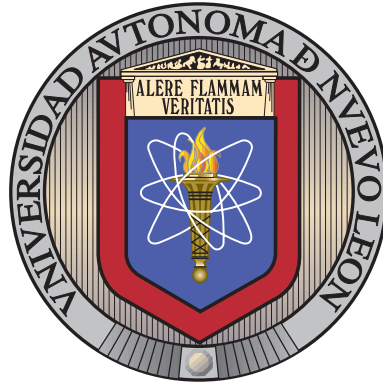


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE EN LOS SISTEMAS  
DE RECOLECCIÓN DE COMPONENTES  
UTILIZANDO REDES BAYESIANAS

POR

ROBERTO MURILLO RAMIREZ

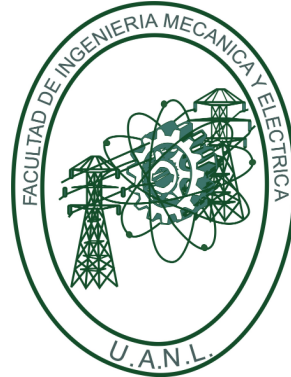
COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN LOGÍSTICA Y CADENA DE SUMINISTRO

AGOSTO 2020

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE EN LOS SISTEMAS  
DE RECOLECCIÓN DE COMPONENTES  
UTILIZANDO REDES BAYESIANAS

POR

ROBERTO MURILLO RAMIREZ

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN LOGÍSTICA Y CADENA DE SUMINISTRO

AGOSTO 2020



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 «Análisis de incertidumbre en los Sistemas de Recolección de Componentes utilizando redes bayesianas», realizada por el alumno Roberto Murillo Ramirez, con número de matrícula 1985770, sea aceptada para su defensa como requisito para obtener el grado de Maestría en Logística y Cadena de Suministro.

El Comité de Tesis

Dr. Giovanni Lizárraga Lizárraga  
Asesor

MLCS. Aldo Pérez Salinas  
Revisor

MLCS. Blanca Idalia Pérez Pérez  
Revisor

Vo. Bo.

Dr. Simón Martínez Martínez  
Subdirector de Estudios de Posgrado

070

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, agosto 2020

# ÍNDICE GENERAL

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>XII</b>
<b>Resumen</b>	<b>XIII</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Descripción del Problema . . . . .	4
1.2. Objetivo General . . . . .	5
1.2.1. Objetivos Específicos . . . . .	5
1.3. Hipótesis . . . . .	6
1.4. Justificación . . . . .	6
1.5. Estructura de la tesis . . . . .	7
<b>2. Antecedentes</b>	<b>8</b>
2.1. Industria Automotriz . . . . .	8
2.1.1. Industria Automotriz en México . . . . .	9
2.1.2. Principales retos para la industria automotriz . . . . .	11
2.1.3. Clasificación de proveedores en la industria automotriz . . . . .	13

---

2.2. Sistemas de manufactura esbelta . . . . .	14
2.2.1. Sistemas Justo A Tiempo . . . . .	15
2.3. Sistemas de Recolección de Componentes SRC . . . . .	16
2.3.1. Estructuras de los sistemas de recolección de componentes . . .	17
2.3.2. Servicios de transporte tercerizado . . . . .	19
2.4. Revisión de literatura . . . . .	20
2.4.1. Herramientas utilizadas en los SRC . . . . .	20
2.4.2. Herramientas de cuantificación de la incertidumbre . . . . .	23
2.5. Métodos Bayesianos . . . . .	24
2.5.1. Redes Bayesianas . . . . .	26
2.5.2. Aplicaciones de las redes bayesianas . . . . .	27
2.5.3. Enfoques cuantitativos y cualitativos . . . . .	30
<b>3. Metodología</b>	<b>31</b>
3.1. Selección de redes bayesianas . . . . .	32
3.2. Modelación de la herramienta . . . . .	33
3.3. Obtención de los datos . . . . .	35
3.3.1. Actividades para la recolección de datos . . . . .	35
3.3.2. Descripción del personal consultado . . . . .	36
3.3.3. Estructura del formulario . . . . .	38
3.4. Alusiones de las redes bayesianas . . . . .	39

---

<b>4. Análisis y Resultados</b>	<b>41</b>
4.1. Caso de estudio . . . . .	41
4.1.1. Situación actual de los sistemas de recolección en la empresa .	43
4.2. Red bayesiana . . . . .	44
4.2.1. Asignación de probabilidades a priori . . . . .	45
4.2.2. Asignación de probabilidades a posteriori . . . . .	50
4.2.3. Acumulación de resultados en los escenarios . . . . .	61
<b>5. Conclusiones</b>	<b>63</b>
5.1. Contribuciones . . . . .	65
5.2. Trabajo futuro . . . . .	65
<b>A. Cuestionario de los Sistemas de Recolección (<i>Milk-runs</i>)</b>	<b>66</b>
<b>B. Desarrollo de una red bayesiana</b>	<b>71</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

1.1. Modalidades de los Sistemas de Recolección de Componentes (Meyer y Amberg, 2018). . . . .	3
2.1. Principales plantas productoras de vehículos ligeros en México . . . .	10
2.2. Principales plantas productoras de vehículos pesados en México . . .	11
2.3. Ranking de países productores de vehículos en el Mundo . . . . .	12
2.4. Clasificación de los niveles Tier de los proveedores (Agüero Díaz, 2018). 14	
2.5. Diagrama de Venn respecto al escenario (Moreno Garza, 2006) . . . .	25
2.6. Nodos padre e hijo . . . . .	26
3.1. Metodología propuesta . . . . .	33
4.1. Ubicación geográfica de clientes y proveedores . . . . .	43
4.2. Gráfico Acíclico Dirigido . . . . .	45
4.3. Gráfico Acíclico Dirigido representado por los porcentajes de probabilidad . . . . .	50
4.4. Gráfico Acíclico Dirigido representado por los porcentajes de probabilidad a posteriori para el nodo «Tiempo de Carga». . . . .	51

---

4.5. Gráfico Acíclico Dirigido representado por los porcentajes positivos de probabilidad a posteriori para el nodo «Tiempo de Carga». . . . .	52
4.6. Gráfico Acíclico Dirigido representado por los porcentajes negativos de probabilidad a posteriori para el nodo «Accidente vial». . . . .	53
4.7. Gráfico Acíclico Dirigido representado por los porcentajes positivos de probabilidad a posteriori para el nodo «Accidente vial». . . . .	54
4.8. Gráfico Acíclico Dirigido representado por los porcentajes negativos de probabilidad a posteriori para el nodo «Cambio de modelo». . . . .	55
4.9. Gráfico Acíclico Dirigido representado por los porcentajes negativos de probabilidad a posteriori para el nodo «Tiempo de carga». . . . .	55
4.10. Gráfico Acíclico Dirigido representado por los porcentajes positivos de probabilidad a posteriori para el nodo «Tiempo de carga». . . . .	56
4.11. Gráfico Acíclico Dirigido representado por los porcentajes negativos de probabilidad a posteriori para el nodo «Accidente vial». . . . .	57
4.12. Gráfico Acíclico Dirigido representado por los porcentajes negativos de probabilidad a posteriori para el nodo «Accidente vial». . . . .	58
4.13. Gráfico Acíclico Dirigido representado por los porcentajes negativos de probabilidad a posteriori para el nodo «Cambio de modelo». . . . .	59
4.14. Gráfico Acíclico Dirigido representado por los porcentajes negativos de probabilidad a posteriori para los nodos «Tiempo de carga», «Accidente vial» y «Cambio de modelo». . . . .	60
4.15. Gráfico Acíclico Dirigido representado por los porcentajes positivos de probabilidad a posteriori para los nodos «Tiempo de carga», «Accidente vial» y «Cambio de modelo». . . . .	60



---

A.1. Parte 1. Presentación de los Expertos . . . . .	66
A.2. Parte 2. Preguntas 1-2 . . . . .	67
A.3. Parte 2. Preguntas 3-5 . . . . .	68
A.4. Parte 2. Preguntas 6-7 . . . . .	69
A.5. Parte 2. Preguntas 8-10 . . . . .	70
B.1. Figura ilustrativa del desarrollo de una red bayesiana cuando se cuenta o no con datos históricos. . . . .	72

# ÍNDICE DE TABLAS

---

1.1. Operaciones del transporte de carga . . . . .	4
2.1. Principales problemas abordados en los SRC . . . . .	22
3.1. Tabla de variables del escenario de los SRC. . . . .	34
3.2. Tabla de los perfiles de los expertos. . . . .	37
4.1. Tabla de probabilidades del nodo «Calidad» respecto al nodo «Lotes completos». . . . .	45
4.2. Tabla de probabilidades del nodo Documentación respecto al nodo Tiempo de Carga. . . . .	46
4.3. Tabla de probabilidades del nodo «Arribo de vehículos» respecto al nodo «Tiempo de Carga». . . . .	46
4.4. Tabla de probabilidades del nodo «Plan de producción» respecto al nodo «Plan de Estiba». . . . .	46
4.5. Tabla de probabilidades del nodo «Tráfico» respecto al nodo «Accidente vial». . . . .	47
4.6. Tabla de probabilidades del nodo «Mantenimiento» respecto al nodo «Accidente vial». . . . .	47

---

4.7. Tabla de probabilidades del nodo «Accidente vial» respecto a los nodos «Tráfico» y «Mantenimiento». . . . .	47
4.8. Tabla de probabilidades del nodo «Plan de producción» respecto al nodo «Cambio en el modelo». . . . .	48
4.9. Tabla de probabilidades del nodo «Cambio de modelo» respecto al nodo «Plan de producción» y «Plan de estiba». . . . .	48
4.10. Tabla de probabilidades del nodo «Expeditar» respecto a los nodos «Tiempo de carga», «Accidente vial» y «Cambio de modelo». . . . .	49
4.11. Tabla de los perfiles de los expertos. . . . .	62

# AGRADECIMIENTOS

---

A mi hermana, madre y hermanos por cuidar siempre de mi y a mis amigos fieles por estar siempre.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por su invaluable apoyo para lograr esta Investigación.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León y a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica por aceptarme en sus espacios de conocimiento.

