

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**  
**SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**MODELO DE LA CADENA DE SUMINISTRO PARA SIMULAR  
DISRUPCIONES USANDO AUTÓMATAS CELULARES**

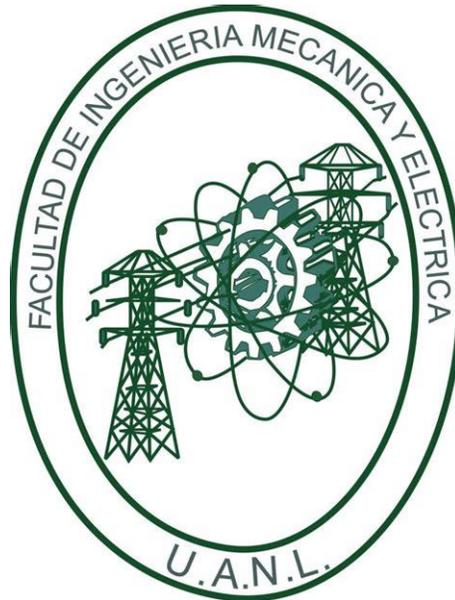
POR

RAQUEL MARTÍNEZ MARTÍNEZ

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTORADO EN INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN TECNOLOGÍAS DE  
LA INFORMACIÓN

FEBRERO 2021

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**  
**SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**MODELO DE LA CADENA DE SUMINISTRO PARA SIMULAR  
DISRUPCIONES USANDO AUTÓMATAS CELULARES**

POR

RAQUEL MARTÍNEZ MARTÍNEZ

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTORADO EN INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN TECNOLOGÍAS DE  
LA INFORMACIÓN

FEBRERO 2021



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

Universidad Autónoma de Nuevo León  
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica  
Subdirección de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis "MODELO DE LA CADENA DE SUMINISTRO PARA SIMULAR DISRUPCIONES USANDO AUTÓMATAS CELULARES", realizada por el alumno Raquel Martínez Martínez, con número de matrícula 1021079, sea aceptada para su defensa como requisito para obtener el grado de Doctorado en Ingeniería con Orientación en Tecnologías de Información.

El Comité de Tesis

Dr. Giovanni Lizárraga Bizárraga  
Director

Dra. Leticia Amalia Neira Tovar  
Revisor

Dr. Arnulfo Treviño Cubero  
Revisor

Dr. Marco Aurelio Jiménez Gómez  
Revisor

Dr. Francisco Torres Guerrero  
Revisor

Vo. Bo.

Dr. Simón Martínez Martínez  
Subdirector de Estudios de Posgrado

170

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, Junio de 2021



EDUCACIÓN DE CALIDAD PARA TRANSFORMAR Y TRANSCENDER EN BENEFICIO DE LA HUMANIDAD

Ciudad Universitaria Pedro de Aiba s/n, C.P. 66455. A.P. 076 Suc. "F"  
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México. Tels: (81) 8332 0903 /  
Conm.: 8329 4020 / Fax: (81) 8332 0904

## DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

---

Declaro solemnemente que he preparado este documento siguiendo las mejores prácticas nacionales e internacionales. Contiene material original generado y redactado por mí. También contiene material parafraseado o entrecorillado, que por ser de otras personas se incluye dando el debido reconocimiento, citando las fuentes documentales correspondientes.



---

RAQUEL MARTÍNEZ MARTÍNEZ

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, febrero 2021

*Primero, quiero agradecer a Dios por permitirme seguir adelante a pesar de toda la  
adversidad.*

*A mi hija hermosa, Mafer, eres la razón de mi existir y lo más valioso que tengo, es por  
ti y para ti. TE AMO, eres lo mejor que me ha pasado en la vida.*

*A mi familia, por todo el apoyo en todo momento.*

*Por último, pero no menos importante, mi querida familia orgullosos de FIME,  
agradecida de conocerlos.*

## Tabla de contenido

<b>DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD .....</b>	<b>iv</b>
<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>xi</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>xiv</b>
<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.2 OBJETIVO GENERAL .....	4
1.2.1 OBJETIVOS PARTICULARES .....	4
1.3 HIPÓTESIS .....	4
1.4 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN .....	5
1.5 JUSTIFICACIÓN .....	5
<b>CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>7</b>
<b>MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>7</b>
2.1 CADENA DE SUMINISTRO .....	7
2.2 AUTÓMATAS CELULARES.....	8
2.3 COMPUTACIÓN EVOLUTIVA.....	10
2.4 ALGORITMOS GENÉTICOS .....	13
<b>CAPÍTULO 3 .....</b>	<b>15</b>

<b>ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>15</b>
3.1 FUNDAMENTOS.....	15
3.2 TRABAJOS RELACIONADOS .....	16
<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>32</b>
<b>MODELO PROPUESTO .....</b>	<b>32</b>
4.1 ANTECEDENTES .....	32
4.2 MODELO PROPUESTO .....	39
4.2.1 FUNCIONES OBJETIVO .....	40
4.2.2 OPTIMIZACIÓN DE LA CONFIGURACIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO USANDO ALGORITMOS GENÉTICOS.....	45
<b>CAPÍTULO 5.....</b>	<b>50</b>
<b>EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS.....</b>	<b>50</b>
5.1 EXPERIMENTACIÓN .....	50
5.2 RESULTADOS.....	54
<b>CAPÍTULO 6.....</b>	<b>62</b>
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>62</b>
6.1 DISCUSIÓN.....	62
6.2 ESTADO DEL ARTE E INVESTIGACIÓN DOCTORAL .....	66
6.3 CONCLUSIONES.....	67
6.4 TRABAJO FUTURO .....	68
<b>APÉNDICE A .....</b>	<b>70</b>

<b>CÓDIGO .....</b>	<b>70</b>
A.1 PRUEBAGENÉTICO .....	70
A.2 EVALUACADENACELULAR.....	71
A.3 FUNCIÓNOBJETIVO.....	75
A.4 ALGORITMOGENETICO .....	76
A.5 CADENACELULAR.....	87
A.6 AUTOMATACELULAR .....	98
A.7 REGLARECUPERACION .....	100
A.8 REGLARCONSUMO .....	104
A.9 SUMAUNOS .....	107
<b><i>BIBLIOGRAFÍA .....</i></b>	<b>109</b>
<b><i>RESUMEN AUTOBIBLIOGRÁFICO.....</i></b>	<b>118</b>

## Índice de figuras

Figura 4-1. Diagrama de procesos.....	36
Figura 5-2. Resultados de la simulación propuesta de la Tabla (5-11) .....	59
Figura 5-3. Resultados de la función objetivo (4-3) .....	60
Figura 5-4. Resultados de la función objetivo (4-4) .....	60
Figura 5-5. Resultados de la función objetivo (4-5) .....	61

## Índice de tablas

Tabla 4-1. Reglas de Decisión, tomada de (8) .....	34
Tabla 4-2. Consumo de recursos, basado en (8) .....	38
Tabla 5-3. Tabla de herramientas utilizadas .....	51
Tabla 5-4. Tabla de características que se usaron para la simulación .....	51
Tabla 5-5. Resultados de simulación base .....	53
Tabla 5-6. Resultados de la simulación base con reglas .....	53
Tabla 5-7. Resultados de las reglas de consumo.....	55
Tabla 5-8. Resultados de corridas de la función objetivo (4-3).....	56
Tabla 5-9. Resultado de corridas de la función objetivo (4-4) .....	57
Tabla 5-10. Resultado de corridas de la función objetivo (4-5) .....	57
Tabla 5-11. Resultados de simulación del modelo propuesto .....	58
Tabla 5-12. Resultados de simulación del modelo propuesto con reglas.....	59

## AGRADECIMIENTOS

---

Agradezco de manera muy especial a mi director de tesis, el Dr. Giovanni Lizárraga Lizárraga, por la paciencia y tolerancia, brindarme su valiosa sabiduría, y aportaciones para el desarrollo de este trabajo.

Así como también a mis revisores de tesis, Dr. Francisco Torres Guerrero, Dra. Leticia Amalia Neira Tovar, Dr. Arnulfo Treviño Cubero y, por último, pero no menos importante el Dr. Marco Aurelio Jiménez Gómez, por sus valiosos comentarios y tiempo dedicado para mejorar y llegar a lograr este trabajo.

Muy agradecida con el coordinador del posgrado, el Dr. Tomas Eloy Salais Fierro, por el apoyo, seguimiento y motivación para continuar y avanzar, a los profesores que tuve durante mi estadía en el doctorado, que compartieron sus conocimientos, dejando huella.

Una gratitud infinita a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León, mi Alma Máter, por todo el apoyo que he recibido para poder realizar este proyecto, a nuestro director, el Dr. Arnulfo Treviño Cubero, que desde subdirector creyó en mí y me brindo todo su apoyo

que estuvo a su alcance, al subdirector Dr. Fernando Banda Muñoz, que a pesar de que tengo poco de tratarlo con mayor frecuencia, me sigue brindando su apoyo. Al Dr. Jaime Arturo Castillo, quien me escucho y brindo la oportunidad de iniciar con este proyecto, siendo el director en turno. A la Ing. María Elena Guerra, super agradecida, que también recibí el apoyo desde que llegué a su coordinación, para continuar con mis estudios de maestría, hasta iniciar este proyecto de posgrado, al Ing. Jesús Adolfo Meléndez, quien me apoyo también a lo que estuvo a su alcance para poder iniciar y avanzar en este proyecto.

A DIOS, por permitirme llegar hasta este punto guiándome siempre, estar a mi lado dando fortaleza, brindarme sabiduría y entendimiento, por darme tantas bendiciones y brindarme a tantas personas que me han marcado para seguir adelante.

Mi hermosa HIJA, Mafer, por intentar comprender, a pesar de su corta edad, por esos días que no estuve de “lleno”, que se ponía a jugar sola, para dejarme avanzar, por todas las oraciones a diario que estuvo pidiendo a Dios que pueda terminar mi grado de Doctorado.

A mi FAMILIA, mis padres San Juana y Mario Javier, mis hermanos Alma, Erick, Any, Norma, Javier, Doris, mis cuñados, Elena, Javi y Gabriel, mis sobrinos Nelson, Oscar, Gabriel, Alex, Liz, Alan y Omar, por seguirme apoyando, en las buenas y en las malas, SIEMPRE ESTÁN AHÍ y es lo que amo demasiado de mi familia. También agradezco a la Sra. Chayo y el Sr. José, que a pesar de todo siempre me brindaron su apoyo.

A Mario, que estuvo durante casi todo el proceso de desarrollo de mi grado doctoral, que sé que no quisiera que lo agregara, pero realmente le tengo mucho que agradecer.

Mis AMIGOS de la FIME, ustedes saben quiénes son, valoro demasiado su amistad, ha sido un gran camino que he recorrido con ustedes y sobre todo gracias por el café.

Por último y no menos importante, a amigos y compañeros maestros que siempre me echaron porras con sus comentarios “tú puedes”, “sigue adelante”, “ánimo”.

## RESUMEN

---

Raquel Martínez Martínez.

Candidato para obtener el grado de Doctorado en Ingeniería Con Orientación en Tecnologías de la Información.

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Título del estudio: MODELO DE LA CADENA DE SUMINISTRO PARA SIMULAR DISRUPCIONES USANDO AUTÓMATAS CELULARES.

Número de páginas: 120.

**OBJETIVOS Y MÉTODO DE ESTUDIO:** Construir un modelo que simule el comportamiento de la cadena de suministro y los efectos de diferentes estrategias de recuperación ante desastres naturales y optimizar el modelo para obtener las mejores estrategias dado una configuración de una cadena.

Realizar un modelo utilizando autómatas celulares, que por medio de una simulación realizar pruebas introduciendo datos ficticios, analizar los datos generados y con la información recolectada, evaluar cuales son las mejores estrategias dado una configuración de una cadena.

CONTRIBUCIONES y CONCLUSIONES: Como conclusión se presentaron tres nuevas funciones objetivas para modelar el comportamiento de una cadena de suministro bajo el efecto de interrupciones utilizando autómatas celulares. Introduciendo nuevos elementos que permitieron una mejor representación del comportamiento real de una cadena de suministro.

Las contribuciones principales son que se puede representar el estado de la cadena de suministro en forma de valor monetario. Al igual que cada empresa que pertenezca a una cadena de suministro pueda tener su propia regla de decisión. Con los resultados se demuestra que el enfoque tiene mejor relación con comportamiento intuitivo que se espera que tenga una cadena de suministro.

Firma del asesor: \_\_\_\_\_

Dr. Giovanni Lizárraga Lizárraga

## CAPÍTULO 1

# INTRODUCCIÓN

---

En el trabajo de Chen, Liu y Yang (8), se define la cadena de suministro como todo aquello que esté involucrado para satisfacer la solicitud de un cliente, ya sea un producto físico o un servicio. Se menciona que la solicitud de los clientes se puede realizar de en forma directa o indirecta. Los de forma directa pueden ser el fabricante, el proveedor, sitio Web, mientras que de forma indirecta pueden ser transportistas, almacenistas, recepcionistas, los departamentos de mercadotecnia, finanzas, demostradores, servicio al cliente, etc. Además, agregan que para que una cadena de suministro sea efectiva deben de cumplirse todas las etapas de la cadena de suministro, cualquier fallo en cualquiera de sus eslabones puede llevar errores en entrega en la pérdida de clientes y de beneficios económicos. Otro punto que señalado en dicho artículo es que, las cadenas de suministro a pesar de su nombre en realidad se comportan como

redes donde no hay una línea única donde pasan los productos, si no que funcionan como una red de distribución.

En el artículo de Yang y Xu (55) se menciona que de la cadena de suministro se han realizado varios estudios donde se han realizados diferentes métodos para modelarla comentando que no es algo sencillo ya que es difícil expresar, entender o comprender todo lo que conlleva dentro del modelo.

Por ello, es que la propuesta que se presta para este trabajo se deriva en una idea que es modelar la complejidad de la cadena de suministro con autómatas celulares, dando un comportamiento diferenciado a cada autómata para determinar que estrategias deben de tomar los miembros de esta misma, de manera que se minimicen los impactos negativos de las interrupciones.

## 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Para las empresas es difícil simular el comportamiento de la cadena de suministro, ya que por lo general son muy complejas y las interacciones entre los miembros que la componen no son fáciles de simular analíticamente.

El trabajo de Chen, Liu y Yang (8) se comenta que en la actualidad la logística tiene áreas muy relevantes donde se tiene que estar gestionando, algunas de ellas son, la distribución de sus productos, buscar técnicas para la comercialización, finanzas, etc., y entre ellas manejan las vulnerabilidades que

se puedan presentar para las empresas, ya sea en pérdida de información por virus informáticos, ataques terroristas, huelgas, o también desastres naturales como terremotos, tsunamis, huracanes.

Entre estas vulnerabilidades está un punto muy importante que es el impacto que se genera ante estas disrupciones, por lo cual las empresas tienen una gran pérdida monetaria y en ocasiones es difícil la recuperación, dependiendo que tan grave fue la catástrofe.

Continuando con el trabajo de Chen, Liu y Yang (8), proponen un modelo de autómeta donde representan el funcionamiento dinámico que se genera después de disrupciones imprevistas en las empresas que pertenecen a una cadena de suministro, utilizando estrategias de recuperación. Este modelo es bastante innovador y aporta mucho a la simulación a la cadena de suministro bajo disrupciones, pero se puede considerar que está muy limitado a la hora de simular diversos aspectos de la cadena de suministro, por ejemplo, al clasificar los estados de las empresas les pone una simple etiqueta de “bueno” o “malo” o “regular” y no lo liga a las condiciones monetarias de la empresa bajo desastre. También la forma en que se liga los costos de recuperación a la situación monetaria de la empresa es muy artificial.

En este trabajo se propone modificar el modelo para que represente de una forma más realista las consecuencias de las disrupciones y los costos de recuperación y sus interacciones, además de agregar flexibilidad a la forma en que las empresas puedan responder en forma individual a los desastres.

## 1.2 OBJETIVO GENERAL

Construir un modelo que simule el comportamiento de la cadena de suministro y los efectos de diferentes estrategias de recuperación ante desastres naturales y optimizar el modelo para obtener las mejores estrategias dado una configuración de una cadena.

### 1.2.1 OBJETIVOS PARTICULARES

- Realizar un modelo utilizando autómatas celulares.
- Realizar pruebas en la simulación, introduciendo datos ficticios al modelo.
- Analizar los datos generados por la simulación del modelo.
- Con la información recolectada, evaluar cuales son las mejores estrategias dado una configuración de una cadena.

## 1.3 HIPÓTESIS

**H0:** Permitir que cada empresa pueda elegir su propia estrategia de recuperación, mostrará que se puede optimizar una cadena de suministro que forzando a todas las empresas a usar una misma estrategia.

**H1:** Todas las empresas van a quedar con la misma estrategia de recuperación, aun cuando se les de la opción de elegir diferentes estrategias.

## 1.4 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

Las preguntas de investigación que se presentan en este trabajo son:

- ¿Es recomendable que todas las empresas de una cadena de suministro usen la misma estrategia de recuperación?
- ¿Puede combinarse los costos de recuperación con los ingresos periódicos de la empresa?
- ¿Se puede proponer más de una función objetivo para evaluar el desempeño de una cadena de suministro bajo interrupciones?

