causal.....</b>	<b>41</b>
<b>3.4.2. Bucles de retroalimentación.....</b>	<b>42</b>
<b>3.4.3. Hipótesis dinámica.....</b>	<b>44</b>
<b>3.4.4. Diagrama de Forrester .....</b>	<b>44</b>
<b>3.4.5. Representación matemática .....</b>	<b>47</b>
<b>3.4.6. Simulación de los modelos de dinámica de sistemas.....</b>	<b>48</b>
<b>3.4.7. Validación en dinámica de sistemas.....</b>	<b>50</b>
<b>3.4.7.1. Consistencia dimensional.....</b>	<b>51</b>
<b>3.4.7.2. Condiciones extremas .....</b>	<b>51</b>
<b>3.4.7.3. Reproducción de conducta .....</b>	<b>52</b>
<b>3.4.7.4. Comportamiento sorpresivo.....</b>	<b>52</b>
<b>3.4.7.5. Análisis de sensibilidad .....</b>	<b>52</b>
<b>3.4.8. Análisis de escenarios .....</b>	<b>53</b>
<b>3.4.8.1. Escenarios de interés.....</b>	<b>54</b>
<b>3.5. Conclusiones.....</b>	<b>55</b>
Capítulo 4 .....	56
Análisis y discusión de resultados .....	56

<b>4.1. Introducción.....</b>	<b>57</b>
<b>4.2 Mapeo de la cadena de suministro .....</b>	<b>57</b>
<b>4.2.3 Hipótesis dinámica.....</b>	<b>60</b>
<b>4.2.4 Ecuaciones del modelo. ....</b>	<b>62</b>
<b>4.3 Pruebas iniciales y validación del modelo .....</b>	<b>65</b>
<b>Tabla 4. 1. Parámetros iniciales para la simulación del modelo de la compañía ABC .....</b>	<b>68</b>
<b>4.3.1 Validación del modelo .....</b>	<b>70</b>
<b>4.3.2 Verificación de consistencia dimensional .....</b>	<b>70</b>
<b>4.3.3 Pruebas extremas y conductas sorprendidas .....</b>	<b>73</b>
<b>4.4 Modelación del Impacto de eventos disruptivos en el desempeño de la cadena de suministros de exportación en escenarios de interés. (Caso empresa ABC) .....</b>	<b>76</b>
<b>4.4.1 Escenario 1. Disrupción por actos terroristas.....</b>	<b>77</b>
<b>4.4.2 Escenario2. Disrupción por desastres naturales.....</b>	<b>82</b>
<b>4.4.3 Escenario 3. Disrupción por actos criminales .....</b>	<b>87</b>
<b>4.5 Conclusiones .....</b>	<b>92</b>
<b>Capítulo 5. ....</b>	<b>94</b>
<b>Conclusiones.....</b>	<b>94</b>
<b>5.1. Introducción.....</b>	<b>95</b>
<b>5.2. Contribuciones .....</b>	<b>99</b>
<b>5.3. Limitaciones .....</b>	<b>101</b>
<b>5.4. Líneas futuras .....</b>	<b>101</b>
<b>5.4.1. Integración de nuevos subsistemas .....</b>	<b>101</b>
<b>5.4.2. Aplicaciones en otras áreas de seguridad en cadena de suministros .....</b>	<b>102</b>
<b>5.4.3. Desarrollo de otros enfoques de validación al sistema. ....</b>	<b>102</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>104</b>

ANEXO 1 .....	110
ANEXO 2 .....	111

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 4. 1. Parámetros iniciales para la simulación del modelo de la compañía ABC.</b>	68
<b>Tabla 4. 2.</b> Consistencia dimensional para variables de estado.....	71
<b>Tabla 4. 3.</b> Consistencia dimensional para variables de flujo .....	71
<b>Tabla 4. 4.</b> Consistencia dimensional para variables auxiliares .....	72
<b>Tabla 4. 5</b> Parámetros iniciales del modelo para escenario 3.....	90

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2. 2.</b> Factores de vulnerabilidad. ....	31
<b>Figura 3. 1</b> Metodología propuesta de investigación (Elaboración propia). ....	39
<b>Figura 3. 2.</b> Polaridad de las relaciones causales. ....	42
<b>Figura 3. 3</b> Causalidad lineal tradicional vs Causalidad circular (adaptación, Franco y Echeverri, 2010) .....	42
<b>Figura 3. 4.</b> Polaridad de ciclos o bucles de retroalimentación. ....	43
<b>Figura 3. 5.</b> Simbología general de dinámica de sistemas.....	45
<b>Figura 3. 6.</b> Simbología de dinámica de sistemas en Stella 9.1.3.....	45
<b>Figura 3. 7.</b> Representación gráfica del modelo hidrodinámico.....	46
<b>Figura 3. 8.</b> Algoritmo 1 de la acumulación del nivel de la Figura 3. 7.....	48
<b>Figura 3. 9.</b> Estructura del algoritmo básico del motor iterativo de simulación en DS.....	49
<b>Figura 3. 10.</b> Instante de tiempo durante simulación (adaptación, Iñaki, 2010). ....	49
<b>Figura 3. 11.</b> Algoritmo básico del motor de simulación de Dinámica de sistemas (Iñaki, 2010).....	50
<b>Figura 4. 1.</b> Flujo de bienes e información a través de la frontera (Cedillo et al., 2012)....	58
<b>Figura 4. 2.</b> Diagrama causal de las relaciones de interacción entre el Manufacturero, Buffer, proveedor de componentes y proveedor de materia prima. ....	60
<b>Figura 4. 3.</b> Comportamiento del tiempo de cruce de frontera (para conservar la consistencia de unidades de la información se presenta en días). ....	67

<b>Figura 4. 4.</b> Comportamiento de la demanda del manufacturero. ....	69
<b>Figura 4. 5.</b> Comportamiento base de CS sin interrupción. ....	69
<b>Figura 4. 6.</b> Condición base del sistema sin demanda. ....	73
<b>Figura 4. 7.</b> Interrupción total de la cadena de suministro sin demanda. ....	74
<b>Figura 4. 8</b> Interrupción total de la cadena de suministro con demanda. ....	75
<b>Figura 4. 9</b> Interrupción total con demanda del cliente y sin soporte.....	76
<b>Figura 4. 10.</b> Nivel de inventario en Buffer vs bienes al cliente durante un periodo disruptivo de tres días. ....	79
<b>Figura 4. 11.</b> Interrupción de 8 días en Frontera internacional. ....	80
<b>Figura 4. 12.</b> Buffer IL vs GSC bajo 10 días de interrupción en frontera.....	81
<b>Figura 4. 13</b> Costo total de CS en escenario 1.....	82
<b>Figura 4. 14.</b> Nivel de inventario vs bienes enviados al cliente con 5 días de interrupción en buffer. ....	84
<b>Figura 4. 15.</b> Nivel de inventario vs bienes enviados al cliente con 8 días de interrupción en buffer. ....	85
<b>Figura 4. 16.</b> Nivel de inventario vs bienes enviados al cliente con 10 días de interrupción en buffer. ....	86
<b>Figura 4. 17.</b> Costo total de la CS (considerando 5 días de Safety stock, 6, 8 y 10 días de interrupción representan 1, 3 y 5 días fuera de la cobertura). ....	86
<b>Figura 4. 18.</b> Escenario A comportamiento de inventario con Buffer durante actos criminales. ....	91
<b>Figura 4. 19.</b> Escenario B comportamiento de inventario con Buffer durante actos criminales. ....	91

# Capítulo 1

## Introducción

Este capítulo presenta el contexto general de los esfuerzos por administrar el riesgo en la cadena de suministros. Actualmente, el análisis del riesgo es considerado por diversas instituciones gubernamentales y privadas como un factor crítico para el éxito del comercio internacional. En el desarrollo del capítulo se expone la problemática general a la que se enfrentan los investigadores de la cadena de suministro en materia de riesgo. También, se presentan el planteamiento del problema, preguntas de investigación, objetivos, justificación, y además, se exponen las principales limitantes para el desarrollo de la investigación. Finalmente se utiliza un esquema que permite visualizar de manera gráfica la estructura del documento.



## **1.1. Introducción**

El comercio ha sido, es y será uno de los motores del desarrollo de la humanidad. En el pasado, las metrópolis se consolidaron en torno a la creación de grandes centros de mercadeo que les permitieron concentrar una gran diversidad de bienes y servicios para su comercialización. Esta concentración de bienes y servicios trajo consigo distintos retos tanto en el área de almacenamiento que agrega valor de lugar, como en el área de aprovisionamiento, que agrega valor de tiempo, (Ballou, 2004)

Distintos factores como el incremento de la demanda, la caducidad y periodicidad de los bienes entre otros, motivaron e incrementaron la necesidad de desarrollar nuevas rutas o canales comerciales que garanticen el suministro de bienes desde los diferentes puntos de producción hasta el centro de demanda de forma eficiente y segura. Estos canales continúan evolucionando día con día dando paso a la formación de una gran diversidad de cadenas de suministro (CS), cuyo objetivo sigue siendo el de la transformación de los bienes en mercancías y servicios para su eventual distribución y comercialización. Sin embargo, dichas cadenas al igual que ayer, hoy, son vulnerables al riesgo.

En este contexto, la administración del riesgo en la cadena de suministros es considerado como un factor crítico para el éxito del comercio internacional. Razón por la cual, en los últimos años el tema se ha posicionado como un área de interés, tanto para el sector gubernamental como para sector privado, así como también entre investigadores y profesionistas del área.

La problemática general a la que se enfrentan los investigadores de la CS es que el riesgo puede materializarse de diversas formas y en prácticamente cualquier punto de la cadena de suministro. De hecho, los tomadores de decisiones no tienen claro qué estrategia deben seguir para administrar el riesgo (Waters, 2007). Además, esta problemática contribuye a que no exista un consenso sobre qué elementos deben considerarse en el análisis del riesgo en la cadena de suministro (Pfohl et al, 2010).

En este sentido, el presente trabajo de investigación tuvo por objetivo proponer un grupo de variables que permitieran medir el impacto de la propagación de riesgos disruptivos de seguridad en cadenas de suministros de exportación. Además, se buscó proponer un modelo capaz de analizar múltiples eventos disruptivos a través de la CS y que pudiera brindar a los tomadores de decisión una visión global de los efectos que tienen sus

decisiones en el comportamiento del sistema global. Esto con la finalidad de contribuir a disminuir la vulnerabilidad y promover el desarrollo de cadenas de suministro internacionales más robustas.

La administración de la cadena de suministro (SCM, por sus siglas en inglés), sugiere que toda cadena empieza con la necesidad del cliente y está formada por todos los procesos involucrados de manera directa o indirecta en la satisfacción de dicha necesidad (Chopra & Meindl, 2008). En general el proceso de la SCM está relacionada con un conjunto de actividades funcionales (transporte, inventarios, entre otras), mediante las cuales la materia prima se convierte en productos terminados y se añade valor para el consumidor.

El objetivo del SCM es crear valor para los clientes, proveedores y para los accionistas de la o las empresas. El valor se expresa fundamentalmente en términos de tiempo y lugar. En este sentido, los productos no tienen valor a menos de que estén en posesión de los clientes cuándo (tiempo) y dónde (lugar) ellos deseen consumirlos. Para los diferentes sectores que participan en comercio internacional, la administración de la cadena de suministro se ha vuelto un proceso cada vez más importante al momento de generar o añadir valor a sus productos y servicios (Ballou, 2004).

Sin embargo, en la última década la administración de las cadenas de suministro se han vuelto más complejas, distintos factores como el incremento en el flujo de bienes, de información, de recursos financieros y las múltiples interfaces que se han integrado a la CS como resultado de la globalización, contribuyen a elevar su vulnerabilidad al riesgo (Rong, Akhil, & Wil van der , 2007) (Pfohl et al, 2010).

Así mismo, las presiones por enfrentar a una competencia global y la necesidad de una colaboración inter-organizacional, está forzando a las compañías a llevar al límite a sus cadenas de suministro, haciéndolas flexibles y exigiendo una rápida capacidad de respuesta. Sin embargo, en este ambiente dinámico en el que las variables siempre están cambiando, las desviaciones del plan ocurren con regularidad y por lo general tienen resultados costosos para la cadena de suministros.

En consecuencia, la surge la necesidad de desarrollar cadenas de suministro robustas, capaces de manejar un gran número de eventos, tanto esperados como inesperados (disrupciones o perturbaciones). Además, cabe señalar que dicha administración debe prever que estos eventos inesperados tienden a propagarse a través de los socios en la

cadena de suministro, resultando en el bien conocido “Efecto látigo” o “Bullwhip effect” (Rong, Akhil, & Wil van der , 2007).

A nivel internacional se han desarrollado distintos estándares de seguridad orientados a disminuir los efectos de la materialización de interrupciones. Estos estándares surgen con la perspectiva de auxiliar en la mitigación del riesgo de que organizaciones terroristas exploten la vulnerabilidad de los sistemas de suministro para el movimiento de armas de destrucción masiva a puntos específicos, o incluso la destrucción los mismos sistemas de suministro. Algunos ejemplos son: ISO 28000, ISO 31000, C-TPAT, BASC, PIP, notificaciones avanzadas entre otras. Sin embargo, se ha identificado una baja adopción de dichos estándares. Según Pfohl et al, (2010), una de las principales barreras consiste básicamente en que no todos los actores de la cadena de suministros comparten el mismo tipo y nivel de percepción del riesgo.

En este contexto, la mayoría de los países desarrollados muestran preocupación por mitigar las oportunidades de que ataques terroristas se materialicen, mientras que en los mercados emergentes, la percepción del riesgo generalmente está influenciada por crímenes como: robo de mercancías, tráfico de droga, espionaje, fraudes, violaciones a la ley y la propiedad intelectual, entre otros (Cedillo et al., 2011).

Considerando estas diferencias en la percepción del riesgo, se ha establecido que los programas de seguridad en cadena de suministros (SCS) se deben desarrollar con la finalidad de prevenir, detectar o mejorar la capacidad de recuperarse no sólo del terrorismo sino también de los crímenes “tradicionales” (Hints, 2010). Además, es importante hacer conciencia que estos programas de seguridad no eliminan el riesgo o la posibilidad de que se presenten interrupciones como producto de la ocurrencia de uno o más crímenes (Stecke & Kumar, 2009).

Es debido a esta última condición en torno a los programas de SCS, que los administradores no tienen clara que postura deben tomar para administrar el riesgo en las cadenas de suministro (SCRM, por sus siglas en inglés). Si es mejor prepararse de manera anticipada ante una eventual situación de riesgo, o si deben esperar a que dicho riesgo se materialice para eventualmente actuar de manera reactiva. En 2003, Mitroff & Alpasan evidenciaron que sólo el 5% de las 500 compañías más influyentes del mercado elegían un

enfoque proactivo ante el riesgo. Sin embargo, en el 2012, Schlegel y Trent expusieron que un 25% de dichas compañías habían optado por administrar de manera proactiva el riesgo.

Esta creciente adopción de enfoque proactivo se debe a que se ha reconocido que hoy en día las CS son más vulnerables ante los riesgos, además de que existe un creciente interés tanto en el ámbito de la investigación como de la iniciativa privada, por administrar el riesgo como un factor crítico de éxito de las CS y como un requisito para enfrentar los cambios que trae consigo la globalización (Sodhi & Son, 2012). Por otro lado, también pudimos identificar con un extenso análisis bibliográfico que el 75% de las compañías más influyentes en el mercado aún no han cambiado su forma de percibir y/o enfrentar el riesgo por lo que no podrían enfrentar de manera oportuna un evento disruptivo de seguridad (Shlegel & Trent, 2012)

Knemeyer et al, (2009) sostienen que esta problemática gira en torno a que las empresas carecen de un proceso formal para estimar su vulnerabilidad ante eventos catastróficos, lo que las restringe a evaluar sólo un rango de catástrofes limitado. Asimismo, argumentan que si bien existen métodos disponibles para estimar los efectos de la ocurrencia de eventos catastróficos, exponen que dichos métodos tradicionalmente han estimado sólo el riesgo local de un solo tipo de evento catastrófico. Concluyen que en la práctica, es necesario que se pueda evaluar el riesgo de manera dinámica combinando múltiples eventos para cada etapa de la cadena de suministro. En este sentido Rong et al., (2011) argumentan que además es necesario poder evaluar el proceso de la toma de decisiones en cadenas de suministros bajo un entorno de disrupciones, con la finalidad de analizar cómo esas decisiones afectan en la propagación de variabilidad en el sistema.

## **1.2. Planteamiento del problema**

Como resultado de un análisis crítico de la bibliografía y de conocer la percepción de los tomadores de decisiones involucrados en SCM, se pudo identificar que el área de análisis y propagación de riesgos permanece relativamente inexplorada, hecho que contribuye a que no exista un consenso sobre que variables deben medirse para tener éxito en el análisis del riesgo en cadenas de suministros. Resultado de ello, se evidencia la ausencia de modelos que permitan por un lado conocer el comportamiento del sistema ante disrupciones y por otro, medir el impacto de la propagación los efectos disruptivos en cadenas de suministros.

Cabe señalar que la necesidad de medir el impacto de los eventos disruptivos fue señalado de forma enfática por la Casa Blanca como factor crítico de éxito en el desarrollo de cadenas de suministro globales. (The White House, 2012.)

### **1.2.1. Descripción del problema y justificación**

En un entorno globalizado, el éxito las Cadenas de Suministros de Exportación (CSE) depende de garantizar el suministro de bienes entre los diferentes actores de la misma. En este sentido los ejecutivos deben tomar decisiones para administrar la incertidumbre con la información que tienen a su alcance, lo que en muchos casos sólo les ofrece una visión local del sistema. Esto los lleva a desconocer el impacto tanto de las disrupciones locales como el efecto de sus decisiones en las demás estepas de la CSE.

De hecho, desde 1993 Davis afirmó que la incertidumbre se propaga a través de una red, resaltando que comprender el impacto de la variabilidad en el sistema es la meta de la teoría de control. Su estudio se centró en redes de manufactura y en el control de inventarios basado en los modelos estáticos tradicionales, aunque sin tomar en cuenta el impacto de las disrupciones de seguridad. Por otro lado, Young et al. (2002) proponen una metodología para trazar el flujo del valor en las actividades de los distintos procesos de la cadena, sin embargo dejan de lado el análisis los riesgos disruptivos. Riesgos que de acuerdo con Giunipero y Eltantawy (2004) están presentes en algún grado en toda cadena de suministro. En los últimos años, enfrentar la vulnerabilidad al riesgo ha sido el tema central de investigadores y administradores del riesgo en la cadena de suministros, quienes se han orientado al desarrollo de técnicas para la identificación, evaluación y análisis de áreas de vulnerabilidad en la cadena de suministro internacional (Neiger et al., 2009).

En este sentido Sheffi et al. (2003), Pickett (2003), Gaonkar y Viswanadham (2004), entre otros, exponen que la administración de riesgo no se debe centrar en la naturaleza específica de la disrupción. Afirman que los administradores de la cadena no pueden prever cada amenaza potencial y mucho menos determinar la probabilidad de que dicha amenaza se materialice. Su propuesta es que los esfuerzos de administración del riesgo deben enfocarse en evaluar el impacto generado por las disrupciones en las operaciones de la cadena de suministros. Concluyen que una gran variedad de eventos disruptivos entre los

que se encuentran los desastres naturales y ataques terroristas, tienden a tener efectos similares en la cadena de suministros.

Por otro lado, Stecke y Kumar (2006), coinciden en que los tomadores de decisión no pueden anticipar todas las posibles interrupciones y consecuencias, sin embargo afirman que la similitud en las consecuencias existe sólo cuando se comparte la naturaleza que origina el evento disruptivo. En este sentido determinan que debido a la gran cantidad y severidad de las catástrofes potenciales, es difícil crear un plan de mitigación de las mismas. Además de que consideran que los administradores no tienen claro cómo enfrentar y administrar el riesgo disruptivo.

Wu et al. (2007) de hecho resaltan que el área de investigación en materia de propagación de riesgos permanece relativamente inexplorada. Por lo que se propone un método para evaluar el impacto de las interrupciones desde una perspectiva de fallas en la programación de la producción, y dificultades mecánicas entre otras, dejando de lado las interrupciones de seguridad.

Así mismo, Wilson (2007) propone un modelo de dinámica de sistemas para evaluar el impacto en la cadena de suministro por interrupciones en el transporte. Retoma la propuesta de enfoque en el impacto del evento disruptivo y no en la fuente de la interrupción. Sin embargo, no considera interrupciones de seguridad, además de que no toma en cuenta el efecto frontera, cuya evaluación es fundamental en el diseño y operación de CSE.

En este sentido, Koh (2007) argumenta que la administración de las cadenas de suministro en un sistema justo a tiempo, ampliamente practicado hoy en día, depende en un alto grado de la eficiencia del cruce de frontera. Afirma que la introducción de controles estrictos en las fronteras internacionales, producto de una mayor atención al terrorismo, pueden ocasionar una disminución considerable en la exportación de bienes. El autor concluye que dicha disminución podría afectar negativamente al crecimiento económico y a la innovación en los países. Cabe señalar que su investigación es descriptiva y no propone metodologías que ayuden a evaluar el impacto de la frontera como fuente disruptiva presente en toda cadena de suministro de exportación.

Knemeyer et al. (2009) y Pfohl et al. (2010) abordan el creciente interés en los últimos años por administrar el riesgo. Coinciden en que reaccionar al evento disruptivo no es la mejor aproximación para administrar el riesgo. Además de que se identifica a la simulación

como una aproximación para estimar el impacto de interrupciones en la cadena de suministros. Finalmente Pfohl et al., (2010) y Sodhi et al., (2012) exponen que no hay un consenso con referencia a qué elementos deben analizarse para contribuir a una efectiva administración del riesgo en cadenas de suministro.

De este modo, después de una revisión exhaustiva del estado del arte, no se identificó una herramienta específica para la evaluación del impacto sistémico de la propagación de riesgos disruptivos de seguridad en la cadena de suministros de exportación. Sin embargo, se identificaron diferentes áreas de oportunidad que apoyan el enfoque propuesto por nuestro trabajo. Así, Stecke y Kumar (2006) expone la necesidad de desarrollar modelos que puedan evaluar las interrupciones que impacten a la cadena, así como también determinar sus efectos. Wilson (2007) propone el uso de dinámica de sistemas para evaluar el impacto de eventos disruptivos en la cadena de suministro. Lo cual tiene sentido por lo expuesto por Pfohl et al., (2010) que define al riesgo con un enfoque causa – efecto. Knemeyer et al., (2009), establece que estos modelos deben evaluar el riesgo en múltiples etapas de la cadena, es decir, que tengan un enfoque dinámico. Finalmente Konh (2007), argumenta que es importante medir el impacto de efecto frontera en la cadena de suministros.

Lo discutido anteriormente, arrojó evidencia sobre la necesidad de desarrollar un modelo con un enfoque dinámico de ayuda a la toma de decisiones que apoyara en la identificación y comprensión de la interrelación de las variables que influyen en la propagación de los riesgos disruptivos de seguridad. Tomando además en cuenta, la evaluación del impacto de la propagación analizando la combinación de distintos escenarios de decisión y considerando a la frontera como parte de la cadena de suministros de exportación.

### **1.2.2. Preguntas de investigación**

Como resultado de un amplio análisis documental y prácticas logísticas, se establecieron las siguientes preguntas de investigación que dieron guía a nuestro trabajo:

- ¿Cuál es el efecto de la propagación de riesgos disruptivos de alto impacto en un sistema que combine distintos eventos en diferentes escenarios?

- ¿A qué nivel de detalle se debe conceptualizar la cadena de suministros de exportación, para identificar las variables y procesos clave que influyen en la propagación del riesgo?
- En una cadena de suministro de exportación, ¿Cuál es el impacto del tiempo de cruce de frontera, derivado del aumento de revisiones de seguridad o de la ocurrencia de eventos disruptivos?
- Bajo escenarios de decisión constituidos por eventos combinados de riesgos, ¿Cuál es la relación de las variables que permiten alcanzar el nivel de servicio deseado?

### **1.3. Hipótesis de investigación**

Si dentro de una cadena de suministro de exportación se mapea cada uno de los procesos evaluando cuantitativamente el efecto disruptivo y su potencial propagación, entonces, es posible el desarrollo de un modelo dinámico que permita conocer la interrelación de las actividades clave y su vulnerabilidad, cuantificando el impacto de la propagación de manera global o en cualquier etapa de la misma.

### **1.4. Objetivos**

Desarrollar un modelo dinámico de los procesos en la cadena de suministro de exportación, capaz de medir el índice de nivel de servicio a través de la identificación de riesgos disruptivos de alto impacto y la medición de los costos asociados a la propagación de los mismos.

#### **1.4.1. Objetivos específicos**

- Identificar la relación de las variables que desde una perspectiva de riesgo influyen en la vulnerabilidad de las cadenas de suministro.
- Desarrollar el sistema dinámico que permita evaluar escenarios de riesgo específicos que puedan ser generalizados y que partiendo de la ocurrencia de uno o más evento disruptivos no deseados, se pueda mostrar en tiempo real la propagación y el impacto económico en la cadena de suministro de exportación.
- Evaluar distintos escenarios de interés para brindar a los tomadores de decisión una visión global de la CS que pueda auxiliar en el desarrollo de alternativas de acción que



contribuyan a mitigar los efectos de la propagación del riesgo en CSE ante la ocurrencia de un evento disruptivo.

### **1.5. Aportaciones y limitaciones**

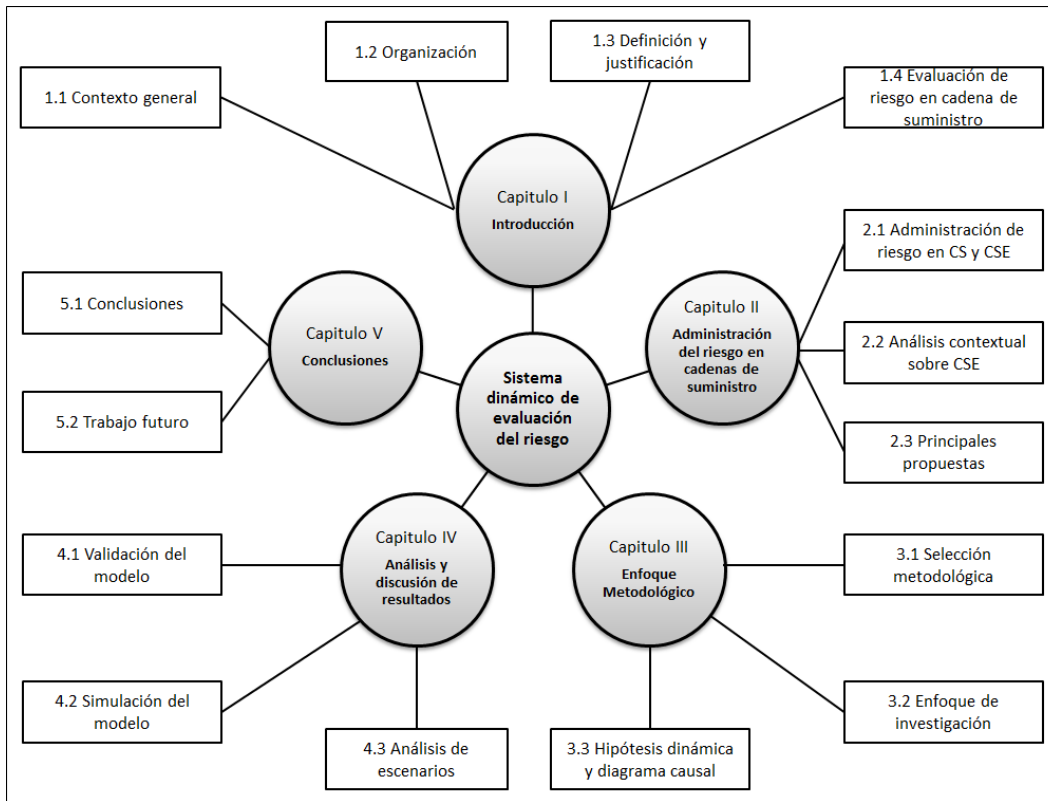
El presente estudio se enfoca al estudio de los riesgos de amplio impacto (desastres naturales, amenazas terroristas y actos criminales) en la CSE, dejando por fuera aquellos riesgos en los que se incurre producto de decisiones directivas.

Se construye un modelo con dinámica de sistemas que evalúa el comportamiento de distintos escenarios de decisión ante la ocurrencia potencial o no de uno o más eventos disruptivos. Se considera a la frontera como un elemento del sistema. Sin embargo el modelo no pretende hacer un pronóstico de potenciales amenazas que tienen como blanco la interrupción del suministro.

El mapeo de procesos será realizado específicamente en cadenas de suministro de exportación mexicanas que tienen actividades manufactureras y que su medio de transporte es el autotransporte.

### **1.6. Organización del documento**

El presente documento se organiza en cinco secciones principales en las que se muestra primeramente los elementos que llevaron a estructurar el problema de investigación (ver Figura 1.1; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). En el segundo capítulo, se resenta la revisión del estado del arte con relación a la administración de riesgos en cadenas de suministros. En el tercer capítulo se presenta el enfoque metodológico, mostrando además el esquema que se siguió para desarrollar un modelo de evaluación del impacto de la propagación de riesgos disruptivos de seguridad en CSE. En el capítulo cuatro se presenta el análisis de escenarios así como la validación de los resultados de simulación. Finalmente en el capítulo cinco, se muestran tanto los resultados de la investigación, como las líneas identificadas para la investigación futura.



**Figura 1.1.** Estructura general de la tesis.

# Capítulo 2

## Marco teórico

En este capítulo se presenta un análisis bibliográfico que nos permitirá conocer los aportes recientes en el área de la administración de riesgos en cadenas de suministro. La primera parte de este capítulo nos muestra la diferencia entre las actividades logísticas y la cadena de suministro. Posteriormente se busca introducir al lector en el concepto de administración del riesgo en cadenas de suministro, así como también se describen aspectos importantes relacionados con el mismo. Finalmente, se propone el uso de una herramienta pertinente para simulación de sistemas complejos y dinámicos.