A mi director de tesis por su guía y tiempo y a mis maestros por el conocimiento adquirido.

# RESUMEN

---

Roberto Murillo Ramirez.

Candidato para obtener el grado de Maestría en Logística y Cadena de Suministro.

Universidad Autónoma de Nuevo León.

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Título del estudio: ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE EN LOS SISTEMAS DE RECOLECCIÓN DE COMPONENTES UTILIZANDO REDES BAYESIANAS.

Número de páginas: 78.

**OBJETIVOS Y MÉTODO DE ESTUDIO:** Analizar los escenarios de operación de los SRC usando una herramienta basada en cuantificación de la incertidumbre para brindar una base en la toma de decisiones de expedición de componentes.

**CONTRIBUCIONES Y CONCLUSIONES:** La presente investigación tuvo como propósito estudiar un tema logístico, los Sistemas de Recolección de Componentes (SRC), se logró obtener una perspectiva de su estructura operacional, diseño, planificación y ejecución de los mismos a partir de dos fuentes: literatura y la observación de un caso de estudio. Se logró desarrollar un análisis que cuantificó la incertidumbre en dichos sistemas y mostró como la probabilidad de ocurrencia de las variables involucradas para poder aportar información útil a las personas encargadas de tomar decisiones.

Los SRC han sido poco estudiados en la literatura Nacional, es necesario abordar más este tópico ya que un gran número de empresas utilizan estas estructuras en sus operaciones logísticas.

Dentro de la literatura consultada no fue posible encontrar a los SRC con objetivos de cuantificación de la incertidumbre, lo cual lo convierte en un tema que podría ser estudiado a profundidad.

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



Dr. Giovanni Lizárraga Lizárraga

## CAPÍTULO 1

# INTRODUCCIÓN

---

Desde hace varias décadas atrás, la industria automotriz ha revolucionado los procesos de manufactura de tal forma que actualmente sus aportaciones no solo se manifiestan dentro de esta industria, sino que se han expandido a un gran número de estructuras empresariales a lo largo del mundo. Dichas aportaciones a los sistemas de manufactura son de vital importancia ya que sustentan muchos de los avances en la mejora de procesos que ha sido una tendencia global en las empresas.

Los sistemas de manufactura esbelta son de las aportaciones más representativas de esta industria, estas herramientas se enfocan principalmente en la eliminación de procesos que no agregan valor a una empresa. Una de las herramientas más representativas es la filosofía de operación Justo A Tiempo (JAT), en la cual se tiene como sustento la correcta coordinación de los actores involucrados en un sistema de suministro. El rol de las empresas ensambladoras de vehículos en los procesos de manufactura se ha modificado conforme al tiempo, en la actualidad estas empresas se centran más en actividades estratégicas como el diseño de vehículos, comercialización de las unidades y por supuesto el armado de vehículos. En este punto surge una figura de gran valor para las empresas ensambladoras, dicha figura son los proveedores que son los responsables de suministrar más del 95 % de los componentes y sistemas de un vehículo (Jiménez Sánchez, 2006). Para fines de esta investigación se utilizará una abreviación OEM (por las siglas en ingles de Original Equipment

Manufacturers) para referirse a las Empresas Ensambladoras de Vehículos.

Los avances en los procesos de manufactura, que involucran a un número significativo de proveedores, se han visto reflejados en la creación de sistemas complejos de operación, si bien estos sistemas han demostrado ser capaces de reducir costos y tiempos en procesos de manufactura, también han significado que las operaciones logísticas se vuelvan más difíciles.

Dentro de las operaciones logísticas existe la logística de entrada que hace referencia al suministro de piezas y componentes por parte de los proveedores considerando aspectos como cantidad correcta, componentes específicos y el orden correcto (Knoll *et al.*, 2016). En la actualidad esta logística es una estructura en la cual se busca la integración en una sola red de los proveedores que se encuentran alejados geográficamente de las OEM (Hosseini *et al.*, 2014).

Los sistemas de transporte existentes para llevar a cabo la logística de entrada de los componentes se han denominado, tanto en la industria como en la literatura existe, como sistemas *milk-runs* los cuales consisten en la programación cíclica y fija de rutas y tiempos de recolección previamente definidos y coordinados por la planta receptora (Meyer y Amberg, 2018). Para realizar estas operaciones de transporte se cuenta con cuatro diferentes modalidades observadas en la figura 1.1 de acuerdo a Meyer y Amberg (2018), la primera es el transporte expeditado de mercancías, el cual se utiliza ante una demanda inesperada, la segunda es el transporte punto a punto para el cual existe una planificación previa y por último tenemos los sistemas de recolección *milk-runs* de ida y vuelta, el cual inicia en las OEM y después continua con algún proveedor de la ruta, la variación con el recorrido de *milk-runs* abierto es que este inicia con alguno de los proveedores de la ruta. Para fines de esta investigación se llamará a estas estructuras operacionales de *milk-runs* como Sistemas de Recolección de Componentes (SRC).

Los SRC tienen como objetivo principal integrar en una sola carga los envíos de componentes requeridos y así disminuir costos de transporte. También son capaces



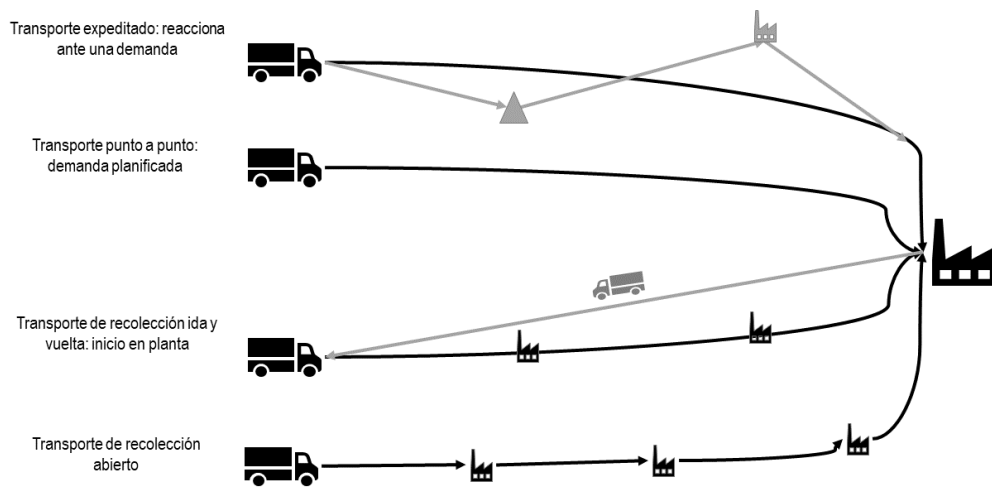


FIGURA 1.1: Modalidades de los Sistemas de Recolección de Componentes (Meyer y Amberg, 2018).

de ofrecer factores como una mayor flexibilidad, reducción en costos y tiempos de entrega correctos en una red de logística de entrada (Hosseini *et al.*, 2014).

El transporte de carga toma un papel importante para llevar a cabo las operaciones de los SRC, las OEM normalmente contratan a empresas especializadas que brindan un servicio tercerizado de transporte, con el cual se busca establecer rutas de transporte eficientes y rentables, minimizando así las pérdidas de tiempo y dinero. Dicho esto, los SRC sugieren una estructura definida por los requerimientos en el flujo de manufactura de las OEM, esto determinara la demanda del transporte de carga requerida por dicha estructura (Ottemöller y Friedrich, 2017).

Los SRC se conforman de operaciones típicas del transporte de carga, estas actividades pueden ser agrupadas en tres segmentos los cuales son operaciones primarias del proveedor, operaciones de planeación y operaciones de tránsito. En la tabla 1.1 se puede observar de mejor manera estas operaciones.

Operaciones en el transporte de carga	
Operaciones Iniciales proveedor	Preparación de ordenes
	Tiempo de carga
	Inspección de la unidad
	Documentación
	Cerrar la carga y configurar el camión para la ruta
	Operaciones imprevistas (mantenimiento)
Operaciones de planeación	Tiempo de espera entre cada cliente
	Tiempo de descarga esperado
	Tiempo de operación desfasado
Transito	Tiempo de transito entre cada cliente
	Velocidad
	Inconvenientes de manejo

TABLA 1.1: Operaciones del transporte de carga

## 1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Al conocer algunas de las operaciones involucradas en los SRC, se conoce que dentro de estas operaciones se pueden presentar eventos disruptivos, en el transporte de carga se asocian comúnmente con errores en el trabajo cotidiano y la ejecución de las operaciones, estos eventos disruptivos, por más mínimos que parezcan, pueden causar cambios en las prácticas cotidianas y por lo tanto propician perturbaciones en una red (Kent, 2017) lo que puede verse reflejado en un decremento en el nivel de servicio otorgado a los clientes. Por lo cual se abordan los eventos disruptivos presentados en el transporte y como estas pueden afectar la movilidad de mercancías, de tal manera que se altera todo el flujo de una red de transporte, mientras que Díaz-Madroño *et al.* (2017) menciona las afectaciones dadas por la incertidumbre en dichas operaciones. Un evento disruptivo se entiende como un evento no determinista que es asociado a conceptos como perturbación, interrupciones y mal funcionamiento,

estos eventos son causantes de problemas y fallas en las transiciones de una operación, también pueden impactar a múltiples niveles de dicha operación (Palma Vázquez, 2018).