## 1.5 JUSTIFICACIÓN

En el artículo de Martínez, Lizárraga, Cavazos, Salais Saucedo (37), se comenta que la vulnerabilidad de la cadena de suministro es un área creciente de investigación debido al alto impacto que puede tener una interrupción en la economía de una región e incluso de un país. Se menciona varios tipos de

desastres que pueden afectar el tránsito de productos, entre ellos, desastres naturales, terrorismo, "piratería", enfermedades, robos, etc.

La Casa Blanca publicó un documento titulado "La Estrategia Nacional para la Seguridad Global de la Cadena de Suministro" (16), donde se observa que los efectos de las interrupciones en la cadena de suministro deben ser estudiados y comprendidos.

Otro factor vital al modelar la cadena de suministro es cómo medir su desempeño bajo los efectos de la interrupción. La función de rendimiento utilizada debe elegirse cuidadosamente para tomar una decisión adecuada sobre cómo organizar la cadena de suministro, para que sea más robusta y confiable.

Se han creado modelos para simular la cadena de suministro bajo disrupciones, pero estos modelos son unos primeros intentos que dejan un gran espacio para mejora. La manera en que están planteados actualmente puede que no capturen correctamente la dinámica del dinero y la interacción entre empresas. Por lo tanto, mejorando estos modelos se puede llegar a un mejor conocimiento de cómo robustecer la cadena de suministro lo cual puede llevar a grandes ahorros económicos y de tiempo.

La justificación para el desarrollo de este trabajo es la importancia que tiene la cadena de suministro ante el impacto de las disrupciones naturales. Tener una seguridad que con una estrategia se pueda lograr obtener la mejor manera para recuperarse de las interrupciones naturales previstas.

## CAPÍTULO 2

# MARCO TEÓRICO

---

## 2.1 CADENA DE SUMINISTRO

El libro de Ballou (57), se define la cadena de suministro, como un grupo de tareas que se van repitiendo desde una materia prima hasta realizar un producto terminado en un canal de flujo, que con esto añade valor al consumidor y que una sola empresa no tiene la capacidad de poder controlar todo un canal de flujo.

En el artículo de Becerra-González, Pedroza-Barreto, Pinilla-Wah y Vargas Lombardo (58), explican que los sistemas de información han sido una herramienta importante para la administración de las empresas, como lo es el desarrollo de software para el control de stock, materiales de requerimiento, planificación de requisitos de fabricación y que en la actualidad se han convertido

en una forma para movilizar, ser flexible y mejorar el cambio de información y operaciones.

En el artículo de Yang y Xu (55), abordan el tema de la resiliencia de una cadena de suministro de granos ante una interrupción con la ayuda del gobierno. Mencionan que es fundamental, para una cadena de suministro de granos, evaluar la interrupción y la resiliencia, esto con la finalidad de garantizar que exista el suministro de granos y así poder estabilizar los precios al mercado final. Proponen un modelo cuantitativo donde analizaron una máquina para procesar granos, para mostrar cómo se recupera después de un desastre natural, y como esta interrupción afecta a las empresas minoristas. Consideraron dos métodos de recuperación de la cadena de suministro: abastecimiento por contingencia y abastecimiento con la ayuda del gobierno. Mencionan que los resultados que obtuvieron muestran que para procesar los granos se prefiere una recuperación completa y oportuna, y que es indispensable la intervención de la ayuda del gobierno, hacen la aclaración que no se puede reemplazar completamente al proveedor que tienen como respaldo.

## 2.2 AUTÓMATAS CELULARES

En la revista de Shiff (39), mencionan que en 1948 fueron los inicios de los autómatas celulares; y comentan que fue gracias al matemático John Von Neumann, cuando intentó realizar una máquina autorreplicable. También

comentan que, el comportamiento de los autómatas celulares es similar al procedimiento de copiar las células vivas del ácido desoxirribonucleico, conocido como ADN.

En el artículo de Reyes (36), se menciona que un autómata celular (AC), dentro de la computación, es una metodología matemática con una estructura dinámica que contiene un grupo de celdas que van obteniendo diferentes valores.

En el libro de Toffoli y Margolus (49), mencionan que los autómatas celulares se caracterizan por formar un sistema simple que maneja reglas sencillas, donde existen y se desarrollan. A medida que se van creando nuevos tipos de autómatas se buscará crear aún más y adaptarlos a nuestras necesidades. También se comenta que las reacciones del autómata son en base a dos sistemas, los cuales son: sistemas dinámicos discretos para un área local y los sistemas dinámicos continuos por ecuaciones diferenciales parciales.

En el libro de Gutowitz (13), se menciona que los autómatas celulares, son discretos en base al tiempo y son dinámicos respecto al espacio, la actualización de cada célula está sincronizada con una regla de interacción local determinista. Así mismo, cada una de las células contiene un número finito de estados, que por lo general son pocos.

En un estudio sobre autómatas celulares de Ganguly, Sikdar y Deutsch en (12), realizaron una investigación sobre los diferentes campos donde se han utilizado los autómatas celulares. Las principales aplicaciones donde se utilizan

son en juegos, en el diseño de máquinas de computación paralela, en sistemas físicos y biológicos, aplicaciones en ciencias sociales y reconocimiento de patrones.

En una revista de Cano y Rojas (5), mencionan que el autómata celular es un modelo matemático dinámico que evoluciona en pasos discretos, y presentan un ejemplo didáctico de una aplicación que realizaron para el cifrado de información utilizando autómatas celulares en donde usaron imágenes digitalizadas, cifrando y asignando información dentro de ellas. Lo realizaron con la finalidad de generar interés en el alumnado de criptografía.

## 2.3 COMPUTACIÓN EVOLUTIVA

En el libro de Eiben y Smith (11) se menciona que la computación evolutiva se inspiró en el método de la evolución natural del ser humano, donde la resolución de problemas es a prueba y error. Mencionan que se tienen dos criterios, el primero de ellos se basa en las posibilidades de supervivencia y multiplicación, mientras que el otro criterio se basa en que tan bien resuelve un problema una solución candidato para decidir si se utilizan como semillas de soluciones propuestas. También comentan que ese procedimiento está inspirado en la teoría de evolución de Darwin, donde la selección de natural es un factor importante.

En un artículo de Eiben y Schoenauer (10), se menciona que la inspiración para aplicar los principios de Darwin se originó antes del avance de las computadoras, a partir de los años cincuenta. También mencionan que durante quince años se estuvo avanzando en áreas como programación evolutiva, introducida por Fogel en Estados Unidos, algoritmo genético por Holland y estrategias evolutivas por Rechenberg y Schwefel, en Alemania. Otra nueva área que comentan es la llamada programación genética, surgió a principios de los noventa.

En el artículo de He, Maple, Watson, Tiwari, Mehnen, Jin y Gabrys (14) mencionan que en la actualidad el Internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés) ha dado lugar a la cuarta revolución industrial, conocida también como Industria 4.0, donde se han obtenido grandes beneficios al conectar personas, procesos y datos. También comentan que, la ciberseguridad se ha convertido en un desafío crítico en los sistemas físicos cibernéticos que se disponen para IoT, desde la conexión de una cadena de suministro, el Big Data que se produce en una gran cantidad de dispositivos, hasta los sistemas de control en la industria. Mencionan que la computación evolutiva cuando se combina con otra inteligencia computacional tiene una función importante para la ciberseguridad, como lo es en el mecanismo inmune artificial, también para la arquitectura de seguridad de IoT, la minería / fusión de datos en sistemas ciber físicos habilitados para IoT y la ciberseguridad impulsada por datos.

En artículo de Horvath y Carvalho (15) realizaron una revisión de investigaciones sobre computación evolutiva en sistemas de recomendación. Comentan que, para los sistemas inteligentes, las principales aplicaciones, son los sistemas de recomendación (SR). Mencionan que los SR pueden ayudar a los usuarios a encontrar elementos relevantes en grandes espacios de información de forma personalizada. También comentan que se han realizado investigaciones con distintas técnicas para el desarrollo de SR, donde una de ellas es la técnica evolutiva computacional (EC), que es una tendencia emergente con varios sectores de aplicación. Mencionan que para el EC hubo un creciente interés como personalización de la web, recuperación de información y que SR fomentó la publicación de trabajos de encuesta sobre el tema. No obstante, comentaron que las estas encuestas han analizado solo un pequeño número de publicaciones, centrándose en cinco aspectos que consideran sobresalientes: primero, técnica de recomendación utilizada, segundo, conjuntos de datos, tercero, los métodos de evaluación adoptados en sus partes experimentales, cuarto, líneas de base empleadas en la comparación experimental de los enfoques propuestos, por último, reproducibilidad de los experimentos reportados.

En el artículo de Chen, Uliji y Zaizai (7), presentaron un novedoso algoritmo evolutivo para hacer agrupaciones heterogéneas basado en el filtrado colaborativo de los usuarios, con el objetivo de reunir a usuarios con intereses similares en el mismo grupo y ayudarlos a encontrar artículos que se adapten mejor a sus gustos personales. Comentan que se pueden adaptar con mayor

probabilidad la sugerencia de amigos con intereses similares. Mencionan que los resultados obtenidos tienen mejores resultados de predicción que otros algoritmos existentes.

## 2.4 ALGORITMOS GENÉTICOS

En el libro de Pal y Wang (26), trata sobre los algoritmos genéticos (AG) para el reconocimiento de patrones, mostrando que son procedimientos computacionales adaptativos y robustos, modelados sobre la mecánica de los sistemas genéticos naturales. Se menciona también, que los AG actúan como una metáfora biológica e intentan emular algunos de los procesos observados en la evolución natural, donde se consideran técnicas de búsqueda y optimización aleatorias, pero estructuradas. Así también, expresan su capacidad explotando eficientemente la información histórica para especular sobre nuevos descendientes con un rendimiento mejorado esperado. Por último, comentan que los AG se ejecutan iterativamente en un conjunto de soluciones codificadas, denominadas población, con tres operadores básicos: selección / reproducción, cruce y mutación.

En el artículo Umbarkar y Sheth (52), mencionan que el rendimiento del algoritmo genético (AG) depende de varios operadores, donde el operador cruzado es uno de ellos. Estos operadores de cruce se clasifican principalmente como operadores de cruce dependientes de la aplicación y operadores de cruce

independientes de la aplicación. También comentan que el efecto de los operadores de cruza en AG depende tanto de la aplicación como de la codificación.

## CAPÍTULO 3

# ESTADO DEL ARTE

---

### 3.1 FUNDAMENTOS

En la tesis de Vazquez (27) se propone una herramienta para administrar sucesos de interrupción de tipo efecto domino en la cadena de suministro. También propone en específico en el área automotriz, acciones de recuperación, de una manera eficiente, que puedan afectar la realización de lo ya planeado. La simulación que presenta también proporciona información importante para que la cadena de suministro para que puedan evaluar y decidir las mejores acciones. Determina que la metodología ayuda resolver la problemática. Menciona que no fue aplicada en el sector industrial, ya que no se contaba con las herramientas necesarias, pero que se dejó a criterio de la empresa el utilizarlo, ya que se dejó demostrando que los resultados obtenidos de la simulación si mostraban una visualización del impacto y que pudieran tomar las mejores decisiones.

El trabajo de Chen, Liu y Yang (8) crearon un modelo formal para representar el desempeño operativo dinámico entre las empresas de la cadena de suministro que enfrentan interrupciones causadas por desastres naturales y provocados por el hombre. Su análisis muestra que una cadena de suministro se recupera mejor si las empresas adoptan una estrategia de recuperación radical, rápida y costosa que resuelve de inmediato la interrupción. Esta observación que muestran es robusta a varios requisitos de consumo de recursos.

## 3.2 TRABAJOS RELACIONADOS

Huerta, en su Tesis realizada (17), realizó una simulación de fenómenos naturales en función del tiempo, para mostrar el comportamiento complejo de una cuerda vibrante utilizando reglas y autómatas celulares.

Los trabajos (3, 4, 6) son ejemplos de cómo cada año se escriben artículos o libros relacionados con la seguridad que debe tener o que presenta una cadena de suministro. Un enfoque para comprender el comportamiento de la cadena de suministro es simular su desempeño utilizando diferentes modelos. Se presenta un enfoque interesante en (8), donde la cadena de suministro se modela utilizando autómatas celulares. En el libro de Schiff (39) se menciona una introducción de la teoría de los autómatas celulares, especificando que un autómata celular único es una unidad individual que realiza tareas simples y

puede interactuar con otros autómatas celulares del mismo tipo. También se menciona que se permiten modelar sistemas complejos utilizando combinaciones de varios autómatas celulares con tareas bien diseñadas y con reglas de interacción.

En el artículo de Martínez, Lizárraga, Cavazos, Salais y Saucedo (37), mencionan que una cadena de suministro está conformada por empresas que trabajan en conjunto para mover los bienes del productor al consumidor final. Mencionando el procedimiento que la primera empresa elabora su producto, después es llevado a la segunda empresa, y así en sucesivo hasta que el producto llega a la última que hace la distribución del producto terminado para poder ser entregado al consumidor final. En este artículo también mencionan que, si un evento inesperado golpea a una de las empresas que pertenezca a una cadena de suministro, existirá una interrupción en el proceso que se realiza, disminuyendo la cantidad de productos que llegarán al consumidor final. Por este motivo, mencionan que es esencial recuperarse de un desastre lo antes posible. Así mismo, comentan que, el costo de recuperación es proporcional a la velocidad reconstruida de una empresa, y a veces no hay suficientes recursos para completar la reconstrucción. También indican que los recursos disponibles para recuperarse de un desastre son elementos críticos en el desempeño de una cadena de suministro, por lo que el procedimiento utilizado para mejorar el estado de una empresa se debe elegir de forma inteligente para que se pueda mantener la cadena de suministro en buen estado y mantener los recursos necesarios.

En el artículo de revista de Iakovou, Vlachos, Keramydas y Partsch (18), se hace una investigación sobre mitigar las interrupciones a través de suministro dual. Se enfoca en una cadena de suministro humanitaria, donde se desarrolla una metodología que cuantificará el impacto del riesgo en cadenas de suministro humanitarias, mediante una estrategia de mitigación. La metodología que describen emplea una simulación de eventos discretos donde incluye la evaluación de estrategias de abastecimiento de emergencia basadas en el coste total y lo reúnen con los costos relacionados que tienen que ver con el inventario.

En otro estudio realizado por Ivanov y Sokolov en (21), estudian el control e identificación que tienen de la operatividad de una cadena de suministro. La metodología que utilizaron se basa en el análisis y bases de teoría de control, sistemas de negocios e información técnica. Propusieron una estructuración y clasificación de datos relacionados para distintas perspectivas teóricas.

Una de las estrategias para administrar la recuperación de interrupciones de una cadena de suministro se propone en (31). La dividen en tres etapas. La primera de estas etapas presenta un modelo matemático que enfrenta cualquier etapa de la cadena de suministro y que incrementa al punto más alto de su beneficio en una ventana de tiempo. La segunda de dichas etapas toma en cuenta muchas interrupciones. Desarrollaron una heurística que enfrenta dichas interrupciones y que funciona en tiempo real, y compararon las soluciones obtenidas. En la tercera y última etapa se tomaron en cuenta algunos ejemplos

realizados y los compararon con casos de estudio en el mundo real para comparar beneficios y utilidades.

En el trabajo de L. Yang, Chen, Rytter, Zhao y D. Yang (54), muestran un algoritmo basado en algoritmos genéticos con el objetivo de mejorar la sostenibilidad de los transportes marítimo, donde las empresas navieras dedican mayor impulso a aumentar la eficacia energética operativa de los barcos existentes. Mencionan que el tipo de predicción de consumo de combustible específico es un requisito previo de las mejoras operativas. Comentan que los modelos de caja gris existentes (GBM, por sus siglas en inglés), aunque tienen una limitación para separar las direcciones climáticas se encuentran con una capacidad de rendimiento significativo para la predicción del consumo de combustible del barco. Mencionan que, con el objetivo de superar esa restricción, propusieron un novedoso GBM basado en algoritmos genéticos (AG), donde el consumo de combustible de un barco lo modelaron con un método basado en los principios básicos de la propulsión del barco y los parámetros desconocidos en dicho modelo mencionado estimaron que con un procedimiento basado en AG. La información real que utilizaron de la operación de un barco petrolero durante un período de navegación fue de siete años que utilizaron para justificar la exactitud y confiabilidad del modelo propuesto. Compararon el modelo propuesto con el último GBM, y los resultados que obtuvieron mostraron que el rendimiento de ajuste es notablemente preferible, sobre todo para las direcciones climatológicas oblicuas. El modelo que propusieron menciona que puede ser utilizado como apoyo de los programas de gestión de la eficacia

energética del barco para aminorar el consumo de combustible y la emanación de gases de efecto invernadero (GEI) de un barco. Por último, mencionan que esto es beneficioso para conseguir el objetivo de envío sostenible.