## **2.1. Introducción**

La práctica de comercializar mercancía ha existido a lo largo de la historia de la humanidad. Esto fue debido a que los bienes que las personas querían no siempre se producían en el lugar donde se requerían o no eran accesibles cuando la gente los quería consumir. En este sentido, el limitado sistema de movimiento-almacenamiento por lo general obligaba a las personas a vivir cerca de las fuentes de producción y en consecuencia, a consumir un rango estrecho de bienes. Con el mejoramiento de los sistemas logísticos, el consumo y la producción comenzaron a separarse geográficamente. Las regiones se especializaron en aquellas mercancías útiles o de convivencia que podían producirse con más eficiencia. El exceso de producción pudo transportarse a otras zonas de consumo y los bienes necesarios que no se producían localmente se importaban. Este proceso de intercambio cumple con el principio de la ventaja comparativa de las regiones enunciado por David Ricardo en 1817. Cuando se aplica este mismo principio a los mercados mundiales, es posible explicar el alto nivel de comercio internacional que tiene lugar hoy en día. De este modo las actividades de logística han proporcionado el puente entre las ubicaciones de producción y las de mercado, separadas por el tiempo y la distancia. El transporte añade valor de lugar a los productos y servicios, en tanto que el mantenimiento de inventarios les añade valor de tiempo (Ballou, 2004).

## **2.2. Logística y cadena de suministros**

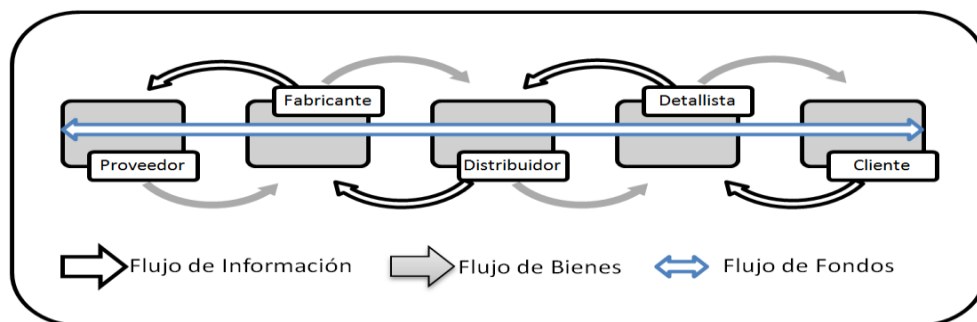
Hasta hace unos pocos años se creía que el término cadena de suministros era una extensión del término logística, sin embargo Christopher y Rutherford (2005), demostró que el término de CS es más mucho más extenso, e incluso que se ha consolidado como un área independiente.

El término logística fue inicialmente utilizado para describir a las actividades en el campo militar y posteriormente fue adoptado por la industria de manufactura y de servicios. Tradicionalmente, la logística está relacionada con el movimiento y almacenaje recursos materiales y humanos en una organización (Goetschalckx, 2011).

Actualmente se pueden encontrar una gran variedad de definiciones del término logística, en la presente investigación se utiliza la definición proporcionada por el consejo de profesionales de cadenas de suministro que la define como:

*“Logística es la parte de la administración de la cadena de suministro encargada de planear, implementar y controlar de manera eficiente y efectiva el almacenamiento y los flujos de bienes y servicios así como la información relacionada entre el punto de origen y el punto de consumo en función de cumplir con los requerimientos del cliente”.*

Por otro lado, la cadena de suministro es representada clásicamente como la forma en que los bienes e información son movidos entre productores y clientes. La idea es que la materia prima se transforme, se venda y sea transportada a una compañía que la venda a una etapa superior en la cadena de suministro, esta etapa o compañía puede ser un importador o un almacenista, que distribuye los bienes ya sea directamente o a través de otros distribuidores al cliente final (Chopra y Menidi, 2008). La estructura generalizada de la cadena de suministros involucra diferentes actores como son el productor, el transportador, el almacenista o importador, distribuidores y el cliente final (ver Figura ).



**Figura 2.1.** Etapas de la cadena de suministros (Adaptación Chopra y Menidil, 2008).

Debido a que las cadenas de suministros (CS) son sistemas complejos y que se utilizan con múltiples propósitos, actualmente se pueden encontrar diversas definiciones de la misma. Waters (2007) la define como las actividades que una serie de organizaciones realizan para el movimiento de materiales en su viaje desde el proveedor inicial hasta el consumidor final. Entendiendo por materiales a todos los recursos que una organización

mueve para crear sus productos. Los materiales pueden ser tangibles (como materia prima) o intangibles (información y servicios asociados).

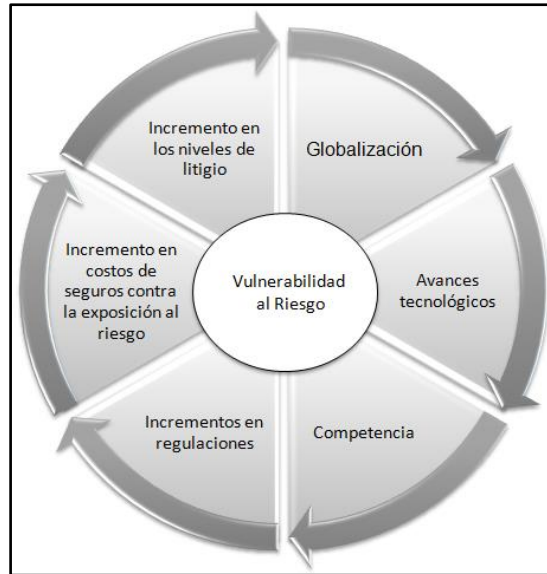
Dado el contexto de administración del riesgo en el que se desarrolla la presente investigación, se define a la cadena de suministros de acuerdo con (Cedillo et al, 2011):

*“Sistema interconectado de procesos dinámicos que son susceptibles al riesgo y que tienen como objetivo la transformación y distribución de materiales e información.”*

Así mismo, se define una cadena de suministros de exportación (CSE) como:

*“Es la CS, cuya organización opera a través de fronteras nacionales y sus esfuerzos se orientan en garantizar el suministro de bienes y servicios en mercados distintos a aquellos donde se manufacturan y controlan las actividades de producción o de marca”*

Como se argumenta en la estrategia nacional para la seguridad de las cadenas de suministro publicado por la Casa Blanca en 2012, el éxito de las cadenas depende de garantizar el suministro a través de los diferentes elementos de la CSE. Sin embargo, como se expuso anteriormente, la administración de la CSE ha vuelto más compleja debido a diversos factores como la globalización, los avances tecnológicos, la competencia, los constantes incrementos en regulaciones internacionales, el incremento en los costos de contratar seguros contra la exposición al riesgo y el incremento de los niveles de litigio entre otros elementos que se han agregado a la misa elevando su vulnerabilidad al riesgo (Frost et al, 2001) (Ver Figura 2. 1.)



**Figura 2. 1.** Factores de vulnerabilidad.

### 2.3. Riesgo en cadenas de suministros

El concepto de riesgo es tratado en distintas disciplinas entre las que se encuentran en la teoría de inventarios, contratación de seguros, finanzas, mercadotecnia, administración entre otras. Sin embargo cada disciplina evalúa una característica distinta del riesgo. El área de evaluación de riesgos para quien busca invertir en mercados emergentes es muy diferente a quien se somete a una intervención quirúrgica. Consecuentemente el concepto de riesgo se adecua al contexto específico y no es posible encontrar una definición que sea apropiada para todas las circunstancias (Barth, 2011).

De este modo, comprendiendo que el riesgo como tal tiene efectos directos e indirectos con la naturaleza y el desarrollo operativo de la cadena de abastecimiento, la ORM (Operational Risk Management) define al riesgo como: el proceso de tomar decisiones que puedan minimizar los efectos de pérdidas que genera la materialización de éstos”. Específicamente en cadena de suministro el riesgo se define en términos de:

*“Eventos imprevistos que pueden interrumpir el flujo continuo de bienes a través de las diferentes etapas de la CS (Waters, 2007).”*

En este sentido podemos identificar que los riesgos dentro de la cadena de suministro son distinguidos entre riesgo de suministro y riesgo de demanda. El riesgo de suministro se basa en las alteraciones del flujo por parte del proveedor. La quiebra de un proveedor clave puede ser un ejemplo. Los riesgos de demanda varían dependiendo de la moda o fluctuaciones de temporada etc. Por otro lado también podemos identificar que los riesgos fuera de la cadena de suministros son nombrados riesgos del ambiente y se incluyen desastres naturales, ataques terroristas o cambios en regulaciones legales.

Así mismo, la seguridad en la cadena de suministro puede ser caracterizada como la protección de la cadena contra disturbios e intentos de ataques criminales, mientras que por otro lado, la resistencia o robustez se refiere a la habilidad de una organización para regresar rápidamente a un estado inicial o funcional después del disturbio (Pfohl et al, 2010).

Pickett (2003), Waters (2007), Handfield y McCormack (2008), aseguran que las fuentes externas de riesgo como son los desastres naturales y ataques terroristas no son un tema nuevo, sin embargo, coinciden y reconocen que en este entorno globalizado, las cadenas de suministro de exportación son más susceptibles a los efectos de las disrupciones. También afirman que las CS no sólo se ven afectadas por eventos disruptivos en las propias instalaciones u operaciones de la empresa central, sino que son vulnerables ante las disrupciones que impactan a sus proveedores, clientes y redes de transporte por mencionar algunas.

#### **2.4. Administración de riesgo en cadena de suministro**

Las cadenas de suministro de exportación se enfrentan a diversos retos que aumentan su vulnerabilidad ante eventos disruptivos. Entre los principales retos encontramos la necesidad de mejorar la predicción de la demanda, manejo de tamaño de órdenes más grandes, un mayor número de intermediarios, el aumento en los tiempos de ciclo y controles políticos, así como las distintas barreras físicas y aduanales entre otras.

En este sentido, aun cuando los tomadores de decisión reconocen que los efectos de las disrupciones pueden tener consecuencias devastadoras en la cadena de suministro, las estrategias para mitigarlas generalmente no son desarrolladas correctamente o incluso ni siquiera son iniciadas. Una estadística preocupante es la que presentan Mitroff y Alpaslan



(2003) y Schlegel y Trent (2012), donde estiman que sólo entre el 5 y el 25 por ciento de las 500 compañías más rentables podrían manejar una crisis por interrupciones en la cadena de suministros. Lo que significa que en el mejor de los casos el 75% de las mejores compañías no están preparadas para manejar crisis de seguridad y en el peor escenario el 95% de ellas no están preparadas para enfrentar una interrupción.

Según Stecke y Kumar (2006), parte esta problemática se da por que los tomadores de decisión no pueden anticipar todas las posibles interrupciones y sus consecuencias. También consideran que los administradores no tienen claro cómo enfrentar y administrar el riesgo disruptivo. En este sentido, Waters (2007) argumenta que el problema básico para la administración del riesgo se encuentra en que este puede manifestarse en muchas formas distintas, además de que puede afectar prácticamente a cualquier punto de la cadena desde el proveedor inicial hasta el cliente final. Expone que los riesgos disruptivos tienen el potencial para interrumpir tanto el suministro de materiales como la demanda de dichos productos. Sus efectos pueden localizarse en un punto específico o estos pueden propagarse por la red y ocasionar daños globales en la cadena de suministros.

En este sentido Handfiel y McCormack (2008), definen al proceso de administración de riesgo en cadena de suministros como:

*“La integración de políticas de acción de parte de las organizaciones para mitigar el riesgo y reducir la probabilidad de que las interrupciones se presenten”.*

Sin embargo afirman que desafortunadamente en la actualidad no existe un proceso que permita administrar efectivamente el riesgo asociado a la cadena de suministro. De hecho dejan abierta la interrogante sobre qué decisiones se deben tomar para conformar una estrategia global y económica encaminada a reducir el impacto y la frecuencia de las interrupciones en la cadena de suministro. Esta interrogante se retomó por esta investigación y fue respondida a través de la evaluación de múltiples escenarios de acción en el modelo de evaluación dinámica que se construyó para estudiar el impacto de la propagación de riesgos disruptivos de seguridad en cadenas de suministro de exportación.

## **2.5. Herramientas para el análisis del riesgo en la cadena de suministro**

La ciencia en general busca comprender los fenómenos para posteriormente poder predecir y controlar su comportamiento, en este sentido, para algunos eventos catastróficos como los choques, accidentes aéreos, entre otros, encontramos disponibilidad de datos histórico de donde podemos partir para estimar por ejemplo, la probabilidad de que se presente un accidente aéreo en alguna región dada. Sin embargo, existen otros tipos de catástrofes como explosiones de reactores nucleares, ataques terroristas, desastres naturales entre otros eventos en los que la información histórica no está disponible o es muy limitada como para ser útil.

Actualmente, para el análisis del riesgo en las cadenas de suministro se utilizan diferentes enfoques entre los que destacan, i) Métodos de estimación de probabilidad basados en la opinión de expertos combinados con los datos históricos; ii) Opinión de expertos combinada con la opinión de los tomadores de decisión; iii) Teoría de juego y iv) Simulación de modelos (Knemeyer et al., 2009).

Sin embargo, diversos autores señalan que por un lado, estos métodos tradicionalmente estiman sólo la probabilidad de que ocurra una catástrofe con respecto a eventos aislados, y por el otro, nos dicen que en la práctica, es necesario que la evaluación sea un proceso que analice los efectos de los eventos disruptivos o catastróficos en múltiples entidades de la cadena de suministro.

Debido a esta necesidad de evaluar dinámicamente la complejidad del sistema bajo estudio, así como por la interrelación de las variables, para la presente investigación se seleccionó la metodología de dinámica de sistemas como una alternativa viable y pertinente en el análisis de cadenas de suministro.

Entre los principales factores para elegir la herramienta de dinámica de sistemas encontramos la utilización de diagrama causales o de influencias y los diagramas de “tuberías” o de Forrester lo que ayuda en la comprensión de sistemas complejos con cambio dinámico (Ghalib, 2004). El objetivo de estos diagramas es explicar los sistemas mentales y la estructura del sistema mediante las retroalimentaciones entre las variables del sistema. Estas retroalimentaciones determinan en gran medida el comportamiento del sistema a través del tiempo (Tako & Robinson, 2008). La dinámica de sistemas, además de aplicarse en la simulación de cadenas de suministro, se ha utilizado en la simulación de

sistemas ecológicos, sociológicos, económicos, gubernamentales, políticas corporativas entre muchos otros (Sweeter, 1999). (Barlas, Y, 1996)

Autores como Towill (1996); Barlas y Aksogan (1996); Angerhofer y Angelides (2000); Sterman (2000); Georgiadis et al, (2005); Kamath y Roy (2007); Duggan, (2008), han realizado diferentes investigaciones sobre estrategias en la cadena de suministro, teniendo como enfoque de análisis la simulación con dinámica de sistemas.

## **2.6. Conclusiones**

La discusión planteada en este capítulo nos permite observar que el área de propagación de riesgo en CSE se encuentra relativamente inexplorada. Si bien existen esfuerzos e interés por comprender los efectos que tienen las interrupciones en las CSE, estos se limitan a estudiar impactos aislados en la CSE, por lo en el siguiente capítulo de esta investigación se analiza el uso de la técnica de dinámica de sistemas como una alternativa para el estudio sobre el impacto de la propagación como resultado de la materialización de eventos disruptivo en CSE.

El uso de un enfoque de dinámica de sistemas resulta fundamental debido a las características y necesidades propias de la investigación que requieren del análisis holístico de la propagación del impacto de eventos disruptivos en todos los miembros de la cadena de suministro en lugar de, separar y reducir los eventos para focalizarlos en eventos aislados tal como lo sugieren otros enfoques de investigación.

# Capítulo 3

## **Enfoque metodológico**

En el capítulo se expone la metodología de investigación seleccionada y su justificación. Se presenta el enfoque sistémico a desarrollar en conjunto con la metodología de dinámica de sistemas, se muestra el diagrama causal que sirve de base para la formulación de la hipótesis dinámica y la construcción del diagrama de Forrester. Así mismo, se remarca la utilidad de la simulación de escenarios de los modelos de dinámica de sistemas para la comprensión de la complejidad derivada del análisis de eventos disruptivos en la CSE.

### **3.1. Introducción**

En este capítulo se analiza el enfoque de investigación utilizado por la presente investigación como una herramienta pertinente para analizar los efectos de la propagación del riesgo en cadenas de suministro de exportación. Debido a la naturaleza de la investigación, carente de información del entorno sobre las interrupciones de seguridad, se realizó una investigación exhaustiva en la bibliografía, así como recurrir a la experiencia de expertos para proponer las variables clave en la evaluación de la propagación.

### **3.2. Metodología de investigación**

La investigación en el área logística es considerada como interdisciplinaria (Kovács y Spens, 2005) y (Halldórsson y ArlbjØn, 2005), esto debido a la interacción que tiene con otras áreas del conocimiento y a la influencia que ha recibido del enfoque económico y diversos sectores como el de la mercadotecnia y la administración, pero sobre todo de la ingeniería (Stock, 1997). Sin embargo, se puede decir que un enfoque de análisis ha tenido cada vez mayor aceptación en la investigación sobre sistemas logísticos, la modelación y simulación (Cedillo y Sánchez, 2008).

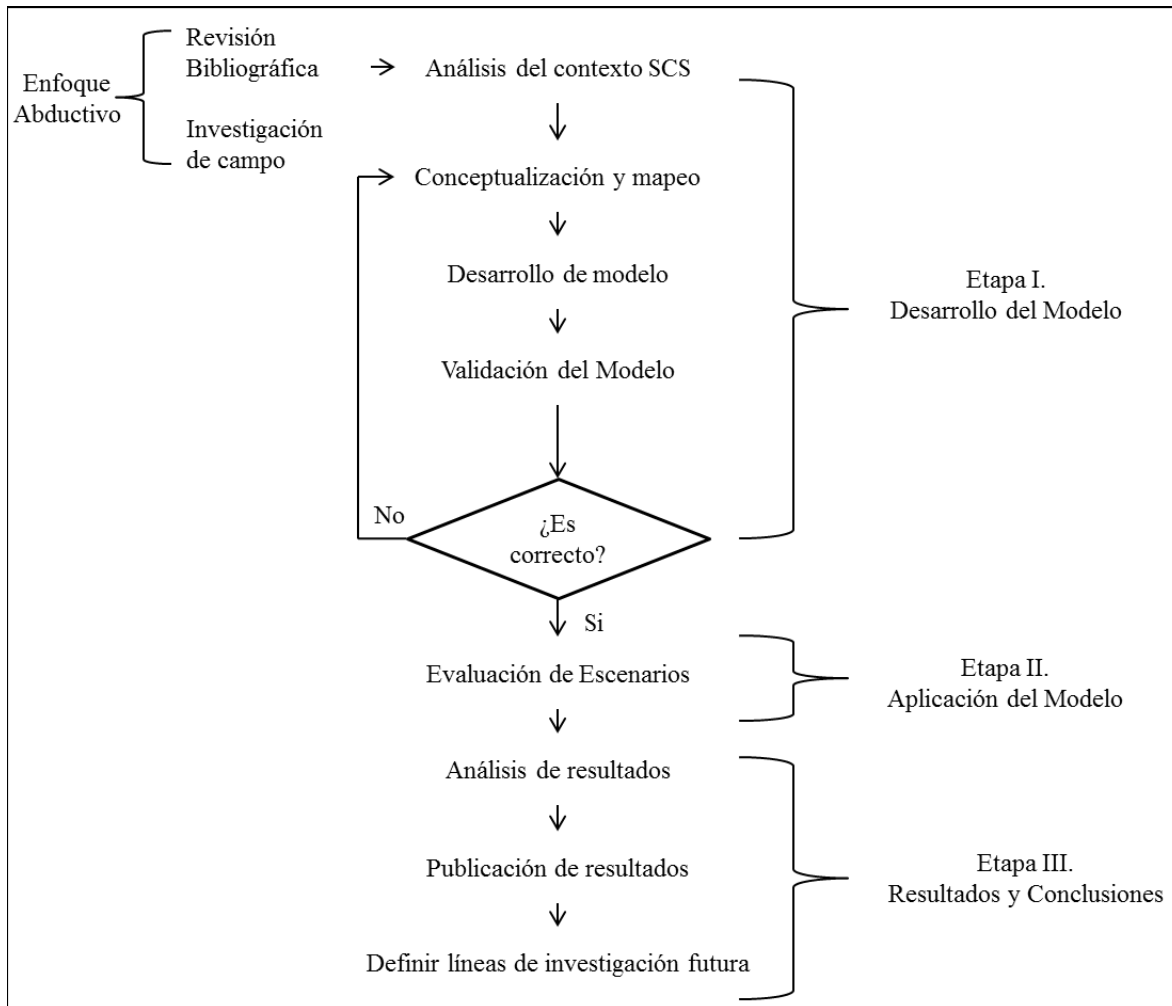
En este sentido, se ha observado que generalmente las investigaciones realizadas en logística y cadena de suministro, tienen un enfoque deductivo o inductivo. El enfoque de investigación deductivo parte de una ley general a un caso específico; mientras que la investigación inductiva va de un caso específico o la recolección de observaciones a una ley general o de los hechos a la teoría (Sánchez, Sistema Dinámico de Evaluación Logística en una Red Regional de Aprovisionamiento Automotriz: El caso de la Región Sureste de Coahuila, 2010).

Recientemente se ha observado el creciente interés en otro enfoque de investigación que combina aspectos teóricos y empíricos, el cual se define como enfoque de investigación abductivo (Kovács y Spens, 2005). Los investigadores que utilizan este enfoque, lo definen como la creatividad sistematizada o la intuición en la investigación para desarrollar nuevo conocimiento (Cedillo y Sánchez, 2008). Al igual que la investigación inductiva, el enfoque abductivo inicia con una observación de la realidad, con la particularidad de que existe una retroalimentación continua con la información teórica.

El enfoque abductivo es comúnmente usado en casos de estudio y en investigación aplicada, en el que se recolectan los datos directamente de fuentes primarias (entrevistas, visitas de campo, etc), que posteriormente se analizan y comparan con información de fuentes secundarias (artículos, libros, revistas, etc.) formándose un ciclo en el que se va generando la teoría o el nuevo conocimiento (Sánchez et al, 2008; Dubois y Gadde, 2002).

Éste enfoque de investigación resulta apropiado para el estudio de interrupciones de seguridad en cadenas de suministro ya que por la naturaleza del problema y el difícil acceso a información fiable, es necesario construir una serie de escenarios que contribuyan generar conocimiento sobre el efecto de dichos eventos disruptivos y que además, permita mejorar la toma de decisiones bajo condiciones disruptivas de alto impacto. Todo ello en función de fomentar el desarrollo de cadenas de suministro más robustas.

El proceso lógico que se siguió en el desarrollo de esta investigación consistió en tres etapas; i) desarrollo del modelo; ii) Evaluación de escenarios y iii) resultados y conclusiones. En la primera etapa se desarrolló el modelo de evaluación *dinámica* del impacto de las interrupciones y la propagación de sus efectos en la cadena de suministro. Para ello se revisó de manera crítica y exhaustiva el estado del arte y además se analizó las necesidades identificadas por los tomadores de decisiones de empresas con actividad exportadora. En la segunda etapa, para la evaluación de escenarios, se consideraron las necesidades expuestas por los expertos en la primer encuesta nacional de seguridad de cadena de suministro, así como también se tomaron como referencia las necesidades evidenciadas en la revisión de literatura. Finalmente, para la tercera etapa, se presentó un análisis formal del comportamiento de los escenarios (Ver Figura 3. 1).



**Figura 3. 1** Metodología propuesta de investigación (Elaboración propia).

Cabe señalar que durante la revisión bibliográfica, se exploró detenidamente las metodologías empleadas para el análisis de la cadena de suministro identificando insistentemente la necesidad de evaluar el comportamiento de la CSE desde una perspectiva holística, es decir que permita analizar los impactos de manera global y no de manera aislada. En este sentido diversos autores (Stecke y Kumar, 2006; Wu, 2007; Knemeyers, 2009; Phof, 2010; Sodhi, 2012), identifican la necesidad de desarrollar herramientas de simulación que sean capaces de evaluar simultáneamente y de principio a fin en la CSE, el impacto de interrupciones de seguridad, así como medir la potencial propagación de sus efectos.

La propuesta de esta investigación fue emplear el enfoque sistémico como una alternativa pertinente en el desarrollo de una herramienta (modelo) que pudiera evaluar de

manera integral, dinámica y simultánea a la CS como un todo, cubriendo así el hueco científico y práctico detectado durante el análisis de la literatura y prácticas existentes.

### **3.3. Enfoque sistémico**

La gran constante de los tiempos modernos es el cambio. Si bien algunos de estos cambios son benéficos, otros amenazan nuestra supervivencia. Sin embargo, la mayor parte de los cambios que ahora nos esforzamos por comprender surgen como consecuencias intencionales o no, de nuestras propias decisiones pasadas (Sterman, 2000).

En este sentido, con base en el pensamiento establecido por René Descartes, desde la publicación de su obra “discurso del método”, la mayoría de los investigadores, para comprender y analizar un fenómeno optan por dividirlo y estudiar sus partes. En consecuencia, la mayoría de las herramientas para la resolución de problemas que hoy disponemos, nos encaminan a dividir los problemas. Así por ejemplo, la esencia del método científico desde un enfoque positivista consiste en observar los resultados de ensayos cuidadosamente elaborados, en los que las condiciones experimentales han sido deliberadamente diseñadas para centrarse en los elementos claves y de interés, con exclusión de todo lo demás.

En contra parte, corrientes como el pensamiento sistémico, surgen como una combinación de enfoques, métodos y técnicas para la resolución de problemas que se basan precisamente en reconocer que los sistemas son complejos debido a la interconexión de sus componentes individuales, y que para entender el sistema, éste debe ser examinado en su conjunto.

En este contexto, hoy en día se trabaja en el diseño y desarrollo de las herramientas, técnicas y métodos para comprender y documentar cómo los componentes se conectan entre sí, así como también para interpretar y estudiar su comportamiento dinámico colectivo. Es aquí donde hay que situar a la dinámica de sistemas, la cuál va más allá del pensamiento sistémico y que entra en el terreno del modelado formal de sistemas.

### **3.4. Metodología de Dinámica de Sistemas**

La metodología de la Dinámica de Sistemas es una herramienta desarrollada en el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) en el año de 1956, bajo la dirección del profesor J.



Forrester. Por su capacidad para evaluar los cambios a través del tiempo, en años recientes la dinámica de sistemas se ha utilizado en diversos campos como las matemáticas, física, estudios sociológicos, economía, biología, ingeniería entre otros (Chase et al., 2009).

Esta técnica constituye una herramienta de análisis a partir de la cual se obtiene conocimiento sobre el comportamiento de modelos del mundo real midiendo las variaciones en las condiciones iniciales del mismo. Así mismo, la dinámica de sistemas busca resolver problemas concretos considerando la evolución de los sistemas en el tiempo y las interacciones entre sus elementos.

En un modelo sistémico la estructura del mismo no está predeterminada por un tipo de modelo matemático previo, sino que la estructura está en función de la experiencia del analista que en conjunto con expertos en el área de estudio, construye un modelo capaz de describir a realidad partiendo de la relación de sus variables (Sterman, 2000).

En dinámica de sistemas se considera las organizaciones como una red compleja en la que interactúan relaciones de causa-efecto permitiendo con ello explicar el comportamiento dinámico de la organización como un todo. En este sentido, la dinámica de sistemas se utiliza cuando el analista ha identificado que la estructura de un sistema cuenta con múltiples variables que interactúan de manera dinámica en el tiempo, haciendo que la comprensión de su desempeño sea compleja. Esta comprensión del entorno se logra a través del análisis de diagramas causales, los cuales son estructuras que expresan una representación ordenada del problema en estudio, mostrando la influencia existente entre las variables, parámetros y otros datos (Cedillo and Sánchez, 2008).

#### **3.4.1. Diagrama causal**

Una de las herramientas clave de la dinámica de sistemas son los diagramas causales. Los diagramas causales son mapas en los que se muestran de manera ordenada y lógica las relaciones que existen entre los diferentes elementos del sistema. Por medio del empleo de flechas se expresan los modos de comportamiento básico del modelo en estudio. Las flechas indican la dirección entre la causa y el efecto y mediante el empleo de signos nos indican la polaridad de las relaciones. (

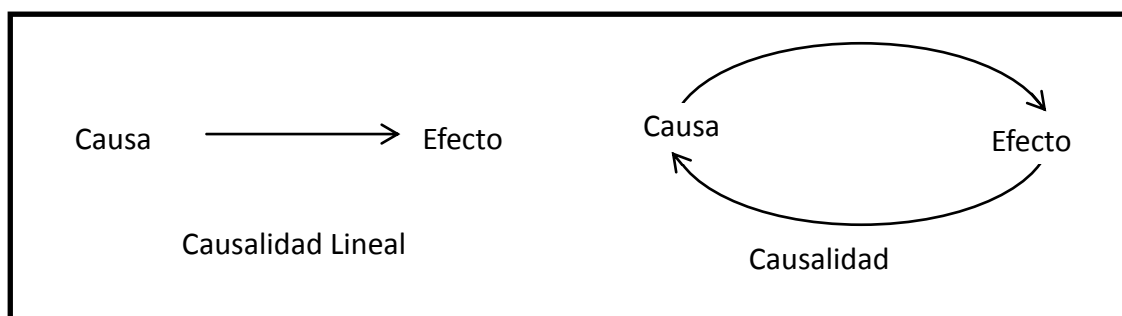
Figura 3. 2)



**Figura 3. 2.** Polaridad de las relaciones causales.

La polaridad nos señala la influencia que la “causa” tiene sobre el “efecto”, una polaridad positiva indicada por el signo (+), significa que el crecimiento o (decremento) en la variable independiente crea un crecimiento o (decremento) en la variable dependiente. Por otro lado la polaridad negativa indicada por el signo (-), nos señala que un incremento o (decremento) en la variable independiente, genera un decremento o (crecimiento) en la variable dependiente (Sterman, 2000).