Uno de los principales objetivos de las OEM es agilizar la entrada de los componentes a las líneas de ensamblaje evitando así el menor número de atrasos y los niveles de inventario más bajos, los atrasos pueden significar pérdidas monetarias por unidad de tiempo (Du *et al.*, 2007) (Aragão *et al.*, 2016).

Los eventos disruptivos en los SRC generan incertidumbre, para poder enfrentar la incertidumbre presentada en los retrasos de entrega de componentes se utiliza el transporte de carga expeditado, esta es una alternativa usada actualmente por las OEM para evitar los retrasos en las líneas de producción, en consecuencia, esto representa un costo mayor inherente y una operación logística de mayor complejidad. Dicha incertidumbre aún no ha sido incorporada y analizada dentro de los escenarios de SRC, las decisiones de expeditar o no componentes se realizan de manera empírica o por intuición sin considerar una base para la toma de decisiones (Yin *et al.*, 2018) (Zahraei y Teo, 2017).

## 1.2 OBJETIVO GENERAL

Analizar los escenarios de operación de los SRC usando una herramienta basada en cuantificación de la incertidumbre para brindar una base en la toma de decisiones de expeditación de componentes.

### 1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Documentar los escenarios de operaciones del transporte de carga con el fin de tener registro de las probabilidades de ocurrencia de las variables de operación

y con base en la recopilación de opinión experta.

- Modelar una herramienta que sea capaz de inferir las causas y probabilidades de los eventos disruptivos encontrados en los sistemas de recolección de componentes.

### 1.3 HIPÓTESIS

Usando una herramienta de redes bayesianas, se podrá estimar la probabilidad de ocurrencia de un evento de expeditación de componentes, que contribuye a tomar mejores decisiones.

### 1.4 JUSTIFICACIÓN

Datos arrojados por un estudio realizado por la empresa Nielsen Research estiman que un minuto de retraso en las líneas de ensamblaje de las OEM puede alcanzar los \$22 mil hasta \$50 mil dólares por minuto. En este sentido la importancia de que los componentes sean suministrados bajo la filosofía JAT, es sin duda crucial para las OEM. El hecho de no cuantificar la incertidumbre generada por las interrupciones en las operaciones de los SRC, propician que los encargados de planear y coordinar dichos sistemas tomen decisiones espontaneas en cuanto a contratar o no servicios de transporte expeditado con el fin de mitigar los retrasos. Estas decisiones derivan en altos costos de operación logística, aparte de comprometer por completo el suministro de los componentes para las líneas de ensamblaje. En los enfoques actuales para diseñar y abordar los problemas de los SRC se busca generar modelos de optimización para el enrutamiento, modificación o establecimiento de ventanas de tiempo y simulación de operaciones como lo es mencionado por Bocewicz *et al.* (2019) y Ma y Sun (2013), pero estas investigaciones no contemplan los niveles de incertidumbre en sus operaciones, por lo tanto, estos autores concluyen que ante variabilidad alta

y la existencia de interrupciones los modelos de optimización y otras herramientas utilizadas no son las más efectivas en sus resultados.

## 1.5 ESTRUCTURA DE LA TESIS

Como parte de la ayuda al lector, se expresa la siguiente estructura del documento, dicha estructura consta de cinco capítulos en los cuales se comienza por la introducción al tema planteado, así como la descripción del problema y objetivos que se buscan lograr y también se describe una justificación del tema de estudio. Luego, en el capítulo dos, se abordan todos los antecedentes relacionados al tema de estudio, se explica los orígenes de los Sistemas de Recolección de Componentes en la industria automotriz y cuales son las principales problemáticas y retos encontrados en tiempos modernos, se describen los enfoques con los que han sido abordado los mismos y se ofrece una perspectiva de las herramientas existentes para poder lograr el objetivo de la investigación, al final se hacen alusiones a la herramienta seleccionada. En el capítulo tercero se desarrolla y explica la metodología que se utilizará para la investigación y se menciona las causas de la selección de la herramienta. Para el capítulo cuatro se comienza por una descripción del caso de estudio con el que se trabajó y se realiza un análisis profundo de los resultados obtenidos por la herramienta seleccionada. Por último, en el capítulo quinto, se expresan todas las conclusiones y comentarios relacionados con la investigación realizada y también se ofrece una perspectiva de trabajo futuro.

A continuación se presentan los antecedentes encontrados referentes al tema estudiado, se comienza por hacer un análisis de las filosofías en la que se sustenta los Sistemas de Recolección de Componentes (SRC) y como han sido abordado este tema desde diferentes perspectivas en la literatura consultada.

## CAPÍTULO 2

# ANTECEDENTES

---

## 2.1 INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

Dentro del amplio espectro de industrias de manufactura, el sector automotriz se ha consolidado a lo largo de la historia como uno de los más importantes y fundamentales en la economía global ya que sus estructuras productivas y comerciales se han expandido no solo en los países de origen sino que han mudado sus cadenas productivas alrededor del mundo y se han convertido así en redes transnacionales, ayudando así a economías emergentes (Alvarez, 2013) (Sabbagha *et al.*, 2016).

El sector automotriz no solo ha revolucionado la economía global sino también el desarrollo tecnológico y social en el mundo. Actualmente el mercado de consumo más grande del mundo es Estados Unidos mientras que China es uno de los principales productores. En el entorno global y fluctuante, esta industria se enfrenta a fuertes cambios que, si bien se pensaba que podrían observar en un futuro lejano, la realidad es que actualmente se están manifestando. Factores como vehículos autónomos, el Internet de las cosas, impresiones 3D y mayor customización por parte de los usuarios, representan un gran reto que solo pocas industrias lograrán una buena adaptación (Ferràs-Hernández *et al.*, 2017).

Esta industria también se ha caracterizado por ser precursora en el ámbito

manufacturero, principalmente en la gestión de la cadena de suministro que se basa en la confianza plena entre los actores principales que intervienen en ella (Pirttilä *et al.*, 2019).

Otra de las principales características es la manufactura en grandes volúmenes de producción, lo cual se puede ver reflejado en un menor costo para el cliente, pero puede traer consigo problemas referidos a la variabilidad de la demanda de los clientes, en general estos sistemas de producción benefician a toda la cadena de valor de la industria automotriz (Christensen, 2011).

El rol de las empresas involucradas en el ensamblaje de vehículos es muy claro, por un lado, se encuentran las empresas armadoras de vehículos que toma el rol principal y realizan funciones como el ensamblaje, diseño y comercialización de las unidades terminadas, mientras los proveedores fungen como suministradores de la mayoría de las piezas del automóvil (Borgstedt *et al.*, 2017).

### 2.1.1 INDUSTRIA AUTOMOTRIZ EN MÉXICO

Nuestro país incursiono desde la década de los ochentas en la industria automotriz, ya que se ha consolidado como el destino predilecto dado que contaba con factores que beneficiaban a las grandes ensambladoras de vehículos, factores como ubicación geográfica y producción a bajo costo fueron los impulsores para la apertura de esta industria en México. El crecimiento fue exponencial ya que los bajos precios de producción se asociaron a altos niveles de productividad, y eso genero que de 1994 a 2010 el número de plantas armadoras subiera de 8 a 22 alrededor del país. En contraste, el número de proveedores también aumento de 600 a 2200 en el mismo periodo (Unger, 1991).

Datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2018), nos indican que, dentro de su estudio más reciente, en el año de 2017 la industria automotriz apporto el 3.7% del Producto Interno Bruto (PIB) y dentro del PIB del sector

manufacturero represento el 20.2%. Dentro del impacto de este sector en otras actividades económicas destacan en 90 actividades en el sector secundario y 70 en el sector de comercio y servicios. Los niveles de empleabilidad se ven reflejados en 800 mil empleos entre plantas armadoras y proveedores de autopartes. En la figura 2.1 se puede observar la distribución de las plantas armadoras tanto de vehículos ligeros, pesados y de motores a lo largo de la república Mexicana, de color rojo con variaciones, se indicia a la región norte, mientras de color azul se muestra a la región centro.

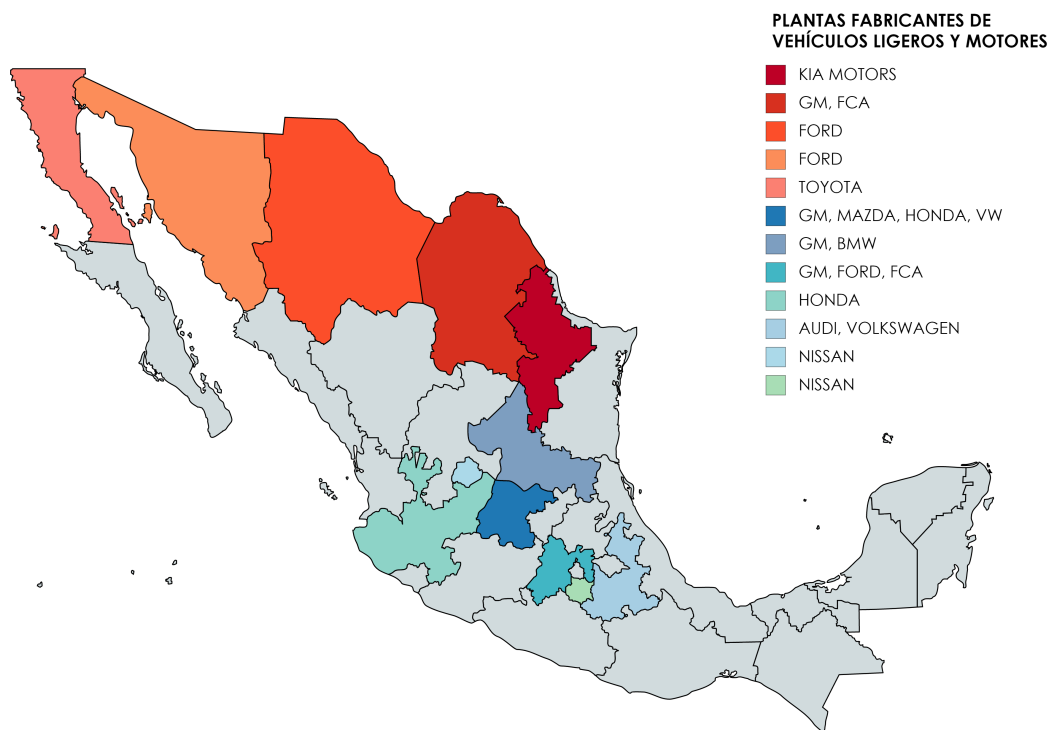


FIGURA 2.1: Principales plantas productoras de vehículos ligeros en México

En esta figura se puede observar que en la zona norte y centro del país se concentra el mayor número de industrias de este tipo.