En el estudio de Parvasi, Tavakkoli-Moghaddam, Bashirzadeh, Taleizadeh y Baboli (30) diseñaron un modelo usando la combinación de un algoritmo genético y un método exacto y simulado con el objetivo de proteger instalaciones de servicio basado en tres niveles de defensa. Este estudio se centró en el modelo de la mediana de r-interdicción en un horizonte temporal finito. Como se mencionó, tiene como objetivo proteger las construcciones de servicio que utilizan las instalaciones de defensa contra el ataque más extremo posible, de manera que el sistema pueda usar su mayor potencia para servir a los clientes después de que se haya dañado. El problema que establecieron es sobre la base de juegos de líder-seguidor en la forma de defensor-atacante-defensor. Asimismo, intentaron hacer el modelo más realista considerando un horizonte de tiempo. Para dar respuesta al problema, usaron una combinación de algoritmo genético, recocido simulado y un método exacto. La comparación que realizaron del método de solución del algoritmo metaheurístico aplicado y el método de solución exacto en una serie de pequeñas muestras, donde señalan el rendimiento apetecible de este algoritmo en un tiempo razonable.

En un artículo de revista publicado por Shahbaz, Rasi y Ahmad (41) mencionan que la cadena de suministro se ha convertido en algo fundamental para cualquier empresa, pero que las interrupciones por desastres son los

principales impedimentos para el mejor desempeño, e incluso puede afectar no solo a una empresa, sino a un sistema completo. También comentan que, es indispensable administrar los riesgos de manera eficiente y segura y que el riesgo no se puede manejar hasta que se investigue de manera adecuada. En este estudio se dedicaron a realizar una investigación exhaustiva, identificaron que el riesgo general de la cadena de suministro es perturbador. Mencionan que el sector de producción de cualquier país es considerado como la columna vertebral de cualquier economía. El estudio presenta como objetivo el suministrar un instrumento confiable para diagnosticar los riesgos generales de la serie de suministro de la manufactura de Malasia a través de un proceso sistemático.

En trabajo de Shahbaz, Rasi, Zulfakar, Ahmad, Abbas y Mubarak (40), realizaron un análisis del resultado de una revisión bibliográfica, con el objetivo de conocer los propósitos, debilidades y cualidades de las buenas medidas de desempeño. También explicaron brevemente varios enfoques y marcos teóricos para el desempeño de la cadena de suministro. Para la gestión de riesgos, propusieron una nueva métrica que mide el desempeño general, sobre la cual concluyeron que es muy efectiva para medir el desempeño del riesgo de la cadena de suministro. Afirman que una buena métrica debe contener siete indicadores que son: costo, calidad, flexibilidad, satisfacción del cliente, capacidad, tiempo y consistencia.

En el trabajo de Sawik (38), propone un enfoque para hacer la selección de proveedores a partir de un portafolio relacionado a los riesgos de una

interrupción de una cadena de suministro. Realizo una combinación de la programación de la producción de los productos terminados con la selección de proveedores de productos. Comenta que, a diferencia de otras investigaciones sobre las interrupciones de una cadena de suministro, se centran en la toma de decisiones de mitigación antes de que suceda una interrupción, y que ellos proponen el enfoque de un portafolio donde se combina las decisiones tomadas para antes, durante y después de la interrupción. Así mismo considera dos enfoques en la toma de decisiones: el primero de ellos es un enfoque integrado, con la información necesaria sobre los posibles escenarios de interrupción, y el segundo enfoque es de jerarquía sin información disponible. Comenta que, en el enfoque integrado, se representan todos los posibles escenarios de interrupción, donde los principales portafolios cubrirán todos los escenarios que se determinan junto con el portafolio de recuperación y el programa de producción para cada escenario. En el de jerarquía, primero determina los principales portafolios, después, cuando un proveedor primario se ve afectado por una interrupción, seleccionan el portafolio de recuperación. Para la toma de decisiones integrada y de jerarquía, utiliza modelos de programación entera mixta desarrollados con el objetivo de que el problema sea neutral al riesgo, tomaron en cuenta tanto el tiempo como el costo de la recuperación para minimizar el costo esperado o maximizar el nivel de servicio esperado. Los resultados que obtuvo indican que, para ambos enfoques, la toma de decisiones de enfoque integrado selecciona los principales portafolios que es más variada que el enfoque jerárquico y cuando los principales proveedores cierran por una

interrupción, por lo general eligen un único portafolio de recuperación de recursos.

En un artículo de revista de Paul, Sarker y Essam (32) muestran una revisión bibliográfica sobre el riesgo y la gestión de interrupciones en los sistemas de producción-inventario y cadena de suministro. La revisión se realiza sobre la base de comparar distintos trabajos publicados en este ámbito de investigación, en particular los trabajos, que consideraron los factores de riesgo de la vida real, como desarrollos de producción con defectos, riesgo e interrupción en la producción, oferta, demanda y transporte. Así mismo, se enfocan en revisar modelos matemáticos y los enfoques de solución aplicando escenarios hipotéticos y problemas del mundo real.

En un trabajo de Ivanov, Dolgui y Sokolov (19), se estudia el impacto de las nuevas tecnologías tales como la digitalización y la Industria 4.0 en el análisis de control de riesgos de suspensión e interrupción en la cadena de suministro (SC, por sus siglas en inglés). El marco de investigación combina las consecuencias de dos áreas, que son el impacto de la digitalización en la administración de SC (SCM, por sus siglas en inglés) y el impacto de SCM en el control del efecto de onda. Mencionan que, es el primer estudio que conecta el punto de vista de la información empresarial, de ingeniería y análisis sobre la digitalización y los riesgos de SC. También consideran la información reciente y los casos de estudios que buscan llevar la discusión a profundidad con la ayuda de un marco conceptual para dejar en claro las relaciones entre la digitalización y los riesgos

de interrupción de SC. Así mismo, analizan las perspectivas y las transformaciones que a futuro se pueden esperar con la transición hacia las SC ciber físicas.

En el trabajo de Ahmed (1), se desarrolló un modelo de inventario para dos proveedores que tienen capacidades aleatorias considerando la interrupción del abastecimiento. Mencionan que la interrupción de abastecimiento se produce por diversas razones, incluyendo problemas de transporte, fallas de equipo, falta de materia prima, interrupciones naturales, etc. Desarrollaron un modelo modificado  $(Q, r)$  para abordar el problema de la incertidumbre que se genera por la futura oferta como respuesta a la demanda generada por un proceso de Poisson. Aplican dos algoritmos de optimización para buscar los valores de las variables de decisión, que son cantidades de pedido dependientes del estado y el punto de pedido para minimizar el costo por unidad de tiempo. Como resultado obtuvieron que el proveedor puede dejar de estar disponible en momentos aleatorios durante un período de tiempo aleatorio. Además, comentan que los proveedores también pueden tener capacidades aleatorias que conducen a un rendimiento incierto en los pedidos.

En el trabajo de Tukamuhabwa Rwakira (50) se realizó un estudio sobre la conexión entre las amenazas, las estrategias y resultados de la resiliencia que existe en una cadena de suministro. El estudio se concentra en los países desarrollados, porque es donde se tiene más información empírica sobre la capacidad de recuperación de la cadena de suministro (SCRES). Las

organizaciones que se encuentran en países en desarrollo constituyen una parte sumamente importante dentro de las cadenas de suministro mundiales y también han tenido que experimentar los efectos desastrosos de las fallas de la cadena de suministro. Se busca encontrar toda la información práctica y teórica sobre la resiliencia.

En el artículo de Ali, Rahman, Tumpa, Rifat y Paul (2) se estudia como la demanda influye en el precio de mercado y el nivel de servicio para minoristas. Estas intermisiones de la demanda han llamado la atención de investigadores y profesionales que se han mantenido al pendiente de estos sucesos. Los autores simulan una estructura de cadena de suministro como centralizada como descentralizada. La cadena de suministro descentralizada la estudian usando teoría de juegos y los resultados analizan usando métodos numéricos. Concluyen que los precios y niveles de servicio están influenciados directamente por las interrupciones en la demanda de mercado de minoristas. Aplicaron los resultados de su estudio a un caso real relacionado con una fábrica de juguetes en Bangladesh mejorando las ganancias.

En el artículo de Parkouhi, Ghadikolaei y Lajimi (29), buscan un método para elegir y clasificar a los proveedores usando un estudio de dos dimensiones (potenciador y reductor de resiliencia). Primero usaron una técnica llamada Gray DEMATEL para asignar pesos a la importancia de las dos dimensiones antes mencionadas. Después empleando otra técnica Gray Simple Additive Weighting (GSAW), definen el puntaje de cada proveedor acorde con cada dimensión.

Encontraron que la personalización era realmente el criterio de mejora más destacable y el límite en la capacidad del proveedor era el limitante más significativo. Clasificaron a los proveedores en vulnerables, sensibles, volátiles y resistentes de acuerdo con la puntuación de los proveedores en las dimensiones de potenciador y reductor, y, por último, se brindaron estrategias para lograr el desarrollo del proveedor.

En esta investigación de Ivanov, Dolgui, Sokolov y Ivanova (20) hicieron una investigación bibliográfica extensa para encontrar las tendencias en los temas de investigación sobre como diseñar y planificar la cadena de suministro poniendo énfasis en las interrupciones y sus técnicas de recuperación para tratar de relacionar los métodos cuantitativos con la investigación empírica. Encontraron que la investigación actual no está actualizada con los problemas reales y que es muy importante investigar a futuro como aprovechar los métodos numéricos de vanguardia para prevenir interrupciones.

En el estudio de Parkouhi y Ghadikolaei (28) realizaron un proceso de una red analítica difusa para la selección de proveedores resilientes. Esto con el objetivo que los proveedores seleccionados sean los ideales, que cuenten con las capacidades para sobrellevar la resiliencia de una empresa en una cadena de suministro. Comentan que los proveedores son fuentes esenciales de vulnerabilidad y que una mejor selección de proveedores tiene como resultado la construcción de resiliencia reduciendo en general los riesgos en la cadena de suministro. Realizaron una revisión amplia de bibliografía para proponer un

modelo conceptual inicial encontrando opiniones de expertos en la Industria de Madera y Papel. Determinaron el nivel de importancia de los elementos que fueran efectivos al momento de la selección de los proveedores resilientes utilizando el proceso de una red analítica difusa. Los resultados que obtuvieron fueron los subcriterios más importantes en la selección de proveedores resilientes siendo: la variación en el precio, la vulnerabilidad, el límite de capacidad del proveedor, el límite de capacidad del proveedor, la visibilidad, las dificultades de adquisición de materia prima del proveedor y la entrega a tiempo.

En el artículo de Kamalahmadi y Parast (23) presentan una evaluación de estrategias para la mitigación de interrupciones en una cadena de suministro. Evalúan la efectividad de integrar tres diferentes tipos de prácticas de redundancia (preposicionamiento de inventario, proveedores de respaldo y proveedores protegidos) en la cadena de suministro de una corporación que está expuesto a dos distintos tipos de riesgo: riesgo de suministro y riesgo ambiental. El riesgo de suministro obstaculiza a un proveedor individual, mientras que el riesgo ambiental hace que diferentes proveedores en una región determinada no estén disponibles. Lo anterior descrito es un factor adicional a la interdependencia del proveedor, donde la interrupción en un proveedor también puede afectar a diferentes proveedores que se encuentren activos. Utilizando el concepto de un árbol de decisión para lograr capturar algunos escenarios diferentes de interrupción, crearon un modelo de programación entera diferente en dos etapas como un modelo general para profundizar en el problema de la clasificación de proveedores y la retribución

de pedidos bajo las dependencias del proveedor y el riesgo que existe debido a las interrupciones. En el Modelo General, el suministro múltiple es la única táctica de proveedor que efectúa la empresa. Después desarrollaron tres variaciones del modelo general, una para cada una de las tres diferentes prácticas de redundancia, y evaluaron el costo deseado de la cadena de suministro propuesto por cada modelo extendido. Descubrieron cuantitativamente cómo añadir redundancia a la cadena de suministro en formas diferentes, todo esto se realiza en junto a planes de contingencia, lo cual busca ayudar a las empresas a disminuir el impacto de las interrupciones de la cadena de suministro. Los resultados que obtuvieron demostraron que las tres estrategias disminuyeron los costos y los futuros riesgos en comparación con lo que ofrece el Modelo General. Ejecutaron un análisis de confiabilidad, riesgos, dependencia y precios en cada estrategia para poder proporcionar la información necesaria sobre la clasificación de proveedores. Finalmente, evidenciaron que regionalizar una cadena de suministro es una representación efectiva de como disminuir los impactos negativos que causan las interrupciones ambientales en la cadena de suministro.

En un artículo de revista de Pervin, Roy y Weber (33) muestran un modelo de inventario de múltiples artículos para mercancía usada, dicho modelo se fundamenta en la perspectiva del fabricante y el minorista. El nivel de uso se considera constante, debido a esto el nivel de demanda de cualquier artículo sufre de una amplia cantidad de nivel de stock; por lo tanto, los autores diseñaron una función de demanda dependiente del stock del producto. La demanda de

cualquier artículo también depende de su precio de venta; por lo que, también diseñaron una función de demanda dependiente del precio. El minorista adopta la política de crédito comercial para sus clientes, con el fin de promover la competencia dentro del mercado. De esta manera puede obtener ingresos e intereses después de que el cliente pague la cantidad del costo de compra al minorista hasta el último período de crédito comercial planteado por el proveedor. Las privaciones se permiten en el modelo del minorista, ya que también es un artículo muy efectivo. Se brinda un descuento en el precio de los artículos en espera para aquellos clientes que están preparados a retrasar su demanda. Los autores presentan un método de solución analítica para encontrar el beneficio total para el fabricante y el minorista. Además, utilizan la teoría de juegos clásica y el enfoque de equilibrio de Nash para encontrar una buena solución que sea óptima para la ganancia conjunta. Finalmente, los autores presentan resultados numéricos y casos de prueba para validar su modelo.

En la investigación de Levner y Ptuskin (25), se enfoca en los riesgos ambientales, los posibles o ya existentes en las cadenas de suministro que representan peligro debido a los efectos adversos sobre las instalaciones y el medio ambiente, los organismos vivos, por los efluentes, emisiones, desechos, disminución de recursos, entre otros efectos que surgen debido a las actividades de la cadena de suministro. Los autores mencionan que debido al tamaño cada vez mayor de las cadenas de suministro industriales modernas y creciente diversidad que existe de ellas, el día de hoy, los problemas de identificación, evaluación y moderación de los riesgos de interrupción se convierten en

objetivos desafiantes de la gestión del riesgo de la cadena de suministro. Los autores proponen un modelo de optimización basado en el desorden para disminuir el tamaño del modelo de la cadena de suministro y visualizar la posible pérdida económica causada por los riesgos ambientales creados por el efecto dominó. La ventaja que presenta su modelo es que permite simplificar la representación de la cadena de suministro, pero manteniendo sus características principales.

En el trabajo de Zou, Chen y Zhao (56), se plantea un algoritmo de búsqueda y seguimiento de objetivos diferentes basados en descomposición (DMOBSA) para problemas de recomendación personalizada (PR). En el DMOBSA-PR presentado, se crea una representación individual efectiva fundada en las peculiaridades de los problemas de PR. Además, presentan un nuevo método de cruce y mutación para su algoritmo de búsqueda. También, utilizan un esquema de objetivos distintos para equilibrar la exactitud y las métricas de diversidad. Evalúan la efectividad de su propuesta utilizando los datos de prueba Movielens 100K donde muestran que DMOBSA-PR es mejor comparado con otros algoritmos.

En la siguiente investigación de Wang (53) trabaja con sistemas de recomendación, los cuales son instrumentos eficaces para aliviar el problema de exceso de información. En estos sistemas de recomendación se busca alimentar el sistema con información confiable y crear un proceso a través del cual los usuarios puedan consultar fácil y rápidamente la información que necesitan. Se

han presentado algunos algoritmos codiciosos para tratar este problema, pero la mayoría de los algoritmos solo se enfocan en localizar información central para conseguir resultados de recomendación exactos, perdiendo de vista otros objetivos de recomendación con una importancia equivalente. Con este fin, formularon el problema de extracción de información central como una dificultad en la optimización multiobjetivo, y formularon un algoritmo cambiante que sea multiobjetivo para extraer información central, etiquetados como MOEA-IC. Extraen información central con múltiples propiedades al mismo tiempo con el algoritmo MOEA-IC, lo que puede propiciar soluciones postuladas con diversas propiedades para los tomadores de decisiones. En los experimentos, el rendimiento del algoritmo MOEA-IC se verifica en tres conjuntos de datos con pautas de selección variables y se coteja con el de dos algoritmos codiciosos existentes.

## CAPÍTULO 4

# MODELO PROPUESTO

---

### 4.1 ANTECEDENTES

Simular la cadena de suministro (CDS) no es una tarea fácil porque es un sistema complejo con muchas variables y condiciones. En (48), muestran una revisión de varios enfoques por estudiar, como, simulación continua, sistemas de eventos discretos y juegos de simulación. Para simular el comportamiento de esta, en (8), presentan un modelo utilizando autómatas celulares. En este modelo tiene como enfoque el desempeño de una CDS en función de los criterios que siguen las empresas miembros de esta para recuperarse después de un desastre y cuál es su costo. El objetivo del modelo que presentan es deducir cuáles son las mejores políticas dadas ciertas condiciones.