Si bien el principio de causalidad tradicionalmente sugiere una relación lineal en la que primero está la causa y después el efecto, donde a su vez se les asocia como variable independiente (causa) y variable dependiente (efecto), para el pensamiento sistémico la causa y el efecto no son sucesivos sino simultáneos y no existe una relación lineal entre la causa y el efecto, sino que se tiene una serie de relaciones circulares, conocidas como bucles de retroalimentación (Figura 3. 3) (Franco y Echeverri, 2010).



**Figura 3. 3** Causalidad lineal tradicional vs Causalidad circular (adaptación, Franco y Echeverri, 2010)

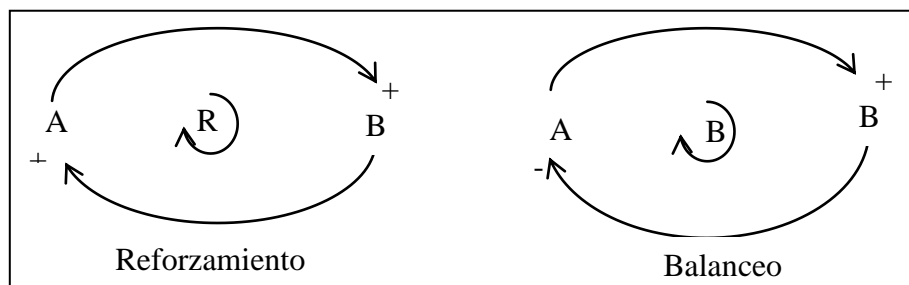
### 3.4.2. Bucles de retroalimentación

Los bucles de realimentación representan el proceso dinámico que se traslada por una cadena de causas y efectos, esto a través de un conjunto de variables en el que se acaba

volviendo a la causa original formando un ciclo. Las estructuras cíclicas contribuyen a presentar de manera organizada la forma en que las relaciones causales de las variables describen el comportamiento del subsistema en estudio. Estas estructuras determinan el comportamiento del sistema en base a su polaridad.

La polaridad de un ciclo es positiva si la multiplicación de todas las polaridades de sus elementos son pares y se indica que su conducta es de auto refuerzo (R). Por otro lado, la polaridad es negativa si la multiplicación de todas las polaridades internas es impar y se dice que se forma un ciclo de balanceo (B) (Forrester, 1968) (Ver

Figura 3. 4).



**Figura 3. 4.** Polaridad de ciclos o bucles de retroalimentación.

Los ciclos con polaridad positiva, son procesos que generan su propio crecimiento. Es decir, la variación de un elemento se propaga a lo largo del bucle de manera que refuerza la variación inicial. El ejemplo clásico es el que representa el crecimiento de una bola de nieve rodando por la colina. Por otro lado, los ciclos con polaridad negativa, son aquellos en los que la variación de un elemento se propaga a lo largo del bucle de manera que contrarreste la variación inicial oponiéndose al cambio. Esta acción produce que los procesos busquen el equilibrio y que generalmente oscilan balanceando el sistema de manera constante en torno a un nivel objetivo o deseado, por lo que comúnmente se le identifica como bucle buscador de metas. Un fenómeno que se identifica en los bucles o ciclos de retroalimentación es la existencia de retardos que son inherentes a la mayoría de los sistemas y pueden tener una influencia notable en el comportamiento de un sistema.

La dinámica de sistemas acepta la existencia de los retardos en el proceso de modelado y simulación. Un retardo no es más que el tiempo que transcurre entre una causa y sus

efectos y en los modelos sistémicos se manejan como procesos cuya salida se retrasa en alguna manera con respecto a la entrada (Franco y Echeverri, 2010).

En los bucles de realimentación positiva, un retardo ocasiona que el crecimiento (o decrecimiento) no se produzca de forma tan rápida como se esperaría. Sin embargo, el efecto de los retardos es especialmente sensible en el caso de los bucles de realimentación negativa. En este caso, el comportamiento, en lugar de aproximarse de forma suave hacia el equilibrio, puede mostrar respuestas que se sobrepasen, hacia arriba o hacia abajo dicho nivel, provocando que el sistema oscile y en ocasiones dicha oscilación se presenta de manera violenta.

De acuerdo con Forrester (1968) y Sterman (2000), el entendimiento de estos fenómenos que ocurren en los bucles o ciclos de retroalimentación, es lo que permite establecer una hipótesis dinámica, la cual es un elemento clave en análisis dinámico de los sistemas logísticos.

### **3.4.3. Hipótesis dinámica**

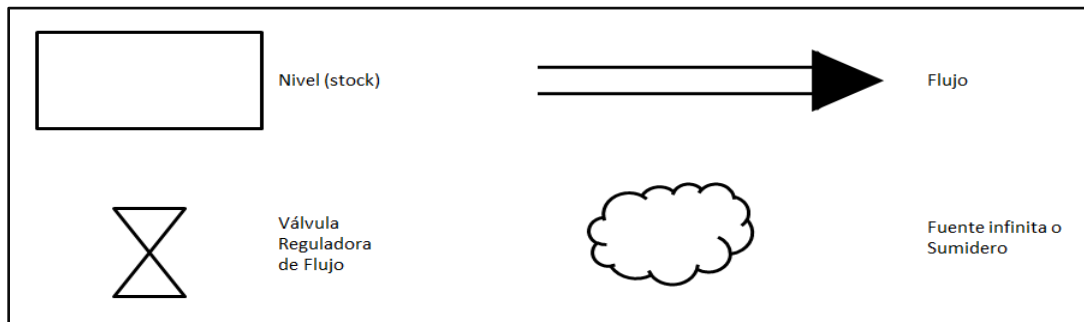
Una vez que se ha identificado el problema, se puede iniciar con el desarrollo de la hipótesis dinámica, la cual tiene como objetivo proveer una explicación de la caracterización dinámica del problema en términos de la estructura de retroalimentación del sistema ilustrada en el diagrama causal. La dinámica de sistemas utiliza a las hipótesis dinámicas en busca de una explicación endógena para el fenómeno que genera el cambio de conducta en la estructura del sistema bajo estudio. Es a través de especificar como el sistema está estructurado y cuáles son las reglas de decisión del sistema, que podemos explorar cómo los patrones de la conducta son alterados por esas reglas y como la estructura se altera si las decisiones cambian. En este sentido la hipótesis dinámica se formula tomando como base el diagrama causal, el cual corresponde a la explicación cualitativa de los patrones del sistema y que a su vez, en conjunto, permiten la construcción del diagrama de Forrester, el cual representa la parte cuantitativa del modelado de sistemas.

### **3.4.4. Diagrama de Forrester**

Uno de los mayores adelantos en dinámica de sistemas ha sido, posiblemente, la aportación de Forrester a través de los diagramas que actualmente llevan su nombre. Este autor asoció

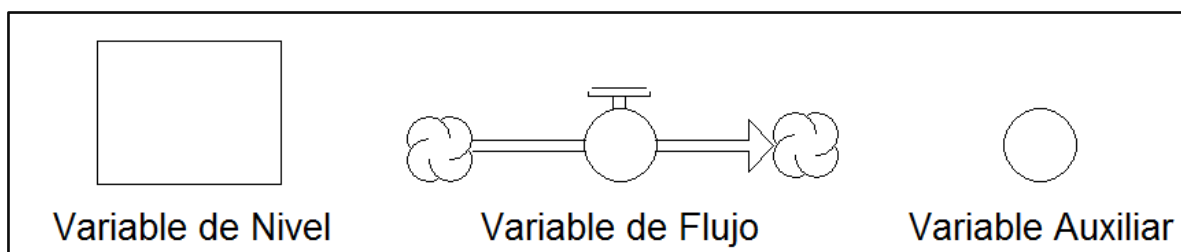
al diagrama causal una estructura matemática funcional, asignado a cada uno de los elementos de los que se compone el diagrama, un tipo de variable concreta a las que nombro como variables de nivel o de estado, variables de flujo y variables auxiliares.

Además, para hacer más intuitivo el uso de estas variables en la modelación, Forrester incorporó a cada una de las variables una imagen representativa de la misma, apareciendo con ello una simbología característica de los modelos de dinámica de sistemas (Figura 3. 5).



**Figura 3. 5.** Simbología general de dinámica de sistemas.

Si bien ésta es la simbología general de la dinámica de sistemas, cada paquete de software para simulación utiliza su propia simbología característica, en la que incluso se pueden apreciar combinaciones u asociaciones de las imágenes ilustradas en la Figura 3. 5. En la presente investigación se utiliza la simbología correspondiente a la versión de Stella 9.1.3 y esta se muestra en la Figura 3. 6



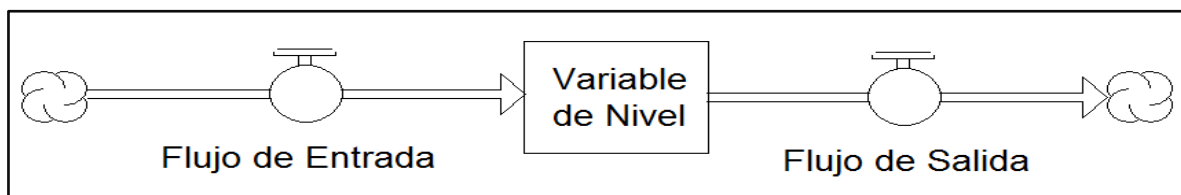
**Figura 3. 6.** Simbología de dinámica de sistemas en Stella 9.1.3.

Frecuentemente el diagrama de Forrester es representado a través de un símil hidrodinámico de un sistema de actuaciones sobre ciertas válvulas que regulan los caudales de alimentación a cada uno de los depósitos o niveles. En este sentido, las variables de nivel, son recipientes que acumulan magnitudes a través del tiempo.

Es importante señalar que las variables de nivel, definen el estado del sistema y generan la información en la que se basan las acciones y la toma de decisiones. También tienen influencia en el comportamiento del sistema porque pueden producir retardos por acumulación, y además representan la capacidad de memoria en el sistema. Las variables de nivel son representadas mediante el empleo de rectángulos (Figura 3. 6).

Por otro lado las variables de flujo, simbolizan el cambio de las variables de nivel durante un periodo de tiempo. Como veremos más adelante, al representar la variación del flujo, son las derivadas de los niveles con respecto al tiempo. Estas variables suelen estar intervenidas con variables auxiliares o con coeficientes (tasas de cambio). En la metáfora hidráulica, estas variables son los grifos o válvulas que regulan el flujo y cuya representación se muestra en la Figura 3. 6.

Finalmente las variables auxiliares son variables dependientes que reciben información de otras variables y que permiten transformar la información en base a una o más funciones determinadas y cuya salida se dirige hacia otra variable auxiliar o hacia una variable de flujo. También se utilizan para descomponer ecuaciones complejas en ecuaciones más simples que faciliten la lectura el modelo (Ver Figura 3. 6). Pueden existir variables auxiliares independientes, pero en este caso serían coeficientes (parámetros, tasas, constantes,...) exógenos que pueden ser modificados por el usuario del modelo para regular su comportamiento. El ejemplo clásico en dinámica de sistemas es el que simula el flujo de entrada y salida de agua en una bañera o recipiente, de forma que la cantidad o nivel de agua de la bañera es la acumulación de agua que entra a través del grifo menos el agua que sale por el desagüe (Ver Figura 3. 7).



**Figura 3. 7.** Representación gráfica del modelo hidrodinámico.

El diagrama de Forrester es la materialización cuantitativa del diagrama causal, y se construye partiendo de que a cada variable de nivel se le puede asociar un determinado flujo de entrada y de salida que estará representado por las variables de flujo. Estas últimas

constituyen los cambios en el estado del sistema y actúan como las válvulas que determinan qué cantidad de flujo o caudal va a ser incorporado a cada uno de los diferentes niveles. Para hacer la representación matemática y definir estas relaciones, se deben especificar y definir las magnitudes de las diferentes variables, así como las ecuaciones que determinen la relación entre las dichas variables del sistema (Iñaki, 2010 ).

### **3.4.5. Representación matemática**

Si bien es deseable que las ecuaciones de todo modelo tengan una formulación matemática simple, esto no siempre es posible dada la complejidad que pueden alcanzar los sistemas bajo estudio. Una de las ventajas al emplear métodos como la simulación con dinámica de sistemas, es precisamente que su estructura y metodología, nos brindan la posibilidad de resolver problemas complejos para los cuales aún hoy, no se conocen soluciones analíticas.

El modelo matemático es representado por medio de ecuaciones diferenciales, lo que no implica que el usuario de dinámica de sistemas deba ser un experto en el área o que deba conocer su solución analítica. El método de cálculo se basa en métodos iterativos que permiten la actualización de los niveles del sistema que se ven afectados tanto por los flujos de entrada, como los flujos de salida en diferentes intervalos de tiempo. Este procedimiento implica acoger el esquema de solución por diferencias finitas en el que el diferencial se aproxima mediante la diferencia de flujos (Iñaki 2010).

En este contexto, el mérito de Forrester ha sido enmascarar el aparato matemático del cálculo diferencial propio de los sistemas relacionándolos con imágenes que facilitan su comprensión y manejo de los modelos de simulación dinámica.

La representación matemática parte de que la variación o cambio de una variable de estado o nivel se produce por medio de un cambio en la variable de flujo. De este modo a cada variable de estado o nivel (N), se le puede asociar un flujo de entrada (FE) y un flujo de salida (FS), en consecuencia, la ecuación que refleja su evolución es la siguiente:

$$N(T) = N(0) + \int (FE - FS)\Delta T$$

Las variables de flujo se pueden asociar ecuaciones en las que el bloque representativo de un flujo admite, como señal la entrada, la información proveniente de los niveles alcanzados por las variables de estado o de las variables auxiliares del sistema y suministra como salida el flujo que alimenta a un nivel, es decir:

$$FA(t) = \frac{B(t)A(t)}{DD}$$

Donde dichas ecuaciones reciben el nombre de ecuaciones de flujo o funciones de decisión.

Por su parte, las variables auxiliares se emplean para reflejar las no linealidades, que aparecen en el sistema. Por ejemplo, las variables A y B se expresan por una expresión de la forma  $B=F(A)$ , donde  $F(A)$  puede ser una constante o una función no lineal.

### 3.4.6. Simulación de los modelos de dinámica de sistemas

De manera previa se expuso que los Diagramas de Forrester representan modelos y funciones continuas; sin embargo su simulación es discreta ya que se realiza por medio de un computador (Iñaky, 2010). Esto significa que en lugar manejar diferenciales de tiempo,  $dt$ , se utilizan incrementos o intervalos discretos de tiempo,  $\Delta t$ . Así, la ecuación que representa la variable de nivel observada en la figura 3.7 se escribe como:

$$\text{Nivel}(t + \Delta t) = \text{Nivel}(t) + (\text{Entrada}(t) - \text{Salida}(t)) \Delta t$$

**Figura 3.7.** Ecuación de nivel

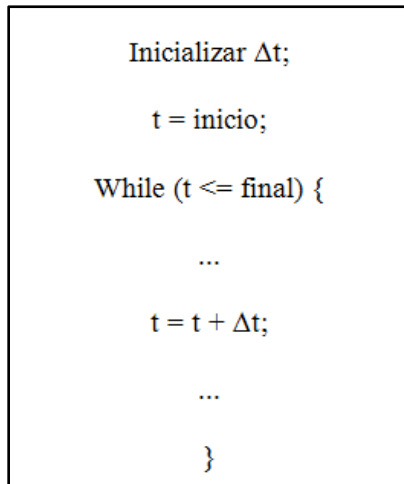
Ecuación que va asociada a un proceso que integra, o acumula, la variable nivel en el intervalo de tiempo {inicio, final} y que se sintetiza en el algoritmo 1 de la Figura 3. 8.

```
for (t = inicio; t<=final; t=t+Δt)
Nivel[t] = Nivel[t-1] + (Entrada-Salida);
```

**Figura 3. 8.** Algoritmo 1 de la acumulación del nivel de la Figura 3. 7.

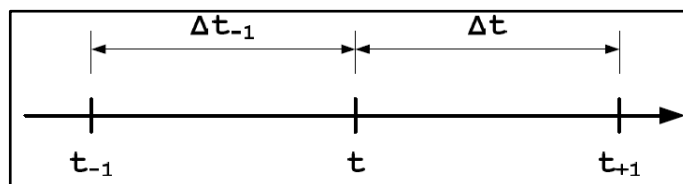
En este sentido, la simulación de un modelo de dinámica de sistemas (DS), se basa en un motor que es una estructura iterativa que dura el horizonte de tiempo definido, por ejemplo, para el mismo intervalo {inicio, final}, y en la que cada iteración el tiempo ( $t$ ) incrementa  $\Delta t$  como se muestra en el algoritmo 2 de la Figura 3. 9.





**Figura 3. 9.** Estructura del algoritmo básico del motor iterativo de simulación en DS.

El motor de simulación en cada instante o punto de muestreo  $t$ , maneja cinco elementos de tiempo como se muestra en la Figura 3. 10, donde además del tiempo presente ( $t$ ), el tiempo siguiente ( $t+1$ ) y el tiempo anterior ( $t-1$ ), se tienen en consideración tanto el intervalo siguiente  $\Delta t$  como el intervalo anterior  $\Delta t-1$ .



**Figura 3. 10.** Instante de tiempo durante simulación (adaptación, Iñaki, 2010).

De cara a entender el proceso básico de simulación conviene tener claro que el tratamiento y el tipo de ecuaciones de la cada tipo básico de variables (nivel, flujo y auxiliares) es diferente. Un nivel es función exclusiva del propio nivel y de los flujos asociados. Sin embargo el cálculo de las variables de flujo y auxiliares es más elaborado pues dependen de los niveles, de las variables auxiliares y de los flujos previos. También hay que tener en cuenta que los niveles se miden en los puntos de muestreo ( $t$  o  $t-1$ ), mientras que los flujos se calculan en los intervalos existentes entre dos puntos de muestreo ( $\Delta t$  o  $\Delta t-1$ ). Teniendo en cuenta estas consideraciones, el motor de simulación de un modelo de Dinámica de Sistemas se puede resumir en la Figura 3. 11.

```

Inicializar parámetros;
Inicializar  $\Delta t$ ;
t = inicio;
Inicializar niveles en t; /* N[t] = N_inicial; */
while (t <= final) {
    Calcular variables auxiliares en t;
    /* aux[t] = f(N[t],aux[t-1], flujo[ $\Delta t$ -1]); */
    Calcular flujos en  $\Delta t$ ;
    /* flujo[ $\Delta t$ ] = f(N[t],aux[t], flujo[ $\Delta t$ -1]); */
    Calcular niveles en t+1;
    /* N[t+1] = N[t] +  $\Delta t$ *f (flujo[ $\Delta t$ ]); */
    Desplazar: [t]  $\rightarrow$  [t-1]; [t+1]  $\rightarrow$  [t]; [ $\Delta t$ ]  $\rightarrow$  [ $\Delta t$ -1];
    t = t +  $\Delta t$ ;
}

```

**Figura 3. 11.** Algoritmo básico del motor de simulación de Dinámica de sistemas (Iñaki, 2010).

Conforme la complejidad del modelo bajo análisis aumenta, esta estructura se extiende y es generaliza para cada tipo de variable, por lo que es posible que en modelos en los que intervienen dos o más variables de nivel se presenten problemas en el planteamiento de las ecuaciones y su consistencia dimensional. En este sentido, los modeladores de dinámica de sistemas han desarrollado una amplia variedad de pruebas específicas para identificar las debilidades del modelo y así poder mejorarlos.

### 3.4.7. Validación en dinámica de sistemas

La validación en dinámica de sistemas consiste en ir ganando confianza en el modelo a través de ir aprobando una serie de pruebas y análisis para aseverar su validez y calidad (Forrester, 1968; Barlas, 1996; Sterman 2000). Los análisis tienen como propósito por un lado, comprobar la consistencia lógica de las hipótesis dinámicas, y por el otro, realizar análisis de sensibilidad que permiten conocer los factores que tienen mayor influencia en el comportamiento del modelo. (Sterman, 2000; Cedillo y Sánchez, 2013)

El objetivo de la validación es verificar que el modelo cuantitativo, por un lado, cumple con la consistencia de dimensiones de las ecuaciones que describen ha dicho modelo, y por otro lado, se evalúa también que tan confiable es el modelo para reproducir las conductas del sistema real. (Franco & Echeverri, 2010).

En la presente investigación se realizaron las pruebas sugeridas por diversos modeladores como son Forrester (1968), Sterman (2000) y Barlas (1996) entre otros. Las pruebas consisten en validar la consistencia dimensional, hacer pruebas de condiciones extremas, observar si se reproduce la conducta deseada o si se producen comportamientos sorprendidos, finalmente se propone realizar análisis de sensibilidad en busca de la mejora continua del sistema.

#### **3.4.7.1. Consistencia dimensional**

Una de las pruebas básicas que se deben realizar al modelo es la de verificar la consistencia dimensional entre los diferentes elementos del modelo. Una inconsistencia dimensional podrá revelar errores que es necesario corregir antes de seguir realizando pruebas al modelo. Incluso en algunas ocasiones las inconsistencias representan advertencias de que la estructura del modelo debe ser analizada nuevamente.

El procedimiento general consiste en revisar detenidamente que cada ecuación y cada parámetro del modelo tengan consistencia en sus unidades, con la intención de prevenir errores al momento de que se ejecuten los cálculos correspondientes en la simulación e incluso para evitar que se establezcan conclusiones erróneas sobre el comportamiento del sistema bajo estudio (Sterman, 2000).

#### **3.4.7.2. Condiciones extremas**

Esta prueba consiste en examinar las reglas de decisión en el modelo y preguntarnos si la salida de dicha regla es válida y razonable incluso en condiciones extremas tanto de entradas como de salidas. Por ejemplo un inventario no puede tomar valores negativos por más que crezca la demanda, o es imposible que se generen nacimientos en una población si en dicha población no se cuenta con mujeres.

Esta etapa debe ser aprobada con contundencia ya que no es deseable que el modelo reproduzca conductas que en la realidad no sucederían. Con forme el modelo cumpla de manera satisfactoria con estas pruebas extremas se dice que el modelo es más robusto. Por otro lado cuando se produce una conducta inapropiada de parte del modelo, se debe efectuar un análisis profundo de la estructura y de las ecuaciones para identificar la causa raíz que provoca dicha conducta inesperada (Sterman, 2000; Sherwood, 2002).

### **3.4.7.3. Reproducción de conducta**

Desde sus inicios, la Dinámica de Sistemas ha vinculado la validación de un modelo con su objetivo. En este sentido, Forrester y Senge insisten en que un modelo se construye con una finalidad determinada y que su validez está determinada por el grado en que cumple dicho fin (Iñaki, 2010).

El objetivo es comprobar la similitud entre el comportamiento generado por el modelo y el del observado y/o previsto para el sistema real. Para ello conviene analizar si el modelo reproduce, o no las frecuencias, fluctuaciones y fases previstas. El interés debe dirigirse a conocer la naturaleza dinámica del comportamiento del sistema bajo una determinada situación, concentrándonos en identificar las condiciones que conducen o reproducen dicha conducta, en lugar de enfocarnos en conocer o pronosticar el momento exacto en que ocurrirá (Barlas, 2002; Sherwood, 2002).

### **3.4.7.4. Comportamiento sorpresivo**

En ocasiones la simulación del modelo puede dar como resultado un comportamiento inesperado. Esta circunstancia no tiene por qué hacer desconfiar del modelo, sino que debe entenderse como una oportunidad para comprender las causas que lo originan. La posibilidad de reconocer, y explicar, comportamientos no identificados a priori contribuye igualmente a incrementar la confianza en la utilidad del modelo.

Un modelo que sólo se comporte aceptablemente bajo determinadas condiciones controladas, sólo puede ser útil para analizar políticas que hagan que el sistema actúe dentro de dichos límites. Por lo tanto, incorporar al modelo el conocimiento sobre condiciones extremas mejora la comprensión y utilidad del mismo y, por ende, su confianza (Barlas, 1996; Sterman, 2000; Sherwood 2002).

### **3.4.7.5. Análisis de sensibilidad**

El objetivo de este análisis es ganar confianza en el modelo y hacer más robustas las conclusiones sobre el sistema en estudio. En esta fase se examina la consistencia del modelo ante cambios en los valores de los parámetros. Se busca constatar si cambios en los

parámetros del modelo pueden causar, o no, desviaciones en las pruebas de comportamiento ya realizadas.

La técnica radica en un proceso iterativo de modificación de los valores adoptados para los parámetros del modelo y examinar la salida resultante. El método manual consiste en cambiar el valor de uno (o varios parámetros a la vez) y realizar la simulación; a continuación, volver a cambiar el valor del parámetro y simular de nuevo; y repetir esta acción diversas veces hasta conseguir un abanico de valores de la salida. (Iñaki, 2010)

La finalidad es poder analizar cómo y en qué grado el cambio de una variable incide en el resultado y detectar las variables críticas que más afectan al resultado, para las cuales el modelo es más sensible. Además de localizar las variables que tienen poca influencia en el comportamiento del modelo.

Sterman (2000), propone que este análisis se efectuó en tres etapas, en la primera nos habla de una sensibilidad numérica, la cual se presenta cuando ocurre un cambio en los supuestos generan un cambio en los valores numéricos de los resultados. La segunda etapa evalúa la sensibilidad en cambios de comportamiento, lo cual se presenta cuando un cambio en los supuestos genera un cambio en los patrones de conducta del modelo. La tercera etapa corresponde a una sensibilidad a las políticas, en las que un cambio en los supuestos hace que se revierta el impacto deseado de una política propuesta.

Cada una de estas etapas de análisis de sensibilidad, se utilizan dependiendo el tipo de propósito del modelo. En la presente investigación el análisis de sensibilidad está orientado a ganar conocimiento sobre el comportamiento del sistema. Esto debido a que no es propósito del modelo pronosticar el momento en que se presentara la siguiente disrupción, el propósito es conocer cómo la cadena de suministro se comportara o responderá ante los cambios repentinos que generan las disrupciones de alto impacto. Así como sus efectos se propagan por la red de suministros de principio a fin en los diferentes escenarios de análisis.

#### **3.4.8. Análisis de escenarios**

En el mundo real las variables suelen estar interrelacionadas por lo cual necesitamos una metodología que nos permita observar cuál es el efecto de algunas combinaciones posibles, incluso poco probables. Por lo tanto, de cara a aumentar la confianza en el modelo, se

necesita comprobar la robustez y la flexibilidad del modelo ante cambios significativos. Una forma eficaz de evaluar estas propiedades es el análisis del modelo sometido a una serie de escenarios alternativos y representativos.

El análisis de escenarios refuerza la confianza en el modelo porque ayuda a superar la comodidad de planificar sobre la base de las mejores predicciones, ya sea por un exceso de confianza o por temor a la incertidumbre que conlleva cualquier planificación.

También permite Mejorar y ampliar la calidad del enfoque estratégico ya que con su uso se pueden tomar decisiones en el contexto de los diferentes futuros que pudieran llegar a pasar. El propio hecho de plantear los escenarios apropiados obliga a afrontar suposiciones sobre el futuro; y el acto de ensayar planes y tomas de decisiones sobre un modelo puede facilitar que se desarrollen estrategias robustas incluso si las circunstancias cambian.

#### **3.4.8.1. Escenarios de interés**

De acuerdo con Perez (2013), el sistema de transportación terrestre es el elemento más vulnerable en la cadena de suministro, en dicho reporte se expone que México y Estados Unidos se encuentran entre los lugares donde existe una mayor exposición a sufrir una disrupción de seguridad. Recientemente la Casa Blanca en su estrategia nacional para la seguridad para CSE, reconoce que el desarrollo de las naciones depende de eficientar y asegurar el tránsito de bienes en la CSE, resaltando la importancia de avanzar en el logro de dos metas que considera claves para el desarrollo de las naciones y el comercio internacional.

La primera tiene que ver con garantizar el flujo eficiente y seguro de bienes a través de la CSE. La segunda meta está relacionada a fomentar cadenas de suministro más resilientes (robustas) capaces de enfrentar disrupciones de manera rápida y permitiendo a la cadena de suministros regresar a un estado operativo en el menor tiempo posible.

En dicho documento también se señala que las cadenas de suministro hoy en día son especialmente vulnerables a tres factores: i) disrupciones provocadas por desastres naturales; ii) disrupciones por actos terroristas; y iii) disrupciones por actos criminales.

Ese documento de carácter oficial, coincide con lo que se identificó en la revisión crítica del estado del arte donde se clasifica tanto a las disrupciones por desastres naturales,

como por actos terroristas, como disrupciones de alto impacto que pueden llevar a una cadena de suministro a un paro total de manera momentánea o irrecuperable con consecuencias catastróficas para la cadena de suministros (Shefi, 2003, Pikket 2003; Sheffy 2005; Ganonkar, 2004).

En el siguiente capítulo se presentara detallada mente el modelo de evaluación, además se identificaran las variables exógenas y endógenas del sistema, se presentara la hipótesis dinámica, así como también se establecieran las ecuaciones a partir de la definición de los diagramas de causales y de Forrester para realizar el sistema de simulación que permitirá evaluar los escenarios de interés.

### **3.5. Conclusiones**

En este capítulo se presentó la metodología de investigación utilizada para desarrollar un modelo dinámico de evaluación y medición del impacto de disrupciones y su propagación en la cadena de suministro. Para su desarrollo se siguió un enfoque abductivo, lo que permitió que se construyera el modelo de evaluación dinámica considerando tanto la información bibliográfica disponible en el estado del arte así como también la opinión de los tomadores de decisión plasmada en la primer encuesta exploratoria nacional sobre seguridad en cadenas de suministro de exportación

La metodología elegida para la construcción del modelo dinámico de disrupciones de alto impacto en CSE fue la dinámica de sistemas, esto gracias a sus características ideales para manejar por un lado la complejidad de sistemas y por el otro su capacidad para medir de manera dinámica y simultánea los efectos de la propagación de principio a fin en todos los eslabones de la cadena.