Dentro de los datos de producción mundial mostrados por la Organización Mundial de Fabricantes de Vehículos de Motor (OICA, 2018), por sus siglas en inglés, colocan a México dentro del lugar número tres en la producción mundial de automóviles después de Estados Unidos y China en la figura 2.3 se muestra sitios en



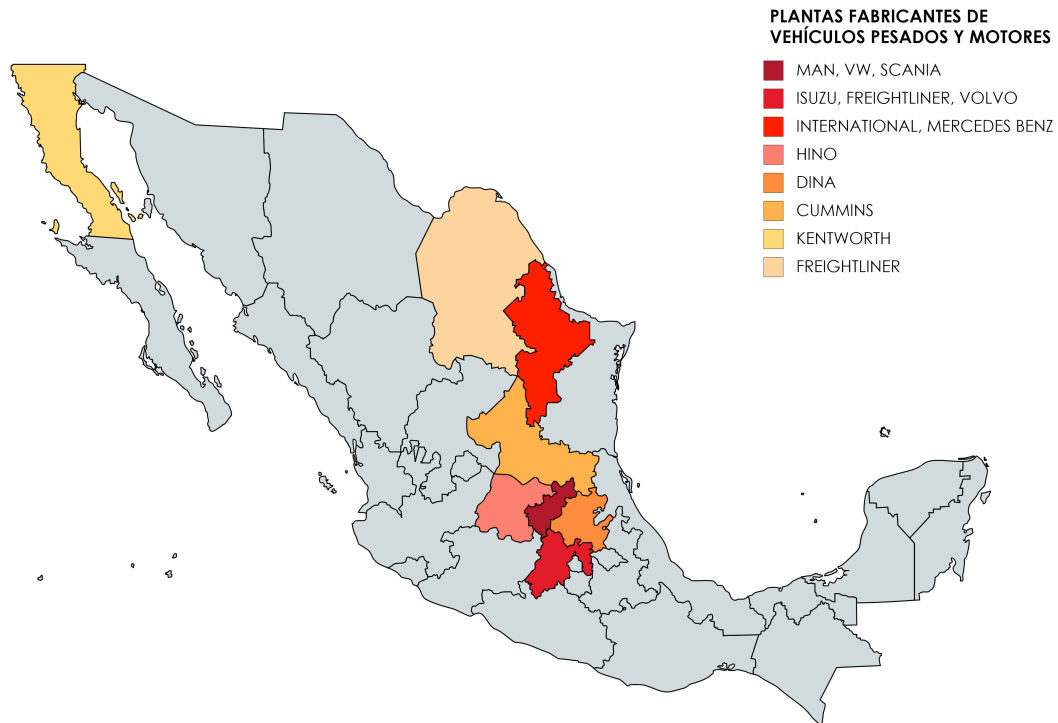


FIGURA 2.2: Principales plantas productoras de vehículos pesados en México

el ranking mundial y la posición de los primeros 10 países incluidos México.

### 2.1.2 PRINCIPALES RETOS PARA LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

Como ya se mencionó existen factores tecnológicos que están afectando el rumbo de la industria automotriz, estos factores, aunque son referentes a el grado de adaptación tecnológica de cada empresa, existen otros retos muy significativos en cuanto a las tendencias de la cadena de suministro en la industria automotriz. A continuación, se realiza una lista de estos aspectos (Pires y Neto, 2008):

- Se busca que en todos los procesos de la cadena de suministro se disminuyan los costos y los tiempos de operación(Pires y Neto, 2008).
- Cambios rápidos en los ciclos de vida de los productos e introducción de estos al

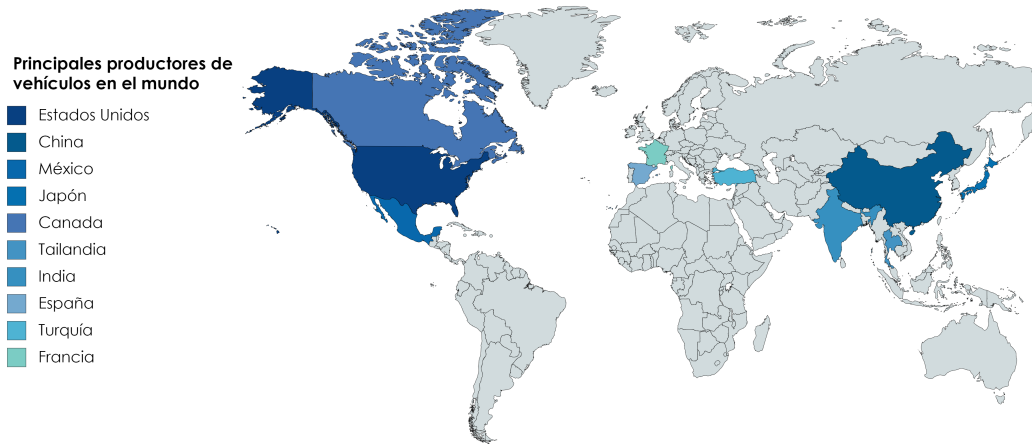


FIGURA 2.3: Ranking de países productores de vehículos en el Mundo

mercado, estos se ven reflejado en menores tiempos de comercialización (Pires y Neto, 2008).

- La fuerte competencia entre las OEM, una de las maneras en la que las empresas compiten es través de sus cadenas de suministro (Yan *et al.*, 2019).
- El cambio de estructuras locales a globales donde el factor geográfico influye demasiado (Yan *et al.*, 2019).
- El efecto látigo y los cambios turbulentos en los niveles de inventario, que afectan las visibilidades en la cadena (Yan *et al.*, 2019).

Estos problemas son a grandes rasgos factores que influirán en las operaciones de la industria automotriz y por su puesto la manera en la que se estructuran. Dicho esto, en la siguiente sección se describe toda la estructura basada en los sistemas de manufactura esbelta que son pilares para la industria automotriz.

### 2.1.3 CLASIFICACIÓN DE PROVEEDORES EN LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

Se conoce que un vehículo promedio requiere más de quince mil piezas y componentes, en este sentido los proveedores especializados en suministrar esta cantidad de piezas buscan una relación estrecha y robusta con las OEM's. Este suministro de componentes está regido por fuertes estatutos que buscan la mejor relación entre el precio y la calidad del componente, esto por medio de sistemas de inventarios justo a tiempo y practicas de manufactura ajustada. La existencia de la clasificación entre proveedores se asigna por variables como el grado de participación del proveedor y la información compartida con este (Pérez y Sánchez, 2001) (Bennett y Klug, 2012).

Dicho lo anterior, tanto la selección como el desarrollo de un proveedor de componentes se vuelve fundamental y es considerada como una *asociación estratégica* ya que se pueden involucrar componentes altamente específicos o subsistemas integrados, por lo cual el cambio repentino de proveedores por las OEM's no es algo viable (Pérez y Sánchez, 2001).

Para lograr una relación integral óptima, también se deben de incluir aspectos de operaciones logísticas para el suministro de estos componentes, las condiciones a considerar para realizar dicho suministro, según Bennett y Klug (2012), son las siguientes:

- Proximidad geográfica.
- Componente a enviar, volumen y secuencia de entrega.
- Inversión compartida y especificación de activos.
- Intercambio de información e integración entre sus tecnologías de información.
- Sistemas de transporte.

La clasificación determina el nivel de relación entre un proveedor y una planta ensambladora, en la Figura 2.4 se observa como se estructura esta relación, en la cual se clasifica por niveles (Tier), los proveedores con niveles Tier 3 y 2 son proveedores que realizan la manufactura de piezas básicas e individuales como herramientas de torno, fundidas, troquelados e inyección de plásticos. Mientras que los Tier 1 son proveedores de partes originales, estas empresas tienen facultades más importantes como el diseño y proveen principalmente sub-ensambles (Agüero Díaz, 2018) (SE, 2012).

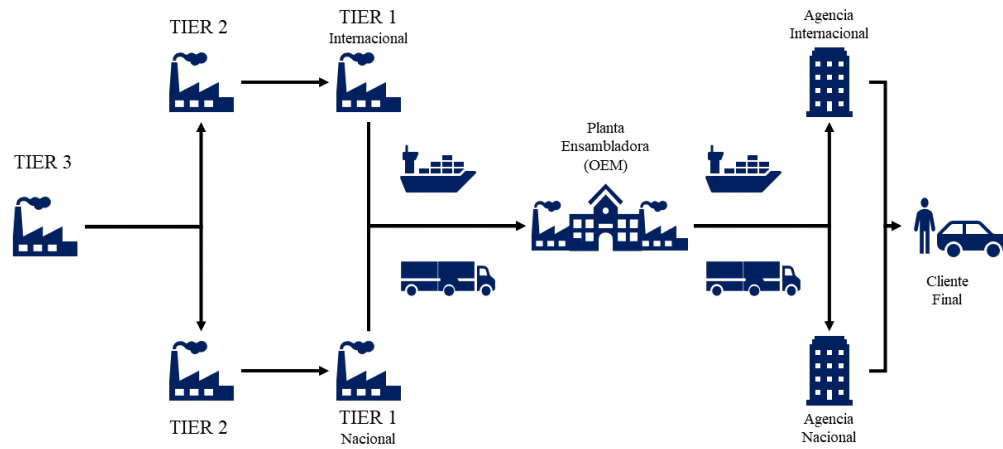


FIGURA 2.4: Clasificación de los niveles Tier de los proveedores (Agüero Díaz, 2018).