Continuando con el modelo mencionado en (8), los autores presentan una simulación donde, cada una de las  $N$  empresas en la cadena de suministro está

representada por un autómata celular. Cada empresa está numerada con el índice  $i$  desde la primera ( $i = 1$ ) hasta la última ( $i = N$ ), que representa su posición en la CDS. Además, para realizar simulaciones, se prueba para varias iteraciones, donde una iteración es un período de tiempo en el que puede ocurrir una interrupción. Por lo general, una iteración es equivalente a un día, pero se pueden usar otros períodos. El estado inicial es la iteración cero, y la simulación tiene un número total de ( $T$ ) períodos. Para cada iteración, se ejecutan varios procesos para evaluar el comportamiento de la CDS; Estos procesos incluyen la ocurrencia de un desastre, la acción que una empresa afectada ejecuta como respuesta al desastre y el estado final de las empresas de la CDS al final del periodo.

El período actual de la simulación está representado por  $t$ , que puede tomar valores de  $0$  a  $N$ ,  $t = 0$ , se refiere al estado original de la cadena de suministro,  $t = 1$  se refiere al día uno,  $t = 2$  se refiere al día dos y así sucesivamente. Para un período dado  $t$ , una empresa miembro de una cadena de suministro puede tener un estado de  $s_i(t)$ . Si  $s_i(t) = 2$  (bueno) es el estado con el nivel más alto, cuando una empresa se encuentra en su estado completamente operativo. Si  $s_i(t) = 1$  (normal) es el estado en el que la empresa no se encuentra en pleno estado operativo, pero aún puede funcionar como parte de la cadena de suministro. El tercer nivel  $s_i(t) = 0$  (malo) es donde la compañía apenas está operativa. Para cada día hay una probabilidad de que un desastre golpee a una compañía. Hay dos tipos de desastres, un desastre fuerte (con probabilidad,  $pf$ ) que hace que la empresa obtenga un estado de cero y un desastre bajo (con probabilidad,  $pg$ )

que hace que la empresa reduzca el nivel de su estado en una unidad. Las probabilidades se establecen en  $pf = 17/365$  y  $pg = 134/365$  según un estudio presentado en (42).

Regla	Definición
RD1	$s_i(t) = 2$
RD2	$s_i(t) = 2$ si $\max(\xi_{i-1}(t), \xi_i(t), \xi_{i+1}(t)) = 2$ de lo contrario $s_i(t) = 1$
RD3	$s_i(t) = 2$ si hay dos $j$ en $J = \{i - 1, i, i + 1\}$ tal que $\xi_j(t) = 2$ de lo contrario $s_i(t) = 1$
RD4	$s_i(t) = 2$ si $\xi_{i-1}(t) + \xi_i(t) + \xi_{i+1}(t) = 6$ de lo contrario $s_i(t) = 1$
RD5	$s_i(t) = 1$ si $\xi_{i-1}(t) + \xi_i(t) + \xi_{i+1}(t) = 6$ de lo contrario $s_i(t) = 2$
RD6	$s_i(t) = \max(\xi_{i-1}(t), \xi_i(t), \xi_{i+1}(t))$
RD7	$s_i(t) = \min(\xi_i(t) + 1, 2)$
RD8	$s_i(t) = \xi_{i-1}(t)$ si $\xi_i(t) \neq \xi_{i-1}(t)$ de lo contrario $s_i(t) = \min(\xi_i(t) + 1, 2)$
RD9	$s_i(t) = \xi_{i+1}(t)$ si $\xi_i(t) \neq \xi_{i+1}(t)$ de lo contrario $s_i(t) = \min(\xi_i(t) + 1, 2)$
RD10	$s_i(t) = \max(\xi_{i-1}(t), \xi_{i+1}(t))$ si $\xi_i(t) \neq \max(\xi_{i-1}(t), \xi_{i+1}(t))$ de lo contrario $s_i(t) = \min(\xi_i(t) + 1, 2)$

Tabla 4-1. Reglas de Decisión, tomada de (8)

Cuando una empresa tiene un nivel inferior a 2, inicia un mecanismo para recuperar el nivel operativo óptimo. Estos mecanismos se llaman “Reglas de Decisión” (RD). En la Tabla 4-1, hay una descripción detallada de las reglas de

decisión definidas por (8). Para una empresa con un número  $i$  en el período  $t$  cuyo estado es  $s_i(t)$ , el estado de su vecino izquierdo inmediato es  $s_{i-1}(t)$  mientras que el estado de su vecino derecho inmediato es  $s_{i+1}(t)$ . Algunas reglas de decisión deciden cómo mejorar el estado de la empresa ignorando el estado de los vecinos inmediatos, por ejemplo, RD1 y RD7. Otras reglas de decisión consideran el estado de los próximos vecinos, por ejemplo, RD2 y RD5. Y otras reglas de decisión consideran el estado de un solo vecino, por ejemplo, RD8 y RD9.

RD1 es el caso más extremo, en el sentido de que siempre trata de aumentar el nivel de la empresa al nivel 2. Esta estrategia puede ser costosa, dependiendo del costo de pasar del estado 0 y 1 al estado 2. Por otro lado, RD7 es una regla gradual donde el estado de una empresa aumenta en una unidad por período. Las diferentes reglas de decisión representan diferentes estrategias que pueden ser más o menos costosas, dependiendo del costo de cambiar de un estado a otro.

Para cada período  $t$ , la simulación de la cadena de suministro es la siguiente: cada empresa miembro comienza el período con un valor de estado de  $s_i(t-1)$ , el valor del período anterior. Luego, se calcula la ocurrencia de un desastre, donde el estado de la empresa puede cambiar dependiendo de si se produce una interrupción, de acuerdo con las probabilidades  $pf$  y  $pg$ . El estado de la empresa miembro de la cadena de suministro después de un desastre, pero antes de la aplicación de una regla de decisión está representado por  $\xi_i(t)$ ,

el cual es solo es un estado transitorio. Finalmente, la regla de decisión asociada con la compañía se aplica para obtener el estado  $s_i(t)$ , de la compañía  $i$  en el período  $t$ . La Figura 4-1 muestra el resumen de este proceso.

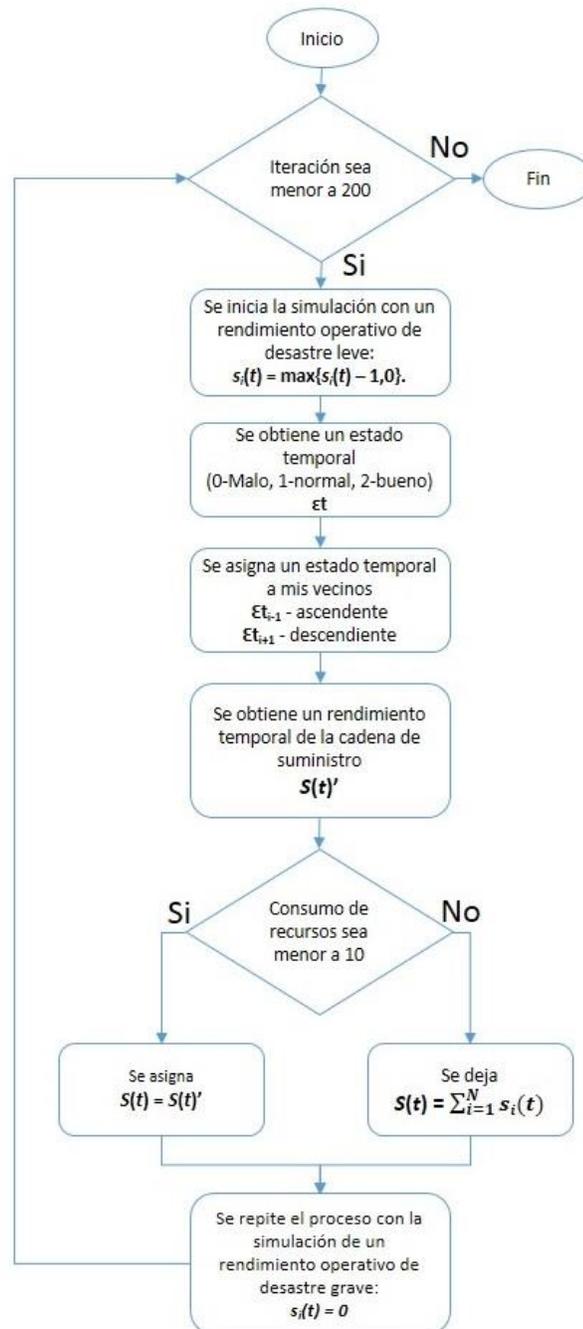


Figura 4-1. Diagrama de procesos

Mejorar el estado de una empresa de un nivel inferior a un nivel superior requiere el uso de recursos. En (8), se proponen varias reglas de consumo de recursos ( $CR$ ) de acuerdo con el costo para mejorar el estado de una empresa, como puede verse en la Tabla 4-2. Cada empresa comienza con  $R = 3$  unidades de recursos, y en cada período los recursos se incrementan cantidad igual a  $\delta = 1$ . Si en un momento dado los recursos de una empresa no son suficientes para respaldar la aplicación de una regla de decisión, entonces la regla de decisión no se aplica y el estado de la empresa  $i$  en el período  $t$  es igual a  $\xi_i(t)$ . Las diferentes reglas de consumo representan diferentes situaciones con respecto al costo de recuperarse de un desastre. Por ejemplo, CR1 y CR2 son reglas intuitivas, donde pasar de un estado al siguiente nivel superior es barato, mientras que pasar del estado cero al estado dos es costoso. Por otro lado, CR5 y CR6 representan situaciones en las que reconstruir completamente las instalaciones (pasar del estado cero al estado dos) es más barato que arreglarlas (pasar de un estado al superior inmediato).

Escenario	Grado de recuperación			Grafico
	$0 \rightarrow 1(C_1)$	$1 \rightarrow 2(C_2)$	$0 \rightarrow 2(C_3)$	
RC1	1	2	10	<p>0 → 1(C1) 1 → 2(C2) 0 → 2(C3)</p>
RC2	2	1	10	<p>0 → 1(C1) 1 → 2(C2) 0 → 2(C3)</p>
RC3	1	10	2	<p>0 → 1(C1) 1 → 2(C2) 0 → 2(C3)</p>
RC4	2	10	1	<p>0 → 1(C1) 1 → 2(C2) 0 → 2(C3)</p>
RC5	10	1	2	<p>0 → 1(C1) 1 → 2(C2) 0 → 2(C3)</p>
RC6	10	2	1	<p>0 → 1(C1) 1 → 2(C2) 0 → 2(C3)</p>

Tabla 4-2. Consumo de recursos, basado en (8)

El desafío es detectar qué reglas de decisión funcionan mejor para una regla de consumo dada. Ejecutar simulaciones puede lograr esto para las diferentes combinaciones de RD y CR. Para un CR dado, podemos elegir la RD para el cual la cadena de suministro tuvo el mejor rendimiento. Para medir el desempeño de una cadena de suministro, se definieron los siguientes conceptos. El estado de toda la cadena de suministro para un período determinado  $t$  se define como:

$$S(t) = \sum_{i=1}^N s_i(t) \quad (4-1)$$

y el rendimiento  $P$  de una cadena de suministro después de una simulación es el valor medio del estado de la cadena de suministro en todos los períodos  $t$ , en otras palabras:

$$P = \sum_{t=1}^T S(t) \quad (4-2)$$

El valor elegido para  $T$  es 365, para simular un periodo de tiempo de un año.

## 4.2 MODELO PROPUESTO

En este proyecto se presenta un modelo diferente al modelo base, consiste en evaluar el rendimiento de la cadena de suministro para una mejor aproximación de lo que ocurre en las cadenas de suministro reales.

#### 4.2.1 FUNCIONES OBJETIVO

En este trabajo proponemos tres funciones objetivo para evaluar el desempeño de la CDS. A continuación, se describe cada una de ellas:

- Función objetivo 1: Suma de los beneficios acumulados de todas las empresas de la cadena de suministro al final del año.
- Función objetivo 2: Se considera la influencia del estado de las empresas en las ganancias, que, a partir de la empresa dañada, hacia la derecha, van a producir una reducción en la ganancia de esa empresa.
- Función objetivo 3: Se considera la influencia del estado de las empresas en las ganancias, que, a partir de la empresa dañada, hacia la derecha, se va a ir reduciendo en forma multiplicativa los daños.

En la Fórmula 4-2 describe la función objetivo 1 como una medida del estado de la cadena de suministro, pero es una selección arbitraria de rendimiento, donde los estados de un miembro de la CDS (bueno, normal, malo) no tienen una interpretación fácil. Una mejor aproximación para los estados de un integrante de la cadena de suministro es utilizar los beneficios generados por una empresa. Por ejemplo, si una empresa está en buen estado, genera una ganancia de 2, pero cuando está en un estado normal, obtiene una ganancia de 1, y si una empresa está en mal estado, genera una ganancia de 0. Al mismo tiempo, el costo de mejorar una empresa de un estado normal/malo a un estado bueno/normal se deduce de esas ganancias. Entonces, por cada iteración en una simulación, una compañía genera ganancias, estas ganancias se acumulan individualmente de manera que un periodo  $t$  las ganancias acumuladas hasta el momento se representan por  $R_i^t$  para cada miembro  $i$  de la CDS y el costo para reparar el estado de la compañía se deduce de  $R_i^t$ . Los valores de las ganancias que estamos usando (2,1,0) han sido elegidos de forma arbitraria siguiendo el artículo original (8), pero en la práctica al simular casos aplicados lo deseable es utilizar valores reales de las ganancias que produzca cada empresa. Por simplicidad estamos asumiendo que cada empresa produce la misma ganancia según su estado, pero nada impide que cada empresa genere una ganancia diferente para cada estado.

La función objetivo propuesta es la suma de las ganancias acumuladas de todas las empresas de la cadena de suministro al final del año. En otras palabras:

$$P = \sum_{i=1}^N R_i^T \quad (4-3)$$

donde  $R_i^T$  es el valor de las ganancias acumuladas de la empresa  $i$  al final del año  $t = T$ .

Como en el modelo original, una empresa mejora su estado solo si tiene suficientes recursos  $R_i^T$  en ese momento.

Este modelo refleja mejor lo que sucede en la vida real. Primero, la base del desempeño de la cadena de suministro son las ganancias monetarias de la cadena; así que maximizar los beneficios es una medida de rendimiento más natural que maximizar un estado artificial. El rendimiento de la cadena de suministro se ve afectado por el costo de reparar una empresa dañada porque este costo se deduce de los recursos que contribuyen a la función objetivo. A diferencia del modelo original, donde los recursos para reparar las empresas y el valor de la función objetivo son elementos separados que solo interactúan en los casos en que no hay suficientes recursos para reparar una empresa, aquí la función objetivo y los recursos para reparar las empresas están estrechamente relacionados.

Una segunda mejora para el modelo base, es considerar la influencia del estado de las empresas anteriores de la cadena de suministro en los beneficios que genera una empresa. Si una empresa se encuentra en buen estado, produce

el 100% de los productos que las siguientes empresas necesitan para satisfacer la demanda, pero si una empresa se encuentra en un estado normal o malo, produce menos del óptimo de los productos que necesitan las siguientes empresas. Entonces, las producciones de las siguientes empresas de la cadena de suministro no pueden producir el máximo de los productos, debido a la falta de materiales de las compañías anteriores, incluso si están en buen estado.

Se implementó la idea descrita antes usando dos casos. Primero, una influencia a corto plazo si una empresa en un estado inferior a un buen estado tiene una mala influencia solo en la empresa siguiente. Y un segundo caso con una influencia a largo plazo fue una empresa con un estado menos que bueno influye en todas las empresas que lo siguen en la cadena de suministro.

Para implementar las ideas descritas en el párrafo anterior, presentamos el factor  $h(i)$  que representa la penalidad que la compañía  $i$  produce a la compañía  $i + 1$  debido a su estado. Para la influencia a corto plazo, los valores de  $h(i)$  son los siguientes: si la empresa  $i$  está en buen estado,  $h(i) = 1$ ; si la compañía  $i$  está en un estado normal, entonces  $h(i) = 0.5$ ; y si la empresa  $i$  está en mal estado,  $h(i) = 0$ .

Para la influencia a largo plazo, los valores de  $h(i)$  son los siguientes: si la empresa  $i$  está en buen estado,  $h(i) = 1$ ; si la compañía  $i$  está en un estado normal, entonces  $h(i) = 0.75$ ; y si la compañía  $i$  está en mal estado, entonces  $h(i) = 0.25$ . Tenga en cuenta que, para el caso a largo plazo, las sanciones son más

bajas para evitar que una sola empresa en mal estado produzca una ganancia cero para toda la cadena de suministro.

La función objetivo del modelo con influencia a corto plazo es:

$$P = \sum_{i=1}^N (R_i^T \cdot h(i-1)) \quad (4-4)$$

y la función objetivo para el modelo con influencia a largo plazo es:

$$P = \sum_{i=1}^N (R_i^T \cdot \prod_{j=0}^{i-1} h(j)) \quad 4-5$$

Definimos  $h(0) = 1$ .  $R_i^T$  se define como en la fórmula 4-3.

Otra aportación de este trabajo en comparación con el introducido en (8), es que se permite que las compañías en la misma cadena de suministro tengan reglas de decisión diferentes. En el modelo original, todas las compañías en la cadena de suministro usan las mismas reglas de decisión para recuperarse de un desastre. Esto no es cierto en la práctica, porque incluso si una empresa es parte de una cadena de suministro, es libre de elegir cómo recuperarse de un desastre. Esto abre una nueva pregunta relacionada con la optimización de la cadena de suministro, ¿qué reglas de decisión deben seguir cada empresa para maximizar las ganancias? En este trabajo, se optimiza la configuración de la

cadena de suministro utilizando un algoritmo genético. Se permite que cada empresa use cualquier regla de decisión y una simulación para buscar la mejor configuración dada una función objetivo.