La validación de un modelo de DS, significa asegurarse de que sus ecuaciones son técnicamente correctas. Forrester (1968) ha insistido en que las ecuaciones deben ser dimensionalmente consistentes y que las variables y los parámetros deben estar claramente especificados.

Asimismo, se delimitaron los escenarios que analizaran en el modelo de evaluación, que son: i) disrupciones por desastres naturales; ii) disrupciones por actos criminales; y iii) disrupciones por actos terroristas.

# Capítulo 4

## **Análisis y discusión de resultados**

En este capítulo se presenta el proceso de construcción del modelo dinámico desarrollado para evaluar el impacto de la propagación de interrupciones de seguridad en CSE. En una primera etapa, se define la estructura de la cadena de suministro que nos permitirá evaluar de manera precisa el comportamiento del sistema ante interrupciones de alto impacto. Posteriormente en una segunda etapa, se construye la hipótesis dinámica partiendo de la identificación de variables de interés y de la definición de sus interrelaciones observadas en el diagrama causal. Como una tercera etapa, se presentan las relaciones matemáticas que describen las relaciones que tienen entre sí los diferentes actores que intervienen en la CSE, donde dichas relaciones fueron establecidas de manera cualitativa anteriormente en el diagrama causal. Finalmente, se presenta la evaluación de los tres escenarios específicos (desastres naturales actos criminales y actos terroristas) haciéndose un análisis crítico de resultados para cada escenario de interés, sin que ello sea limitativo de las capacidades del modelo para evaluar otros tipos de interrupciones.



#### **4.1. Introducción**

La modelación de escenarios ha sido utilizada por los investigadores y tomadores de decisión como un laboratorio para comprender el comportamiento de los sistemas y poder así hacer entender el pasado, el presente y elaborar predicciones sobre eventos futuros (Wasson, 2006). En este sentido, el uso de la dinámica de sistemas como una herramienta pertinente para el análisis de escenarios, nos plantea la necesidad de estudiar los sistemas con una visión global. La cual permite conocer el efecto que las decisiones presentes tienen en el comportamiento del sistema en estudio.

El presente capítulo se subdivide en cuatro secciones, en la primer sección, el objetivo es mostrar el modelo de evaluación dinámica desde una etapa de conceptualización y modelado hasta su desarrollo. Ello tiene por objeto analizar el efecto de la propagación del impacto disruptivo en la cadena de suministro como resultado de la materialización de uno de los eventos de interés (desastres naturales, actos terroristas, y actos criminales). En la segunda sección el modelo se somete a una fase de validación de acuerdo con las metodologías presentadas por Forrester (1968), Barlas (1996) y Sterman (2000), las cuales se discutieron en el capítulo tres. Finalmente en una cuarta sección se presentan y discuten los resultados de la evaluación para cada escenario de interés.

#### **4.2 Mapeo de la cadena de suministro**

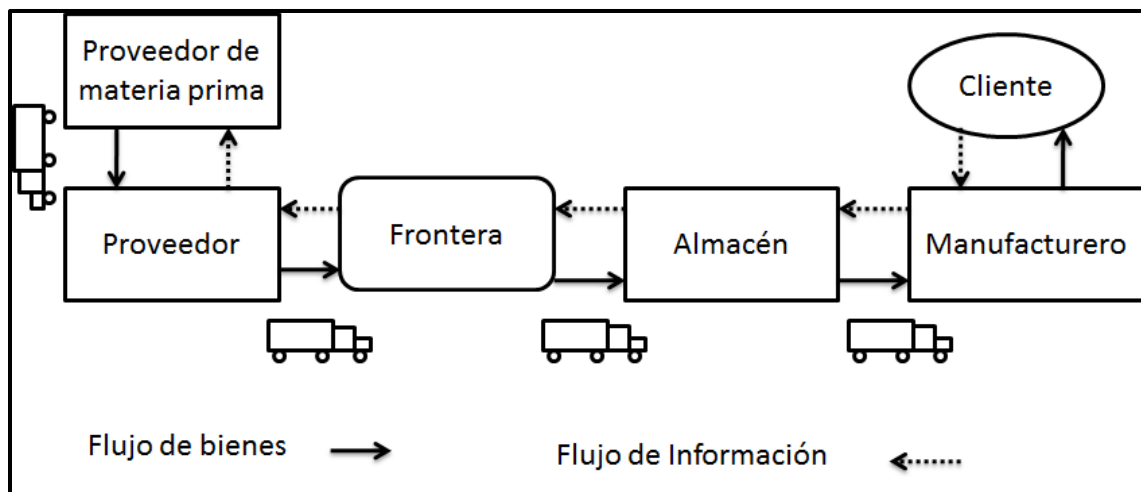
El mapeo de la estructura de una CSE propuesta en la presente investigación está orientado a representar de manera generalizada la forma en la que los procesos agregan valor a la cadena. También tiene como objetivo mostrar de forma clara la influencia que cada actor o acción tiene en la seguridad en la CSE, además que dicho mapeo deberá ser flexible a la inclusión de nuevas variables o procesos.

Generalmente, la estructura básica de cadena de suministro está conformada por un proveedor, un manufacturero, un distribuidor, un minorista y el cliente. Sin embargo esta estructura general no captura el efecto crítico que tiene el proceso de cruce de frontera, el cual está presente en toda CSE y que es un proceso clave en el análisis aquí propuesto.

En este sentido, para asegurar que el objetivo planteado en la investigación sea alcanzado, y considerando tanto las variables de interés identificadas durante la revisión de la literatura, así como en el trabajo de campo en el marco de la primer encuesta nacional de

seguridad en cadenas de suministro, se pudo constatar la complejidad que se presenta en el análisis de la CSE dada la identificación múltiples relaciones entre los diferentes niveles o actores de la CSE. Por lo tanto, con el objetivo de hacer posible y confiable el análisis dinámico de la propagación de impactos ante la materialización del riesgo, fue necesario tomar la decisión de acotar la estructura de modelo de una cadena de suministro incluyendo el análisis de comportamiento con el proceso de cruce de frontera.

De esta forma, el modelo de cadena de suministro construido a partir del caso de estudio de la compañía ABC presentado y analizado por Cedillo et al., (2012), quedó conformado por los siguientes componentes básicos: a) Proveedor de materias primas; b) Proveedor de componentes; c) Frontera Internacional; d) Buffer administrado por el proveedor de componentes; y e) manufacturero que cumple con la función de cliente (Figura 4. 1). Donde la demanda del cliente fluye desde el último eslabón aguas abajo de la cadena de suministro (manufacturero), al primer eslabón aguas arriba de la cadena (proveedor de materias primas).



**Figura 4. 1.** Flujo de bienes e información a través de la frontera (Cedillo et al., 2012).

Si bien podría parecer un sistema lineal, la complejidad de una cadena de suministros global se multiplica a medida que se integra a un mayor número de eslabones. En realidad, se debe considerar que cada organización participa al mismo tiempo en varias cadenas de suministro, las cuales tienen diferentes requerimientos y objetivos (Wu et al., 2007). De este modo, dado que las CSE son sistemas complejos en donde las relaciones lineales entre

el flujo de bienes e información son poco comunes. En consecuencia la delimitación de la estructura de cadena de suministro propuesta resultó válida debido a varios aspectos clave, entre ellos: i) No se identificaron trabajos cuantitativos pre-existentes considerando la propagación de las interrupciones en cadenas de suministro globales, ii) No existe un consenso sobre que variables deben considerarse para medir el efecto de interrupciones en CSE y iii) El principal objetivo de investigación fue desarrollar un primer modelo básico capaz de establecer escenarios de análisis dinámico para medir el impacto en costos y nivel de servicio de dichas interrupciones.

En este contexto, se identificó que una forma pertinente de analizar sistemas complejos es la simulación de sus procesos a través del enfoque de dinámica de sistemas. Esta metodología fue elegida debido a que la evidencia sugiere que el análisis del riesgo no responde a una relación simple de causa-efecto, sino que se observa que la causa y el efecto ocurren de manera simultánea en el tiempo a través de los diferentes eslabones de la CSE. Además, la flexibilidad de la herramienta de simulación para analizar interrelaciones múltiples a través del tiempo por medio del análisis causal o estructural de la problemática abordada, permitió obtener una representación ordenada del sistema bajo estudio.

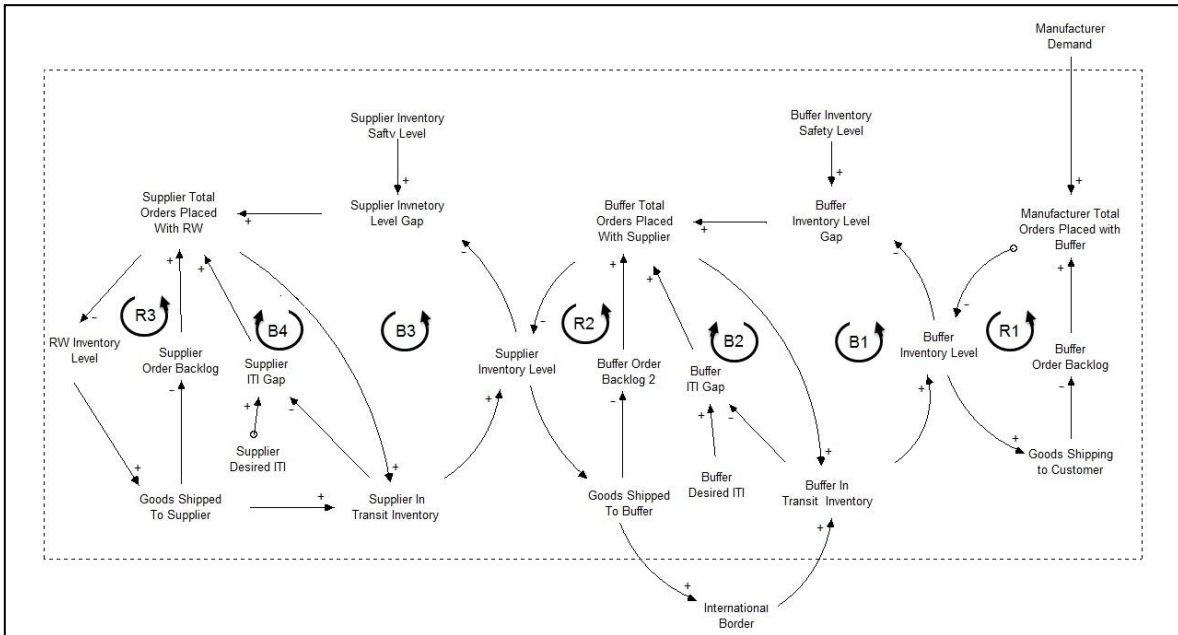
En este sentido, las variables identificadas como claves para el análisis en cada etapa, surgen como resultado del trabajo de campo y de una amplia revisión de la literatura, los cuales además componen dos subsistemas básicos. El primero corresponde a un proceso de reforzamiento, el cual está constituido por la generación de órdenes o pedidos (demanda) y el segundo proceso o subsistema, está representado como un ciclo de balanceo, que está conformado por el proceso de abastecimiento. De estos dos procesos generales se identifican como sigue:

- **Demanda del cliente / Customer Demand (Ds):** Es la demanda del cliente correspondiente a cada periodo (s).
- **Ordenes pendientes / Order Backlog (OB):** Es la cantidad de órdenes que aún están pendientes de ser entregadas al cliente.
- **Ordenes totales / Total Orders Placed (TOP):** Es la cantidad total a surtir por parte del nivel inventario y se integra por la suma de Ds y OB.
- **Nivel de Inventario / Inventory Level (IL):** Es el comportamiento del nivel de inventario para cada etapa de la cadena de suministros.

- **Bienes enviados al cliente / Goods Shipped to Customer (GSC):** Es la cantidad de bienes que se envía en cada periodo al cliente inmediato. Si la cantidad enviada es menor a la ordenada por el cliente, se generan OB.
- **Inventario de seguridad / Safety Stock (SS):** representa el nivel deseado de inventario. Ayuda a que realicen los ajustes necesarios para mantener el nivel deseado de inventario evitando que este crezca o disminuya sin control.
- **Inventario en tránsito / In Transit Inventory (ITI):** Es la cantidad de inventario en tránsito. Representa GSC del periodo superior
- **Inventario en tránsito deseado / Desired in Transit Inventory (DITI):** Es el nivel deseado de inventario en tránsito. Ayuda que se realicen los ajustes necesarios para mantener el nivel de inventario en tránsito deseado.

#### 4.2.3 Hipótesis dinámica

Una vez identificadas las variables de interés se prosiguió a construir el diagrama causal para comprender las relaciones que rigen el comportamiento del sistema. Los diagramas causales que representan los bucles de la demanda y de abastecimiento, se describen a continuación en la Figura 4. 2.



**Figura 4. 2.** Diagrama causal de las relaciones de interacción entre el Manufacturero, Buffer, proveedor de componentes y proveedor de materia prima.

En el diagrama causal podemos identificar dos procesos que giran en torno a la variable de interés “nivel de inventario”. Por un lado encontramos el bucle de la demanda, el cual tiene una polaridad positiva y se identifica en el diagrama causal como **R1**, **R2** y **R3**. Por el otro lado, existen dos bucles de aprovisionamiento los cuales son representados por **B1** y **B3**, el cual cuenta con un sub proceso correspondiente al inventario en tránsito **ITI**, nombrado **B2** y **B4** respectivamente. Cabe señalar que estos últimos cuatro bucles muestran una polaridad negativa y el comportamiento de cada uno permite mantener equilibrando el subsistema en torno a una meta que en este caso es el nivel de inventario (servicio) deseado. La primera meta correspondiente a **B1** y **B3**, consiste en mantener el nivel de inventario en torno a “**SS**”, buscando así evitar rupturas por escasas de inventario en la cadena de suministros. La segunda meta correspondiente a **B2** y **B4**, contribuye a mantener la línea de suministros estable impidiendo el desabasto de bienes con el cliente. Esto se logra comparando el inventario en tránsito deseado con el nivel de inventario en tránsito real.

En los bucles **R1**, **R2** y **R3** se observa que la variable “**TOP**” está influenciada positivamente por “**Ds**” y el “**OB**” acumulado de periodos anteriores. Así mismo “**TOP**” tiene una relación negativa con el nivel de inventario quien se encarga de satisfacer la demanda. La variable “**GSC**” representa la cantidad de bienes enviados al cliente y equivale a la cantidad mínima de bienes entre la demanda total y el nivel de inventario disponible. De esta forma, las órdenes que quedan pendientes de envío se acumulan en la variable “**OB**”. Finalmente la acumulación de órdenes pendientes incrementa la cantidad de pedido para el siguiente periodo. Ello contribuye a que se tenga un ciclo que se refuerza constantemente, el cual por un lado conlleva la disminución del nivel de inventario y por otro lado, al aumento de “**TOP**”. En consecuencia, el bucle conduce a la entropía del sistema.

Así mismo, los bucles **B1** y **B3** consisten en el abastecimiento del nivel de inventario, los cuales tienen la estructura de un buscador de metas. Esta condición mantiene el nivel de inventario en torno a un nivel de inventario deseado, lo que permite equilibrar constantemente el subsistema. Si bien en los bucles **R1**, **R2** y **R3**, observamos que “**IL**” disminuye conforme se envían bienes al cliente, ahora podemos identificar que “**IL**” se incrementa conforme se recibe “**ITI**”. Este inventario en tránsito en realidad representa los

bienes que fueron enviados por el proveedor al cliente inmediato. De esta forma, si el “**ITI**” es alto, la diferencia respecto al nivel de “**SS**” y “**IL**” será menor. Esta condición implica que se coloquen menos órdenes con el proveedor y así, el sistema tendrá una menor cantidad de bienes en tránsito en el siguiente periodo. En consecuencia, el “**IL**” recibirá una menor cantidad de “**ITI**” y al comparar de nuevo el “**IL**” y el “**SS**”, se tendrá una diferencia mayor respecto al nivel deseado. Esta nueva condición provoca que se coloquen una mayor cantidad de órdenes con el proveedor, generando que posteriormente se incremente el “**IL**” equilibrando así constantemente el sistema en torno al nivel de seguridad deseado. Finalmente, los bucles **B2** y **B4** monitorea el “**ITI**” el cual influye de manera directa en la cantidad de pedido. Es decir la cantidad de pedido está en función de la diferencia entre “**DITI**” y “**ITI**” actual.

#### 4.2.4 Ecuaciones del modelo.

Las ecuaciones que describen estos subsistemas se explican a continuación:

$$\text{Customer demand} = D_s \quad (1)$$

Donde  $s$  (número de periodos)= 1... 180 periodos.

y  $s_{i-1}$  = representa el periodo anterior

$$\text{Total Orders Placed (TOP)} = D_s + O_Bs \quad (2)$$

Donde

$$\text{Order Backlog (OB)} = D_s - GSCs \quad (3)$$

Donde GSC equivale al valor mínimo entre el nivel de inventario y TOP. GSC se calcula:

$$GSC = \min (ILs, TOPs, MGS) \quad (4)$$

Donde MGS es la capacidad máxima de bienes que se mueven de una estación a otra y es establecida en  $\pm 33\%$  de  $D_s$ .

El nivel de inventario (IL) se calcula utilizando:

$$IL = IL + ITI - GSC \quad (5)$$

Donde ITI representa el inventario en tránsito que incrementará al nivel de inventario y se calcula de la siguiente manera:

$$ITI = ITI + TBDs - GSM \quad (6)$$

Donde la demanda total del buffer (TBDs) se determina con la siguiente ecuación propuesta por Rong et al. (2011):

$$\mathbf{TBDs} = \mathbf{max}(0, \widehat{\mathbf{O}} + \alpha(\mathbf{IL} - \mathbf{SS}) + \beta(\mathbf{IP} - \mathbf{IL} - \mathbf{DITI}) + \gamma\mathbf{S} \quad (7)$$

donde IP representa la cantidad de bienes que actualmente se encuentran en la línea de suministro y se cálcala de la siguiente manera:

$$\mathbf{IP} = \mathbf{ITI} - \mathbf{IL} \quad (8)$$

Donde  $\widehat{\mathbf{O}}$  representa el pronóstico de la demanda y se calcula:

$$\widehat{\mathbf{O}} = n\widehat{\mathbf{O}}_{s_{i-1}} + (1-n)\widehat{\mathbf{O}}_{s_{i-1}} \quad (9)$$

De acuerdo con Rong et al. (2011), n es un factor de suavizado de la demanda y puede tomar valores de  $0 < n < 1$ . Debido a que en el modelo propuesto la demanda es conocida, los autores sugieren que  $n=0$ . Por lo cual podemos concluir que:  $\widehat{\mathbf{O}} = \widehat{\mathbf{O}}_{s_{i-1}} = \mathbf{D}_{s_{i-1}}$

Las constantes  $\alpha$  y  $\beta$  son parámetros de ajuste que ayudan a controlar los cambios en la variable de cantidad total de pedido “**TOP**”, cuando el nivel actual de pedido y la línea de suministro se desvían de los niveles deseados “metas”. En modelo dinámico aquí propuesto, estas metas son responsables de mantener el equilibrio del sistema por lo que es importante identificarlas claramente. En este sentido, si se analiza la ecuación (7), en el segundo término correspondiente al nivel de inventario, se puede identificar la variable “**SS**” que representa el stock de seguridad y tiene la función de mantener el nivel de inventario entorno a una meta deseada. En el tercer término de la ecuación, se puede identificar la variable “**DITI**” que representa el nivel de inventario en tránsito deseado y al igual que “**SS**”, su función es mantener el inventario en tránsito en torno a una meta. El último término de la ecuación corresponde a una señal de disrupción representada por “**S**” y “ $\gamma$ ” se refiere a la política que se sigue para manejar o enfrentar la disrupción que puede ser de tres formas, ignorar la disrupción, reaccionar de forma reactiva o actuar de manera proactiva.

De esta forma “**S**” puede tomar valores de uno cuando el sistema se encuentra bajo efectos disruptivos y de lo contrario el valor será de cero. Por otro lado “ $\gamma$ ” representa la política que se toma para minimizar los efectos de la disrupción así,  $\gamma < 0$  significa que los administradores tienden a ordenar menos durante el periodo disruptivo. Si  $\gamma = 0$ , los administradores toman una postura reactiva ante la disrupción y no varía su política de pedidos (simplemente ignoran la disrupción). Así mismo cuando  $\gamma > 0$  los administradores

tienden a ordenar más bienes durante un periodo de disrupción (e.g., para protegerse contra posibles periodos disruptivos futuros, o enfrentar la eminente escasez). Sin embargo basados en las investigaciones de Forrester (1968), Sterman (1989), Sterman (2000), Wilson (2007) y Cedillo y Sánchez (2013), hemos propuesto un cambio en la ecuación (7) para que cumpla con la estructura de un buscador de metas y la reformulación se presenta a continuación:

$$\mathbf{TBDs} = \mathbf{max}(0, \widehat{\mathbf{O}} + \mathbf{OB} + \alpha(\mathbf{SS} - \mathbf{IL}) + \beta(\mathbf{DITI} - \mathbf{IP} - \mathbf{IL}) + \gamma\mathbf{S}) \quad (10)$$

Si comparamos (7) y (10), podemos observar dos cambios fundamentales en el orden y el manejo de las variables exógenas “SS” y “DITI”. Por un lado, en la ecuación (7) las variables mencionadas no cumplen con la función de mantener el inventario en torno a un valor objetivo o meta, la cual corresponde a la estructura fundamental del modelo en discusión. Por el contrario, la relación causal mostrada por ambas variables, contribuyen a que el sistema refuerce su comportamiento conduciéndolo a la entropía en lugar de ayudar a balancearlo.

En el modelo propuesto por Rong et al., (2011), para lograr un comportamiento balanceado plantean el uso de parámetros de ajuste  $\alpha$  y  $\beta$  negativos. Estos parámetros además permiten evaluar distintas políticas administración de la cadena de suministros. De esta forma si  $|\alpha| > |\beta|$ , entonces se tiene una administración de cadena de suministro en la que se sub-pondera la línea de suministro. Pero por otro lado si  $|\alpha| < |\beta|$ , significa que los administradores sobre-ponderan la línea de suministros.

Nuestra propuesta en la ecuación (10) consistió, en cambiar la relación presentada entre las variables “SS” y “IL”. Dicho replantea el orden en que se efectúa la sustracción entre ambas variables. Así como también se cambia la relación y el orden en que se efectúa la sustracción entre “DITI” y “ITI” todo ello con respecto a la ecuación (7).

Estos cambios obedecen a que se identificó que los bucles **B1** y **B3**, requieren una estructura en la que la variable de interés sea comparada de manera periódica con un nivel deseado “meta” y ante la diferencia en los niveles actuales y deseados, se tome una acción correctiva que contribuya a generar un balance. Además se identifica que con este cambio



ya no se depende de los parámetros de ajuste propuestos por Rong et al. (2011), los cuales incluso podrían ser eliminados de la ecuación (10) y así permitir la evaluación de una mayor diversidad de escenarios de interés. Este cambio también permitirá el análisis de distintas políticas de administración de la cadena de suministros en ausencia de dichos parámetros. Para efectos de la modelación expuesta en la presente investigación, se decidió que dichos parámetros permanecieran en la ecuación y que tomarán los valores iniciales propuestos por Rong et al. (2011) de  $\alpha$  igual a 0.1 y de  $\beta$  igual a 0.2. Esto permitió ponderar el estado de la línea de suministros, lo cual es una característica de interés en el modelo aquí propuesto.

En la siguiente sección se presentaran las pruebas iniciales, así como también se expone el proceso de validación del modelo. Cabe señalar que dichas pruebas de validación se realizaron con base a lo indicado por Forrester (1968), Barlas (1996) y Sterman (2000). Por otro lado las pruebas iniciales consistieron en presentar el comportamiento de los inventarios en ausencia de una interrupción. Cabe señalar que dicho escenario base, se tomó como referencia para ser comparado con el comportamiento resultante de cada escenario de interés.

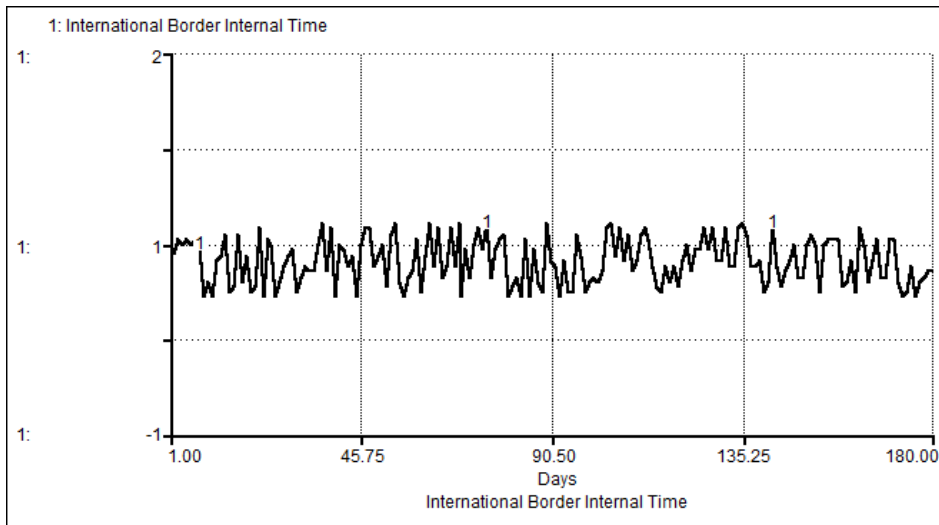
#### **4.3 Pruebas iniciales y validación del modelo**

Debido a la dificultad experimentada a lo largo del proyecto para acceder a la información, los impactos disruptivos se midieron en función del cambio en el comportamiento de los niveles de inventario, así como también se compararon los costos totales de la cadena de suministro. Dentro de los costos se consideraron los costos correspondientes al manejo de inventario y los costos de incumplir con órdenes del cliente. También, se consideraron los costos generados por la pérdida de las mercancías como resultado de la interrupción por actos criminales en la cadena de suministro. Cabe señalar que a pesar de que el modelo que se propone aquí es para evaluar tres escenarios de interés específicos en una CSE base, la estructura estándar del modelo puede ser generalizada a otras cadenas de suministro internacionales con actividad exportadora.

La simulación del modelo se realizó y simuló con el software especializado para la construcción y evaluación de sistemas dinámicos STELLA 9.1.3. Para ello, se consideró un periodo o ventana de 180 días consecutivos, correspondientes a un horizonte de planeación

de seis meses. Esto en función de lo explicado por Chopra y Meindl, (2008), quienes argumentan que periodos de planeación menores a un año, permiten a los administradores incorporar flexibilidad a la cadena de suministros facilitando explotarla para optimizar el desempeño de la misma. Cabe señalar que dado que el sistema analizado recibe órdenes diarias, el parámetro de cambio STEPTIME se fijó en uno. Además, para ilustrar como la incertidumbre de los tiempos de cruce de frontera afectan los niveles del inventario de seguridad en una CSE, se consideraran diferentes escenarios partiendo de la información recabada de la compañía ABC, la cual corresponde a una empresa manufacturera automotriz Tier 1 localizada en el clúster automotriz del estado fronterizo de Coahuila México. De acuerdo con la información obtenida por Cedillo et al., (2012), la demanda diaria de manufactura para el producto ( $\psi$ ) fue considerada como la entrada del modelo. Esta demanda es entregada normalmente en 1,296 unidades por día con una desviación estándar de 50 unidades. También se sabe que se requieren cuatro días para reabastecer el inventario del buffer situado del otro lado de la frontera. Uno de los requisitos impuestos por el cliente para la concertación de las operaciones para la planta de ensamble, es que este último requiere mantener como mínimo un inventario de seguridad equivalente a cinco días d nivel de inventario con el buffer (Almacenista). Finalmente para efectos de la simulación, en todos los escenarios analizados, se consideró utilizar tiempos aleatorios de cruce de frontera que de acuerdo con Cedillo et al., (2012), su distribución pueden variar de 1.77 hrs (en el mejor caso) a 16.77 hrs (en el peor caso) (Ver

Figura 4. 3).



**Figura 4. 3.** Comportamiento del tiempo de cruce de frontera (para conservar la consistencia de unidades de la información se presenta en días).

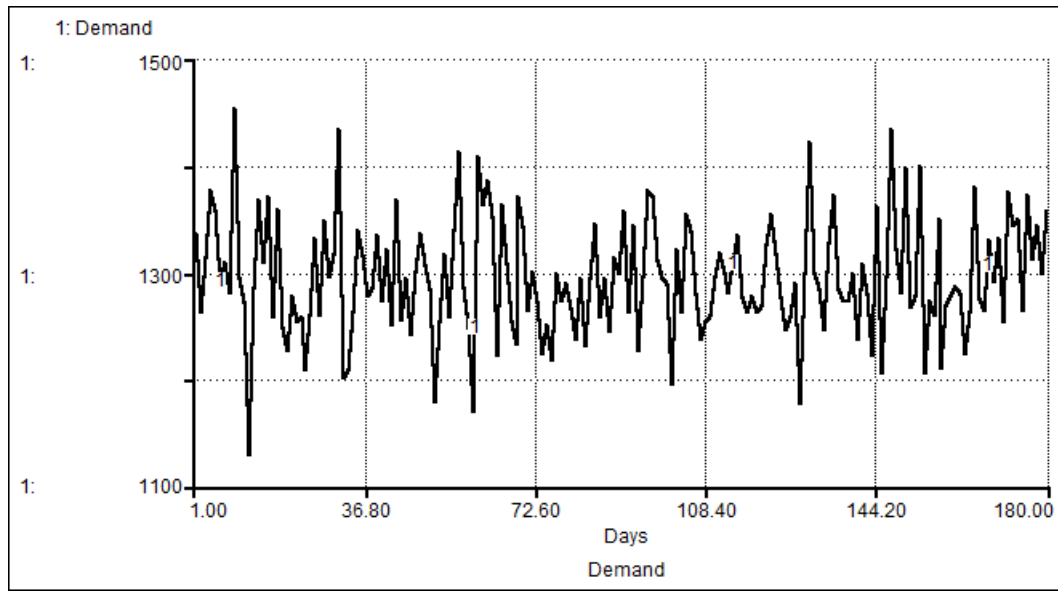
De igual forma, se calculó el comportamiento de la demanda para el horizonte de simulación en el que se consideró que la demanda promedio del producto “ $\psi$ ” es de 1,296 unidades con un rango de oscilación entorno a una demanda máximas de 1,454 unidades y mínima de 1,130 unidades (Figura 4. 4). El análisis del comportamiento de un escenario base del modelo evaluado, nos demuestra un nivel de inventario promedio es 6,474 unidades. Además el flujo promedio de mercancías embarcadas al manufacturero es de 1,296 piezas. De esta forma también el “**ITI**” se mantiene en torno a un nivel de 1,296 piezas.