## 2.2 SISTEMAS DE MANUFACTURA ESBELTA

Estos sistemas han sido abordados desde varias décadas atrás, cuando la empresa japonesa Toyota logró establecer una metodología de trabajo que revolucionó los sistemas de producción en masa. A continuación, se realiza una revisión de estos sistemas que continúan vigentes hasta nuestros tiempos, también con sus respectivas mejoras.

Los sistemas de manufactura esbelta tienen su origen en la empresa Toyota quienes lograron crear la base para este tipo de manufactura, dicho sistema es un conjunto de reglas cuya misión es la eliminación de desperdicios, defectos y por ende tratar de reducir los tiempos de entrega. También es asociado como un proceso de mejora continua. Factores de riesgo dentro de estos sistemas que pueden crear variación de la parte o producto manufacturado son baja calidad por parte de proveedor, error en diseños de componentes o piezas y procesos no alineados. Algunas de las principales practicas asociadas a este sistema de producción de Toyota son mantenimiento preventivo, reducciones de tiempo en configuraciones, comunicación interna y suministro Justo A Tiempo (JAT) (Jayaram *et al.*, 2010).

En esta última herramienta del sistema de producción de Toyota es el que nos enfocaremos, ya que sustenta la base de los sistemas de aprovisionamiento de piezas y componentes para las líneas de producción que presentan las empresas que manejan estos sistemas.

### 2.2.1 SISTEMAS JUSTO A TIEMPO

Se puede entender el sistema Justo A Tiempo (JAT) como un sistema de producción y gestión, el cual se define por ciertos puntos clave, uno de ellos es la estructura operativa, en la cual se crean equipos de personas con diferentes habilidades que pueden tomar diferentes asignaciones de actividades, esto crea una manufactura flexible en variaciones de demanda. Otro punto busca la integración de todo el personal con el fin de lograr el plan de Control de Calidad Total. También, de acuerdo con la demanda del cliente, se busca aumentar el índice de rotación de capital con la reducción en tiempo de producción, esto de la mano con controles integrales de costos que busquen reducir o eliminar los gastos innecesarios (Kaneko y Nojiri, 2008) (Green Jr *et al.*, 2014).

En general estos sistemas permiten la reducción de los niveles de inventario y

el retrabajo de los procesos, siempre desde la perspectiva de colocar las mercancías en lugar, cantidad y momento correcto. El cumplimiento de estos objetivos tiene su origen en la completa cooperación de proveedores y distribuidores (Paladugu y Grau, 2019).

Las actuales estructuras empresariales de nivel global obligan a que los sistemas JAT se enfrenten a un gran reto en cuanto a la posición geográfica donde son necesitadas las mercancías. Una de las principales reglas dentro de las empresas que manejan sistemas JAT, como fue mencionado con anterioridad, es la reducción de inventarios hasta casi su nivel cero, partiendo de este hecho aparecen los niveles de incertidumbre presentados en el tiempo de entrega de los proveedores. El nivel de incertidumbre en las entregas en los componentes está directamente relacionado con los niveles de inventario y retraso en el flujo de las piezas y componentes (Chung *et al.*, 2018) (Green Jr *et al.*, 2014).

Al conocer las características de estos sistemas, surge la necesidad de implementar una estructura que sea flexible en cuando la entrega de múltiples componentes con lotes pequeños y en una frecuencia determinada. De esta manera surgen los sistemas de recolección programada llamada conocidos en la literatura como rutas lecheras que, como ya fue mencionado, para fines de esta investigación se asignó el termino Sistemas de Recolección de Componentes (SRC). A continuación, se abordan estos sistemas de recolección.

## 2.3 SISTEMAS DE RECOLECCIÓN DE COMPONENTES

### SRC

El término utilizado en la literatura para definir los SRC es rutas lecheras (Milk run), que hace referencia a las décadas de los sesentas cuando en Estados Unidos se realizaban entregas de leche en cada hogar, básicamente el concepto se basa en la necesidad de mover pequeñas cantidades piezas de un número largo de ítems entre

plantas con tiempos de entrega predictivos y considerando costos de transporte. Estas cuestiones han orillado a las plantas con sistemas JAT a implementar recolección y entrega de piezas de manera planificada. Este concepto ha sido ignorado en la literatura referente a logística y muy poco mencionado en los sistemas de manufactura esbelta (Baudin, 2005).

Una de las principales características que presenta los SRC es la consolidación de componentes mixtos de diferentes proveedores alejados geográficamente, con el fin de evitar un envío de camiones de carga completos, esto implicaría para la OEM el hecho de no solo soportar el almacenamiento de un lote completo de cada proveedor sino soportar las cargas de componentes de todos los proveedores, lo cual se contrapone a la filosofía JAT de cero inventarios (Meyer y Amberg, 2018)

Características específicas de los SRC son las mencionadas por (Meyer, 2017) nos señala que:

- Se trata de intervalos de tiempo fijos de recolección, rutas establecidas en ciclos fijos.
- Esta estructura también sirve de apoyo en el retorno de contenedores donde son transportadas las piezas.
- La planeación es normalmente realizada por la empresa receptora de componentes.

### 2.3.1 ESTRUCTURAS DE LOS SISTEMAS DE RECOLECCIÓN DE COMPONENTES

La gestión de los SRC, normalmente presentan la misma estructura jerárquica que involucra al personal de las OEM, personal de la empresa transportista y personal de los proveedores (Aragão *et al.*, 2016).

Para la generación de una estructura solida de los SRC, se necesita de una planificación, la cual toma un papel relevante y requieren aspectos importantes tales como (Meyer y Amberg, 2018):

- El número de proveedores involucrados en el suministro de componentes.
- La distancia promedio entre proveedores y las OEM.
- Contar preferentemente con frecuencias de envío estables.
- Horarios de recolección fijos por patrones constantes y con frecuencia conocida.
- Los tamaños de lotes normalmente se pueden determinar por tasas de consumo estable.

Con base a lo mencionado en secciones anteriores, se logra identificar a los tres actores principales en la ejecución de los SRC que son las plantas receptoras de componentes (OEM), los proveedores de componentes y las empresas de transporte tercerizado. En este sentido los participantes mencionados, normalmente tienen establecido las actividades a ejecutar en cada eslabón, por ejemplo, las OEM establecen la demanda de componentes con base en un plan maestro de producción, el cual es la medula de la estructura de los SRC, si este es incorrecto o tiene alguna variación, se incurre en otro tipo de alternativas como el transporte expeditado. Por la parte de los proveedores, estos se comprometen a realizar las operaciones de carga de manera oportuna y a brindar un flujo de información (De Moura y Botter, 2016).

Como ya se ha mencionado, dentro de la planificación del sistema de recolección, el transporte es fundamental y normalmente es subcontratado por empresas que prestan este tipo de servicios logísticos tercerizados o conocido 3PL por sus siglas en ingles. En la siguiente sección se describe a detalle.



### 2.3.2 SERVICIOS DE TRANSPORTE TERCERIZADO

Es una tendencia global de las organizaciones, el tercerizar actividades logísticas a empresas especializadas en ciertos tipos de operaciones, las razones por las que se busca deslindar actividades son las siguientes :

- Mejorar el nivel de servicio.
- Reducir costos.
- Deslindar actividades que no son el núcleo de su negocio.

Un servicio logístico de transporte tercerizado se refiere a una empresa que posee y gestiona sus propias unidades vehiculares, y facilita a las empresas ensambladoras de vehículos la recolección de componentes o piezas de proveedores alejadas geográficamente. Estas empresas de servicios pueden realizar actividades como recolección, distribución y gestión de inventarios (Kaneko y Nojiri, 2008).

La forma de estructurar la relación con las empresas transportistas es muy importante, ya que por la naturaleza operativa propia de los SRC, es conveniente estructurar contratos solidos, ya que los SRC requieren una planificación solida que concediere todas las necesidades operativas y del flujo de información entre los involucrados (Aragão *et al.*, 2016).

De esta manera surge la importancia de abordar de manera significativa los sistemas, aspectos como la selección correcta de la ruta a recolectar, establecer las ventanas de tiempo y seleccionar el medio de transporte han sido, a lo largo del tiempo, los principales factores de análisis. A continuación, se detalla como estos problemas dentro de los SRC han sido abordados.

## 2.4 REVISIÓN DE LITERATURA

En esta sección se realiza una descripción de cómo han sido analizados los SRC, se ofrece la perspectiva de los autores y sus respectivos enfoques de acuerdo con la herramienta utilizada y el objetivo que se intentó obtener. Se habla de los modelos normados, son definidos y se muestra algunos de los alcances que pueden ofrecer, pero también se menciona el hecho de que ante incertidumbre no resultan ser los más acertados, esto sirve de preámbulo para hablar de las herramientas en la cuantificación de la incertidumbre que, de acuerdo con la literatura revisada, no han sido utilizadas en los SRC.