#### 4.2.2 OPTIMIZACIÓN DE LA CONFIGURACIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO USANDO ALGORITMOS GENÉTICOS

Los algoritmos genéticos (GA, por sus siglas en inglés) son técnicas de optimización inspiradas en la teoría de la evolución de las especies (43). Los GA son parte de algoritmos de inteligencia artificial. Su procedimiento de búsqueda utiliza operadores basados en conceptos como poblaciones, supervivencia del más apto, mutación, cruce, etc. (44). Las técnicas evolutivas se han aplicado a muchos problemas logísticos (24, 46, 9).

En los GA, una solución candidata para un problema se codifica como un vector de ceros y unos (un vector binario). Un conjunto de vectores binarios se conoce como población y un vector único generalmente se conoce como un individuo. Los elementos de una población se mutan y recombinan para obtener nuevos vectores que representan una mejor solución para el problema. Los vectores que están mutados y recombinados son una selección de los mejores elementos de la población. La idea es que los mejores elementos de una población se puedan utilizar para obtener nuevas soluciones que sean incluso mejores que sus "padres".

Se asigna un valor de aptitud a cada elemento de la población, dependiendo de qué tan buena sea la solución que representa el individuo. El método para asignar un valor numérico para la aptitud depende del problema. Por ejemplo, en un problema en el que queremos minimizar el tiempo de viaje de un punto a otro, el valor de aptitud física puede calcularse con la fórmula:

$$F(x) = \frac{1}{T(x)} \quad 4-6$$

Donde  $F(x)$  es el valor del valor de aptitud,  $x$  es una solución para el problema, y  $T(x)$  es el tiempo de viaje que resulta para la aplicación de la solución  $x$ . Tenga en cuenta que esta fórmula asigna un mayor valor de condición física a las personas con el menor tiempo de viaje.

Una vez que cada elemento de la población tiene un valor de aptitud asignado, el siguiente paso de un GA es hacer una selección de los mejores individuos de la población. Esta selección se utilizará para generar una nueva población a través de un mecanismo de recombinación. Si el tamaño de la población es  $n$ , podemos tomar  $n / 2$  individuos para producir la siguiente población. Existen varios mecanismos para hacer la selección. El torneo binario es uno de los métodos más populares, en este se toman al azar dos elementos de la población, se compara la aptitud de los individuos y se selecciona al individuo con el valor de aptitud más alto. Esta operación se repite hasta que se alcanza el número deseado de individuos.

El siguiente paso es ejecutar un proceso de recombinación. En GA, el proceso de recombinación es la principal estrategia de búsqueda y se realiza de la siguiente manera:

1. Elegir al azar dos individuos (Padre 1 y Padre 2).
2. Suponiendo que los números binarios en cada individuo son  $m$ , generar un número aleatorio  $k$  entre  $1$  y  $m-1$ .
3. Tomar los primeros  $k$  bits del padre 1 y concatenarlos con los últimos  $m-k$  bits del padre 2. Esta concatenación genera un nuevo individuo (descendiente 1).
4. Tomar los primeros  $k$  bits del padre 2 y concatenarlos con los últimos  $m-k$  bits del padre 1. Esta concatenación genera un nuevo individuo (descendiente 2).

Tener en cuenta que cada recombinación genera dos nuevos individuos. Si el tamaño de la población es  $n$ , entonces se pueden realizar  $n / 2$  recombinaciones para crear una nueva población.

Otro operador importante que en GA es la mutación. La mutación consiste en invertir un bit aleatorio de un individuo. Para cada una población de tamaño  $n$ , se realiza la mutación de cada individuo con una probabilidad  $pm$ . Los valores comunes para  $pm$  son  $0.05$  o  $0.01$ .

El algoritmo general para GA es el siguiente:

1. Generar una población inicial al azar.
2. Evaluar la función objetivo para cada elemento de la población.

3. Seleccionar los mejores individuos de la población.
4. Recombinar los mejores elementos de la población.
5. Mutar la recombinación de los mejores elementos de la población para crear una nueva población.
6. Sustituir la población antigua por la nueva población.
7. Repetir desde el paso 2 hasta alcanzar el criterio de detención.

El proceso de seleccionar a los mejores individuos de una población, recombinar para generar descendientes, mutar y evaluar su aptitud, se conoce como una "generación". Un criterio de paro común para detener la búsqueda es realizar un número fijo de generaciones. Otro criterio de paro es cuando toda la población tiene el mismo (o muy similar) valor de aptitud. Al final, la mejor solución encontrada se elige como una solución al problema.

Los algoritmos genéticos tienen propiedades interesantes. Pueden trabajar con problemas no lineales, problemas discretos y discontinuos, problemas restringidos y no restringidos, etc. Solo necesitan una fórmula explícita para la función objetivo del problema. La desventaja de un GA es que se necesitan muchas evaluaciones de funciones para encontrar una solución. En los casos en que la función objetivo es barata de evaluar, esto no es un problema.

Para optimizar la cadena de suministro simulada por autómatas celulares, representamos a cada individuo en un GA utilizando una cadena de números binarios. Utilizamos cuatro números binarios para representar la regla de decisión de una empresa en la cadena de suministro. Por ejemplo, si una cadena

de suministro tiene cinco compañías, usamos una cadena de veinte números binarios. Los primeros cuatro números representan la Regla de decisión para la primera compañía, los siguientes cuatro números representan la regla de decisión de la siguiente compañía, y así sucesivamente. Con cuatro números binarios podemos representar números del cero al quince, pero las reglas de decisión están numeradas del uno al diez, por lo que, si un individuo tiene un valor fuera de rango, se considera inviable y su aptitud se establece en cero.

La aptitud de un individuo factible se evalúa en base a las Fórmulas (4-2), (4-3), (4-4) y (4-5). Se ejecutaron diferentes simulaciones para cada fórmula para buscar la mejor configuración para la cadena de suministro. Para un individuo determinado, su aptitud es el resultado de una simulación que utiliza sus valores de la Regla de decisión.

## CAPÍTULO 5

# EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS

---

En este capítulo se presentan los experimentos y resultados que se realizaron a la simulación del modelo, para comprobar la hipótesis 0, donde se menciona que al permitir que cada empresa pueda elegir su propia estrategia de recuperación, mostrará que se puede optimizar una cadena de suministro que forzando a todas las empresas a usar una misma estrategia.

## 5.1 EXPERIMENTACIÓN

Para llevar a cabo la experimentación de este proyecto se utilizó las siguientes características que se muestran en la tabla 5-1 del equipo de cómputo utilizado.

<b>Herramienta</b>	<b>Descripción</b>
Lenguaje utilizado	Lenguaje Java
Equipo	iMac 2013
Procesador	Intel core i5, frecuencia 3.4GHZ
RAM	32GB

*Tabla 5-3. Tabla de herramientas utilizadas*

Así mismo en la tabla 5-2 se menciona las características que se usaron en el algoritmo genético para la simulación del modelo, donde se seleccionó un 50% de la población para generar la nueva población.

<b>Característica</b>	<b>Descripción</b>
Población	100
Generaciones	200
Probabilidad de mutación	0.01
Probabilidad de cruce	0.9
Individuos seleccionados para cruce	50

*Tabla 5-4. Tabla de características que se usaron para la simulación*

Las simulaciones tardaron alrededor de una hora para una simulación de una cadena de suministro de 5 empresas. La mutación consiste en seleccionar al azar un bit del individuo y cambiar su valor. Se uso cruza de un punto.

Se probaron todas las combinaciones de reglas de decisión (DR) y reglas de consumo (RC) para encontrar qué DR funciona mejor para un RC dado.

Para cada combinación de DR y RC, se ejecutaron 200 simulaciones y se usó el valor medio de  $P$  entre todas las simulaciones para determinar qué DR se desempeña mejor.

Se realizaron varias pruebas para explorar el comportamiento de una cadena de suministro utilizando las funciones objetivo propuestas en este trabajo. En (8), se probaron todas las combinaciones de reglas de decisión (DR) y reglas de consumo (RC) para determinar qué DR funciona mejor para un RC determinado. En el modelo propuesto en (8), todas las empresas de una cadena de suministro utilizan la misma DR. En la Tabla 5-5, se presenta un resumen de los resultados de esa experimentación base con valores y en la Tabla 5-6 se muestra los resultados de la simulación base, pero representado con reglas de decisión, para hacer la comparación con nuestros resultados obtenidos. En esa tabla, para cada RC mostramos el DR ordenado de mejor a peor según las simulaciones. Por ejemplo, para RC1, tenemos que DR7 fue la regla de decisión con el mejor rendimiento en la simulación, mientras que DR4 fue la regla menos efectiva.

	<b>RC1</b>	<b>RC2</b>	<b>RC3</b>	<b>RC4</b>	<b>RC5</b>	<b>RC6</b>
<b>DR1</b>	7.606	9.740	8.025	8.175	10.000	9.995
<b>DR2</b>	7.788	9.198	7.389	7.429	9.670	9.646
<b>DR3</b>	5.025	5.014	5.016	5.010	1.277	1.274
<b>DR4</b>	5.003	4.996	5.005	4.998	1.223	1.233
<b>DR5</b>	5.613	7.024	7.645	7.768	9.072	9.049
<b>DR6</b>	7.594	9.228	7.362	7.431	9.656	9.652
<b>DR7</b>	9.619	9.629	5.789	5.169	8.073	4.494
<b>DR8</b>	5.709	6.272	5.338	5.109	6.443	6.242
<b>DR9</b>	5.710	6.243	5.340	5.103	6.436	6.235
<b>DR10</b>	7.136	8.661	6.823	6.863	9.560	9.480

*Tabla 5-5. Resultados de simulación base*

	<b>RC1</b>	<b>RC2</b>	<b>RC3</b>	<b>RC4</b>	<b>RC5</b>	<b>RC6</b>
<b>1</b>	DR7	DR1	DR1	DR1	DR1	DR1
<b>2</b>	DR2	DR7	DR5	DR5	DR2	DR6
<b>3</b>	DR1	DR6	DR2	DR6	DR6	DR2
<b>4</b>	DR6	DR2	DR6	DR2	DR10	DR10
<b>5</b>	DR10	DR10	DR10	DR10	DR5	DR5
<b>6</b>	DR9	DR5	DR7	DR7	DR7	DR8
<b>7</b>	DR8	DR8	DR9	DR8	DR8	DR9
<b>8</b>	DR5	DR9	DR8	DR9	DR9	DR7
<b>9</b>	DR3	DR3	DR3	DR3	DR3	DR3
<b>10</b>	DR4	DR4	DR4	DR4	DR4	DR4

*Tabla 5-6. Resultados de la simulación base con reglas*

El objetivo de la experimentación que presentaremos en la siguiente sección es verificar que, si permitimos a cada empresa elegir su propio DR, podemos optimizar aún más la configuración de la cadena de suministro. Utilizamos una cadena de suministro con cinco compañías, con  $pf = 17/365$  y  $pg = 134/365$ , el número de períodos es 365, el valor inicial de  $R = 3$  y  $delta = 1$ . Se utilizaron para el algoritmo genético los parámetros que se muestran en la Tabla 5-4.

## 5.2 RESULTADOS

El primer experimento que se realizó consistió en optimizar con el algoritmo genético la cadena de suministro tal como se pone en (8) para verificar que se obtienen los mismos resultados que el artículo mencionado.

Las mejores soluciones después de las optimizaciones que se les aplicaron a los resultados base se muestran en la Tabla 5-7, donde se puede ver que los resultados concuerdan con los mostrados en la Tabla 5-6. Por ejemplo, según la tabla 5-7, para CR1, la mejor configuración es que todas las empresas usen DR7, y DR7 es la regla de decisión mejor valorada en la Tabla 5-6 para RC1.

<b>Reglas de consumo</b>	<b>Empresa 1</b>	<b>Empresa 2</b>	<b>Empresa 3</b>	<b>Empresa 4</b>	<b>Empresa 5</b>
RC1	7	7	7	7	7
RC2	1	1	1	1	1
RC3	1	1	1	1	1
RC4	1	1	1	1	1
RC5	1	1	1	1	1
RC6	1	1	1	1	1

*Tabla 5-7. Resultados de las reglas de consumo*

Se repitió la misma optimización usando la Fórmula (4-3) como la función objetivo. El resultado se presenta en la Tabla 5-8. Hay cambios para RC2. En esas reglas, es costoso reparar una empresa del estado cero al estado dos, en nuestro modelo la mejor estrategia es DR7, como se esperaba porque DR7 promueve un incremento gradual del estado de la empresa, evitando aumentos del estado cero al estado dos. En el modelo original, DR7 es la mejor opción para RC1, pero no para RC2, donde la estrategia extremadamente costosa (para RC2) de manejar siempre el estado de una empresa al estado dos (DR1) se considera la mejor. Para las reglas de consumo RC3 y RC4 (donde pasar del estado 1 al estado dos es muy costoso), la mejor regla de decisión es DR3 según el modelo de la función objetivo (4-3). DR3 tiene la característica de que tiende a mantener el estado de los integrantes de una cadena de suministro en el valor de uno, evitando la transición del estado uno al estado dos, evitando el alto costo de dicho cambio. Finalmente, para las reglas de consumo RC5 y RC6, donde la

recuperación del nivel cero al nivel dos es relativamente barata y la recuperación del nivel cero al nivel uno es muy costosa, la regla de decisión DR2 es el mejor enfoque. Esto se debe a que DR2 promueve el movimiento del estado cero o uno al estado dos directamente, evitando la transición del nivel cero al nivel uno.

<b>Reglas de consumo</b>	<b>Empresa 1</b>	<b>Empresa 2</b>	<b>Empresa 3</b>	<b>Empresa 4</b>	<b>Empresa 5</b>
RC1	7	7	7	7	7
RC2	7	7	7	7	7
RC3	3	3	3	3	3
RC4	3	3	3	3	3
RC5	2	2	2	2	2
RC6	2	2	2	2	2

*Tabla 5-8. Resultados de corridas de la función objetivo (4-3)*

Los resultados para la Fórmula (4-4) y la Fórmula (4-5) se muestran en la Tabla 5-9 y 5-10, respectivamente. Es interesante notar que, para esos modelos, los integrantes de la cadena de suministro toman diferentes DR dependiendo de su posición en la cadena. Esto no es sorprendente debido al efecto que el estado de una empresa puede tener en las empresas siguientes. Para CR2 y CR3, DR7 sigue siendo el mejor para todas las empresas, pero para CR3, CR4, CR5 y CR6 se utilizan una variedad de reglas. En las Figuras 5-3, 5-4 y 5-5, representan

respectivamente en forma gráfica los resultados de las corridas de las funciones objetivo.

<b>Reglas de consumo</b>	<b>Empresa 1</b>	<b>Empresa 2</b>	<b>Empresa 3</b>	<b>Empresa 4</b>	<b>Empresa 5</b>
RC1	7	7	7	7	7
RC2	7	7	7	7	7
RC3	4	7	1	6	1
RC4	3	7	1	5	1
RC5	6	1	1	1	2
RC6	2	1	1	1	2

*Tabla 5-9. Resultado de corridas de la función objetivo (4-4)*

<b>Reglas de consumo</b>	<b>Empresa 1</b>	<b>Empresa 2</b>	<b>Empresa 3</b>	<b>Empresa 4</b>	<b>Empresa 5</b>
RC1	7	7	7	7	7
RC2	7	7	7	7	7
RC3	3	1	5	1	1
RC4	4	1	5	1	6
RC5	2	1	1	1	9
RC6	2	1	1	1	9

*Tabla 5-10. Resultado de corridas de la función objetivo (4-5)*

En la Tabla 5-11, se presenta un resumen de los resultados obtenidos de la experimentación con valores y en la Tabla 5-12 se muestra los resultados de la simulación, pero representado con reglas de decisión. Así como también se muestra en la Figura 5-2 en forma gráfica los resultados obtenidos de la experimentación.