Por otro lado, es necesario señalar que bajo estas condiciones iniciales del sistema, no se presentan órdenes pendientes a lo largo de todo periodo u horizonte de simulación. Este hecho nos permitió confirmar que la reconfiguración de la ecuación (10) explicada anteriormente, si permite mantener el equilibrio del sistema entre el inventario de seguridad, los envíos de unidades al cliente y su demanda existe (ver figura 4.5). Así mismo, se observa que el costo del sistema bajo estas condiciones asciende a \$6,623,895.90 dólares. Finalmente, con la intención de sólo medir la variabilidad derivada de las disrupciones, los parámetros de simulación iniciales

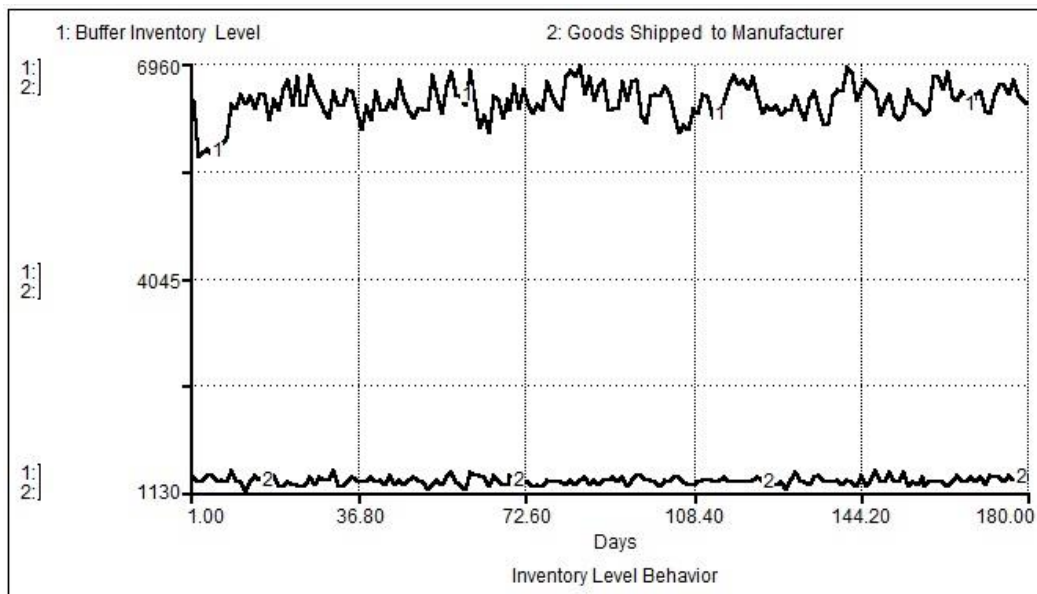
presentados en la Tabla 4. , serán retomados como un estándar para la simulación de todos los escenarios de interés en la cadena de suministros de exportación.

**Tabla 4. 1. Parámetros iniciales para la simulación del modelo de la compañía ABC.**

	Proveedor (en México)		Frontera Internacional	Buffer (Almacenista)	
	Inventario en transito	Nivel de inventario	Inventario en tránsito de frontera	Inventario en transito	Nivel de Inventario
Inventario Inicial	1300	1450	1300	1296	6480
Inventario inicial deseado	1300	1300		1300	6480
Tiempo de Transito	1		Min 1.77 hrs. Max 16.77 hrs.	2	
Costo de manejo de <i>IL</i> (dlls)		5			10
Costo de pérdidas en <i>IL</i> (dlls)		175			175
Costo de pérdidas en <i>ITI</i> (dlls)	125			125	



**Figura 4. 4.** Comportamiento de la demanda del manufacturero.



**Figura 4. 5.** Comportamiento base de CS sin interrupción.

Es importante señalar que todos los escenarios disruptivos tienen como punto inicial de interrupción el periodo o día 50. Esta medida se toma de acuerdo con Wilson (2007), quien argumenta que antes de simular la interrupción se debe asegurar la estabilidad del sistema evitando así incluir la variación natural del sistema a la variación resultante del comportamiento de la cadena durante un periodo disruptivo.

Una vez concluida esta simulación inicial que nos permite conocer el comportamiento del modelo bajo condiciones base de operación y antes de iniciar con la evaluación de los escenarios de interés, es necesario realizar las pruebas de validación presentadas en el capítulo 3

#### **4.3.1 Validación del modelo**

Como se estudió en capítulos anteriores la intención de validar un modelo de dinámica de sistemas no está enfocada a conocer con que precisión el modelo predice un evento futuro. El objetivo de esta etapa es verificar si la estructura del modelo representa o reproduce la conducta que se observa en el sistema o en la realidad. Es este hecho lo que hace que las pruebas de validación tradicionales, no cuenten con la fuerza requerida para la validación de un modelo en dinámica de sistemas. En este sentido tres de los precursores en esta técnica de investigación como son Forrester, Sterman y Barlas, nos proponen que las pruebas deben estar orientadas en validar o verificar la consistencia dimensional, para posteriormente conocer el comportamiento del sistema cuando se enfrenta a condiciones extremas y observar si se reproduce la conducta deseada o si se producen comportamientos sorpresivos que no se producirían en el sistema real. Finalmente proponen realizar análisis de sensibilidad en busca de la mejora continua del sistema. Todo ello en función de ganar confianza en el modelo y poder hacer observaciones más precisas sobre el comportamiento del sistema real cuando se enfrenta a disrupciones de seguridad de alto impacto.

#### **4.3.2 Verificación de consistencia dimensional**

Para esta etapa es recomendable elaborar una tabla que permita identificar a que categoría pertenece cada variable. Recordemos que en dinámica de sistemas podemos encontrar tres tipos de variables diferentes: Nivel (estado), Flujo y Auxiliares. También es posible clasificar a las variables como exógenas, cuando estas no pueden ser controladas por el modelo y como endógenas de otro modo. Por la naturaleza del modelo sólo la demanda del manufacturero puede ser considerada como una variable exógena. Si bien los tiempos de cruce de la frontera en la realidad tampoco pueden ser 100% predecibles, en el modelo se

consideró como endógena debido a que se supusieron los patrones de tiempo recomendados por Cedillo et al., (2012).

Para efectuar la revisión dimensional, se decidió que dada la estructura del modelo es necesario presentar una revisión ecuación por ecuación tanto del bucle de demanda como del bucle de aprovisionamiento. Para este ejercicio se dispuso tomar los bucles correspondientes al almacenista, ya que en esta sección se incluye el cruce de frontera. Recordemos que gracias a la generalidad del modelo, este puede repetir los dos ciclos mencionados para cada nivel que se agregue de manera posterior a la cadena de suministros por lo que la consistencia dimensional debe mantenerse sin importar que tan grande sea la estructura de la misma. Dicha revisión se organizó en cuatro variables de estado, cinco variables de flujo y 15 variables auxiliares y la consistencia dimensional pueden verse en la siguiente tabla (ver Tabla 4. 2, Tabla 4. 3 y Tabla 4. 4).

**Tabla 4. 2.** Consistencia dimensional para variables de estado

<b>Variable</b>	<b>Unidades</b>
Buffer Inventory Level	Unidades
Buffer Order Backlog	Unidades
Buffer In Transit Inventory	Unidades
International Border	Unidades

**Tabla 4. 3.** Consistencia dimensional para variables de flujo

Variable	Unidades
<b>Goods Shipped to IB</b>	Unidades/día 1 día = 1 Periodo
<b>Goods Shipped to Cross IB</b>	Unidades/día 1 día = 1 Periodo
<b>Goods Shipped to Buffer</b>	Unidades/día 1 día = 1 Periodo
<b>Goods Shipped to Manufacturer</b>	Unidades/día 1 día = 1 Periodo
<b>Buffer Fulfillment Rate</b>	Unidades/día 1 día = 1 Periodo

**Tabla 4. 4.** Consistencia dimensional para variables auxiliares

Demand	Unidades/día 1 día = 1 Periodo
Manufacturer order placed	Unidades/día 1 día = 1 Periodo
Buffer Safety Stock	Unidades/día 1 día = 1 Periodo
Buffer Desired ITI Level	Unidades/día 1 día = 1 Periodo
Buffer order function demand	Unidades/día 1 día = 1 Periodo
Buffer In transit Inventory IP	Unidades/día 1 día = 1 Periodo
Buffer Inventory Level IL	Unidades/día 1 día = 1 Periodo
Buffer to Manufacturer transit time	día
IB to Buffer Transit Time	día
IB internal Time	día
Supplier to IB Transit Time	día
A	Sin dimensión
B	Sin dimensión
S	Sin dimensión
Y	Sin dimensión

Una vez computadas cada una de las variables con sus respectivas unidades en STELLA, se ejecutó una prueba de verificación de la consistencia dimensional dentro del software de simulación. Esta evaluación por parte del software consiste en realizar las operaciones indicadas en las ecuaciones y confirmar que no se presenten inconsistencias dimensionales en sus resultados. El resultado de la evaluación en STELLA, arrojó un



mensaje positivo para la revisión de todas las ecuaciones y variables de nivel, flujo y auxiliares utilizadas por el modelo. (Ver Anexo 1).

Una vez evaluadas las unidades dimensionales presenten en el modelo de análisis, se puede afirmar que existe consistencia dimensional en las ecuaciones. En consecuencia, se concluye que el modelo ha aprobado de manera satisfactoria esta etapa, por lo que posteriormente el modelo debió ser expuesto la evaluación de condiciones extremas y verificar la existencia o no de conductas sorprendidas.

### 4.3.3 Pruebas extremas y conductas sorprendidas

Se validó que el modelo no reproducía una conducta indeseada, es decir, un comportamiento que regularmente no se exhibiría en el sistema real cuando dichas situaciones extremas se presentan. En un primer escenario denominado prueba A, se realizó una simulación en la que se colocó un nivel de demanda igual a cero para todos los periodos de evaluación. El comportamiento del sistema puede observarse en la Figura 4. 6. Condición base del sistema sin demanda.

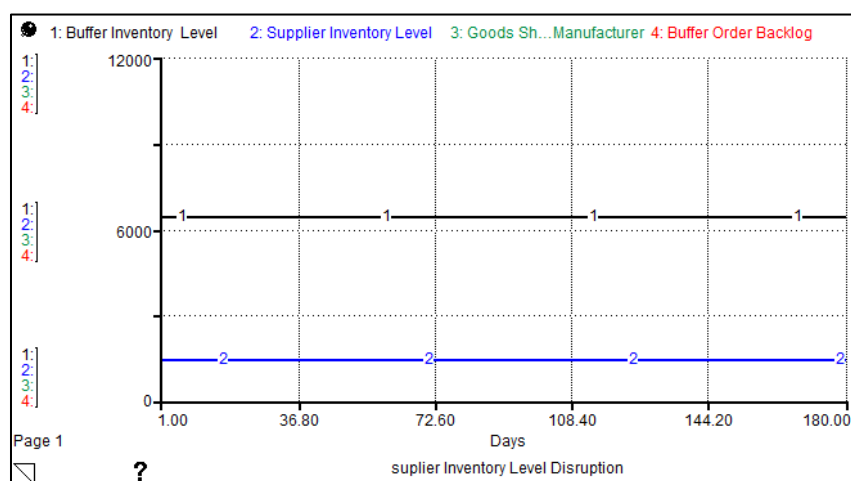
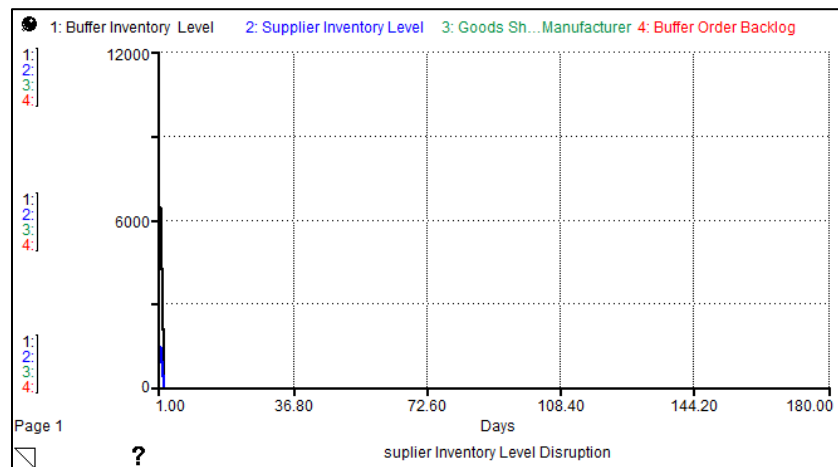


Figura 4. 6. Condición base del sistema sin demanda.

El resultado esperado de esta prueba es demostrar de manera cuantitativa el equilibrio cualitativo explicado en el diagrama causal de la sección 4.2.3 y Figura 4. 2 y que consiste básicamente en el hecho de que al no haber demanda, los bienes no son enviados al cliente y por tanto los niveles de inventario permanecen fijos en su nivel inicial, por lo que gracias

a la estructura de balance en el bucle de aprovisionamiento los diferentes elementos que participan en la cadena, no generan órdenes con su proveedor para ningún periodo ya que no hay diferencias entre los inventarios deseados y los niveles de inventario actuales. Este comportamiento de niveles constantes es contrario al expuesto en la Figura 4. 5, cuando se presentó el comportamiento base en el que el nivel de inventario está oscilando entorno a una meta y la variación del sistema se ve representada por la variación de la demanda.

Un segundo escenario extremo llamado prueba B, consistió en simular una interrupción total del sistema propuesto en un contexto de demanda cero. En este escenario se esperó que al existir una interrupción total de alto impacto los niveles de inventario disminuyeran rápidamente. Dicha interrupción se presentó en el día uno y se mantuvo a lo largo del horizonte de simulación. El comportamiento del sistema bajo estas condiciones se presenta en la Figura 4. 7 y se puede observar primeramente que todos los niveles de inventario caen hasta llegar a cero de manera inmediata. También se puede observar que al no existir una demanda, no se genera órdenes pendientes (**OB**) en ninguno de los niveles de la cadena de suministro.



**Figura 4. 7.** Interrupción total de la cadena de suministro sin demanda.

Así mismo la prueba C, fue un escenario extremo de simulación en el que se tuvo una interrupción total de la cadena de suministro igual que en la prueba B, pero con la diferencia de que la demanda del cliente se mantuvo en cada periodo de simulación.

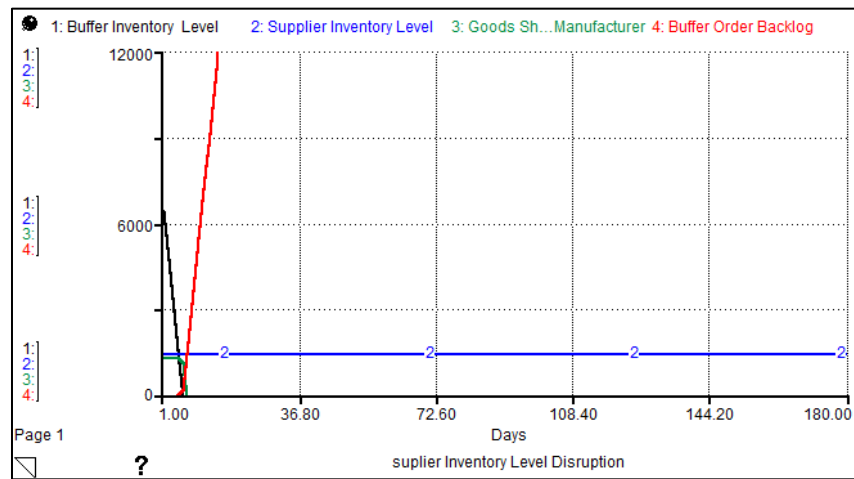


**Figura 4. 8** Disrupción total de la cadena de suministro con demanda.

Como puede observarse en esta prueba, se presentan dos comportamientos distintos. En el primero vemos como los inventarios caen de manera inmediata tal y como se comportó en la prueba de evaluación B. La diferencia se presenta en el segundo comportamiento ya que ahora la demanda periódica por parte del cliente continúa a pesar de la disrupción. En este contexto, es posible apreciar la acumulación de una gran cantidad de **OB** que crecen de manera rápida al no existir una respuesta por parte del modelo ya que las distintas entidades de la cadena de suministro se encuentran en un periodo disruptivo. Ello que impide procesar pedidos que permitan recuperar de manera gradual los niveles de inventario y afrontar la demanda del cliente.

Finalmente en la prueba D, se presentó un escenario en el que la disrupción sólo se materializa en el transporte de mercancías. Es interesante observar que al igual que el nivel de inventario a resguardo del Buffer o almacenista, disminuye de manera gradual al igual que los bienes enviados al cliente (goods shipped to Manufacturer). Mientras que por otro lado, el inventario del proveedor representado por la línea azul, permanece constante. Esto se debe a que aún y cuando el escalón inferior de la cadena (Buffer), coloca órdenes cada periodo, estas no pueden ser surtidas por el proveedor ya que el sistema no cuenta con transporte para mover la mercancía. De éste modo cuando el sistema compara el nivel de inventario actual con el nivel de inventario deseado en el proveedor, este se mantiene constante y no se generan pedidos para el horizonte de simulación. Otra característica interesante es que al igual que en la prueba C el nivel de ordenes pendientes (**OB**), se eleva

de manera considerable al no poder cumplir con la demanda periódica presentada por el cliente.



**Figura 4. 9** Disrupción total con demanda del cliente y sin soporte.

Después de concluir las cuatro pruebas extremas a las que fue sujeto el modelo, se determinó que el modelo reproduce los patrones de comportamiento observados en el sistema real. Además, cabe señalar que no se observaron patrones de conductas sorprendidas que indicaran alguna anomalía en la construcción del modelo de evaluación del impacto de la propagación de disrupciones de seguridad de alto impacto.

La siguiente etapa de validación del modelo consistió en efectuar una prueba de sensibilidad para conocer de qué manera se comporta el modelo ante cambios en los valores de los parámetros iniciales presentados en secciones anteriores en la Tabla 4. Sin embargo debido a las características propias del análisis de sensibilidad, este se llevó a cabo directamente en la evaluación de los escenarios disruptivos de interés los cuales se presentarán a en el siguiente punto.

#### **4.4 Modelación del Impacto de eventos disruptivos en el desempeño de la cadena de suministros de exportación en escenarios de interés. (Caso empresa ABC)**

Como se ha venido mencionando a lo largo del trabajo de investigación, para el análisis de escenarios de interrupción de suministro, se seleccionaron tres escenarios disruptivos de alto impacto expuestos en el NSGSCS. Los cuales además han sido identificados

plenamente como escenarios de interés para los tomadores de decisiones en las CSE que operan dentro del TLCAN (tratado de libre comercio para América del Norte) en el marco de la primer encuesta nacional exploratoria de seguridad (Cedillo et al., 2012)

#### **4.4.1 Escenario 1. Disrupción por actos terroristas**

El escenario disruptivo seleccionado para el análisis tomó en cuenta los argumentos expuestos en el NSGSCS. Para ello se evaluó tanto la interrupción al suministro de productos como resultado de ataques terroristas, así como el incremento del tiempo en el cruce de frontera derivado de una más extensiva política de revisión como consecuencia en el incremento de nivel en la alerta contra el terrorismo.

Sin duda el ataque a las torres gemelas de New York City's World Trade Center marca un punto de inflexión en la historia de la magnitud de los ataques terroristas. Pickett (2003), demuestra que objetivos comerciales son ampliamente preferidos por los atacantes sobre instalaciones militares o diplomáticas como alternativas para sus ataques. En este sentido y de acuerdo con Koh (2007), se puede entender por terrorismo al uso premeditado de la violencia para lograr la intimidación de una gran audiencia. Argumenta que este tiene dos componentes principales, el primer componente persigue un objetivo político y el segundo hace uso de violencia extrema para llamar la mayor atención posible.

Así por ejemplo, posterior a los atentados del 9/11, los puentes fronterizos de México y EUA permanecieron cerrados por un periodo de tres días (Quiroga, 2012). Además las pérdidas económicas derivadas de la manifestación del ataque pueden ascender a varios billones de dólares. De acuerdo con Buesa et al. (2007), el impacto económico directo de los ataques la mañana del 11 de septiembre se pueden cuantificar en torno de los \$47,000,000,000 dls., mencionando además que la bolsa de valores Dow requirió de 44 días para estabilizarse. Si se considera el alto volumen comercial que cruza las fronteras entre México y Estados Unidos, los impactos totales pueden ser catastróficos. Tan sólo en importaciones terrestres podemos observar que el departamento de transporte de EUA reporta que en septiembre de 2001 EE.UU tuvo un déficit en importaciones superiores a los \$350,000,000 dls., con respecto a septiembre de 2000 y 2002. En este sentido, podemos afirmar que es posible clasificar a los actos terroristas como eventos disruptivos de alto impacto por su capacidad para afectar el flujo de bienes y servicios. Además de que existe el riesgo que representa el hecho de que los sistemas de suministros sean utilizados para el

movimiento de armas de destrucción masiva o como vehículos para materializar ataques. (Kommerskollegium, 2008).

Con base en una extensa investigación documental, así como información proporcionada por Consejo Empresarial Mexicano de Comercio Exterior, Inversión y Tecnología, A.C. (COMCE). Para el caso del comercio México-EE.UU, se pudo identificar que las disrupciones generadas por los ataques terroristas de septiembre de 2001, afectaron principalmente al ITI. Esto como resultado del aumento en el tiempo de cruce de frontera derivado del cierre de los puentes internacionales durante el periodo de máxima alerta. Pero también derivado del incremento en los tiempos de revisión una vez que se reiniciaron las operaciones de exportación.

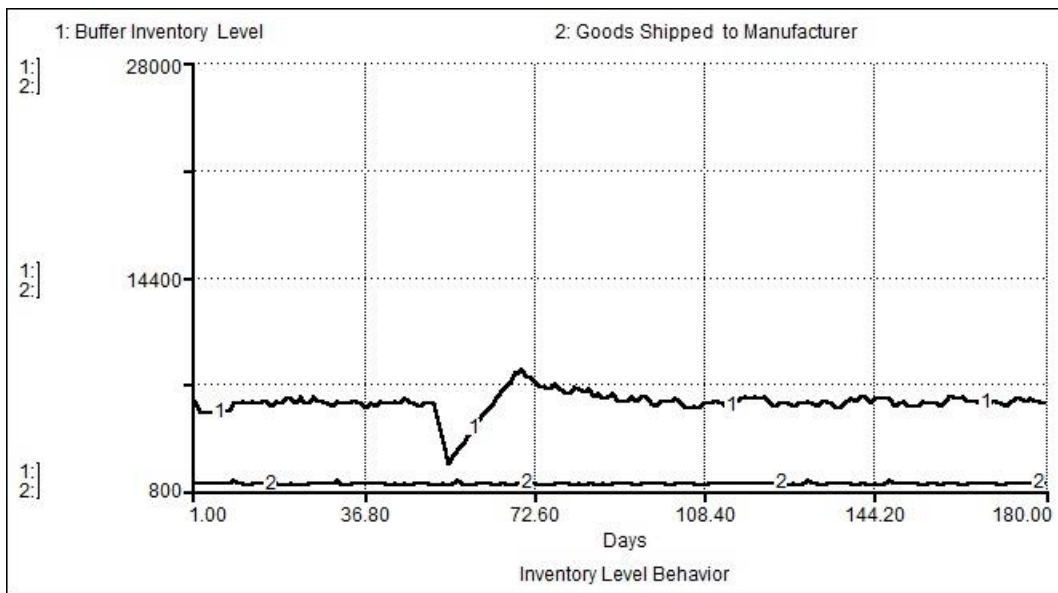
De este modo, para comprender el “efecto frontera” y considerando que el transporte se mantiene como un componente clave de las operaciones logísticas, se desarrolló el análisis de disrupciones derivadas de la materialización de ataques terroristas en el “**ITI**” previo a su llegada a la frontera. Cabe señalar que se simularon tres distintos periodos en el que el tiempo de duración de la disrupción generada cambio para analizar los efectos en la cadena de suministros de la compañía ABC. Esta compañía cuenta con un inventario de seguridad que le permite enfrentar un desabasto de 5 días. El primer periodo de simulación correspondió al cierre de frontera por un espacio de tres días, mismo que se mantuvo dentro de las previsiones para el inventario de seguridad de la compañía ABC. El segundo y tercer periodos consisten en la simulación de una disrupción de 8 y 10 días de duración y que representan tres y cinco días fuera del inventario de seguridad previsto respectivamente. Como resultado, se obtuvieron tres diferentes impactos sobre los inventarios, así como comportamiento de entrega al cliente y costos totales del sistema de suministros. (Ver

Figura 4. 10, Figura 4. 11, Figura 4. 12 y Figura 4. 13).

En cuanto al análisis del comportamiento de los inventarios, en todos los periodos de disrupción se confirmó el comportamiento de las tres etapas expresadas cualitativamente por Sheffi (2005), las cuales fueron tomadas como referencia en el proceso de validar que el modelo reproduce cuantitativamente la conducta conceptual o teórica esperada. Para el primer periodo de disrupción con un espacio

de 3 días, en una primera etapa se presentó una fase de operación “normal” antes del impacto, el cual se presentó en el día 50. En una segunda etapa, se apreció un fenómeno característico de la dinámica de sistemas y que se manifiesta como un retardo que afecta el nivel de inventario de la empresa. Se observó una reducción paulatina en nivel de inventario como resultado mantener el flujo de entregas al cliente, pero sin ser re-aprovisionado debido al cierre de la frontera. Finalmente en un tercer periodo se apreció cómo se regularizó el comportamiento del nivel de inventario en el día 76. Este último hecho también manifiesto un retardo en la recuperación del sistema. En cuanto al cumplimiento de la demanda para el caso de la empresa automotriz global en estudio, debido a que tiene un **SS** con una cobertura equivalente a cinco días de inventario, no se incumplió con la entrega de bienes al cliente por lo que no se acumularon ordenes pendientes en el horizonte de simulación (ver

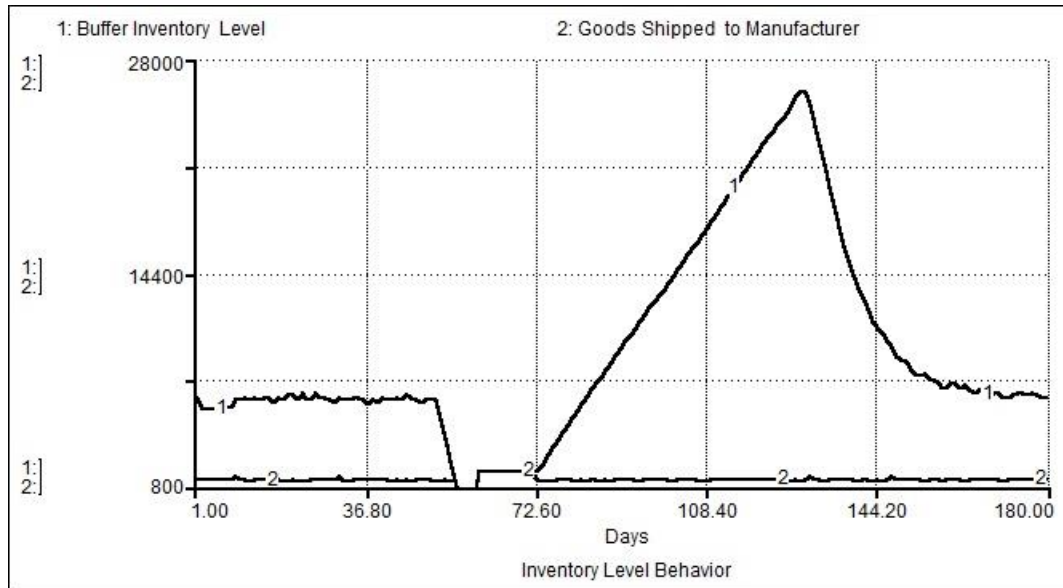
Figura 4. 10).



**Figura 4. 10.** Nivel de inventario en Buffer vs bienes al cliente durante un periodo disruptivo de tres días.

Sin embargo para la segunda fase de evaluación del escenario disruptivo, establecido en 8 días, se pudo verificar que una vez concluida la segunda fase descrita por Sheffi et al

2005, (referida al retardo de los efectos del impacto de la disrupción), se presentó una ruptura de inventario de seguridad. Contrario a lo observado en el fase anterior (3 días de disrupción), en esta fase, si se observó que la entrega de bienes al cliente se vio comprometida por un lapso de 4 periodos. También fue posible identificar que para un escenario de esta magnitud, la CSE requirió de 115 periodos para alcanzar un estado de operación deseado. Además también se observó que como resultado de incumplir por completo con la demanda del cliente, el nivel de inventario se incrementó en un 375% con respecto al escenario base. Esto como consecuencia de la acumulación de ordenes pendientes (**OB**) y de reiniciar las operaciones de envío para completar los pedidos actuales y los que se encuentran con estatus de faltantes (Ver Figura 4. 11).