### 2.4.1 HERRAMIENTAS UTILIZADAS EN LOS SRC

Dentro de los SRC se cuenta con ventanas de tiempo de recolección y entrega, aunado a esto, existe un número limitado de unidades de carga con ciertas capacidades que lo hacen candidato para ser resultado por un problema de enrutamiento de vehículos VRP (por sus siglas en inglés). Estos problemas de enrutamiento se enfrentan a cuestiones como vialidades bloqueadas, tiempos muertos y colisiones, entre otros (Bocewicz *et al.*, 2019). Por su parte Du *et al.* (2007) explica el modelo VRP y sus implicaciones para la gestión de sistemas de recolección de piezas, se menciona que este modelo tiene variantes respecto a si se contemplan factores como ventanas de tiempo o procesamiento de órdenes dinámicas, para ambos casos existen modificaciones al modelo. También nos menciona que a medida que el tamaño del problema crece el tiempo de cálculo será mayor. La finalidad principal de los modelos VRP son normalmente lograr la mínima distancia total de viaje utilizando algoritmos heurísticos o evolutivos. Para los sistemas de recolección de componentes se utiliza una herramienta conocida como problema de enrutamiento de vehículos con rutas lecheras MRVRP, en este modelo contempla dos enfoques: minimizar la distancia o los costos totales (Ma y Sun, 2013). Los modelos VRP pueden presentar

alguno de los siguientes enfoques (Ulin Hernández, 2019)

- Minimizar el costo total de operación
- Minimizar el tiempo total de transporte
- Minimizar la distancia total recorrida
- Minimizar el tiempo de espera
- Maximizar el beneficio
- Maximizar el servicio al cliente
- Minimizar la utilización de vehículos

Otra aportación es la de Meyer y Amberg (2018) que buscan modificar el modelo de problema de enrutamiento periódico de vehículos con ventas de tiempo (PVRPTW) y adecuarlo a la selección de transporte en los sistemas de recolección con su modelo de problema de enrutamiento periódico de vehículos con selección de servicio (PVR-PSC), estas herramientas modifican el modelo de VRP y buscan adecuar ciertas necesidades de sus respectivos casos de estudio. Ambos modelos presentan objetivos específicos que se desean alcanzar, pero estos modelos no contemplan ningún tipo de comportamiento estocástico, lo cual significa que ante fluctuaciones en parámetros establecidos no suelen ser los más adecuados.

Autores	Problemas					
	Enrutamiento	Ventanas de tiempo	Dinamismo	Costos	Diseño en planta	Incertidumbre
Du 2007	x	x	x	-	-	-
Aragao 2016	x	-	x	-	-	-
Meyer 2018	x	-	-	x	-	-
Kluska 2018	-	-	-	-	x	-
De 2016	-	-	-	x	-	-
Guner 2017	x	-	x	-	-	-
Staab 2016	-	-	-	-	x	-
Bocewicz 2019	x	-	-	-	x	-
Fedorko 2018	-	-	-	-	x	-
Lin 2015	x	-	-	-	-	-
Ma 2013	x	-	-	-	-	-
Novaes 2015	x	-	x	x	-	-
Ranjbaran 2020	-	-	-	x	-	-

TABLA 2.1: Principales problemas abordados en los SRC

En la tabla 2.1 se muestran algunos de artículos relevantes encontrados en la revisión de literatura, en los cuales se observa la herramienta utilizada por los autores para resolver problemas asociados con rutas de recolección. Partimos de esta tabla para mostrar que actualmente, dentro de la búsqueda realizada en la literatura, no se ha realizado alguna investigación abordando niveles de incertidumbre en las operaciones, en la siguiente sección se abordan algunas de las herramientas que son utilizadas en escenarios que presentan incertidumbre.

#### 2.4.2 HERRAMIENTAS DE CUANTIFICACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE

Por incertidumbre se entiende que es el menor o nulo entendimiento de un escenario que requiera indagaciones o respuestas que los modelos normados no muestran. Según la literatura consultada estas herramientas son las más utilizadas en la cuantificación de la incertidumbre (Cárdenas-Monsalve *et al.*, 2018):

- Método Monte Carlo: se refiere a una herramienta matemática que es capaz de generar series de números por medio de muestreo aleatorio de distribuciones de probabilidad. Estos números aleatorios sirven de base probabilística para este modelo. Sirve para dar soluciones aproximadas realizando experimentos de fenómenos reales (Cárdenas-Monsalve *et al.*, 2018).
- Método de Conjuntos Difusos: conjuntos o subconjuntos a los cuales les es asignado una etiqueta lingüística ya sea un palabra o adjetivo, a este se le determina una función de pertinencia. Ayuda a representar la ambigüedad o impresión de fenómenos reales (Diciembre Sanahuja, 2017).
- Método del caos polinomial: utiliza la medir la incertidumbre por medio de una base polinomial que propaga las incertidumbres sobre las predicciones del modelo, reduce la complejidad de resolución computacional en comparación con el método Monte Carlo (Hu *et al.*, 2018).

- Métodos Bayesianos: son un tipo de representación gráfica, ya que utiliza gráficos acíclicos dirigidos para su modelación, y se basa en las dependencias probabilísticas entre nodos y arcos, los nodos representan variables y los arcos una dependencia probabilística (Moreno Garza, 2006).

Para nuestra investigación utilizaremos métodos de inferencia bayesiana que es una de las mejores herramientas en cuanto medición de la incertidumbre y complejidad en los escenarios (Hu *et al.*, 2019). En el siguiente apartado se profundiza más en este método matemático.

## 2.5 MÉTODOS BAYESIANOS

Estos métodos se fundamentan su historia a través del teorema de Bayes el cual fue establecido por el matemático Thomas Bayes en 1763, en este se muestra la probabilidad condicional de los fenómenos estudiados. Este teorema tiene como objetivo conocer las probabilidades posteriores de una variable dado ciertos hallazgos (Rincón, 2014). El método de Bayes parte de la teoría de probabilidad total en la cual se calcula la probabilidad de que ocurran los fenómenos  $A$  y  $B$  dado que estos eventos se toman como si fueran independientes uno de otro y se calcula de la siguiente manera (Sucar, 2015):

$$P(A \cap B) = P(A) * P(B) \quad (2.1)$$

Donde  $P$  es la probabilidad de intersección de dichas probabilidades. En este espacio de intersección determina el grado probabilidad de relación entre las variables analizadas. En el teorema de Bayes el efecto es contrario, ya que a partir de que cierto fenómeno sucede el cálculo de estas probabilidades condicionales se cuenta con ciertos fenómenos  $A$  y  $B$ , se calcula la probabilidad que suceda uno dado que el otro sucedió, una vez que estas variables son determinadas se continúa con el cálculo

mediante la siguiente fórmula (Hu *et al.*, 2019):

$$P(A_i|B) = \frac{P(A_i B)}{P(B)} = \frac{P(B|A_i)}{\sum_{j=1}^n P(A_j) P(B|A_j)} \quad (2.2)$$

Donde  $A$  toma el rol del evento dependiente de  $B$ , por lo que se podría leer de la siguiente manera: la probabilidad de que  $A$  suceda conociendo que  $B$  sucedió. Para la estructura general del modelo se toma la siguiente base en la cual se puede observar de manera más gráfica como es la interacción de evento en un modelo bayesiano. Se considera a  $C$  como un escenario donde se encuentran los eventos  $A_1, A_2, A_3 \dots A_n$  que son independientes uno de otro y el evento  $B$  que es dependiente de los eventos  $A_n$  (Moreno Garza, 2006).

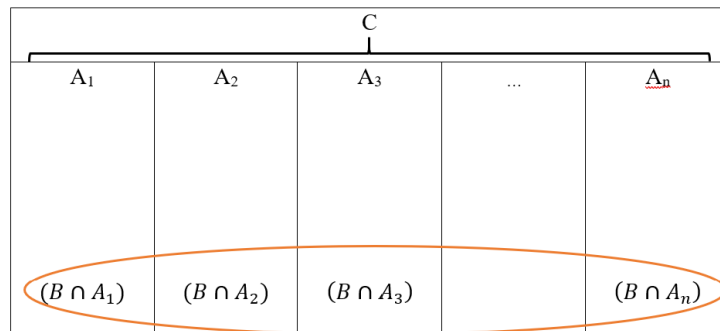


FIGURA 2.5: Diagrama de Venn respecto al escenario (Moreno Garza, 2006)

Donde:

$C$  = Escenario de un fenómeno.

$A_i$  = Eventos independientes dentro del fenómeno.

$B$  = Evento dependiente.

Recordando que el teorema de Bayes tiene como objetivo analizar experiencias previas de los eventos y su valor es asignado con base en datos históricos o experiencia previa en los eventos, las probabilidades asignadas a de estos eventos son llamadas de la siguiente manera (Moreno Garza, 2006):

- Probabilidades a priori: probabilidad de que los eventos de  $A_i$  ocurran sin tener conocimiento que ha sucedido el evento  $B$  (Moreno Garza, 2006).
- Probabilidades de verosimilitud: indica la probabilidad de que un evento  $B$  suceda dado que existen eventos  $A_i$ , esto sirve para saber el grado de credibilidad de que  $A_i$  sea la causa de  $B$ , esto se resuelve mediante la fórmula de probabilidad total (Moreno Garza, 2006).
- Probabilidades a posteriori: son conocidas mediante la formulación del método de Bayes y son conocidas también como probabilidades condicionales y son el resultado inverso de la probabilidad total (Moreno Garza, 2006).

### 2.5.1 REDES BAYESIANAS

Las redes bayesianas son herramientas de representación gráfica que sirve para la clasificación, predicción y diagnóstico de un fenómeno mediante un razonamiento probabilístico de un conjunto de variables y sus respectivas relaciones de dependencia entre cada una de ellas. Estas variables que son representadas por nodos padres e hijos, esta relación de condicionalidad se expresa de acuerdo con el nivel de dependencia entre una variable y otra, por ejemplo, haciendo alusión al teorema de Bayes, cuando una variable  $B$  es dependiente que la variable  $A$  suceda, se dice que  $A$  es padre de  $B$ . Se expresa de la siguiente manera (Sucar, 2015):

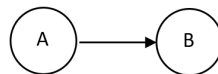


FIGURA 2.6: Nodos padre e hijo

Se puede observar que se cuenta con el nodo padre e hijo, la flecha que los une e indica la jerarquía de esta relación es denominada como arco. Las relaciones entre estas variables son denominadas independencia o dependencia condicional y se determinan de acuerdo con el evento estudiado, de esta manera se construye los



gráficos acíclicos dirigidos (Abolbashari *et al.*, 2018). Las redes bayesianas pueden ser encontradas en la literatura con el nombre de redes causales, redes causales probabilísticas, redes de creencia, sistemas gráficos probabilísticos, sistemas expertos bayesianos y diagramas de influencia (Pascual *et al.*, 2014).