	<b>RC1</b>	<b>RC2</b>	<b>RC3</b>	<b>RC4</b>	<b>RC5</b>	<b>RC6</b>
<b>DR1</b>	1084.7	1725.9	44.9	50.4	2857.0	2297.9
<b>DR2</b>	1155.2	1614.9	54.5	53.0	2555.2	2088.2
<b>DR3</b>	1128.0	379.3	1127.0	374.5	28.1	28.0
<b>DR4</b>	1123.7	325.8	1119.7	333.2	27.5	26.8
<b>DR5</b>	606.3	946.5	39.8	42.2	2160.5	1641.2
<b>DR6</b>	1116.0	1546.9	52.1	56.4	2551.5	2093.2
<b>DR7</b>	2059.1	2582.5	33.8	6.4	971.9	454.0
<b>DR8</b>	271.1	444.9	34.3	25.2	765.6	589.1
<b>DR9</b>	270.7	422.5	34.7	24.6	770.8	582.1
<b>DR10</b>	676.2	1153.3	38.2	41.1	2400.3	1868.9

*Tabla 5-11. Resultados de simulación del modelo propuesto*

	RC1	RC2	RC3	RC4	RC5	RC6
<b>1</b>	DR7	DR7	DR3	DR3	DR1	DR1
<b>2</b>	DR2	DR1	DR4	DR4	DR2	DR6
<b>3</b>	DR3	DR2	DR2	DR6	DR6	DR2
<b>4</b>	DR4	DR6	DR6	DR2	DR10	DR10
<b>5</b>	DR6	DR10	DR1	DR1	DR5	DR5
<b>6</b>	DR1	DR5	DR5	DR5	DR7	DR8
<b>7</b>	DR10	DR8	DR10	DR10	DR9	DR9
<b>8</b>	DR5	DR9	DR9	DR8	DR8	DR7
<b>9</b>	DR8	DR3	DR8	DR9	DR3	DR3
<b>10</b>	DR9	DR4	DR7	DR7	DR4	DR4

Tabla 5-12. Resultados de simulación del modelo propuesto con reglas

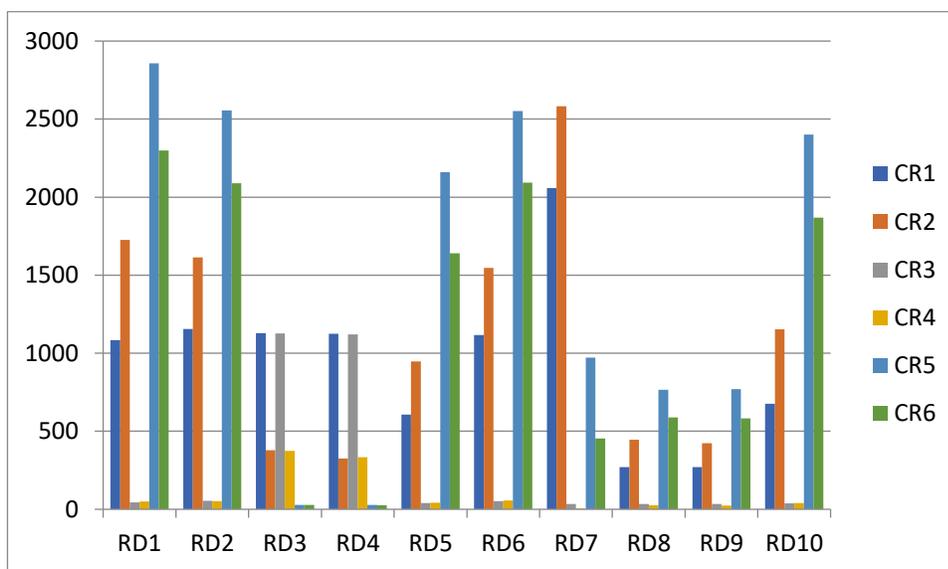


Figura 5-2. Resultados de la simulación propuesta de la Tabla (5-11)

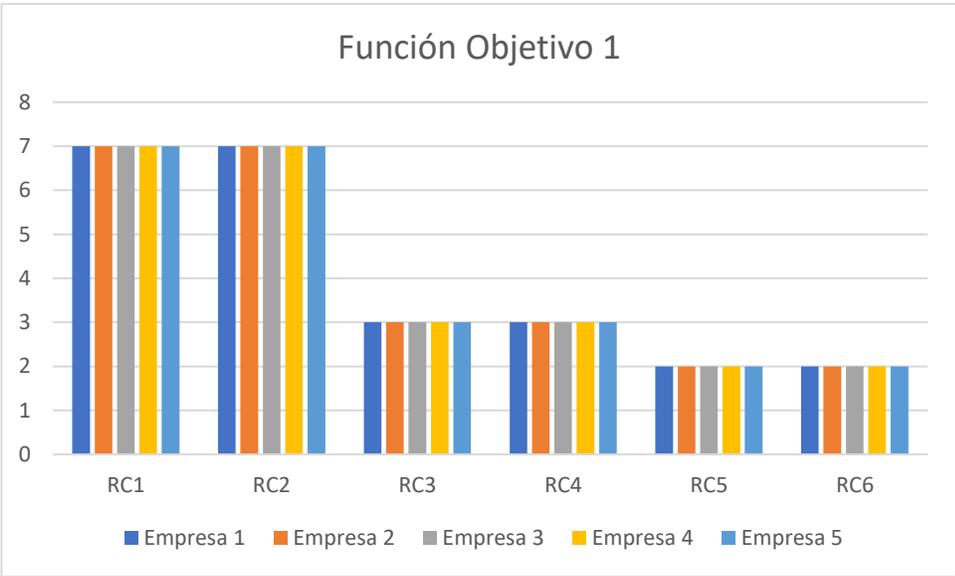


Figura 5-3. Resultados de la función objetivo (4-3)

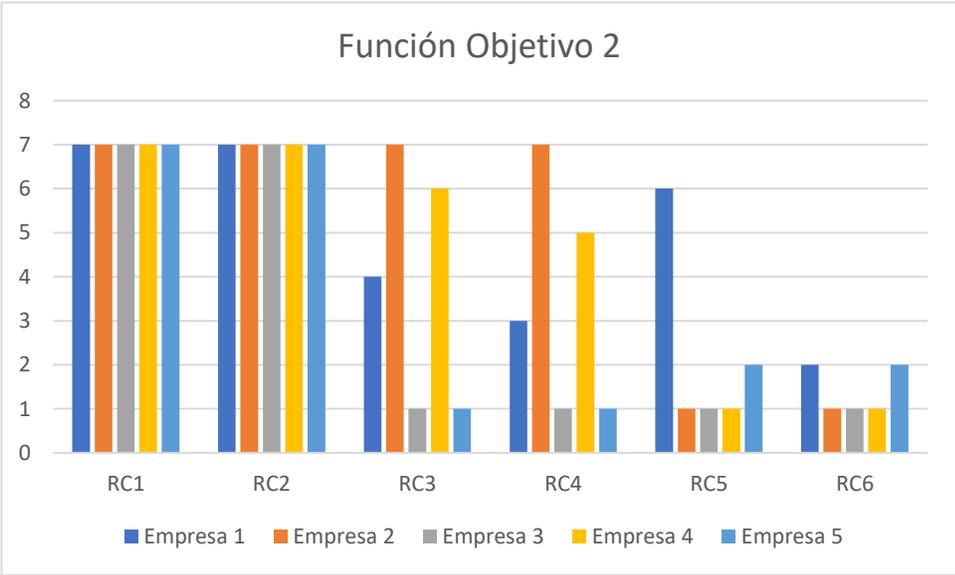
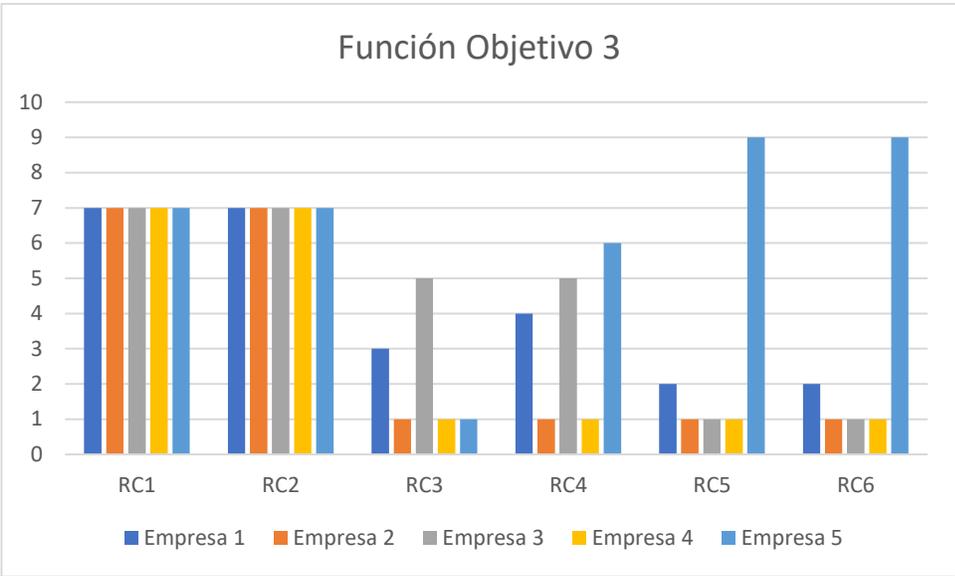


Figura 5-4. Resultados de la función objetivo (4-4)



*Figura 5-5. Resultados de la función objetivo (4-5)*

## CAPÍTULO 6

# CONCLUSIONES

---

### 6.1 DISCUSIÓN

En este trabajo de tesis de investigación se enfocó en evaluar tres nuevas funciones objetivas usando autómatas celulares y que se utilizaron para modelar el comportamiento de una cadena de suministro bajo el efecto de interrupciones naturales para que las empresas de esa cadena de suministro puedan obtener las mejores estrategias. En la función objetivo 1, consiste en la suma de los beneficios acumulados de todas las empresas de una cadena de suministro al final del año, como se puede mostrar en los resultados de la Figura 5-3. En la función objetivo 2, al igual que la función objetivo 1, toma en cuenta la suma de los beneficios acumulados durante un año, pero tiene como característica la influencia del estado de las empresas en los beneficios que, a partir de la empresa dañada, hacia la derecha, van a producir el mínimo generado por esa

empresa, como se puede mostrar en los resultados de la Figura 5-4. Por último, en la función objetivo 3, también como las otras dos funciones objetivos anteriores, suma los beneficios acumulados durante un año, tiene como característica que, a partir de la empresa dañada, hacia la derecha, se va a ir reduciendo en forma multiplicativa los daños como se puede mostrar en los resultados de la Figura 5-5.

En la sección 1.2.1, se plantearon los siguientes objetivos particulares:

- Realizar un modelo utilizando autómatas celulares, por medio de una simulación.
- Realizar pruebas en la simulación, introduciendo datos ficticios al modelo.
- Analizar los datos generados por la simulación del modelo.
- Con la información recolectada, evaluar cuales son las mejores estrategias dado una configuración de una cadena.

Se logró realizar cada uno de los objetivos particulares establecidos, se hizo simulaciones para un modelo que utiliza autómatas celulares, donde estas pruebas de simulaciones se realizaron con datos ficticios al modelo. Se analizaron los datos generados y se muestran en los resultados presentados en la Figura 5-2, mostrando que para las reglas de consumo RC1 y RC2, es demasiado costoso reparar una empresa después de un desastre natural imprevisto. También se analizó con los resultados que la mejor estrategia es la

regla de decisión 7 (DR7), ya que esta regla promueve un incremento en forma gradual, evitando aumentos del estado cero al estado dos.

En la sección 1.3 Hipótesis, se planteó las siguientes hipótesis:

**H0:** Permitir que cada empresa pueda elegir su propia estrategia de recuperación, mostrará que se puede optimizar una cadena de suministro que forzando a todas las empresas a usar una misma estrategia.

**H1:** Todas las empresas van a quedar con la misma estrategia de recuperación, aun cuando se les de la opción de elegir diferentes estrategias.

Después de analizar los resultados del capítulo 5 podemos concluir que aceptamos la hipótesis 0 ya que se demuestra que cada empresa puede seleccionar su propia estrategia para la recuperación de desastres naturales imprevistos y obtener mejores resultados.

Adicionalmente también se plantearon las siguientes preguntas de investigación en la sección 1.4:

- ¿Es recomendable que todas las empresas de una cadena de suministro usen la misma estrategia de recuperación?

Se observó que al darle la libertad a las empresas de elegir su propia estrategia de decisión las empresas de la cadena ya no eligen la misma estrategia sino que algunas eligen una estrategia diferente dependiendo

de su posición en la cadena así que es recomendable permitir que puedan tener diferentes reglas.

- ¿Puede combinarse los costos de recuperación con los ingresos periódicos de la empresa?

Si pueden combinarse y de hecho es recomendable porque refleja mejor comportamiento real de una empresa con respecto a sus ingresos y gastos, la forma en que se combinó este trabajo fue relativamente sencilla y combinaciones más complejas se pueden proponer a futuro dependiendo a la realidad de cada empresa.

- ¿Se puede proponer más de una función objetivo para evaluar el desempeño de una cadena de suministro bajo interrupciones?

Si se puede proponer más de una función objetivo. Existen muchos tipos de cadena de suministro y no hay una sola función objetivo que pueda adaptarse a todos los casos, aquí se mostraron tres funciones objetivo que pueden usarse en ciertos tipos de cadena de suministro, pero pueden proponerse más funciones objetivo de cada naturaleza de cadena de suministro.

## 6.2 ESTADO DEL ARTE E INVESTIGACIÓN DOCTORAL

Se tomaron como base el trabajo “Robust supply chain strategies for recovering from unanticipated disasters” de los autores Li-Ming Chen, Yan Emma Liu y Sunny Shu-Jung (8), donde muestran un modelo representando el desempeño operativo dinámico entre las empresas de la cadena de suministro que enfrentan interrupciones causadas por desastres naturales y provocados por el hombre. Su análisis muestra que una cadena de suministro se recupera mejor si las empresas adoptan una estrategia de recuperación radical, rápida y costosa que resuelve de inmediato la interrupción. Esta observación es robusta a varios requisitos de consumo de recursos.

Otro trabajo (27) que se tomó como fundamento de la tesis “Solución colaborativa de eventos disruptivos en la cadena de suministro” por Palma Vázquez, Fanny, donde propone una herramienta para administrar sucesos de interrupción, pero de tipo efecto domino, para una cadena de suministro en específico en el área de automotriz. Aunque no fue aplicada dicha simulación, se determinó que la metodología ayuda a resolver la problemática y tomar las mejores decisiones.

## 6.3 CONCLUSIONES

En este trabajo, presentamos nuevas funciones objetivo para modelar el comportamiento de una cadena de suministro bajo el efecto de interrupciones usando autómatas celulares. Las nuevas funciones objetivo introducen elementos que permiten una mejor representación del comportamiento real de una cadena de suministro en la vida real. Las características clave de nuestros modelos son:

- Se considera que el estado de la cadena de suministro puede representarse mediante un valor monetario cuando otros enfoques evalúan el estado de la cadena de suministro como un número cuya interpretación no está clara.
- Introducimos la influencia del estado de una empresa en la productividad de las empresas posteriores de la cadena de suministro.
- Permitimos que cada empresa tenga su propia regla de decisión, a diferencia del modelo base publicado anteriormente donde todas las empresas tienen la misma regla de decisión.
- Representar a los estados de la cadena de suministro como un valor monetario permite que nuestro modelo combine el efecto de las interrupciones con el costo de reconstruir las empresas afectadas por el desastre.

Cuando el modelo propuesto en este trabajo se utiliza para simular la cadena de suministro (CDR), las estrategias de recuperación que optimizan las ganancias en la CDR no son necesariamente las mismas que maximizan el estado de la CDR en el modelo original. Pero el resultado de nuestro enfoque está mejor relacionado con el comportamiento intuitivo que se espera que tenga la CDR.

Finalmente, nuestro modelo tiene varios parámetros cuyo valor numérico se seleccionó de trabajos anteriores, o se eligió en base a la intuición, por ejemplo, la cantidad de ganancias que genera una empresa en función de su estado, o la reducción en la producción que una empresa produce sobre otras empresas.

## 6.4 TRABAJO FUTURO

Como trabajo futuro, planeamos introducir una lógica difusa para simular el estado de las compañías en el modelo, ajustando parámetros a los valores elegidos de acuerdo con los valores realistas tomados de las cadenas de suministro para realizar una mejor simulación. En el modelo actual, el estado de las empresas, los daños que produce una interrupción y los recursos utilizados para reparar una empresa están representados por números nítidos. Los números y la lógica difusos pueden generar una mejor representación del

comportamiento de una cadena de suministro que diseña conjuntos difusos y reglas de inferencia adecuadas.