**Figura 4. 11.** Disrupción de 8 días en Frontera internacional.

Finalmente en el tercer escenario de análisis, con una disrupción de 10 días, se pudo observar un comportamiento similar al identificado en el escenario anterior, pero con consecuencias más agudas para la empresa. Se verificó que a pesar de que sólo se presentaron 5 días de escasez de producto, no fue posible recuperar un nivel de servicio deseado de operación en el horizonte de evaluación. Además se generó un gran volumen de **OB**, superior a las 107,500 unidades lo que llevó al sistema de suministro a incrementar sus inventarios en un 600%. Estos incrementos en el nivel de inventario posterior al reinicio de

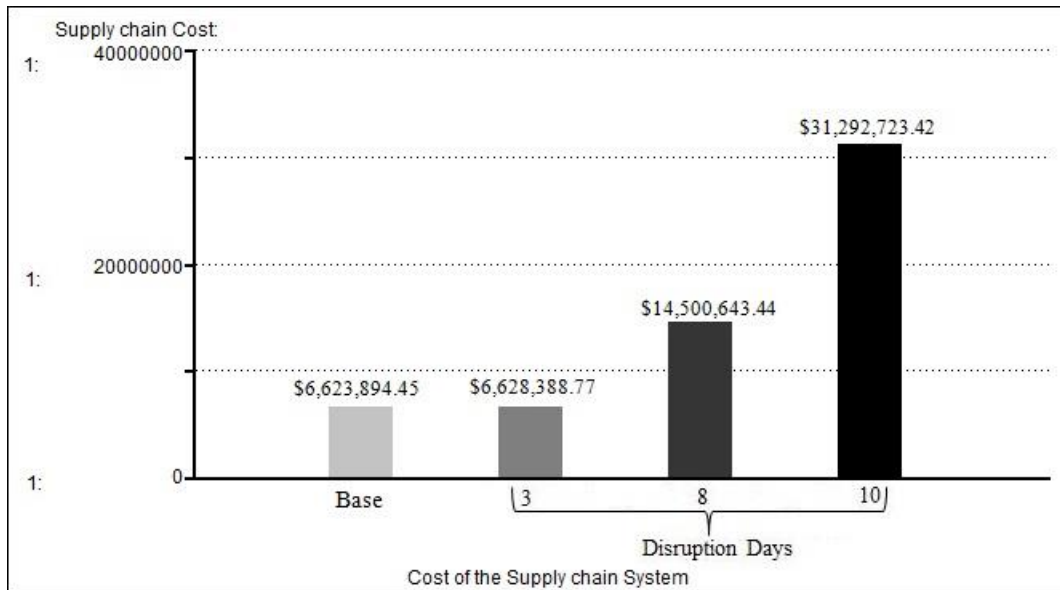


operaciones, tienen relación con lo demostrado cuantitativamente por Sterman (1989), quien expone que estos comportamientos se presentan dado que los administradores tienden a poner más atención a las ordenes pendientes que a la línea de suministro, llevando a colocar ordenes muy grandes con el proveedor.



**Figura 4. 12.** Buffer IL vs GSC bajo 10 días de interrupción en frontera.

Por otro lado, en la Figura 4. 13, podemos observar los costos totales derivados de los periodos disruptivos analizados para un escenario de ataque terroristas. Observamos que el incremento en tiempo de cruce en frontera provocó un aumento de 472% en los costos del sistema. Lo cual coincide con los resultados expuestos conceptualmente por Wilson (2007), quien estima que los costos pueden llegar a incrementarse hasta en un 500% en una estructura de suministro como la analizada aquí.



**Figura 4. 13** Costo total de CS en escenario 1

#### 4.4.2 Escenario2. Disrupción por desastres naturales

En el verano de 2010, el huracán Alex golpeo las costas mexicanas causando pérdidas millonarias estimadas en 775 mdd tan sólo en el estado de Nuevo León (EFE, 2010a). Los daños ocasionados por las lluvias obligaron al cierre de la carretera, Monterrey-Laredo tanto por la ruta de cuota, como por la vía libre. Todo debido al desbordamiento del Río Salado y el derrumbe parcial de diversos puentes a la altura de Sabinas Hidalgo (EFE, 2010b). La Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) informó el primero de julio que un total de seis carreteras fueron cerradas en los estados de Tamaulipas, Nuevo León y Coahuila, a causa de las fuertes lluvias tras el paso del huracán "Alex" (EFE, 2010c).

Ante ello, el sector manufacturero que se vio seriamente afectado. Se reportó que aproximadamente 1,800 tráileres estuvieron varados hasta por cinco días en la carretera Monterrey-Nuevo Laredo. En entrevista con CNN Expansión, Candelaria Sánchez Nápoles, vicepresidenta de la Cámara Nacional de la Industria de la Transformación (Canacintra) de Nuevo Laredo, señaló que realizaron una revisión de empresa por empresa para hacer una estimación más precisa de las pérdidas económicas, las que, resultaron ser millonarias (Shaila Rosagel, 2010).

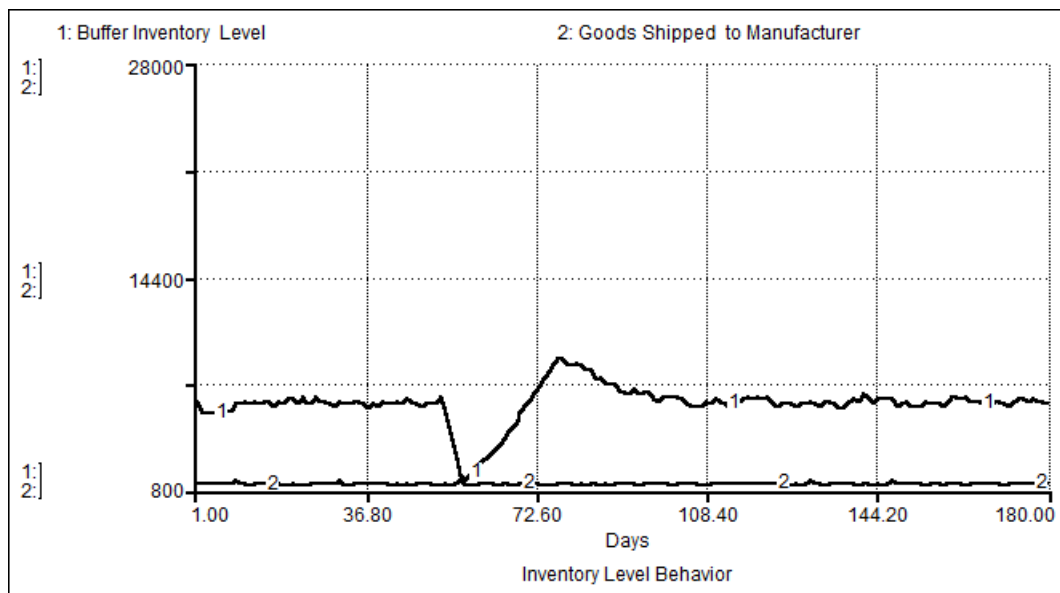
Por otro lado, de acuerdo con información de Reuters, el grupo Reliefweb estimó que 22,000 camiones quedaron imposibilitados de transitar entre Monterrey-Nuevo Laredo y la

ciudad de Laredo, Texas. Así mismo, indicó que aún y cuando después de cinco días se logró reabrir el paso parcial al comercio de carga, los niveles de agua seguían impidiendo el paso a la mayoría de los camiones. Además, se dió prioridad a vehículos que transportaban alimentos frescos y a los que llevaban ayuda humanitaria ante la emergencia generada por las inundaciones. El Presidente municipal de Nuevo Laredo Ramón Garza, informo que calcular los daños económicos era una tarea compleja, sin embargo considero que estos eran sustanciales ya que la ruta de Nuevo Laredo representa el 40% del comercio entre Estados Unidos-México, resaltando así la vulnerabilidad del sistema logístico internacional ante impactos de esta naturaleza. También agregó que la industria automotriz que generalmente trabaja en secuencia justo a tiempo, se vio seriamente afectada al interrumpirse la entrega de autopartes. Información que confirmó Octavio Gonzalez, director de un grupo privado de promotores industriales de la región, quien expreso que las manufactureras estuvieron bajo tensión ante la escasez de autopartes. Finalmente la Secretaria de comunicaciones y transporte (SCT) el 14 de Julio de 2010, emitió un comunicado anunciando la reapertura para todo el tráfico de la ruta Monterrey-Nuevo Laredo (Comunicado 114-10). Normalizándose así el tránsito de mercancía entre ambas ciudades, prácticamente catorce días después del impacto del huracán Alex.

Con base a la información presentada, se pudo identificar que las interrupciones generadas por el Huracán Alex, afectaron principalmente al **ITI** aumentando su tiempo de entrega. De este modo, para comprender el “efecto frontera” y considerando que el transporte se mantiene como un componente clave de las operaciones logísticas, se desarrolló el análisis de interrupciones derivadas de la materialización de desastres naturales en el **ITI** previo a su llegada a la frontera. Cabe señalar que al igual que en el escenario de interrupciones por ataques terroristas, también se simularon tres distintos periodos disruptivos para analizar los efectos en la cadena de suministro de la compañía ABC. Como se comentó anteriormente cuenta con un inventario de seguridad que le permite enfrentar un desabasto equivalente a la demanda de 5 días. El primer escenario correspondió al cierre de carreteras por un periodo de cinco días, mismo que es el límite del inventario de seguridad de la compañía ABC. Este periodo es similar al experimentado como consecuencia de las interrupciones generadas por el huracán Alex. El segundo y tercer escenario consisten en la simulación de una interrupción de 8 y 10 días que representan tres y

cinco días fuera del inventario de seguridad respectivamente. Como resultado, se obtienen tres diferentes impactos sobre los inventarios, así como comportamiento de entrega al cliente y costos totales del sistema de suministro.

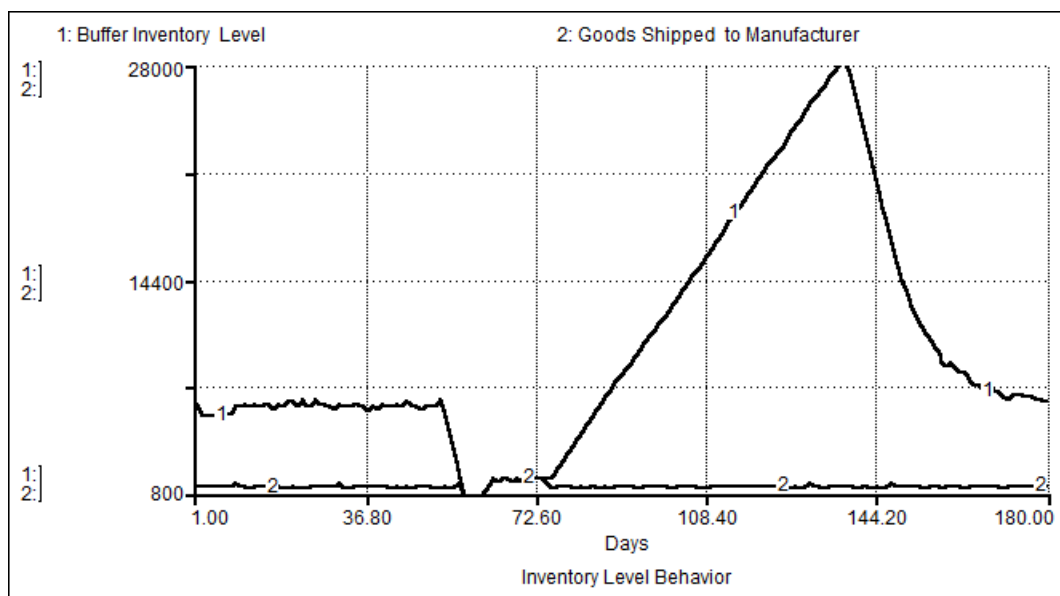
En cuanto al análisis del comportamiento de los inventarios, en todos los periodos de disrupción se ratificó el comportamiento de tres etapas expresadas cualitativamente por Sheffi (2005). Estos comportamientos son similares a los analizados en el escenario disruptivo anterior. Para el primer periodo de disrupción de 5 días, en una primera etapa se presentó un periodo de operación “normal” antes del impacto, el cual se presenta en el día 50. En una segunda etapa, un efecto con retardo afecta el nivel de inventario de la empresa. Se observó una reducción constante en nivel de inventario como resultado mantener el flujo de entregas al cliente, pero sin ser re-aprovisionado debido al cierre de la frontera. Finalmente en un tercer periodo se apreció cómo se regularizó el comportamiento del nivel de inventario en el día 90. Para el caso de la empresa automotriz global en estudio, gracias a una cobertura de inventario de 5 días, no se incumplió con la entrega de bienes al cliente (ver Figura 4. 14).



**Figura 4. 14.** Nivel de inventario vs bienes enviados al cliente con 5 días de disrupción en buffer.

Sin embargo, para el segundo periodo de disrupción establecido en 8 días, se pudo verificar que una vez concluida la segunda etapa (impacto con retardo de la disrupción), se

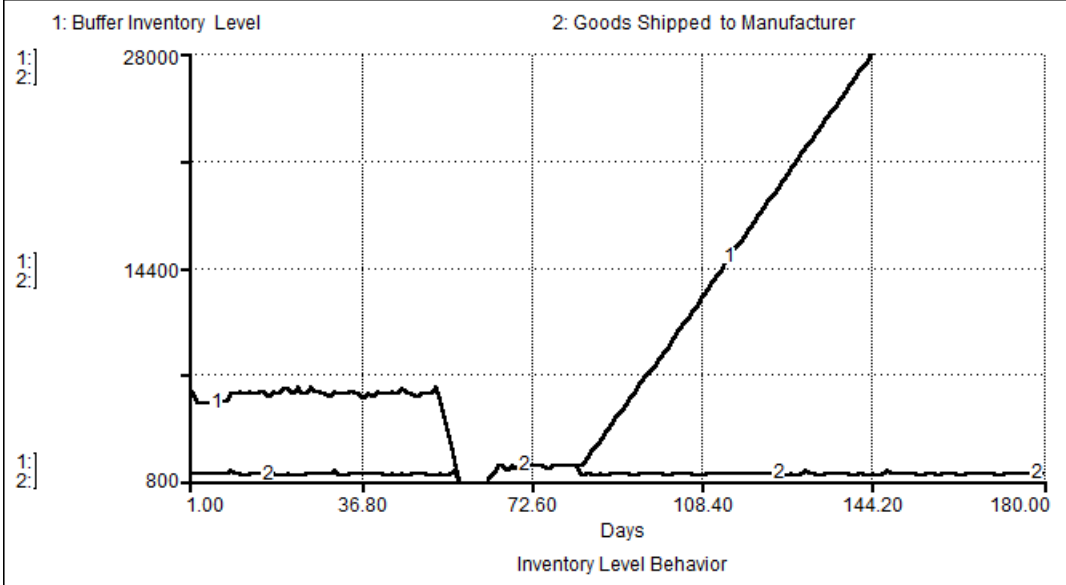
presentó una ruptura de inventario de seguridad y contrario a lo observado en el escenario anterior (5 días), la entrega de bienes al cliente se vio comprometida por un lapso de 4 periodos. En este caso, la cadena de suministro requirió de 120 periodos para alcanzar un estado de operación deseado. Además también se observó como resultado de incumplir por completo con la demanda, un incremento en el nivel de inventario de un 409% con respecto al escenario base. Esto como consecuencia de reiniciar las operaciones de envío para completar los pedidos actuales y los faltantes pactados (ver Figura 4. 15)



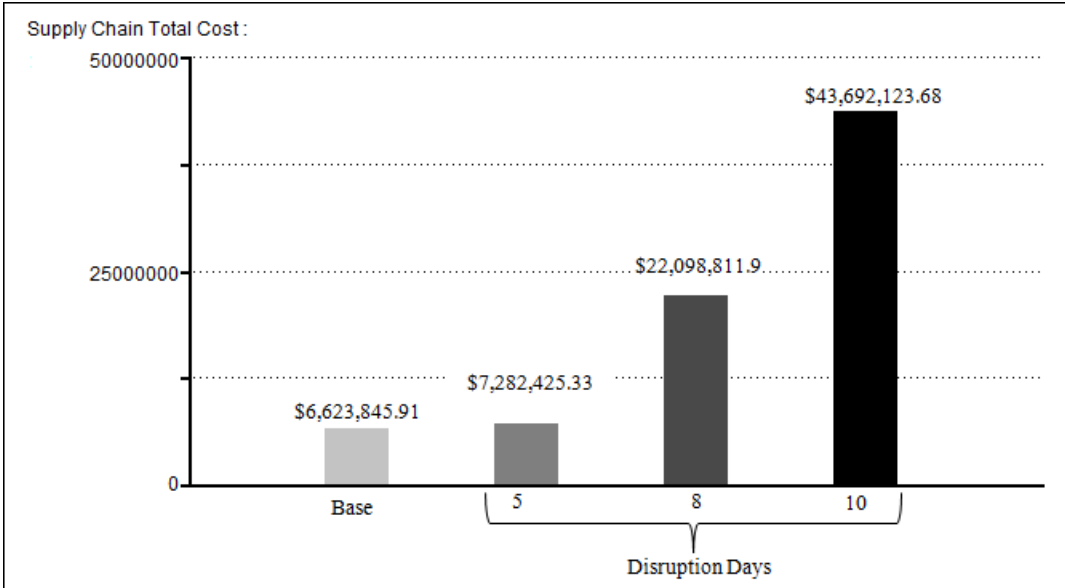
**Figura 4. 15.** Nivel de inventario vs bienes enviados al cliente con 8 días de disrupción en buffer.

Finalmente en el tercer escenario de análisis, con una disrupción de 10 días, se pudo observar un comportamiento similar al identificado en el escenario anterior, pero con consecuencias más agudas para la empresa. Se verifico que a pesar de que sólo se presentaron 5 días de escasez de producto, se generó un gran volumen de **OB** superior a las 134,685 unidades lo que llevó al sistema de suministro a incrementar su inventario en un 625%. Estos incrementos en el nivel de inventario posterior al reinicio de operaciones, fueron explicados en el análisis del escenario anterior y tienen relación con lo demostrado por Sterman (1989), y confirmado por Rong et al., (2011). Ellos exponen como los

administradores tienden a poner más atención a las órdenes pendientes que a la línea de suministro, llevando a colocar órdenes muy grandes con el proveedor. Un comportamiento verificado en los 3 escenarios disruptivos bajo análisis.



**Figura 4. 16.** Nivel de inventario vs bienes enviados al cliente con 10 días de interrupción en buffer.



**Figura 4. 17.** Costo total de la CS (considerando 5 días de Safety stock, 6, 8 y 10 días de interrupción representan 1, 3 y 5 días fuera de la cobertura).

En la Figura 4. 16y Figura 4. 17 presentadas anteriormente podemos ver que las previsiones de pérdidas millonarias tras una disrupción como la generada por el huracán Alex se cumplen ya que el costo de la cadena pasa de \$6,623,894.45 dls en una situación de operación normal a \$43,692,123.68 dls en el peor escenario de 10 días de disrupción los que significa un aumento del 650%. Este incremento es similar al estimado por Sterman (1989). Quien argumenta que la amplificación en la demanda del cliente se incrementa a través de los eslabones en un factor de 700%. Según Rong et al, (2011), este incremento es debido a que los tomadores de decisiones tienden a poner más atención al incremento de la variable **OB** que a la línea de aprovisionamiento en su afán por mantener un nivel de inventario deseado. En el caso específico de la Compañía ABC podemos ver en la Figura 4. 14 que mantener un inventario de seguridad de 5 días le permite enfrentar disrupciones similares a las ocasionadas por el huracán Alex siempre y cuando estas no superen los cinco días. Como se puede observar en la Figura 4. 15 y Figura 4. 16, al no disponer de inventario, no se puede enviar bienes al cliente generando **OB** que se traduce en costos de penalización que aumentan el costo del sistema hasta en \$ 3000 dls por minuto (Cedillo et al, 2012).

Por otro lado, con relación a los costos totales derivados de la disrupción por desastres naturales, el incremento en tiempo de cruce en frontera provocó un crecimiento de costos de un 472%. Lo cual coincide con los resultados expuestos por Wilson (2007), quien estima que los costos pueden llegar a incrementarse hasta en un 500% en una estructura de suministro como la analizada aquí.

#### **4.4.3 Escenario 3. Disrupción por actos criminales**

La seguridad de la cadena de suministro se ha convirtiendo en un tema central para la competitividad de la economía global y va más allá de la prevención de actos de terrorismo o narcotráfico. De hecho, la Pérez (2013) afirma que la interrupción de una cadena logística, ya sea por actos criminales, falta de inventarios o por cualquier evento que básicamente impide la distribución de suministros o productos, no sólo conduce a pérdidas económicas focalizadas, sino que también estas pérdidas tienen un efecto dominó al resto de la cadena, afectando severamente la competitividad nacional.

Uno de los rubros que más sufren es el sector de auto transporte, actualmente los grupos criminales que operan en el robo de camiones de carga no reconocen fronteras y se

mueven continuamente en busca de áreas con bajos niveles de seguridad donde se faciliten sus acciones. Por lo tanto es importante desarrollar estrategias internacionales de seguridad y una logística coordinada regionalmente. Desde el punto de vista del sector transporte, la falta de seguridad afecta a sus costos operativos, ya que se deben de aumentar el volumen de los inventarios (en relación con el **SS**), los plazos de entrega, el valor de las primas de seguros, entre otras características. Todo ello eleva el precio de los productos y reduce la competitividad.

En 2011 el reporte internacional emitido por la organización Estadounidense FreightWatch, señaló a México, Brasil, Sudáfrica, Estados Unidos, Rusia, India y Reino Unido, como los siete países más peligrosos a nivel mundial para el transporte de carretero mercancías, esto basado en el número de siniestros registrados ante las autoridades. Sin embargo la CEPAL afirma que estimar una magnitud real de las pérdidas económicas causadas por productos de robo en transporte terrestre es una tarea compleja, principalmente porque las estadísticas tienden a subestimar el problema y por qué no se tiene acceso a la información que permita validar dichos cálculos Pérez (2013). Sin embargo, la CEPAL también estima que globalmente el robo de mercancías por carretera representa 30 billones de dólares en pérdidas anuales (Pérez, 2013).

Esta falta de información sobre las dimensiones reales del problema en todo el mundo pero sobre todo a nivel nacional, en gran parte se debe a que los delitos contra el transporte de carga terrestre son una baja prioridad en la agenda política e incluso muchas veces se ven como un costo implícito de actividad logística (Pérez, 2013). La falta de información actualizada, homogénea, comparable y oportuna para la toma de decisiones dificulta la gestión proactiva de la cadena de suministro (Pérez, 2013).

Como resultado del análisis del estado del arte, se identificó que uno de los puntos críticos y más vulnerables en el análisis de interrupciones es el efecto que estas tienen sobre la variable de tiempo de entrega (lead time) y como está a su vez influye en el costo total de la cadena de suministro. El análisis diseñado para evaluar el impacto de actos criminales y la propagación de sus efectos en la CSE, se propone simular tres diferentes situaciones disruptivas para cada escenario de evaluación.

El evento disruptivo consiste en variar la frecuencia de los actos criminales (robo de carga). De acuerdo con la organización estadounidense Freightwatch (2012), el inventario en



tránsito es el elemento más vulnerable en la cadena de suministro, sin embargo, y bajo el contexto de la discusión aquí presentada, se puede afirmar que no existe suficiente información disponible para hacer un análisis de una situación real. Por este motivo, la presente investigación recurrió a la información presentada por la Asociación Mexicana de Instituciones de Seguros (AMIS) para desarrollar escenarios de simulación en los que se podrá evaluar el robo del autotransporte dentro del horizonte de planeación.

Para esta prueba se partió de la elección de dos países con alto potencial de desarrollo en América Latina y que de acuerdo al informe de la CEPAL en 2013, presentan un alto índice de robos en el sector de auto transporte (Perez, 2013). De esta forma, por un lado se tiene al escenario A, que representa el caso de una cadena de suministro que opera en México, mientras que el escenario B representara a la cadena de suministros que opera en Brasil. Estos escenarios se construyen con datos recabados del reporte de media de tiempo para exportación por países que publica el Banco Mundial, también nos apoyamos en lo publicado en febrero de 2013 en la página de la oficina representativa de tratados de los Estados Unidos (USTR).

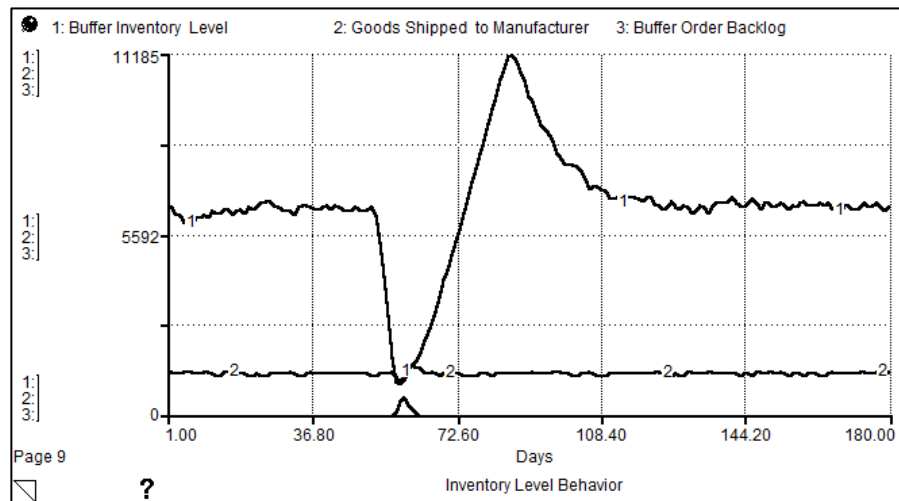
A diferencia de los actos disruptivos estudiados en los puntos 4.2.1 y 4.2.2, para la evaluación de las interrupciones generadas por actos criminales dirigidas al sector autotransporte identificado frecuentemente como el eslabón más débil en la CSE, se evaluará el efecto que estas interrupciones tienen en el inventario en tránsito, pero específicamente el análisis en esta ocasión estará focalizado en el estudio del tiempo de ciclo “lead time”. Es importante señalar que para este escenario, partiendo de los datos recabados en las páginas del Banco Mundial y de los reportes del USTR, los parámetros iniciales de la simulación fueron ajustados para representar una cadena de suministros con un lead time de 4 días para el escenario A y de 6 días para el escenario B. (ver Tabla 4. 5)

**Tabla 4. 5** Parámetros iniciales del modelo para escenario 3.

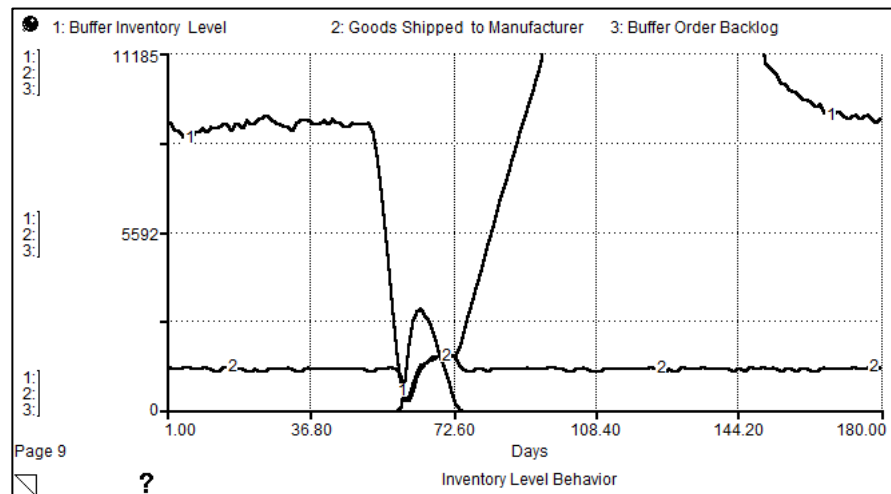
	Proveedor (en México)		Frontera Internacional		Buffer (Almacenista)	
	Inventario en transito	Nivel de inventario	Inventario en tránsito de frontera	Crossing Border Times	Inventario en transito	Nivel de Inventario
Inventario Inicial	1300	1450	1300			6480
Escenario 1	1300	1450	1300		1296	9072
Escenario 2						
Inventario inicial deseado	1300	1300			1300	6480
Escenario 1	1300	1450			1300	9072
Escenario 2						
Tiempo de Transito				Min 1.77 hrs.		
Escenario 1	1			Max 16.77	2	
Escenario 2	4			hrs.	2	
Costo de manejo de <i>IL</i> (dlls)		2.5				5
Costo de pérdidas en <i>IL</i> (dlls)		175				175
Costo de pérdidas en <i>ITI</i> (dlls)	125				125	

Como puede observarse para el escenario A, un robo de mercancía representa al menos una interrupción de seis días. Esto debido a que el lead time base es de siete días, por lo que si el acto criminal ocurre en el día tres, la cadena de suministros requerirá de cuando menos

otros tres días para recobrar un estado base deseado. Empleando esta misma lógica para el escenario B, si la interrupción ocurre el día seis, en el mejor de los casos la CS necesitara al menos otros tres días para recuperarse, en este contexto el lead time pasa de 7 a 9 días. Cabe señalar que en ambos casos se consideró el uso de transporte aéreo que permitiera satisfacer la demanda del cliente y mejorar la capacidad de respuesta por parte del proveedor. Como resultado del análisis se obtuvieron los siguientes impactos en el inventario del buffer. (Figura 4. 18 y Figura 4. 19).