Las redes bayesianas poseen dos componentes medulares para su construcción, el primero es el enfoque cualitativo que es representado por medio del gráfico acíclico dirigido y el segundo componente es cuantitativo que se muestra a través de tablas de probabilidad condicional para cada variable respecto a relación con otras variables (Roche Beltrán, 2002). Existen dos formas en las que son tomados los datos para la construcción para estos modelos, la primera es basada en experiencia experta sobre algún fenómeno y la segunda se realiza mediante el análisis de datos asociados al fenómeno (Sucar, 2015).

La forma de obtención de datos es mediante la recopilación de opiniones de personas expertas en el tema o fenómeno a tratar, la selección del perfil de estas personas es importante ya que los datos cualitativos tomados sirven de base para designar las dependencias condicionales, para la selección de estas personas los criterios pueden ser subjetivos y pueden ser sometidos a una evaluación para dictaminar su nivel de conocimiento acerca del fenómeno a estudiar (Abolbashari *et al.*, 2018).

### 2.5.2 APLICACIONES DE LAS REDES BAYESIANAS

Dentro de las bases de datos consultadas, la aplicación de las redes bayesianas es amplia, y se centra principalmente en las siguientes áreas:

- Ciencias médicas, obtención de diagnósticos clínicos de enfermedades (Ershadi y Seifi, 2020).
- Reconocimiento de patrones en imágenes (Sucar, 2015).
- En análisis de problemas con riesgos financieros (Pascual *et al.*, 2014).

- Problemas de incertidumbre en logística y Cadena de Suministro (Abolbashari *et al.*, 2018)(Hu *et al.*, 2019).

Al consultar el repositorio de la Universidad Autónoma de Nuevo León, se encontró una tesis de maestría elaborada por Moreno Garza (2006), quien realizó una investigación con base en el control de flujo vial, teniendo como objetivo crear una red bayesiana que controlara las variables que afectan el nivel de servicio de una intersección vial. En este sentido el autor proporcionó un estudio profundo de las estructuras de redes viales y su interacción con el medio urbano. Los resultados obtenidos indican que la red bayesiana presenta un 25 % de eficiencia en el desempeño de la predicción de un estado real, lo cual menciona no es muy prometedor. El autor refiere que el estudio también, de redes bayesianas en el transporte es mínimo.

Es importante mencionar que las redes bayesianas han sido utilizadas en cadena de suministro y en algunos casos en logística. Uno de los artículos encontrados en la literatura es la investigación realizada por Hu *et al.* (2019), esta investigación analizó las interrupciones en los escenarios de la cadena de suministro de petróleo, la cual se realiza por medio de instalaciones de tuberías normalmente acuáticas y monitoreada por estructuras robustas de sensores. El escenario estudiado se basó en el accidente de la fuga de petróleo en el Golfo de México en el año 2010, donde se menciona que dicho escenario fue propiciado por factores como errores operativos, incendio, explosiones, etc. La construcción de la red bayesiana se basó en datos históricos recavados de los sensores y opinión de expertos. Los autores concluyen que lograron inferir las causas y probabilidades de interrupción en un sistema de sensores, brindaron una base en la toma de decisiones gerenciales para buscar preparación ante contingencias y buscar el menor impacto posible.

Otra aplicación de redes bayesianas en logística, fue realizada por Abolbashari *et al.* (2018), quien busco integrar los diferentes *Keep Performance Indicators* (KPI) para medir el desempeño en los procesos de abastecimiento. Los autores mencionan que las redes bayesianas pueden sustituir por completo a métodos clásicos de toma

de decisiones como el proceso de jerarquía analítica (AHP) etc. Se menciona como la ejecución de las redes bayesianas puede ayudar no solo a conocer las probabilidades de un nodo objetivo de arriba hacia abajo, sino que también muestran el comportamiento contrario en los nodos, ya que los valores también se propagan de abajo hacia arriba en la red. Para obtener los datos de expertos, los autores aplicaron una entrevista para determinar si un gestor de abastecimiento podría obtener el estatus de «experto». Los resultados nos son los esperados, ya que se menciona que los KPI presentan deficiencias en su medición, pero ofrecen todo un marco para poder gestionar y buscar la eficacia y eficiencia en el abastecimiento de una empresa.

Una aportación interesante es la de Zheng *et al.* (2020), quien documentó las operaciones logísticas existentes en una cadena de frío (termino que hace referencia a la todas las actividades de una cadena de suministro pero involucra mercancías que requieren un control de temperatura estricto), dicha cadena de frío se menciona que es relacionada con factores tanto cualitativos como cuantitativos. La investigación busca brindar un análisis bidireccional en el cual se pueda calcular la probabilidad de ocurrencia de las variables contempladas y también identificar las fallas. El modelo realizado de redes bayesianas obtiene datos base en opinión experta y después estos valores, de acuerdo al aprendizaje de datos, se modifica. Dichos datos se obtuvieron por medio de encuestas. Concluyen que los factores de producción, almacenamiento, transporte y distribución son de sumo impacto en las operaciones de la cadena de frío y son consideraros como eventos de riesgo.

Otro enfoque de aplicación de las redes bayesianas en cadena de suministro fue aportada por Lockamy y McCormack (2012). El objetivo de esta investigación fue generar una metodología para brindar estrategias y tácticas de gestión de riesgos en la cadena de suministro. Hace mención de un sistema de gestión integral de riesgos, en los cuales la empresa y los proveedores busquen, en cadena de suministro, la mínima ocurrencia de eventos de riesgo. La investigación integra a un modelo de evaluación de riesgos de cada proveedor. Los proveedores analizados pertenecen a la industria automotriz, por lo cual el análisis podría solo ser efectivo para este tipo de

industrias. Al final se ofrece un marco para poder ayudar a los gerentes a generar estrategias políticas y tácticas en la gestión de riesgos.

### 2.5.3 ENFOQUES CUANTITATIVOS Y CUALITATIVOS

Dentro de la revisión de literatura referente a redes bayesianas, los enfoques más estudiados y con mayor profundidad son desarrollos y aplicaciones en algoritmos para el aprendizaje de datos (Sucar, 2015) (Abolbashari *et al.*, 2018) (Larrañaga y Moral, 2011). Al usar datos históricos de la ocurrencia de un fenómeno, las redes bayesianas presentan estructuras y procesos avanzados de cálculos estadísticos profundos. Para realizar estos cálculos se requieren de datos que presenten un origen *cuantificable*.

Cuando se utiliza la *opinión de expertos* para *cuantificar* la ocurrencia de un fenómeno, los autores refieren a esta aplicación como un enfoque clásico y primario (Roche Beltrán, 2002). En este sentido estaríamos hablando de enfoques *cualitativos* cuando nos referimos a la utilización del conocimiento experto que se traduce a opiniones subjetivas de la ocurrencia de un fenómeno, cuando contamos con datos históricos sobre un fenómeno, el enfoque cualitativo no es del todo requerido.

Para captar este conocimiento experto algunos autores como Lockamy y McCormack (2012) y Ershadi y Seifi (2020), han utilizado sesiones de entrevistas a personal experto en los temas a tratar sin caer en sesgos de la información recavada. Además existen resultados prometedores cuando se logran combinar opinión experta con datos históricos (Hu *et al.*, 2019).

Una vez explicado el teorema de Bayes y las redes bayesianas y sus aplicaciones, el siguiente capítulo ofrece una estructura de aplicación de las redes y como se pretende desarrollar en el presente trabajo, también brinda argumentos por los cuales fueron seleccionadas las redes bayesianas como herramienta de solución.

## CAPÍTULO 3

# METODOLOGÍA

---

En este apartado se propone el desarrollo de una metodología basada en la herramienta de redes bayesianas abordando los problemas de incertidumbre en las operaciones de los SRC. Se comienza mostrando las razones por las cuales las redes bayesianas fueron seleccionadas, después se ilustra la serie de pasos a seguir para desarrollar la herramienta y también se menciona el sustento de dicha metodología. Por último se mencionará el proceso realizado para la obtención de datos.

Como ya se mencionó en la sección anterior, las redes bayesianas cuentan con dos partes importantes para su desarrollo, estas son la parte cualitativa y cuantitativa, para la parte cualitativa se prevé la consulta de expertos de la industria automotriz acerca de los escenarios encontrados en la literatura acerca de la operación de SRC, después se pretende realizar el gráfico acíclico dirigido para poder determinar la relación entre variables. De esta manera se podrá avanzar a la parte cuantitativa con los cálculos de probabilidad e inferencia de los datos. A continuación, se mencionan aspectos relacionados a las razones por las cuales se seleccionó esta herramienta, después se detallan los pasos a seguir para desarrollar la metodología.