## APÉNDICE A

# CÓDIGO

---

### A.1 PRUEBA GENÉTICO

```
package algoritmo genético ;
/* @author giovanni and raquel */

public class Prueba Genetico {
    public static void main ( String [] args ) {
        funcion Objetivo f = new evalua Cadena
        Celular ( 5 , 365 , 1 , 134 .0 / 365 , 17 .0 / 365 ,
        1 , 1 , 200 );
        Algoritmo Genetico ag = new Algoritmo
        Genetico ( 20 , 100 , 1000 , 50 , 0.9 , 0.01 ,
        f );
    }
}
```

```

        ag.ejecutar();
    }
}

```

## A.2 EVALUACADENACELULAR

```

package algoritmogenetico;

/* @author giovanni and raquel */

public class evalua Cadena Celular extends funcion Objeto {

    int nEmpresas; int DR[];

    int periodos;

    int inicializacion; double g;

    double f;

    double delta; int RC;

    int simulaciones;

    public evalua Cadena Celular ( int nEmpresas , int periodos ,

```

```

int  inicializacion,  double g,  double f,  double
delta,int RC,int  simulaciones){

    this.nEmpresas = nEmpresas ;

    this.DR = new int[nEmpresas];this.periodos=period
os;

    this.inicializacion=inicializacion;this.g=g;

    this.f=f;

    this.delta=delta;this.RC = RC;

    this.simulaciones=simulaciones;

}

```

@Override

```

void imprime (int[]  individuo ,  double f) {

    int bits Por Empresa = 4 ;

    int inicio,  fin;

    for  (int i = 0 ;i < nEmpresas ;  i++){

        inicio = bits Por Empresa * i ;

        fin = bits Por Empresa * (i + 1) - 1 ;
    }
}

```

```

        DR[i]=this.convier teEntero(individuo, inicio, fi
        n)+1;
    }

    for (int i=0;i < nEmpresas; i++){

        System.out.print(DR[i]+"");

    }

    System.out.println(" :"+f);

}

```

@Override

```

double evalua (int[] x){

    int bits Por Empresa = 4;

    int inicio, fin;

    double total=0;

    for(int i=0;i < nEmpresas; i++){

        inicio = bits Por Empresa * i;

        fin = bits Por Empresa * (i + 1) - 1;
    }
}

```

```

DR[i]=this.convierteEntero(x, inicio, fin)
+ 1;

while (DR[i] > 10) {

    for (int j=inicio; j<= fin; j++){

        if (Math.random() < 0.5) {

            x[j] = 0;

        }else{

            x[j] = 1;

        }

    }

}

DR[i]=this.convierteEntero(x, inicio, fin)+
1;

}

}

```

```

Cadena Celular cc = new Cadena Celular ( nEmpresas , DR, periodos , i n
i c i a l i z a c i o n , g , f , delta , RC);

```

```

for(int i=0; i< simulaciones; i++){

```

```

        total += cc.simulacion();
    }

    return total/simulaciones;
}
}

```

### A.3 FUNCIÓN OBJETIVO

```

package algoritmogenetico;

/* @author giovanni and raquel */

public abstract class funcion Objetivo {

    abstract double evalua (int[] x);

    abstract void imprime (int[] individuo, double f);

    int convierteEntero (int x[], int inicio, int
        fin){

        int acumulado = 0;

        for (int i = inicio; i <= fin; i++) {

            acumulado = x[i] + 2 * acumulado;

```

```

    }
    return acumulado ;
}
}

```

## A.4 ALGORITMO GENETICO

```

package algoritmo genetico ;

/* @author giovanni and raquel */

class Algoritmo Genetico {

    int nGen ;

    int nPop ;

    int nGeneraciones ; int nSel ;

    double pCruza ;

    double pMutacion ; int poblacion [][] ; int mejor [] ;

    double f Mejor ;

```

```

double aptitud [ ];

int  seleccionados[][];

funcion Objetivo      f;

public Algoritmo Genetico ( int nGen , int nPop , int n
nGeneraciones , int n Sel , double pCruza , double pMutacion
, funcion Objetivo      f ) {

    this . nGen = nGen ; this . nPop = nPop ;

    this . n Generaciones = n Generaciones ; this . n Sel = n Sel ;

    this . pCruza = pCruza ;

    this . pMutacion = pMutacion ;

    poblacion = new int [ nPop ] [ nGen ] ;

    mejor = new int [ nGen ] ;

    aptitud = new double [ nPop ] ;

    seleccionados = new int [ n Sel ] [ nGen ] ;

    this . f = f ;

    f Mejor = this . f . evalua ( mejor ) ;

```

```
}
```

```
void iniciaPoblacion(){  
    for(int i = 0; i < nPop; i++){  
        for (int j = 0; j < nGen; j++){  
            if (Math.random() < 0.5){  
                poblacion[i][j] = 0;  
            } else {  
                poblacion[i][j] = 1;  
            }  
        }  
    }  
}
```

```
void normaliza Aptitud ( double newMax , double newMin) {  
    double min , max, factor;  
    min = max = aptitud [ 0 ] ;  
    for(int i = 1 ; i < nPop ; i++) {
```

```

        if ( aptitud [ i ] < min ) {

            min = aptitud [ i ];

        }

        if ( aptitud [ i ] > max ) {

            max = aptitud [ i ];

        }

    }

    if ( min == max ) {

        return ;

    }

    f a c t o r = ( newMax - newMin ) / ( max - min ) ;

    f o r ( i n t i = 0 ; i < nPop ; i++ ) {

        aptitud [ i ] = f a c t o r * ( aptitud [ i ] - min ) + newMin ;

    }

}

```

```

void seleccionUniversal(){

    int contador ;

    double min , max,      delta , flecha , total , acumulado ;

    min = max = total = acumulado = aptitud [ 0 ] ;

    for(int i = 1 ; i < nPop ; i++){

        if ( aptitud [ i ] < min ) {

            min = aptitud [ i ] ;

        }

        if ( aptitud [ i ] > max ) {

            max = aptitud [ i ] ;

        }

        total += aptitud [ i ] ;

    }

    delta = total / n Sel ;

    flecha = Math . random ( ) * delta ; contador = 0 ;

    for(int i = 0 ; i < n Sel ; i++) {

```

```

while ( acumulado < flecha ) {

    contador++;

    acumulado += aptitud [ contador ] ;

}

flecha += delta ;

System . arraycopy ( poblacion [ contador ] , 0 , seleccion
ados [ i ] , 0 , nGen ) ;

}

}

```

```

void cruzaUnPunto ( int [] p1 ,   int [] p2 ,   int [] h1 ,   int [] h2 ) {

    int punto ;

    punto = ( int ) ( Math . random ( ) * ( nGen - 1 ) ) + 1 ;

    System . arraycopy ( p1 ,      0 , h1 ,      0 , punto ) ;

    System . arraycopy ( p2 ,      0 , h2 ,      0 , punto ) ;
}

```

```

        System . arraycopy ( p1 ,      punto ,      h2 , punto , nGen      -
            punto ) ;

        System . arraycopy ( p2 ,      punto ,      h1 , punto , nGen      -
            punto ) ;

    }

```

```

void cruza Poblacion ( ) {

    i n t p1 , p2 ;

    f o r ( i n t i = 0 ; i < nPop / 2 ;      i++) {

        p1 = ( i n t ) ( Math . random ( ) * n Sel      ) ;

        d o {

            p2 = ( i n t ) ( Math . random ( ) * n Sel ) ;

        } w h i l e ( p1 == p2 ) ;

        i f ( Math . random ( ) < pMutacion ) {

            cruzaUnPunto ( s e l e c c i o n a d o s [ p1 ] ,

                s e l e c c i o n a d o s [ p2 ] ,      p o b l a c i o n [ 2 * i ] ,

                p o b l a c i o n [ 2 * i + 1 ] ) ;

        } e l s e {

```

```

        System . arraycopy ( s e l e c c i o n a d o s [ p 1 ] , 0 ,
        poblacion [ 2 * i ] , 0 , nGen ) ;

        System . arraycopy ( s e l e c c i o n a d o s [ p 2 ] , 0 ,
        poblacion [ 2 * i + 1 ] , 0 , nGen ) ;

    }

}

}

```

```

void mutaPoblacion ( ) {

    i n t b i t ;

    f o r ( i n t i = 0 ; i < nPop ; i ++ ) {

        i f ( M a t h . r a n d o m ( ) < pMutacion ) {

            b i t = ( i n t ) ( M a t h . r a n d o m ( ) * nGen ) ;

            poblacion [ i ] [ b i t ] = 1 - poblacion [ i ] [ b i t ] ;

        }

    }

}

```

```

void mutaPoblacion ( i n t g ) {

    i n t b i t ;

    f o r ( i n t i = 0 ; i < n P o p ; i ++ ) {

        i f ( M a t h . r a n d o m ( ) < p M u t a c i o n / g ) {

            b i t = ( i n t ) ( M a t h . r a n d o m ( ) * n G e n ) ;

            p o b l a c i o n [ i ] [ b i t ] = 1 - p o b l a c i o n [ i ] [ b i t ] ;

        }

    }

}

```

```

void evalua Aptitud ( ) {

    f o r ( i n t i = 0 ; i < n P o p ; i ++ ) {

        a p t i t u d [ i ] = f . e v a l u a ( p o b l a c i o n [ i ] ) ;

    }

}

```

```

void ejecutar() {

    t h i s . i n i c i a P o b l a c i o n ( ) ;

}

```

```

this . evalua Aptitud ( ) ;

for ( int i = 0 ; i < n Generaciones ; i++ ) {

    this . seleccion Universal ( ) ;

    this . cruza Poblacion ( ) ;

    this . muta Poblacion ( ) ;

    this . evalua Aptitud ( ) ;

    this . guarda Mejor ( ) ;

}

f . imprime ( mejor , f Mejor ) ;

}

void guarda Mejor ( ) {

    for ( int i = 0 ; i < nPop ; i++ ) {

        if ( aptitud [ i ] > f Mejor ) {

            f Mejor = aptitud [ i ] ;

            System . arraycopy ( poblacion [ i ] , 0 , mejor , 0 ,

nGen ) ;

```

```

        }
    }
}

void imprimeMejor () {

    for(int is : mejor) {

        System.out.print(is + " ");

    }

    System.out.println(":" + f Mejor);

}

```

```

void imprime Poblacion () {

    double cont = 0;

    for(int[] is : poblacion) {

        for (int i : is) {

            System.out.print(i + " ");

        }

        cont += f. evalua (is);

    }
}

```

```
        System . out . p r i n t l n ( f . e v a l u a ( i s ) ) ;  
    }  
  
    System . out . p r i n t l n ( " Cont : " + cont ) ;  
}  
}
```

## A.5 CADENACELULAR

```
package a l g o r i t m o g e n e t i c o ;
```

```
c l a s s C a d e n a C e l u l a r {
```

```
    double probMayor ;
```

```
    double probMenor ;
```

```
    Automata Celular primero ;
```

```
    Automata Celular ultimo ;
```

```
    i n t n E m p r e s a s ;
```

```
    i n t D R [ ] ;
```

```

Automata Celular cadena [ ];

int periodos;

int inicializacion;

double g;

double f;

double delta;

ReglaConsumo rc;

double sitGen [ ];

public Cadena Celular (int nEmpresas, int DR[], int
    periodos, int inicializacion, double g, double f,
    double delta,

int RC) {

    this.nEmpresas = nEmpresas;

    this.DR = DR;

    this.periodos = periodos;

    cadena = new AutomataCelular [ nEmpresas ];

    this.primeros = new Automata Celular ( 2, 3, 1)

```

```

this.ultimo = new AutomataCelular ( 2 , 3 , 1 );

for( int i = 0 ; i < cadena . length ; i++ ) {

    cadena [ i ] = new Automata Celular ( 2 , 3 , DR[ i ] );

}

for( int i = 0 ; i < cadena . length - 1 ; i++ ) {

    cadena [ i ] . derecho = cadena [ i + 1 ] ;

    cadena [ i + 1 ] . izquierdo = cadena [ i ] ;

}

cadena [ 0 ] . izquierdo = this . primero ;

cadena [ cadena . length - 1 ] . derecho = this . ultimo ;

this . g = g ;

this . f = f ;

this . delta = delta ;

rc = new ReglaConsumo ( RC ) ;

sitGen = new double [ periodos ] ;

```

```

        this.inicializacion=inicializacion;
    }

void inicia Cadena () {

    for(int i = 0;i < nEmpresas; i++){

        cadena [ i ] . estado = 2 ;

        if (this.inicializacion== 1 ){

            cadena [ i ] . estado = 2 ;

        }else{

            double aleatorio = Math . random ( ) ;

            if (aleatorio < 1 / 3 )

                cadena [ i ] . estado = 0 ;

            elseif (aleatorio < 2 / 3 )

                cadena [ i ] . estado = 1 ;

            else

                cadena [ i ] . estado = 2 ;

        }

    }
}

```

```
}
```

```
void calculaSinistro(int i){
```

```
    double aleatorio = Math.random();
```

```
    cadena[i].estadoPre = cadena[i].estado;
```

```
    if (aleatorio < f){
```

```
        cadena[i].estadoPre = 0;
```

```
    }else if (aleatorio < g){
```

```
        cadena[i].estadoPre = Math.max(cadena[i].estado - 1,  
                                        0);
```

```
    }
```

```
}
```

```
public void calculaRecuperacion(int i){
```

```
    int izquierdo;
```

```
    int derecho;
```

```
    int centro = (int) cadena[i].estadoPre;
```

```

if (i == 0){

    izquierdo = 2;

} else {

    izquierdo = (int) cadena[i - 1].estadoPre;

}

if (i == nEmpresas - 1){

    derecho = 2;

} else {

    derecho = (int) cadena[i + 1].estadoPre;

}

cadena[i].estado = cadena[i].rr.calculaEstado(izquierdo, centro, derecho);

}

void ajusta Recuperacion (int i){

    this.cadena[i].acumulado += delta;

```

```

double gasto Recuperacion = this.rc.consume ( cadena [ i ] .
estado , cadena [ i ] . estado Pre ) ;

if ( gasto Recuperacion <= cadena [ i ] . acumulado )

    cadena [ i ] . acumulado -= gasto Recuperacion ;

else

    cadena [ i ] . estado = cadena [ i ] . estado Pre ;

}

```

```

public double simulacion () {

    double suma = 0 ;

    this.inicia Cadena () ;

    for(int i = 0 ; i < periodos ; i++) {

        for (int j = 0 ; j < nEmpresas ; j++) {

            calcula Siniestro ( j ) ;

            calcula Recuperacion ( j ) ;

            ajusta Recuperacion ( j ) ;

        }

        this.sitGen [ i ] = 0 ;
    }
}

```

```

        for (int j = 0; j < nEmpresas; j++) {
            sitGen [i] += cadena [j]. estado ;
        }

        suma += sitGen [i];
    }

    return suma / periodos ;
}

```

```

public double simulacion 2 () {

    double suma = 0 ;

    this . inicia Cadena () ;

    for (int i = 0; i < periodos ; i++) {

        for (int j = 0; j < nEmpresas ; j++) {

            calcula Siniestro (j) ;

            calcula Recupera cion (j) ;

            ajusta Recuperacion (j) ;

        }
    }
}

```

```

        this.sitGen[i]=0;

        for (int j = 0;j < nEmpresas; j++){

            sitGen[i] += cadena[j].estado;

        }

        suma += sitGen[i];

    }

    return suma;

}

```

```

public double simulacion3() {

    // Esta es la segunda funcion o b j e t i v o que propusimos ,

    // donde a p a r t i r de una empresa d a a d a , e l r e s t o de

    // la cadena produce a l o m a s l o que produce e s t a .

    double suma = 0;

    double estadoMin;

    this.iniciaCadena();

    for (int i = 0;i < periodos; i++){

```

```

for(int j = 0; j < nEmpresas; j++) {

    calculaSinistro(j);

    calculaRecuperacion(j);

    ajustaRecuperacion(j);

}

this.sitGen[i] = 0;

estadoMin = 2;

for(int j = 0; j < nEmpresas; j++) {

    if (cadena[j].estado < estadoMin) {

        estadoMin = cadena[j].estado;

    }

    sitGen[i] += estadoMin;

}

suma += sitGen[i];

}

return suma;

```

```
}
```

```
public double simulacion 4 () {
```

```
    // Ultima funcion objetivo propuesta donde cada miembro
```

```
    // de la cadena va reduciendo su produccion de forma
```

```
    // multiplicativa.
```

```
    double suma = 0;
```

```
    double estadoMin;
```

```
    this.inicia Cadena ();
```

```
    for (int i = 0; i < periodos; i++) {
```

```
        for(int j = 0; j < nEmpresas; j++) {
```

```
            calcula Siniestro (j);
```

```
            calcula Recuperacion (j);
```

```
            ajusta Recuperacion (j);
```

```
        }
```

```
        this.sitGen [i] = 0;
```

```
        estadoMin = 2;
```

```
        for(int j = 0; j < nEmpresas; j++) {
```

```

        if (cadena [j] . estado == 1 ) {

            estadoMin *= 0 . 5 ;

        } else if (cadena [j] . estado == 0 ) {

            estadoMin *= 0 . 1 ;

        }

        s i t Gen [ i ] += cadena [ j ] . estado * estadoMin ;

    }

    suma += s i t Gen [ i ] ;

}

return suma ;

}

}

```

## A.6 AUTOMATA CELULAR

```

package algoritmogenetico ;

```

```

public class Automata Celular {

    double estado Pre ;

    Automata Celular izquierdo ;

    Automata Celular derecho ;

    double estado ;

    double acumulado ;

    int regla Recuperacion ;

    Regla Recuperacion r r ;

    public Automata Celular ( double estado , double acumulado , int
        regla ) {

        this . estado = estado ;

        this . acumulado = acumulado ;

        this . regla Recuperacion = regla ;

        this . r r = new Regla Recuperacion ( regla ) ;

    }

}