**Figura 4. 18.** Escenario A comportamiento de inventario con Buffer durante actos criminales.



**Figura 4. 19.** Escenario B comportamiento de inventario con Buffer durante actos criminales.

En el escenario A, el comportamiento de los niveles de inventario para una interrupción de seis días se pudo observar un periodo de operación que puede ser descrito como normal antes del impacto. En una segunda etapa posterior a la materialización del acto criminal, se observó un retraso en el impacto de la interrupción sobre el nivel de inventario del buffer. Este inventario disminuyó conforme se suministraban las órdenes del cliente sin la reposición del nivel de inventario. En un tercer periodo se apreció como el comportamiento del nivel de inventario se regularizó en el periodo 110. Para este escenario el inventario de seguridad de 5 días resultó suficiente ya que en ningún momento se interrumpió el suministro pudiendo cumplir satisfactoriamente con la demanda del cliente.

Por otro lado, para el escenario B, el impacto generó una interrupción de nueve días y de igual forma que en el escenario anterior, en una primera etapa se observó un periodo de estabilidad y posteriormente ocurrió la interrupción. En una segunda etapa pudimos verificar consecuencias más severas que las observadas en el análisis anterior. Esto se debe a que la demanda del cliente no pudo ser satisfecha en su totalidad lo que generó órdenes incumplidas (**OB**). El escenario requirió de 100 periodos para alcanzar un nivel de operación deseado (estado inicial), en la segunda fase. En esta ocasión el nivel de inventario se incrementó en 125% en comparación con lo observado en una corrida base.

El costo de la cadena de suministros en el primer escenario, alcanzó los \$8,015,205 mientras que para el segundo escenario el costo se elevó a \$19,780,320. Esto representó un incremento del 121% en los costos de operación. Este análisis permitió entender por qué algunos autores afirman que las empresas con actividad de exportación a Estados Unidos prefieren invertir en México aún y cuando organismos internacionales como la CEPAL lo considera como uno de los destinos más inseguros para el transporte de mercancía. (Perez, 2013)

#### **4.5 Conclusiones**

Los fenómenos naturales, los actos terroristas y los criminales, son eventos impredecibles que siempre están latentes en una cadena de suministros. Estos pueden materializarse llevando a la cadena a experimentar situaciones extremas en las que una interrupción no es la excepción.

A raíz de los desafortunados eventos ocurridos en septiembre de 2001, el tema de la seguridad se ha vuelto relevante y el estudio de las cadenas de suministro no es la

excepción. Sin embargo estos estudios se limitan a describir de manera cualitativa como serían los comportamientos de la CS bajo efectos disruptivos. Como hemos estudiado, estas interrupciones del suministro pueden ser parciales o totales pero sin duda su efecto no es focalizado. El estudio de estos tres escenarios aquí presentado, nos permitió analizar el problema de las interrupciones desde distintas perspectivas así como también nos permitió concluir que los efectos que dichos actos tienen sobre la cadena de suministro tienden a propagarse en ambos sentidos en la cadena de suministro.

Otro hallazgo interesante fue la similitud entre el resultado del comportamiento para interrupciones naturales y actos terroristas y criminales. En los tres casos se pudo demostrar que cuando se interrumpe el suministro las CSE enfrentan tres fases o periodos durante las interrupciones. En la primera fase se tiene un periodo de contención gracias a los inventarios de seguridad existentes. Es en esta etapa cuando deben iniciarse las acciones que permitirán una pronta recuperación del estado deseado en la CSE. En una segunda fase, los administradores de la cadena se enfrentan a las consecuencias totales llevando los inventarios a sus niveles más bajos. Aquí la recuperación depende de cómo los tomadores de decisión se hayan preparado para enfrentar la interrupción. De acuerdo con Buesa (2012), el 75% de las empresas prefieren una postura reactiva y sólo un 25% optan por un plan de administración proactiva de las interrupciones. Lo cual muestra un avance con lo expuesto por Mitroff y Alpaslan (2002), en el que se estimaba que sólo un 5% seguía un plan de administración proactivo. Finalmente en una tercer etapa, se mostró como en el caso de haber una recuperación esta no es inmediata y que para alcanzar los niveles deseados de operación, el comportamiento sugiere la existencia de un patrón con retardo.

Los resultados de la aplicación de este sistema en la CSE, fueron satisfactorios, lográndose el objetivo de desarrollar una herramienta de evaluación capaz de analizar los procesos clave de su cadena de suministro bajo eventos disruptivos. Además se proporcionó información clave sobre el comportamiento de sus niveles de inventario ante la evidente propagación de los efectos propios de la interrupción en la CSE.

# Capítulo 5.

## Conclusiones

En el presente capítulo se presentan las aportaciones alcanzadas a lo largo de la investigación, dichas contribuciones fueron el brindar una respuesta a nuestras preguntas de investigación y reflejar un aporte científico y tecnológico. También se presentan las limitaciones que se encontraron en el desarrollo de la investigación. Finalmente se presentan algunas líneas futuras de investigación.

## 5.1. Introducción

Las disrupciones en la cadena de suministros son fenómenos que pueden originar desde una interrupción breve y parcial del suministro, hasta un paro total e irrecuperable con consecuencias catastróficas para las CSE. En este sentido, el sector gubernamental y la iniciativa privada reconocen la importancia de unir fuerzas para analizar y enfrentar los efectos de las disrupciones de alto impacto. Sin embargo, como pudo documentarse en el capítulo dos, esta es un área relativamente inexplorada, por lo que no se tiene un consenso sobre cómo se debe de evaluar y actuar ante el impacto de las disrupciones y el efecto de su propagación en CSE.

En este contexto de falta de información y análisis en el área, surgió la necesidad de respondernos a una serie de preguntas de investigación, dentro de las cuales la primera fue: **¿A qué nivel de detalle se debe conceptualizar la cadena de suministros de exportación, para identificar las variables y procesos clave que influyen en la propagación de impactos disruptivos?** Para dar respuesta, cabe señalar que se partió de un análisis crítico y reflexivo del estado del arte, en consecuencia, se decidió tomar como base los trabajos de Sheffi (2003), Pickett (2003), Wilson (2007), Wu et al, (2007) Koh (2007), Knemeyer et al, (2009) y Sodhi (2012), quienes exponen la necesidad de evaluar el riesgo de manera global y dinámica en la CSE. En este sentido, se decidió utilizar una estructura básica que nos permitiera comprender de forma clara un problema tan complejo. De ésta forma se diseñó una cadena de suministro compuesta por cinco eslabones: i) proveedor de materias primas; ii) manufacturero; iii) cruce de frontera internacional; iv) almacenista; y v) cliente final. Ello según lo propuesto por Cedillo, M., Sánchez, C., (2012) y que fue documentado en la sección 4.2.

De ésta forma, y una vez definidos los procesos (subsistemas), se prosiguió a identificar las variables que rigen el comportamiento de dichos subsistemas, para lo cual se revisó de manera exhaustiva en la bibliografía los trabajos de Wu (2007), Wilson (2007), Duggan (2008), Rong et al, (2011), además del análisis concienzudo del estudio publicado por Cedillo et al, (2012). En consecuencia, se decidió utilizar las siguientes variables i) demanda del cliente (Ds); ii) ordenes pendientes (OB) iii) ordenes totales (TOP); iv) nivel de Inventario (IL); v) bienes enviados al cliente (GSC); vi) inventario de seguridad (SS); vii) inventario en tránsito (ITI); y viii) inventario en tránsito deseado (DITI). Concluyendo

así, que en estudios futuros sobre la propagación de interrupciones en CSE, se debe considerar al menos las variables expuestas para poder medir el efecto de la propagación del impacto de interrupciones con precisión.

Si bien, en el capítulo dos se documentó la existencia de investigaciones que presentan distintas medidas e iniciativas de carácter internacional en busca de mejorar los niveles seguridad y la robustez de las CSE, podemos afirmar que estas iniciativas sólo muestran un panorama de lo que podría hacerse y no así, de cómo se manifiestan y cómo se miden los efectos de las interrupciones. Así mismo, en todas las investigaciones identificadas, se utilizó una metodología de evaluación con una perspectiva de análisis aislada de las interrupciones, lo cual y cómo pudo demostrarse en esta investigación, es una aproximación errónea en el análisis de los efectos disruptivos ya que impide medir con precisión como estos se propagan por la red afectando a toda la CSE.

Otra característica importante en un proceso de exportación es sin duda el cruce de frontera. Sin embargo y con base en la revisión bibliográfica podemos afirmar que este proceso clave tampoco fue estudiado adecuadamente con anterioridad como parte de una investigación de propagación del riesgo por lo que nos llevó a plantearnos la segunda pregunta de investigación, la cual se enunció como: **¿Cuál es el impacto del cruce de frontera en una CSE, si se incrementa el tiempo de cruce derivado del aumento de revisiones de seguridad o de la ocurrencia de eventos disruptivos?** Para responder a esta pregunta, la cadena de suministro aquí propuesta incluyó una etapa de cruce de frontera, esto con dos finalidades, primero para cumplir con la condición de evaluar una CSE y segundo, poder medir el impacto que tiene el cierre de la cadena de suministro tal como se evaluó en el escenario descrito en la sección 4.4.1. Así mismo también se evaluó escenarios como los ocurridos cuando el cruce de frontera en una cadena de suministro considerando que los tiempos de cruce son variables, tal como se planteó en el escenario 4.4.2 y 4.4.3. En todos los casos la evidencia fue contundente al señalar que la frontera representa en sí misma una fuente disruptiva, ya sea porque el cruce obedece a una secuencia de tiempos propios de una revisión o porque el cruce ha sido detenido como consecuencia de un cierre total.

Este efecto de cruce de frontera, pudo entenderse mejor al dar respuesta a una tercera pregunta de investigación fue definida como: **¿Cuál es el efecto de la propagación de**



**riesgos disruptivos de alto impacto en un sistema que combine distintos eventos en diferentes escenarios?** Para responder a ella, en el capítulo cuatro pudimos constatar que el modelo respondió satisfactoriamente a los comportamientos previstos de manera conceptual para una disrupción, en especial a los descritos por Sheffi (2005), demostrándose así, la existencia de una relación “no lineal” entre las disrupciones y la propagación de sus efectos. Esto nos brindó una mejor comprensión sobre impacto que tienen los retardos en el comportamiento tanto, de los distintos niveles de inventarios en la cadena de suministro, como el efecto que tiene el cruce de frontera bajo condiciones disruptivas en una CSE.

Así mismo, el modelo permitió afirmar que las disrupciones ocasionan distorsiones tanto en los patrones de demanda como en los del suministro, validándose así la ocurrencia del efecto látigo (BWE) y confirmándose además la existencia del efecto látigo inverso (RBWE). Éste último fenómeno fue expuesto por Rong et al, (2011), quienes sugieren que este efecto se origina dependiendo del eslabón de la cadena que resulte afectado por una perturbación. Sin embargo en su investigación no queda claramente demostrado como es que este fenómeno se genera. Además de que Rong et al, (2011), recurren a diversas estrategias como a fijar la demanda por parte del cliente inicial, así como también, fija la capacidad de suministro por parte del proveedor final para poder representar dicho fenómeno.

En este sentido, durante la simulación y el análisis crítico realizado con el modelo aquí propuesto, se identificó que RBWE se origina cuando la disrupción afecta la fuente de suministro por un tiempo mayor a la capacidad de respuesta en horas u días del nivel de SS, impidiendo así su distribución a otras etapas de la cadena de suministro. Este efecto genera una escasez que se distorsiona y amplifica a medida que avanza desde el proveedor inicial hasta el cliente final. Por otro lado, el modelo pudo constatar que el BWE sucede cuando la disrupción afecta la demanda distorsionándose a medida que avanza del cliente hacia el proveedor.

De esta forma, el modelo propuesto se alineó con el objetivo general de investigación, el cual fue establecido como sigue:

*“Desarrollar un modelo dinámico de los procesos en la cadena de suministro de exportación, capaz de medir el índice de nivel de servicio a través de la identificación de riesgos disruptivos de alto impacto y la medición de los costos asociados a la propagación de los mismos”.*

En éste sentido, el modelo propuesto contribuye al objetivo inicial de la investigación al demostrar que el impacto en los niveles de inventario de la cadena puede incrementarse en 600% respecto a condiciones normales de operación. Esto coincide con lo expuesto por Sterman (1989), quien argumento que este efecto se debe a que los tomadores de decisión tienden a poner más atención a la variable **OB**, y reaccionan incrementando sus niveles de demanda sin atender la variable **ITI**. Además se observa que el impacto económico de las disrupciones y su propagación, puede llegar a incrementarse hasta en un 472% como resultado del incremento de los distintos niveles de inventario presentes en la CSE.

Así mismo, producto de los resultados obtenidos, es posible afirmar que el modelo es capaz de dar respuesta a la necesidad de evaluar desde una perspectiva sistémica y dinámica de los efectos que se producen como resultado de la propagación de disrupciones de alto impacto en CSE. Así mismo, esta capacidad dinámica de análisis convierte al modelo en una herramienta útil y auxiliar en el complejo proceso de generar estrategias proactivas que pueden ser emprendidas incluso de forma anticipada ante una disrupción. Además, el modelo hace posible analizar de manera dinámica como las acciones emprendidas por un eslabón, tienen influencia en el desempeño en los demás miembros de la cadena de suministro.

Por otro lado, debido a que no fue posible contar con el apoyo de datos reales, el modelo no pudo evaluar con precisión escenarios de decisión constituidos por eventos combinados de riesgos, que se planteó en la cuarta pregunta de investigación establecida como: **¿Cuál es la relación de las variables que permiten alcanzar el nivel de servicio deseado?**. Sin embargo, si se pudo obtener evidencia de acuerdo con los escenarios evaluados en el capítulo cuatro, que el tiempo de respuesta es la variable que influye contundentemente en el impacto de la propagación en una CSE, es decir, entre más rápido se atiende una disrupción, es más probable que esta pueda enfrentarse con éxito. De ahí la importancia de desarrollar estrategias que permitan auxiliar a los tomadores de decisión en

el proceso de diseño de estrategias proactivas que permitan eficientar y asegurar el flujo continuo de bienes y servicios a través de todos los miembros de la CSE.

En éste sentido, como resultado del fenómeno de propagación aquí estudiado, se puede confirmar positivamente la hipótesis de investigación definida al inicio de nuestra investigación y la cual se propuso como sigue:

*“Si dentro de una cadena de suministro de exportación se mapea cada uno de los procesos evaluando cuantitativamente el efecto disruptivo y su potencial propagación, entonces, es posible el desarrollo de un modelo dinámico que permita conocer la interrelación de las actividades clave y su vulnerabilidad, cuantificando el impacto de la propagación de manera global o en cualquier etapa de la misma.”*

Finalmente, se puede afirmar que si bien las cadenas de suministro hoy en día son muy integradas, con procesos flexibles y con una eficiencia demostrada en el manejo de los costos, estas son susceptibles a las interrupciones de alto impacto, las cuales pueden escalar de manera rápida de un evento localizado en una etapa a una interrupción generalizada en todas las etapas de la misma.

## **5.2. Contribuciones**

Como resultado de una amplia reflexión, las aportaciones de la presente investigación se han estructurado en cuatro aspectos: i) Metodológico; ii) Ingeniería Industrial; iii) Simulación de Cadenas de Suministro en Dinámica de Sistemas y iv) Nacional.

En el **aspecto metodológico**, el objetivo fue proponer una metodología de investigación pertinente para el análisis de interrupciones de seguridad en CSE. Debido a que no se identificó un consenso sobre cómo debe desarrollarse un estudio de interrupciones en cadenas de suministro, se consideró que la mejor opción era seguir un enfoque de investigación abductivo, el cuál demostró ser pertinente ya que permitió generar un nuevo conocimiento mediante la retroalimentación de información obtenida de fuentes primarias y secundarias. De acuerdo Kovács y Spens (2005) y Sánchez (2010), gran parte de las investigaciones realizadas sobre procesos logísticos utilizan el enfoque de investigación deductivo o inductivo. Además nos fue posible demostrar que en la medida que se

mapearon las variables que intervenían en cada proceso de la CSE, fue posible ir evaluando cuantitativamente el efecto disruptivo y su potencial propagación. Permittiéndonos así cuantificar el impacto de las disrupciones desde una perspectiva global.

En cuanto a la contribución a la **ingeniería industrial**, ésta consistió en desarrollar un sistema dinámico de evaluación, que permite simular y analizar de manera sistémica y simultánea los comportamientos de los distintos niveles de inventarios que se ven involucrados en los procesos logísticos de los diferentes eslabones con participación en cadenas de suministro globales. Lo cual permite comprender como las CSE se comportan al enfrentarse principalmente a factores imprevistos y repentinos como son, desastres naturales, actos criminales y actos terroristas. Si bien el modelo puede evaluar entre otros aspectos los cambios súbitos en el comportamiento de la demanda del cliente, la investigación se enfocó en actos que derivaran en disrupciones de alto impacto, ya que se pudo identificar un especial interés en la comunidad científica, y una necesidad latente en el sector gubernamental e iniciativa privada, por conocer cuál es el comportamiento de la cadena de suministros bajo estas circunstancias. Además de que el modelo puede contribuir en el desarrollo de cadenas de suministro resistentes desde una perspectiva de administración proactiva.

Con relación a la **simulación de cadenas de suministro en dinámica de sistemas**, tomando de referencia los trabajos propuesto por Umeda y Jain (2004), así como Sánchez (2010), quienes exponen las fortalezas de los diagramas causales para identificar los bucles de retroalimentación de la cadena de suministro, se tomó la decisión de construir un modelo desde la perspectiva de dinámica de sistemas en el que sus resultados se pudieran explicar el comportamiento dinámico de las disrupciones en cadenas de suministro partiendo de la poca información dura disponible. La investigación demostró que se pueden usar este tipo modelos dinámicos para generar información relevante en torno al proceso de toma de decisiones así como una herramienta auxiliar para planear y actuar de manera proactiva ante la materialización potencial de una perturbación que origine una disrupción. En este contexto se puede concluir que la dinámica de sistemas es una herramienta pertinente para hacer posible la modelación y simulación de escenarios disruptivos en cadenas de suministro de exportación.

Del mismo modo, la presente investigación tiene una **contribución nacional**, la cual consistió a estudiar un problema estratégico para la competitividad de empresas localizadas en México, así como en difundir el conocimiento generado sobre el comportamiento de la cadena de suministros y de la importancia de uso en el estudio de sistemas dinámicos. Incluso pueden ser considerados como un factor crítico en la solución de problemas complejos, ya que facilitan el aprendizaje de las personas con respecto a las estructuras de sus procesos logísticos, permitiendo una mejor toma de decisiones.

### **5.3. Limitaciones**

Si bien los resultados de los análisis presentados en este documento muestran la importancia de estudiar de manera detenida y concienzuda el fenómeno del riesgo visto como una fuente generadora de interrupciones, la realidad nos muestra que sólo un 25% de las empresas admiten administrar el riesgo con una actitud proactiva. Este hecho aunado a la dificultad para acceder a información real y fidedigna de los efectos que eventos pasados han generado en las cadenas de suministro, no nos permitieron evaluar el modelo propuesto ante un amplio número de casos reales que nos permitieran robustecer nuestro análisis.

Hecho que sería deseable para seguir enriqueciendo el modelo y brindar así predicciones más precisas sobre el comportamiento de las CSE bajo interrupciones de alto impacto.

### **5.4. Líneas futuras**

Dado que el acceso a la información real sobre los efectos que las interrupciones de seguridad tienen sobre la cadena de suministro de exportación, no son de carácter público y por el contrario son datos muy celados por los directivos de las empresas, se han propuesto las siguientes líneas de trabajo futuro.

#### **5.4.1. Integración de nuevos subsistemas**

Debido a factores como el constante cambio en las necesidades del cliente y el dinamismo de los mercados globales, los procesos que se desarrollan en las cadenas de suministro se enfrentan a una constante transformación que pueden modificar sus patrones de conducta,

por lo que para mejorar la capacidad de análisis de su comportamiento se deben considerarse la inclusión de otros subsistemas al modelo que le permitan analizar el grado de impacto de estos factores en la competitividad de las cadenas de suministro.

De acuerdo a la investigación bibliográfica y experiencia desarrollada en la presente investigación, es recomendable incluir en la evaluación del riesgo, nuevos subsistemas que permitan medir en nivel de infraestructura y ligarlo con la productividad de la cadena de suministros, ya que son factores que se ven afectados por la materialización de cualquiera de los tres escenarios disruptivos estudiados. De igual forma se sugiere que en futuras investigaciones se considere la ubicación de los proveedores como un factor crítico en el análisis de riesgo.

#### **5.4.2. Aplicaciones en otras áreas de seguridad en cadena de suministros**

Si bien los diferentes actores que participan en la cadena de suministro han manifestado su interés por analizar los efectos que tiene la materialización de riesgos de alto impacto en el comportamiento global de la cadena de suministros, estos esfuerzos generalmente se dirigen al estudio de riesgos puros en los que sólo es posible perder (desastres naturales, actos criminales y terroristas) y que fueron objeto de nuestra investigación. Sin embargo, como trabajo futuro, se sugiere analizar también los riesgos especulativos, que son aquellos riesgos donde se puede ganar o perder dependiendo de nuestras decisiones y que sin duda su estudio también resulta de interés, por ejemplo analizar el efecto que tiene la toma de decisiones en una de las etapas en la cadena (decisión local) en el comportamiento total de la cadena. Es decir evaluar las consecuencias globales en la cadena si decidimos incrementar o disminuir nuestros inventarios, si se hace un cambio de proveedor y esto modifica el tiempo de ciclo entre otros. El análisis de estas decisiones puede permitirnos anticipar el comportamiento de una cadena de suministros, ayudando así a fortalecer nuestro proceso de administración proactiva del riesgo.

#### **5.4.3. Desarrollo de otros enfoques de validación al sistema.**

Aunque se realizó la validación del sistema mediante diferentes técnicas propuestas por Forrester (1968), Forrester y Senge (1980) y Barlas (1996), los modelos de dinámica de sistemas son frecuentemente criticados por validar sólo el comportamiento interno del modelo, por lo que si en un futuro se logra tener acceso a datos reales sobre los efectos que

los distintos sucesos disruptivos han tenido en las cadenas de suministro, se sugiere desarrollar un diseño de experimentos, esto es porque la validación mediante diseño de experimentos permite a conocer entre otras cosas, el grado de confiabilidad de un sistema, cabe señalar que en la actualidad pocos modelos desarrollados en Dinámica de Sistemas, han sido evaluados con esta herramienta Sánchez (2010). Sin embargo y debido a que los diseños experimentales, no permite identificar las influencias directas entre los bucles de retroalimentación, será necesario seguir aplicando otros métodos de validación como los desarrollados en la presente investigación.

## REFERENCIAS

- Angerhofer, B. J., & Angelidis, M. C. (2000).** System Dynamics Modeling in Supply Chain Management: Research View. Proceedings of the Winter Simulation Conference, 342-351.
- Ballou, R. (2004).** Logística: administración de la cadena de suministro (Quinta ed.). México: Pearson Educación.
- Barlas, Y. (1996).** Formal Aspects of Model Validity and Validation in System Dynamics. System Dynamics Review, 183-210.
- Barlas, Y. (2002).** System Dynamics: System Feedback Modeling for Policy Analysis. Knowledge for Sustainable Development - An Insight into the Encyclopedia of Life Support System. Oxford, UK: Unesco - Eolss publisher.
- Barlas, Y., & Aksogan, A. (1996).** Product diversification and Quick Response Order Strategies in Supply Chain Management. Proceedings of the International Conference of the System Dynamics Society.
- Buesa, M., Valiño, A., Heijs, J., Baumert, T., González, J., (2007).** El impacto de los atentados terroristas sobre los mercados de valores. Un estudio comparativo de la repercusión financiera de los ataques islamistas contra Nueva York, Madrid y Londres. Información Comercial Española, núm. 834 (enero 2007).
- Cedillo, M., Sánchez, C., (2013).** Dynamic Self-Assessment of Supply Chains Performance: an Emerging Market Approach. *Journal of Applied Research and Technology*, Vol. 11, Jun 2013, pp. 338 – 347.
- Cedillo, M., Sánchez, C., (2012).** Near-sourcing: Crossing times at U.S.-Mexico border and its impacts on NAFTA Supply chains, Working Paper.
- Cedillo, M. G., González, R. G., Jiménez, J. E., Zazueta, H., & Bueno, A. (2011).** Evaluación del riesgo en las cadenas de suministro. Proyecto CONACyT 6484. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.
- Cedillo, M., Sánchez, C., (2008).** Análisis Dinámico de sistemas Industriales. Trillas, México.
- Chase, R. B., Jacobs, F. R., & Aquilano, N. J. (2009).** Administración de Operaciones: Producción y Cadena de Suministros. McGrawHill.
- Chopra, S., & Meindl, P. (2008).** Administración de la Cadena de Suministro: Estrategia, Planeación y Operación (Tercera ed.). México: Pearson Educación.



- Christopher, M., & Rutherford, C. (2005).** Creating Supply Chain Resilience Through Agile Six Sigma. CriticalEYE Publications, 24-28.
- Davis, T. (1993).** Effective Supply Chain Management. Sloan Management, 35-46.
- Dubois, A., & Gadde, L. E. (2002).** Systematic combining: an abductive approach to case research. Journal of Business Research, 553-560.
- Duggan, J., (2008).** Using System Dynamics and Multiple Objective Optimization to Support Policy Analysis for Complex Systems. In H. Qudrat-Ullah, J. M. Spector, P. I. Davidsen (Eds.), Understanding complex systems. Springer, New York. pp. 59-81.
- EFE, (2010a).** Daños por Alex en NL superan los 10 mil mdp [Internet]. Agencia EFE. Available online: <<http://www2.esmas.com/noticierostelevisa/mexico/estados/183699/danos-alex-nl-superan-10-mil-mdp>> [Consulted 04-15-2010].
- EFE, (2010b).** Cierran carreteras por desbordamientos en Nuevo León. [Internet]. Notimex. Available online: <<http://www2.esmas.com/noticierostelevisa/mexico/estados/185083/cierran-carreteras-desbordamientos-nuevo-leon>> [Consulted 04-15-2012].
- EFE, (2010c).** Siguen cerradas seis carreteras por huracán 'Alex' [Internet]. Agencia EFE. Available online: <<http://www2.esmas.com/noticierostelevisa/mexico/estados/186448/siguen-cerradas-seis-carreteras-huracan-alex>> [Consulted 04-15-2012].
- Forrester, J., & Senge, P. (1980).** Test for Building Confidence in System Dynamics Models. TIMS Studies in the Management Science, 209-228.
- Forrester, Jay W., (1968).** Principles of Systems. Portland, OR: Productivity Press.
- Franco, L. M., & Echeverri, R. D. (2010).** Towards a systemic research methodology. Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas.
- FreightWatch, (2011).** International 2011 Mexico Cargo Theft Report. Austin, Texas
- Frost, C., Allen, D., Porter, J., & Bloodw, P. (2001).** Operational Risk and Resilience: Understanding and Minimising Operational Risk to Secure Shareholder value. Oxford: PricewaterhouseCoopers.
- Gaonkar, R., Viswanadham, N., (2004).** A Conceptual and Analytical Framework for The Management of Risk in Supply Chains, IEEE Trans Automation Syst Eng, submitted.

- Georgiadis, P., Vlachos, D., & Iakovou, E. (2005).** A System Dynamics Modeling Framework for the Strategic Supply Chain Management of Food Chain. *Journal of Food Engineering*, 351-364.
- Ghalib, A. K. (2004).** Systemic Knowledge Management: Developing a Model for Managing Organisational Assets for. *Journal of Knowledge Management Practice*.
- Giunipero, L. C., & Eltantawy, R. A. (2004).** Securing the Upstream Supply Chain: a risk management approach. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 698-713.
- Halldórsson, Á., & Arlbjörn, J. S. (2005).** Research Methodologies in Supply Chain Management - What do we know?. *Research Methodologies in Supply Chain Management*. Physica-Verlang.
- Handfield, R., McCormack, K., 2008.** Supply Chain Risk Management: minimizing disruptions in Global Sourcing. Taylor & Francis Group.
- Hints, J. (2010).** A Comprehensive Framework for analysis and design of supply chain security standards. *Journal of Transportation Security*, 105-125.
- Iñaki, S. (2010).** Modelo de Dinámica de Sistemas para la Implantación de Tecnologías de la Información en la gestión Estratégica Universitaria. Departamento de Lenguajes y Sistemas Informaticos.
- Kamath, B., & Roy, R. (2007).** Capacity Augmentation of a Supply Chain for a Short Lifecycle Product; A system dynamics framework. *European Journal of Operation Research*, 334-351.
- Kleindorfer, P.R., Saad, G.H., 2005.** Managing Disruption Risk in Supply Chains. *Production and Operations Management* 1 (14), 53-68.
- Knemeyer, A. M., Zinn, W., & Eroglu, C. (2009).** Proactive Planning for Catastrophic Events in Supply Chain. *Journal of Operations Management*, 141-153.
- Koh, W.T.H., 2007.** Terrorism and its impact on economic growth and technological innovation. *Technological forecasting & Social Change* (74), 129-138.
- Kommerskollegium, 2008,** supply chain security initiatives: a trade facilitation perspective. The national board of trade.
- Kovács, G., & Spens, K. (2005).** Adductive Reasoning in Logistics Research. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 132-144.
- Mitroff, I., & Alpasan, M. (2003).** Prparing for Evil. *Harvard Business*, 109-115.

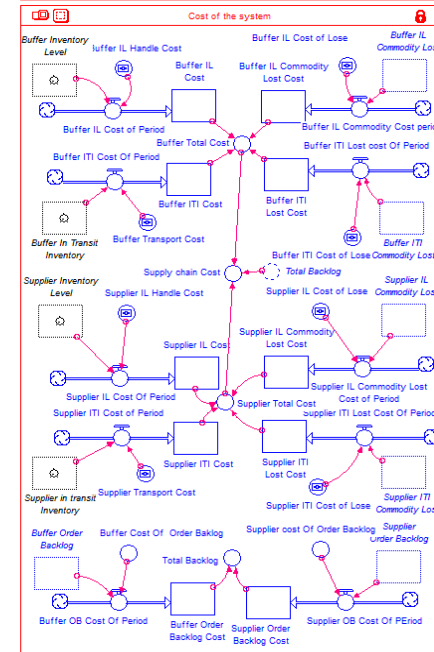
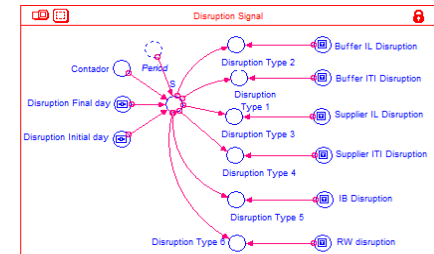
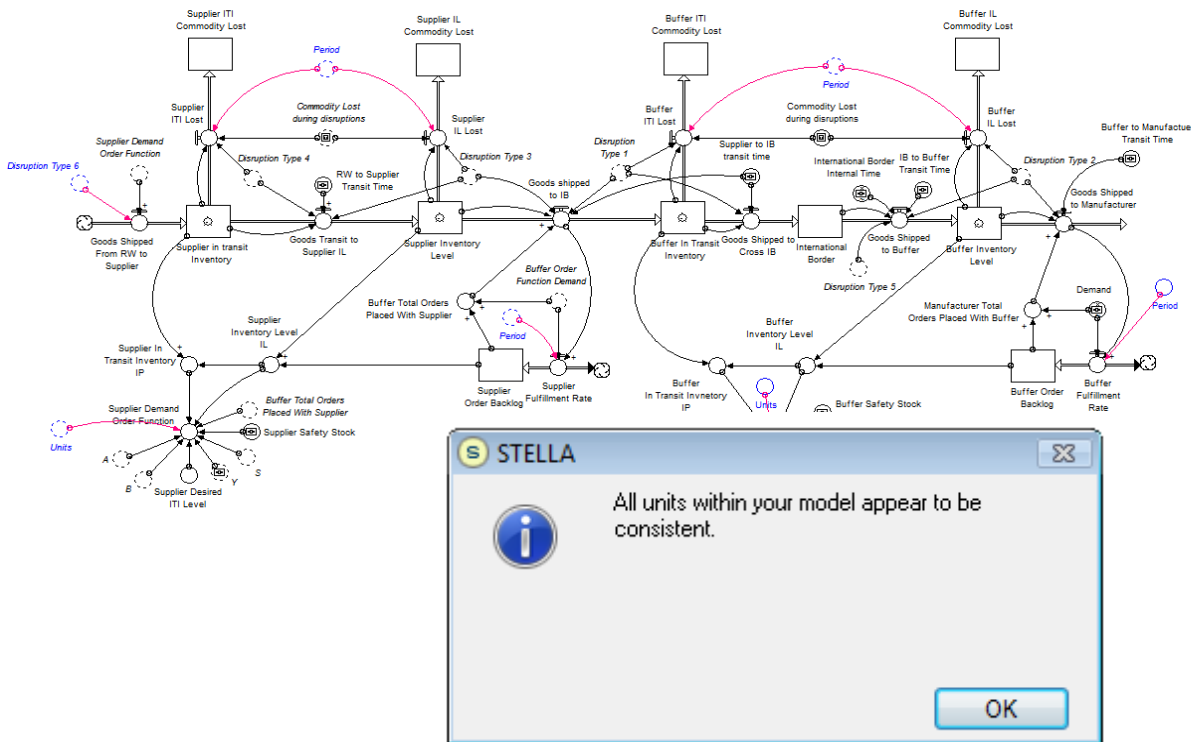
- Nieger, D., Rotaru, K., & Churilov, L. (2007).** Supply Chain Risk Identification with Value-focused Process Engineering. *Journal of Operations Management*, 154-168.
- Perez, G. (2013).** Seguridad de la cadena Logística terrestre en América Latin. Santiago: CEPAL, División de Recursos Naturales e Infraestructura.
- Pfohl, H., Köhler, H., Thomas, D., 2010.** State of the art in supply chain risk management research: Empirical and conceptual findings and a roadmap for the implementation in practice. *Logistics Research*, 1(2), 33-44.
- Pickett, C.B., 2003.** Strategies for Maximizing Supply Chain Resilience: Learning From the Past to Prepare for the Future. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology.
- Quiroga, J. (2012).** Impactos de los atentados terroristas del 9/11 en el comercio exterior mexicano. Entrevista con el Director General del Consejo Empresarial Mexicano de Comercio Exterior, Inversión y Tecnología, A.C. (COMCE), Capítulo Noreste. (01-25-2012), Monterrey, México.
- Research and Innovative Technology Administration - RITA, U.S. Department of Transportation (US DOT) 1200 New Jersey Avenue, SE • Washington, DC 20590 • 800.853.1351 [Internet]. Available online <[http://www.bts.gov/programs/international/transborder/TBDR\\_QA.html](http://www.bts.gov/programs/international/transborder/TBDR_QA.html)> [Consulted 12-15-2011].**
- Rong, L., Akhil, K., & Wil van der , A. (2007).** A formal modeling approach for supply chain event management. *Decision Support Systems*, 43, 761-778.
- Rong, Y., Shen, Z.M., Snyder, L.V., 2011.** The impact of ordering behavior on order-quantity variability: A study of Forward and reverse bullwhip effects. Working paper.
- Sánchez, C. (2010).** Sistema Dinámico de Evaluación Logística en una Red Regional de Aprovisionamiento Automotriz: El caso de la Región Sureste de Coahuila. Tesis de Doctorado. Programa Interinstitucional en Ciencia y Tecnología (PICYT), Sede COMIMSA.
- Sánchez, C., Cedillo, M. G., & Pérez, P. (2008).** Sensitivity of the Impact of Inventory and Cycle Time on Performrance of the Automotive Supply Chain. Proceedings of the Annual International Conference of Industrial Engineering Theory, Applications and Practice.
- Sanchez, C., Cedillo, M.C., Perez, P., Martinez, J., 2011.**Global economic crisis and Mexican Automotive Suppliers: Impacts on labor capital. *Simulation: transactions of the society for modeling and simulation international* 89(09) 1-15.

- Schlegel, G.L., Trent, R., 2012.** Risk management: Welcome to the new. *Logistics Management* (2012), 42-45. [Internet]. Available online <[http://logisticsmgmt.com/images/site/LM1202\\_RiskManagement.pdf](http://logisticsmgmt.com/images/site/LM1202_RiskManagement.pdf)>[Consulted 03-18-2012].
- Sheffi, Y., 2005.** “Building a Resilient Supply Chain. *Supply Chain Strategy*” - Harvard Business Review, 1, 1-11
- Sheffi, Y., 2007.** Building a resilient organization. *The Birdge: Linking engineering and Society. National Academy Of Engineering* 1 (37), 32-38. Spring 2007.
- Sheffi, Y., Rice, J.B., Fleck, J.M., Caniato, F., 2003.** Supply Chain Response to Global Terrorism: a situation scan. EurOMA POMS Joint International Conference.
- Sherwood, D. (2002).** Seeing the Forest for the Trees: A Manager's Guide to Applying Systems Thinking . Clerkenwell, London: Biddles Ltd.
- Shlegel, G. L., & Trent, R. (2012).** Risk Management: Welcome to the new. *Logistics Management*, 42-45.
- Sodhi, M., & Son, B. G. (2012).** Researcher's Perspectives on Supply Chain Risk Management. *Production and Operations Management*, 1-13.
- Stecke, K. E., & Kumar, S. (2009).** Sources of Supply Chain Disruptions, Factor that Breed Vulnerability, and Mitigating Strategies. *Journal of Marketing Channels*, 193-226.
- Sterman, J.D., 1989.** Modeling managerial behavior: Misperceptions of feedback in a dynamic decision making experiment. *Management Science* 3(35) 321-339.
- Sterman, J.D., 2000.** *Business Dynamics*. Irwin McGraw-Hill, Boston, MA.
- Stock, J. (1997).** Applying theories from other disciplines to logistics. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 515-539.
- Sweeter, A. (1999).** A comparison of System Dynamics and Discrete Event Simulation. *Proceedings of System Dynamics Society*.
- Tako, A., & Robinson, S. (2008).** Model Building in System Dynamics and Discrete-event Simulation: A Quantitative Comparison. *Proceedings of System Dynamics Society*.
- The White House, (2012).** National strategy for global supply chain security. Washington, U.S.A.
- The World Bank, (2013).** The World Bank: lead time to export report. Available Online <http://data.worldbank.org/indicator/>

- Thun, J.H., Hoening, D., 2011.** An empirical analysis of supply chain risk management in the German automotive industry. *International Journal of Production Economics* (131), 242-249.
- Towhil, D. R. (1996).** Industrial Dynamics Modeling of Supply Chain. *Logistics Information Management*, 43-56.
- Umeda, S., & Jain, S. (2004).** Integrated Supply Chain Simulation System (ISSS)-Modeling Requirements and Design Issues. U.S. Department of Commerce.
- USTR, (2013).** Executive Office of the President. The United States Trade Representative. Washington, DC. <http://www.ustr.gov/sites/default/files/>
- Vilko, J.P.P., Hallikas, J.M., 2011.** Risk assessment in multimodal supply chains. *International Journal of Production Economics* (2011), doi:10.1016/j.ijpe.2011.09.010.
- Wasson, C. S. (2006).** System Analysis, Design, and Development: Concepts, Principles, and Practices. US.
- Waters, D. (2007).** Supply Chain risk management: vulnerability and resilience in logistics. Philadelphia: Kogan Page.
- Wilson, M.C., 2007.** The impact of transportation disruptions on supply chain performance. *Transportation research: Part E* (43), 295-320.
- Wu, T., Blackhurst, J., O'Grady, P., 2007.** Methodology for supply chain disruption analysis. *International Journal of Production Research* 45 (7), 1665-1682.
- Young, H. L., Min, K. C., Seo, J. K., & Yun, B. (2002).** Supply chain simulation with discrete-continuous combined modeling. *Computers & Industrial Engineering*, 375-392.

# ANEXO 1

## Consistencia Dimensional



## ANEXO 2

### Ecuaciones del Modelo (parte 1).

- $Buffer\_IL\_Commodity\_Lost\_Cost(t) = Buffer\_IL\_Commodity\_Lost\_Cost(t - dt) + (Buffer\_IL\_Commodity\_Cost\_period) * dt$   
 INIT  $Buffer\_IL\_Commodity\_Lost\_Cost = 0$   
 INFLOWS:  
 ⇌  $Buffer\_IL\_Commodity\_Cost\_period = Buffer\_IL\_Commodity\_Lost * Buffer\_IL\_Cost\_of\_Lose$
- $Buffer\_IL\_Cost(t) = Buffer\_IL\_Cost(t - dt) + (Buffer\_IL\_Cost\_of\_Period) * dt$   
 INIT  $Buffer\_IL\_Cost = 0$   
 INFLOWS:  
 ⇌  $Buffer\_IL\_Cost\_of\_Period = Buffer\_Inventory\_Level * Buffer\_IL\_Handle\_Cost$
- $Buffer\_IL\_Commodity\_Lost(t) = Buffer\_IL\_Commodity\_Lost(t - dt) + (Buffer\_IL\_Lost) * dt$   
 INIT  $Buffer\_IL\_Commodity\_Lost = 0$   
 INFLOWS:  
 ⇌  $Buffer\_IL\_Lost = Buffer\_Inventory\_Level * Disruption\_Type\_2 * Commodity\_Lost\_during\_disruptions$
- $Buffer\_Inventory\_Level(t) = Buffer\_Inventory\_Level(t - dt) + (Goods\_Shipped\_to\_Buffer - Goods\_Shipped\_to\_Manufacturer - Buffer\_IL\_Lost) * dt$   
 INIT  $Buffer\_Inventory\_Level = 6480$   
 INFLOWS:  
 ⇌  $Goods\_Shipped\_to\_Buffer = ((min(216*8, International\_Border / (International\_Border\_Internal\_Time + IB\_to\_Buffer\_Transit\_Time)) * (1 - Disruption\_Type\_2)) * (1 - Disruption\_Type\_5))$
- OUTFLOWS:  
 ⇌  $Goods\_Shipped\_to\_Manufacturer = ((min(Buffer\_Inventory\_Level, Manufacturer\_Total\_Orders\_Placed\_With\_Buffer, 216*8)) * (1 - Disruption\_Type\_2)) / Buffer\_to\_Manufacturer\_Transit\_Time$   
 ⇌  $Buffer\_IL\_Lost = Buffer\_Inventory\_Level * Disruption\_Type\_2 * Commodity\_Lost\_during\_disruptions$
- $Buffer\_In\_Transit\_Inventory(t) = Buffer\_In\_Transit\_Inventory(t - dt) + (Goods\_shipped\_to\_IB - Goods\_Shipped\_to\_Cross\_IB - Buffer\_ITI\_Lost) * dt$   
 INIT  $Buffer\_In\_Transit\_Inventory = 1296$   
 INFLOWS:  
 ⇌  $Goods\_shipped\_to\_IB = (min(Supplier\_Inventory\_Level, Buffer\_Total\_Orders\_Placed\_With\_Supplier, 216*8) * (1 - (Disruption\_Type\_1 + Disruption\_Type\_3))) / Supplier\_to\_IB\_transit\_time$
- OUTFLOWS:  
 ⇌  $Goods\_Shipped\_to\_Cross\_IB = (1 - Disruption\_Type\_1) * Buffer\_In\_Transit\_Inventory / Supplier\_to\_IB\_transit\_time$   
 ⇌  $Buffer\_ITI\_Lost = Disruption\_Type\_1 * Buffer\_In\_Transit\_Inventory * Commodity\_Lost\_during\_disruptions$
- $Buffer\_ITI\_Commodity\_Lost(t) = Buffer\_ITI\_Commodity\_Lost(t - dt) + (Buffer\_ITI\_Lost) * dt$   
 INIT  $Buffer\_ITI\_Commodity\_Lost = 0$   
 INFLOWS:  
 ⇌  $Buffer\_ITI\_Lost = Disruption\_Type\_1 * Buffer\_In\_Transit\_Inventory * Commodity\_Lost\_during\_disruptions$
- $Buffer\_ITI\_Cost(t) = Buffer\_ITI\_Cost(t - dt) + (Buffer\_ITI\_Cost\_Of\_Period) * dt$   
 INIT  $Buffer\_ITI\_Cost = 0$   
 INFLOWS:  
 ⇌  $Buffer\_ITI\_Cost\_Of\_Period = Buffer\_In\_Transit\_Inventory * Buffer\_Transport\_Cost$

## ANEXO 2

### Ecuaciones del Modelo (parte 2)

- $Buffer\_ITI\_Lost\_Cost(t) = Buffer\_ITI\_Lost\_Cost(t - dt) + (Buffer\_ITI\_Lost\_cost\_Of\_Period) * dt$   
 INIT  $Buffer\_ITI\_Lost\_Cost = 0$   
 INFLOWS:  
   ↻  $Buffer\_ITI\_Lost\_cost\_Of\_Period = Buffer\_ITI\_Commodity\_Lost * Buffer\_ITI\_Cost\_of\_Lose$
- $Buffer\_Order\_Backlog(t) = Buffer\_Order\_Backlog(t - dt) + (Buffer\_Fulfillment\_Rate) * dt$   
 INIT  $Buffer\_Order\_Backlog = 0$   
 INFLOWS:  
   ↻  $Buffer\_Fulfillment\_Rate = Demand - Goods\_Shipped\_to\_Manufacturer$
- $Buffer\_Order\_Backlog\_Cost(t) = Buffer\_Order\_Backlog\_Cost(t - dt) + (Buffer\_OB\_Cost\_Of\_Period) * dt$   
 INIT  $Buffer\_Order\_Backlog\_Cost = 0$   
 INFLOWS:  
   ↻  $Buffer\_OB\_Cost\_Of\_Period = Buffer\_Order\_Backlog * Buffer\_Cost\_Of\_Order\_Baklog$
- $International\_Border(t) = International\_Border(t - dt) + (Goods\_Shipped\_to\_Cross\_IB - Goods\_Shipped\_to\_Buffer) * dt$   
 INIT  $International\_Border = 1300$   
 INFLOWS:  
   ↻  $Goods\_Shipped\_to\_Cross\_IB = (1 - Disruption\_Type\_1) * Buffer\_In\_Transit\_Inventory / Supplier\_to\_IB\_transit\_time$   
 OUTFLOWS:  
   ↻  $Goods\_Shipped\_to\_Buffer = ((\min(216 * 8, International\_Border / (International\_Border\_Internal\_Time + IB\_to\_Buffer\_Transit\_Time))) * (1 - Disruption\_Type\_2)) * (1 - Disruption\_Type\_5)$
- $Supplier\_IL\_Commodity\_Lost(t) = Supplier\_IL\_Commodity\_Lost(t - dt) + (Supplier\_IL\_Lost) * dt$   
 INIT  $Supplier\_IL\_Commodity\_Lost = 0$   
 INFLOWS:  
   ↻  $Supplier\_IL\_Lost = Disruption\_Type\_3 * Supplier\_Inventory\_Level * Commodity\_Lost\_during\_disruptions$
- $Supplier\_IL\_Commodity\_Lost\_Cost(t) = Supplier\_IL\_Commodity\_Lost\_Cost(t - dt) + (Supplier\_IL\_Commodity\_Lost\_Cost\_of\_Period) * dt$   
 INIT  $Supplier\_IL\_Commodity\_Lost\_Cost = 0$   
 INFLOWS:  
   ↻  $Supplier\_IL\_Commodity\_Lost\_Cost\_of\_Period = Supplier\_IL\_Commodity\_Lost * Supplier\_IL\_Cost\_of\_Lose$
- $Supplier\_IL\_Cost(t) = Supplier\_IL\_Cost(t - dt) + (Supplier\_IL\_Cost\_Of\_Period) * dt$   
 INIT  $Supplier\_IL\_Cost = 0$   
 INFLOWS:  
   ↻  $Supplier\_IL\_Cost\_Of\_Period = Supplier\_Inventory\_Level * Supplier\_IL\_Handle\_Cost$
- $Supplier\_Inventory\_Level(t) = Supplier\_Inventory\_Level(t - dt) + (Goods\_Transit\_to\_Supplier\_IL - Goods\_shipped\_to\_IB - Supplier\_IL\_Lost) * dt$   
 INIT  $Supplier\_Inventory\_Level = 1450$   
 INFLOWS:  
   ↻  $Goods\_Transit\_to\_Supplier\_IL = (1 - (Disruption\_Type\_3 + Disruption\_Type\_4)) * (Supplier\_in\_transit\_Inventory / RW\_to\_Supplier\_Transit\_Time)$   
 OUTFLOWS:  
   ↻  $Goods\_shipped\_to\_IB = (\min(Supplier\_Inventory\_Level, Buffer\_Total\_Orders\_Placed\_With\_Supplier, 216 * 8) * (1 - (Disruption\_Type\_1 + Disruption\_Type\_3))) / Supplier\_to\_IB\_transit\_time$   
   ↻  $Supplier\_IL\_Lost = Disruption\_Type\_3 * Supplier\_Inventory\_Level * Commodity\_Lost\_during\_disruptions$



## ANEXO 2

### Ecuaciones del Modelo (parte 3)

- $Supplier\_in\_transit\_Inventory(t) = Supplier\_in\_transit\_Inventory(t - dt) + (Goods\_Shipped\_From\_RW\_to\_Supplier - Goods\_Transit\_to\_Supplier\_IL - Supplier\_ITI\_Lost) * dt$   
 INIT  $Supplier\_in\_transit\_Inventory = 1300$   
 INFLOWS:  
    $\Leftrightarrow Goods\_Shipped\_From\_RW\_to\_Supplier = if(Disruption\_Type\_6=0)then(min(Supplier\_Demand\_Order\_Function,216*8))else(0)$
- OUTFLOWS:  
    $\Leftrightarrow Goods\_Transit\_to\_Supplier\_IL = (1-(Disruption\_Type\_3+Disruption\_Type\_4))*(Supplier\_in\_transit\_Inventory/RW\_to\_Supplier\_Transit\_Time)$   
    $\Leftrightarrow Supplier\_ITI\_Lost = Disruption\_Type\_4*Supplier\_in\_transit\_Inventory*Commodity\_Lost\_during\_disruptions$
- $Supplier\_ITI\_Commodity\_Lost(t) = Supplier\_ITI\_Commodity\_Lost(t - dt) + (Supplier\_ITI\_Lost) * dt$   
 INIT  $Supplier\_ITI\_Commodity\_Lost = 0$   
 INFLOWS:  
    $\Leftrightarrow Supplier\_ITI\_Lost = Disruption\_Type\_4*Supplier\_in\_transit\_Inventory*Commodity\_Lost\_during\_disruptions$
- $Supplier\_ITI\_Cost(t) = Supplier\_ITI\_Cost(t - dt) + (Supplier\_ITI\_Cost\_of\_Period) * dt$   
 INIT  $Supplier\_ITI\_Cost = 0$   
 INFLOWS:  
    $\Leftrightarrow Supplier\_ITI\_Cost\_of\_Period = Supplier\_in\_transit\_Inventory*Supplier\_Transport\_Cost$
- $Supplier\_ITI\_Lost\_Cost(t) = Supplier\_ITI\_Lost\_Cost(t - dt) + (Supplier\_ITI\_Lost\_Cost\_Of\_Period) * dt$   
 INIT  $Supplier\_ITI\_Lost\_Cost = 0$   
 INFLOWS:  
    $\Leftrightarrow Supplier\_ITI\_Lost\_Cost\_Of\_Period = Supplier\_ITI\_Commodity\_Lost*Supplier\_ITI\_Cost\_of\_Lose$
- $Supplier\_Order\_Backlog\_Cost(t) = Supplier\_Order\_Backlog\_Cost(t - dt) + (Supplier\_OB\_Cost\_Of\_PEriod) * dt$   
 INIT  $Supplier\_Order\_Backlog\_Cost = 0$   
 INFLOWS:  
    $\Leftrightarrow Supplier\_OB\_Cost\_Of\_PEriod = Supplier\_Order\_Backlog*Supplier\_cost\_Of\_Order\_Backlog$
- $Supplier\_Order\_Backlog(t) = Supplier\_Order\_Backlog(t - dt) + (Supplier\_Fulfillment\_Rate) * dt$   
 INIT  $Supplier\_Order\_Backlog = 0$   
 INFLOWS:  
    $\Leftrightarrow Supplier\_Fulfillment\_Rate = Buffer\_Order\_Function\_Demand - Goods\_shipped\_to\_IB$
- A = .1
  - B = .2
  - Buffer\_Cost\_Of\_Order\_Baklog = 2.5
  - Buffer\_IL\_Cost\_of\_Lose = 175
  - Buffer\_IL\_Disruption = 0
  - Buffer\_IL\_Handle\_Cost = 5
  - Buffer\_In\_Transit\_Invnetory\_IP = (Buffer\_In\_Transit\_Inventory)-Buffer\_\_Inventory\_Level\_IL
  - Buffer\_ITI\_Cost\_of\_Lose = 125

## ANEXO 2

### Ecuaciones del Modelo (parte 4)

- Buffer\_ITI\_Disruption = 0
- Buffer\_Order\_Function\_Demand =  
 $(\max(0, \text{Manufacturer\_Total\_Orders\_Placed\_With\_Buffer} + A * (\text{Buffer\_Safety\_Stock} - \text{Buffer\_Inventory\_Level\_IL}) + B * (\text{Buffer\_Desired\_ITI\_Level} - \text{Buffer\_In\_Transit\_Inventory\_IP} - \text{Buffer\_Inventory\_Level\_IL}) + S * Y)) * (1 - \text{Disruption\_Type\_2})$
- Buffer\_Safety\_Stock = 6480
- Buffer\_Total\_Cost =  
 $\text{Buffer\_IL\_Commodity\_Lost\_Cost} + \text{Buffer\_IL\_Cost} + \text{Buffer\_ITI\_Cost} + \text{Buffer\_ITI\_Lost\_Cost}$
- Buffer\_Total\_Orders\_Placed\_With\_Supplier = Buffer\_Order\_Function\_Demand + Supplier\_Order\_Backlog
  
- Buffer\_to\_Manufacturer\_Transit\_Time = 1
- Buffer\_Transport\_Cost = 0
- Buffer\_Inventory\_Level\_IL = Buffer\_Inventory\_Level - Buffer\_Order\_Backlog
- Buffer\_Desired\_ITI\_Level = 1300
- Commodity\_Lost\_during\_disruptions = 0
- Contador = COUNTER(0,250)
- Disruption\_Final\_day = 60
- Disruption\_Initial\_day = 50
- Disruption\_Type\_2 = Buffer\_IL\_Disruption \* S
- Disruption\_Type\_3 = Supplier\_IL\_Disruption \* S
- Disruption\_Type\_4 = S \* Supplier\_ITI\_Disruption
- Disruption\_Type\_5 = IB\_Disruption \* S
- Disruption\_Type\_6 = RW\_disruption \* S
- Disruption\_Type\_1 = Buffer\_ITI\_Disruption \* S
- IB\_Disruption = 0
- IB\_to\_Buffer\_Transit\_Time = 1
- Manufacturer\_Total\_Orders\_Placed\_With\_Buffer = Demand + Buffer\_Order\_Backlog
- RW\_disruption = 0
- RW\_to\_Supplier\_Transit\_Time = 1
- S = if(Contador >= Disruption\_Initial\_day) and (Contador <= Disruption\_Final\_day - 1) then (1) else (0)
- Supplier\_cost\_Of\_Order\_Backlog = 2.5
- Supplier\_Demand\_Order\_Function =  
 $\max(0, \text{Buffer\_Total\_Orders\_Placed\_With\_Supplier} + A * (\text{Supplier\_Safety\_Stock} - \text{Supplier\_Inventory\_Level\_IL}) + B * (\text{Supplier\_Desired\_ITI\_Level} - \text{Supplier\_In\_Transit\_Inventory\_IP} - \text{Supplier\_Inventory\_Level\_IL}) + S * Y)$
- Supplier\_Desired\_ITI\_Level = 1600
- Supplier\_IL\_Cost\_of\_Lose = 175
- Supplier\_IL\_Disruption = 0
- Supplier\_IL\_Handle\_Cost = 2.5
- Supplier\_In\_Transit\_Inventory\_IP = Supplier\_in\_transit\_Inventory - Supplier\_Inventory\_Level\_IL
- Supplier\_ITI\_Cost\_of\_Lose = 125
- Supplier\_ITI\_Disruption = 0
- Supplier\_Safety\_Stock = 1300
- Supplier\_Total\_Cost =  
 $\text{Supplier\_IL\_Commodity\_Lost\_Cost} + \text{Supplier\_IL\_Cost} + \text{Supplier\_ITI\_Cost} + \text{Supplier\_ITI\_Lost\_Cost}$
- Supplier\_to\_IB\_transit\_time = 1
- Supplier\_Transport\_Cost = 0
- Supplier\_Inventory\_Level\_IL = Supplier\_Inventory\_Level - Supplier\_Order\_Backlog

## ANEXO 2

### Ecuaciones del Modelo (parte 5)

- Supply\_chain\_Cost = Buffer\_Total\_Cost+Supplier\_Total\_Cost+Total\_Backlog
- Total\_Backlog = Buffer\_Order\_Backlog\_Cost+Supplier\_Order\_Backlog\_Cost
- Y = 0
- Demand = GRAPH(TIME)  
(1.00, 1338), (2.00, 1264), (3.00, 1315), (4.00, 1378), (5.00, 1360), (6.00, 1294), (7.00, 1310), (8.00, 1281), (9.00, 1454), (10.0, 1297), (11.0, 1275), (12.0, 1130), (13.0, 1286), (14.0, 1368), (15.0, 1311), (16.0, 1372), (17.0, 1258), (18.0, 1361), (19.0, 1250), (20.0, 1227), (21.0, 1280), (22.0, 1253), (23.0, 1259), (24.0, 1209), (25.0, 1260), (26.0, 1333), (27.0, 1261), (28.0, 1348), (29.0, 1296), (30.0, 1317), (31.0, 1434), (32.0, 1203), (33.0, 1208), (34.0, 1263), (35.0, 1340), (36.0, 1318), (37.0, 1280), (38.0, 1286), (39.0, 1335), (40.0, 1275), (41.0, 1321), (42.0, 1252), (43.0, 1370), (44.0, 1257), (45.0, 1294), (46.0, 1244), (47.0, 1302), (48.0, 1338), (49.0, 1308), (50.0, 1285), (51.0, 1180), (52.0, 1254), (53.0, 1317)...
- International\_Border\_Internal\_Time = GRAPH(TIME)  
(1.00, 0.43), (1.25, 0.375), (1.50, 0.375), (1.75, 0.375), (2.00, 0.542), (2.25, 0.667), (2.50, 0.125), (2.75, 0.25), (3.00, 0.5), (3.25, 0.333), (3.50, 0.417), (3.75, 0.458), (4.00, 0.542), (4.25, 0.0833), (4.50, 0.292), (4.75, 0.458), (5.00, 0.5), (5.25, 0.167), (5.50, 0.375), (5.75, 0.25), (6.00, 0.542), (6.25, 0.542), (6.50, 0.0833), (6.75, 0.125), (7.00, 0.5), (7.25, 0.625), (7.50, 0.458), (7.75, 0.208), (8.00, 0.0833), (8.25, 0.208), (8.50, 0.208), (8.75, 0.625), (9.00, 0.208), (9.25, 0.375), (9.50, 0.542), (9.75, 0.5), (10.0, 0.0833), (10.3, 0.542), (10.5, 0.0833), (10.8, 0.167), (11.0, 0.375), (11.3, 0.125), (11.5, 0.625), (11.8, 0.208), (12.0, 0.417), (12.3, 0.333), (12.5, 0.458), (12.8, 0.333), (13.0, 0.583), (13.3, 0.5), (13.5, 0.25), (13.8, 0.125), (14.0, 0.125)...