```

## A.7 REGLA RECUPERACION

```
package algoritmogenetico;

/* @author giovanni and raquel */ public class

Regla Recuperacion {

    int    tipo;

    Regla Recuperacion (int    tipo) {

        this.tipo = tipo;

    }

    int    calculaEstado (int izquierdo,    int centro, int

derecho) {

        switch (tipo) {

            case 1 :

                return 2 ;

            case 2 :
```

```
if ( Math . max( Math . max( i z q u i e r d o ,  
    derecho ) , centro ) == 2 ) {  
    return 2 ;  
} else {  
    return 1 ;  
}
```

case 3 :

```
if ( i z q u i e r d o + derecho == 4 || i z q u i e r d  
o + centro == 4 )  
    return 2 ;  
} else {  
    return 1 ;  
}
```

case 4 :

```
if ( i z q u i e r d o + derecho + centro == 6 ) {  
    return 2 ;  
} else {  
    return 1 ;  
}
```

```
}
```

```
case 5 :
```

```
if ( izquierdo + derecho + centro == 6 ) {
```

```
    return 1 ;
```

```
} else {
```

```
    return 2 ;
```

```
}
```

```
case 6 :
```

```
    return Math . max( Math . max( izquierdo ,  
        derecho ) , centro ) ;
```

```
case 7 :
```

```
    return Math . min ( 2 , centro + 1 ) ;
```

```
case 8 :
```

```
if ( centro != izquierdo ) {
```

```
    return izquierdo ;
```

```
} else {
```

```
    return Math . min ( 2 , centro + 1 ) ;
```

```
}
```

case 9 :

```
    if ( centro != derecho ) {  
        return derecho ;  
    } else {  
        return Math . min ( 2 , centro + 1 ) ;  
    }  
}
```

case 10 :

```
    if ( centro != Math . max( derecho , i z q u i e r d o ) ) {  
        return Math . max( derecho , i z q u i e r d o ) ;  
    } else {  
        return Math . min ( 2 , centro + 1 ) ;  
    }  
}
```

default:

```
    throw new A s s e r t i o n E r r o r ( ) ;  
}  
}  
}
```

## A.8 REGLARCONSUMO

```
package algoritmogenetico;

public class ReglaConsumo {

    double c1, c2, c3; int regla;

    public ReglaConsumo(int regla){

        this.regla=regla;if (regla==1){

            c1 = 1;

            c2 = 2;

            c3 = 10;

        }

        if (regla==2){

            c1 = 2;

            c2 = 1;

            c3 = 10;

        }

    }

}
```

```
if (regla == 3){  
    c1 = 1;  
    c2 = 10;  
    c3 = 2;  
}
```

```
if (regla == 4){  
    c1 = 2;  
    c2 = 10;  
    c3 = 1;  
}
```

```
if (regla == 5){  
    c1 = 10;  
    c2 = 1;  
    c3 = 2;  
}
```

```
    if (regla == 6){  
        c1 = 10;  
        c2 = 2;  
        c3 = 1;  
    }  
}
```

```
double consume ( double nuevo , double anterior){  
    if (anterior == 0 && nuevo == 1)  
        return c1;  
    if (anterior == 1 && nuevo == 2)  
        return c2;  
    if (anterior == 0 && nuevo == 2)  
        return c3;  
    return 0;  
}  
}
```

## A.9 SUMAUNOS

```
package algoritmogenetico;

/* @author giovanni and raquel */

public class SumaUnos extends funcion Objetivo {

    /*

        public static void main ( String [] args ) {

            SumaUnos fg = new SumaUnos ( );

            int dato [] = { 1 , 0 , 1 , 0 , 1 , 0 , 1 };

            System . out . println ( "" + fg . evalua ( dato ) );

        }

        */

    @Override

    void imprime ( int [] individuo , double f ) {

        System . out . println ( " Pendiente de implementar " );

    }

}
```

```
}
```

```
@Override
```

```
double evalua ( i n t x [ ] ) {  
  
    double suma = x . l e n g t h / 2 ;  
  
    f o r ( i n t i = 0 ; i < x . l e n g t h ; i += 2 ) {  
  
        suma = suma + x [ i ] - x [ i + 1 ] ;  
  
    }  
  
    return suma ;  
  
}  
  
}
```

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ahmed, I., “Development of an inventory model for two suppliers with random capacity considering supply disruption”, 2014.
- [2] Ali, S. M., M. H. Rahman, T. J. Tumpa, A. A. M. Rifat y S. K. Paul, “Examining price and service competition among retailers in a supply chain under potential demand disruption”, *Journal of Retailing and Consumer Services*, 40, págs. 40–47, 2018.
- [3] Altay, N. y W. G. Green III, “OR/MS research in disaster operations management”, *European journal of operational research*, 175(1), págs. 475–493, 2006.
- [4] Bueno-Solano, A. y M. G. Cedillo-Campos, “Dynamic impact on global supply chains performance of disruptions propagation produced by terrorist acts”, *Transportation research part E: logistics and transportation review*, 61, págs. 1–12, 2014.
- [5] Cano, A., & Rojas, Á. (2016). *Autómatas celulares y aplicaciones*. UNIÓN. *Revista Iberoamericana de Educación Matemática*, 46, 33-48.

- [6] Cedillo-Campos, M. G. y H. O. Cedillo-Campos, "w@ reRISK method: Security risk level classification of stock keeping units in a warehouse", *Safety Science*, 79, págs. 358–368, 2015.
- [7] Chen, J., H. Wang, Z. Yan et al., "Evolutionary heterogeneous clustering for rating prediction based on user collaborative filtering", *Swarm and Evolutionary Computation*, 38, págs. 35–41, 2018.
- [8] Chen, L.-M., Y. E. Liu y S.-J. S. Yang, "Robust supply chain strategies for recovering from unanticipated disasters", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 77, págs. 198–214, 2015.
- [9] Correa, E. S., M. T. A. Steiner, A. A. Freitas y C. Carnieri, "A genetic algorithm for solving a capacitated p-median problema", *Numerical Algorithms*, 35(2), págs. 373–388, 2004.
- [10] Eiben, A. E. y M. Schoenauer, "Evolutionary computing", *Information Processing Letters*, 82(1), págs. 1–6, 2002.
- [11] Eiben, A. E., & Smith, J. E. (2003). *Introduction to evolutionary computing* (Vol. 53, p. 18). Berlin: springer.
- [12] Ganguly, N., B. K. Sikdar, A. Deutsch, G. Canright y P. P. Chaudhuri, "A survey on cellular automata", 2003.
- [13] Gutowitz, H., *Cellular automata: theory and experiment*, MIT press, 1991.
- [14] He, H., C. Maple, T. Watson, A. Tiwari, J. Mehnen, Y. Jin y B. Gabrys, "The security challenges in the IoT enabled cyber-physical systems and

opportunities for evolutionary computing & other computational intelligence”, en 2016 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), IEEE, págs. 1015–1021, 2016.

[15]Horvath, T. y A. C. de Carvalho, “Evolutionary computing in recommender systems: a review of recent research”, *Natural Computing*, 16(3), págs. 441–462, 2017.

[16]House, W., “National strategy for global supply chain security”, Washington, DC. Available at: [http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/national strategy for global supply chain security.pdf](http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/national_strategy_for_global_supply_chain_security.pdf). Accessed on October, 30, pág. 2013, 2012.

[17]Huerta-Trujillo, I., Simulacion de sistemas naturales usando autómatas celulares, Tesis Doctoral, Instituto Politecnico Nacional. Centro de Investigación en Computacion, 2009.

[18]Iakovou, E., D. Vlachos, C. Keramydas y D. Partsch, “Dual sourcing for mitigating humanitarian supply chain disruptions”, *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*, 4(2), págs. 245–264, 2014.

[19]Ivanov, D., A. Dolgui y B. Sokolov, “The impact of digital technology and Industry 4.0 on the ripple effect and supply chain risk analytics”, *International Journal of Production Research*, 57(3), págs. 829–846, 2019.

- [20]Ivanov, D., A. Dolgui, B. Sokolov y M. Ivanova, "Literature review on Bibliograf'ia 99 disruption recovery in the supply chain", International Journal of Production Research, 55(20), págs. 6158–6174, 2017.
- [21]Ivanov, D. y B. Sokolov, "Control and system-theoretic identification of the supply chain dynamics domain for planning, analysis and adaptation of performance under uncertainty", European Journal of Operational Research, 224(2), págs. 313–323, 2013.
- [22]Kamalahmadi, M. y M. M. Parast, "A review of the literature on the principles of enterprise and supply chain resilience: Major findings and directions for future research", International Journal of Production Economics, 171, págs. 116–133, 2016.
- [23]Kamalahmadi, M. y M. M. Parast, "An assessment of supply chain disruption mitigation strategies", International Journal of Production Economics, 184, págs. 210–230, 2017.
- [24]Kratka, J., D. Tošić, V. Filipović y I. Ljubić, "Solving the simple plant location problem by genetic algorithm", RAIRO-Operations Research-Recherche Opérationnelle, 35(1), págs. 127–142, 2001.
- [25]Levner, E. y A. Ptuskin, "Entropy-based model for the ripple effect: managing environmental risks in supply chains", International Journal of Production Research, 56(7), págs. 2539–2551, 2018.
- [26]Pal, S. K. y P. P. Wang, Genetic algorithms for pattern recognition, CRC press, 2017.

- [27]Palma Vazquez, F., Solución colaborativa de eventos disruptivos en la cadena de suministro, Tesis Doctoral, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2018.
- [28]Parkouhi, S. V. y A. S. Ghadikolaei, "A resilience approach for supplier selection: Using fuzzy analytic network process and grey VIKOR techniques", *Journal of cleaner production*, 161, págs. 431–451, 2017.
- [29]Parkouhi, S. V., A. S. Ghadikolaei y H. F. Lajimi, "Resilient supplier selection and segmentation in grey environment", *Journal of cleaner production*, 207, págs. 1123–1137, 2019.
- [30]Parvasi, S. P., R. Tavakkoli-Moghaddam, R. Bashirzadeh, A. A. Taleizadeh y A. Baboli, "Designing a model for service facility protection with a time horizon based on tri-level programming", *Engineering Optimization*, págs. 1–16, 2019.
- [31]Paul, S. K., R. Sarker y D. Essam, "A disruption recovery plan in a threestage production-inventory system", *Computers and Operations Research*, 57, págs. 60–72, 2015.
- [32]Paul, S. K., R. Sarker y D. Essam, "Managing risk and disruption in production-inventory and supply chain systems: A review", *Journal of Industrial & Management Optimization*, 12(3), págs. 1009–1029, 2016.
- [33]Pervin, M., S. K. Roy y G. W. Weber, "Multi-item deteriorating twoechelon inventory model with price-and stock-dependent demand: A trade-credit

policy”, *Journal of Industrial & Management Optimization*, 15(3), págs. 1345–1373, 2019.

[34]Pesantez Pacheco, P. G., *Clasificación y predicción de cambio de cobertura de suelo de la cuenca del Río Paute utilizando herramientas geoinformáticas*, Tesis de Maestría, 2015.

[35]Ren, Z. y J. Liu, “Extracting Information Cores with Multi-property Using a Multiobjective Evolutionary Algorithm”, en *2019 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, IEEE, págs. 1014–1021, 2019.

[36]Reyes, D., “*Descripcion y aplicaciones de los Automatas Celulares*”, Puebla, Moxico, 2011.

[37]Martínez, R., Lizárraga, G., Cavazos, L., Salais, T., & Saucedo, J. (2018). A New Objective Function to Simulate Supply Chain Performance Under Disruptions with Cellular Automata. In *Smart Technology* (pp. 21-30). Springer, Cham.

[38]Sawik, T., “A portfolio approach to supply chain disruption management”, *International Journal of Production Research*, 55(7), págs. 1970–1991, 2017.

[39]Schiff, J. L., *Cellular automata: a discrete view of the world*, tomo 45, John Wiley & Sons, 2011.

[40]Shahbaz, M., R. Rasi, M. Zulfakar, M. B. Ahmad, Z. Abbas y M. Mubarak, “A Novel Metric of Measuring Performance for Supply Chain Risk

Management: Drawbacks and Qualities of Good Performance”, *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 10(3S), págs. 967–988, 2018.

[41] Shahbaz, M. S., R. Z. R. Rasi y M. F. B. Ahmad, “A novel classification of supply chain risks: Scale development and validation”, *Journal of Industrial Engineering and Management*, 12(1), págs. 201–218, 2019.

[42] Sheffi, Y. et al., “The resilient enterprise: overcoming vulnerability for competitive advantage”, MIT Press Books, 1, 2005.

[43] Shepherd, S. y A. Sumalee, “A genetic algorithm based approach to optimal toll level and location problems”, *Networks and Spatial Economics*, 4(2), págs. 161–179, 2004.

[44] Silva, C. y E. C. Biscaia Jr, “Genetic algorithm development for multiobjective optimization of batch free-radical polymerization reactors”, *Computers & chemical engineering*, 27(8-9), págs. 1329–1344, 2003.

[45] Stone, J. y S. Rahimifard, “Resilience in agri-food supply chains: A critical analysis of the literature and synthesis of a novel framework”, *Supply Chain Management: An International Journal*, 23(3), págs. 207–238, 2018.

[46] Syarif, A., Y. Yun y M. Gen, “Study on multi-stage logistic chain network: a spanning tree-based genetic algorithm approach”, *Computers & Industrial Engineering*, 43(1-2), págs. 299–314, 2002.

[47] Tayyab, M. y B. Sarkar, “Optimal batch quantity in a cleaner multi-stage lean production system with random defective rate”, *Journal of cleaner production*, 139, págs. 922–934, 2016. QUITARLA

- [48]Thierry, C., A. Thomas y G. Bel, “Simulation for supply Chain management: An Overview”, *ISTE Ltd and John Wiley and Sons Inc*, 2008.
- [49]Toffoli, T. y N. Margolus, *Cellular automata machines: a new environment for modeling*, MIT press, 1987.
- [50]Tukamuhabwa, B., M. Stevenson y J. Busby, “Supply chain resilience in a developing country context: a case study on the interconnectedness of threats, strategies and outcomes”, *Supply Chain Management: An International Journal*, 22(6), págs. 486–505, 2017.
- [51]Tukamuhabwa Rwakira, B., *Supply chain resilience: a case study análisis of a supply network in a developing country context*, Tesis Doctoral, Lancaster University, 2015.
- [52]Umbarkar, A. y P. Sheth, “CROSSOVER OPERATORS IN GENETIC ALGORITHMS: A REVIEW.”, *ICTACT journal on soft computing*, 6(1), 2015.
- [53]Wang, Y., “Resilience quantification for probabilistic design of cyber-physical system networks”, *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part B: Mechanical Engineering*, 4(3), pág. 031 006, 2018.
- [54]Yang, L., G. Chen, N. G. M. Rytter, J. Zhao y D. Yang, “A genetic algorithm-based grey-box model for ship fuel consumption prediction towards sustainable shipping”, *Annals of Operations Research*, págs. 1–27, 2019.

- [55]Yang, Y. y X. Xu, "Post-disaster grain supply chain resilience with government aid", *Transportation research part E: logistics and transportation review*, 76, págs. 139–159, 2015.
- [56]Zou, F., D. Chen y Y. Zhao, "Decomposition-based Multi-objective Backtracking Search Algorithm for Personalized Recommendation", en *2019 Chinese Control Conference (CCC)*, IEEE, págs. 2674–2678, 2019.
- [57]Ballou, R. H. (2004). *Logística: Administración de la cadena de suministro*. Pearson educación.
- [58]Becerra-González, K., Pedroza-Barreto, V., Pinilla-Wah, J., & Vargas-Lombardo, M. (2017). Implementación de las TIC´ S en la gestión de inventario dentro de la cadena de suministro. *Revista de Iniciación Científica*, 3(1), 36-49.

## RESUMEN AUTOBIBLIOGRÁFICO

Raquel Martínez Martínez

Candidato para obtener el grado de  
Doctorado en Ingeniería  
Con Orientación en Tecnologías de la Información

Universidad Autónoma de Nuevo León  
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Tesis:

MODELO DE LA CADENA DE SUMINISTRO PARA SIMULAR  
DISRUPCIONES USANDO AUTOMATAS CELULARES

Soy Raquel Martínez Martínez, nací un 21 de octubre de 1982, en la ciudad de Monterrey, Nuevo León, soy divorciada, tengo una hija hermosa, en toda la extensión de la palabra, de 7 años, tengo una familia muy grande, mis padres Mario J. Martínez y San Juana Martínez, mis hermanos de mayor a menor. Mi

hermana Alma D. Martínez con sus dos hijos Nelson A. Méndez y Oscar J. Méndez, mi hermano Erick A. Martínez (el Arquí), mi hermana Juana M. Martínez y su esposo Javier Zamora, mi hermana Norma G. Martínez, su esposo Gabriel González, sus hijos Gabriel González (el guapo) y Alejandro González, mi hermano F. Javier Martínez, su esposa Elena Covarrubias, sus hijos Anele Martínez, Alan Martínez y Omar Martínez y, por último, pero no menos importante mi hermana Dora A. Martínez.

Soy Ingeniero Administrador de Sistemas, egresada en el año 2008 orgullosamente de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME) de mi Alma Máter Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL).

Termine la Maestría en Ingeniería de la Información con Orientación en Informática, en la misma Facultad de FIME, egresada en el año 2011.

Desde 8vo semestre me desarrollé como instructor en el departamento de Educación Continua en la facultad de FIME, terminando la licenciatura empecé como personal administrativo en dicha facultad y al terminar la maestría empecé como docente. Actualmente estoy continuo como docente y como jefe del Programa Educativo Ingeniero en Tecnología de Software (ITS) desde el 2018 a la fecha.

Como experiencia incluyo que he participado en acreditaciones de la carrera Ingeniero Administrador de Sistemas (IAS), como lo es EUR-ACE, en el año 2015, para este mismo programa educativo para la acreditación de CACEI,

marco de referencia 2018, en el año 2017, y para el programa educativo ITS, con la acreditación de ABET en el 2018.

Actualmente pertenezco al Cuerpo Académico con el nombre de “Desarrollo de Tecnologías de Información y Software” que está autorizado en formación desde diciembre del 2020 al diciembre del 2023.