### 3.1 SELECCIÓN DE REDES BAYESIANAS

Observando el desarrollo de los capítulos anteriores se puede entender que en la literatura revisada los SRC han sido abordados con enfoques basados en modelos de optimización en los cuales se busca resolver los problemas respecto a las rutas y ventanas de tiempo establecidas. Estos enfoques pueden dar resultados esperados en cuando la mejora de los factores ya mencionados, pero por la propia naturaleza de los modelos normados los resultados no son los mejores cuando existe variabilidad e incertidumbre en los SRC. La incertidumbre en los SRC es factor implícito que no puede ser reducido tan fácilmente y tampoco se ha incorporado a la planeación de estos. Para cuantificar la incertidumbre existen métodos que ya han sido mencionados, dentro de los cuales las redes bayesianas poseen los siguientes aspectos especiales que las otras herramientas no:

- Ideal para situaciones donde se cuenta con pocos datos o conocimiento imperfecto, lo cual no puede ser solucionado por los modelos probabilísticos rigurosos (Larrañaga y Moral, 2011).
- Resolución de problemas complejos causados por incertidumbre, correlaciones e información incompleta ((Larrañaga y Moral, 2011).
- Esta herramienta se basa principalmente en intuición lo cual se formaliza en factores de certeza(Larrañaga y Moral, 2011).
- Se usa un razonamiento general bajo incertidumbre con conocimiento profundo (Larrañaga y Moral, 2011).
- Se cuantifica la incertidumbre de forma global, por el contrario, tanto las reglas de asociación como las redes neuronales la tratan de forma local (Larrañaga y Moral, 2011).

De esta manera, no solo seleccionamos la herramienta que cuantifica mejor la incertidumbre, sino también se pretende realizar la aportación a la literatura existente ya

que, dentro de la revisión realizada, no se encontraron vinculado las redes bayesianas con los SRC.

## 3.2 MODELACIÓN DE LA HERRAMIENTA

La modelación de la herramienta tiene base en lo redactado en secciones anteriores en la literatura revisada. Se describirá a la red bayesiana y los procesos que involucra, a continuación, se propone el siguiente orden para llevar a cabo dicha modelación:

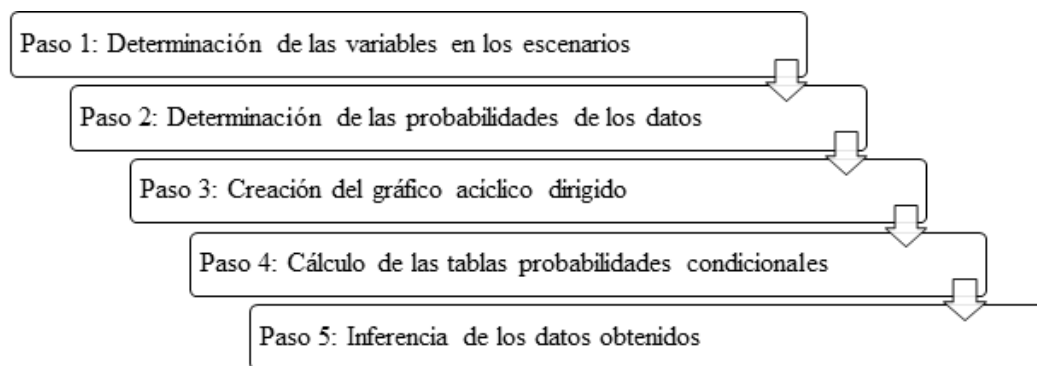


FIGURA 3.1: Metodología propuesta

La estructura de este modelo se basó en dos partes dado el sustento de redes bayesianas, el primer argumento fue considerar una explicación precisa y clara del sustento matemático de dicha herramienta, para lo cual fueron consultados los autores Moreno Garza (2006), Larrañaga y Moral (2011), Sucar (2015) y Pascual *et al.* (2014). Para el segundo argumento, el cual es la estructuración del modelo se consultaron los autores Zheng *et al.* (2020), Hu *et al.* (2019), Lockamy y McCormack (2012) y Abolbashari *et al.* (2018), quienes en sus respectivas aplicaciones de redes bayesianas ajustaron las variables para poder predecir la probabilidad de ocurrencia de un evento utilizando el enfoque bayesiano. En esta investigación se pretende, de igual manera, ajustar las variables involucradas en un escenario de SRC, y tratar de cuantificar la incertidumbre en dichos sistemas.

El primer paso descrito en la Figura 3.1 es la determinación de las variables del escenario propuesto, en esta parte fueron seleccionadas las variables que presentan factores de dependencia sobre la variable objetivo que se pretende analizar, la siguiente sección se hablará de la empresa y la validación del escenario. La Tabla 3.1 muestra a las variables que serán incluidas en la red, se clasificaron en tres segmentos, esto depende si la variable es desarrollada por cierto actor, estos actores son los proveedores, los servicios de transporte tercerizado y la planta receptoras de componentes (OEM). Las variables fueron ajustadas de acuerdo a las operaciones implícitas en los SRC.

<b>Variables</b>		
<b>Proveedor</b>	<b>Transporte tercerizado</b>	<b>Planta receptora</b>
Documentación del envío	Arribo de vehículos	Plan de producción
Tiempo de Carga	Tráfico vehicular	Plan de estiba
Lotes completos	Mantenimiento	Cambio de modelo
Calidad	Accidente vial	Expeditar

TABLA 3.1: Tabla de variables del escenario de los SRC.

El segundo paso consiste en determinar la ponderación de cada una de las variables respecto a su dependencia o independencia condicional, esto se realiza por medio de las ponderaciones asignadas por la opinión experta de las personas encargadas de gestionar los SRC, este paso se detalla en la sección 3.3. De esta manera se cuantifica la incertidumbre que es asociada a cada variable por medio de las ponderaciones de probabilidad.

El tercer paso es la creación del gráfico que conectará a las variables entre sí, esta estructura es conocida como gráfico acíclico dirigido que, dada su alta expresividad, ya que muestra el proceso de modelación probabilística que representara las dependencias condicionales entre variables, es importante mencionar que las variables son conocidas como nodos dentro del gráfico.

La parte cualitativa es representada por el gráfico pero la parte cuantitativa



es representada por los pesos numéricos asignados a las variables o nodos. Estos pesos numéricos son expresados en el cuarto paso donde se realizan las tablas de distribución de probabilidad condicional, en donde se busca que la red no solo calcule la probabilidad de ocurrencia de una variable objetivo, sino que también se realice una propagación de probabilidades hacia los demás nodos, esto con el fin no solo de visualizar los valores de salida, sino de observar también los valores de los posibles nodos de causa.

En la última parte de la metodología se harán las inferencias correspondientes a los resultados en los cálculos de las tablas de probabilidad para el caso de estudio. Una vez construido el gráfico y teniendo las tablas de probabilidad condicional, se otorgará evidencia positiva y negativa de posibles estados a la red bayesiana, estas pruebas serán mencionadas como escenarios optimistas y pesimistas en los cuales esto con el fin de obtener las probabilidades posteriores de red. En la siguiente parte se detallan aspectos de la empresa que decidió colaborar con la presente investigación.

### 3.3 OBTENCIÓN DE LOS DATOS

Para esta parte de la investigación se estructurará la obtención de los datos, en la primera parte se hace una breve mención de los expertos colaboradores, sin afectar el anonimato de estos, luego se muestra una lista de las actividades realizadas con dicho personal, después se menciona como se estructuró el formulario que fue utilizado para obtener el conocimiento experto, por último se hacen algunas alusiones de la herramienta ya mencionada.

#### 3.3.1 ACTIVIDADES PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS

Una vez que se contacto a la empresa y se estableció una colaboración formal con los empleados (los detalles de la empresa se muestran en el capítulo cuatro), se

procedió a realizar las actividades en el siguiente orden:

1. Se comenzó por realizar una visita presencial a las instalaciones de la empresa, la cita fue pactada por correo electrónico y el lugar de reunión fue el centro de distribución de la empresa ubicado en Apodaca, Nuevo León.
2. Dentro de esta reunión se conocieron las formas de trabajo, generalidades de la empresa, principales clientes, operaciones del centro de distribución y funciones involucradas.
3. La empresa brindó, por medio de correo electrónico, una matriz de datos de las veintiún rutas de operación de los SRC, en formato de hoja de cálculo.
4. La determinación de las variables del escenario se realizó con base en la matriz y las características operativas de la empresa, estas variables fueron corroboradas por el personal.
5. Elaboración de un formulario para conocer las probabilidades de ocurrencia de dichas variables, mismo que fue compartido vía electrónica.
6. Reunión virtual para definir las probabilidades de acuerdo al conocimiento experto de los gestores, se compartió el formulario previamente para que los participantes pudieran adaptarse a el tipo de respuestas.

### 3.3.2 DESCRIPCIÓN DEL PERSONAL CONSULTADO

Se cuenta con la colaboración del personal que gestiona los SRC dentro de la empresa del caso de estudio, este personal consta de tres personas pre-calificadas para brindar opinión acerca de dichos sistemas. Para crear un perfil de los expertos, se elaboró un formulario para recavar información personal de los participantes, la primera parte consta de datos como nombre, edad, puesto actual y anterior así como el tiempo laborado, experiencia previa, grados académicos y áreas de conocimiento.

Para la segunda parte de formulario se colocaron conceptos de los SRC, con la finalidad de observar que tan familiarizado estaba el personal con dichos conceptos. Se busca mantener el anonimato de la empresa y del personal que colaboró, por lo cual solo se muestran algunos datos de manera ilustrativa.

<b>Cuestionamiento</b>	<b>Respuesta</b>
<b>Edades</b>	43 31 24
<b>Puesto actual</b>	Warehouse Supervisor Regional Operations Manager Auxiliar de operaciones
<b>Experiencia previa</b>	Team Leader & Warehouse assistant Inventory Coordinator & Production Coordinator NA
<b>Grados académicos</b>	Licenciatura - Ingeniería Maestría - Logística y Cadena de Suministro Licenciatura - Ingeniería
<b>Concepto de SRC</b>	Muy satisfactorio Muy satisfactorio Muy satisfactorio
<b>Características de SRC</b>	Satisfactorio Satisfactorio Moderado
<b>Ejecución de SRC</b>	Alta frecuencia Alta frecuencia Moderada frecuencia

TABLA 3.2: Tabla de los perfiles de los expertos.

### 3.3.3 ESTRUCTURA DEL FORMULARIO

El formulario elaborado se puede observar en el apéndice A, en este se cuestiona a los expertos sobre las probabilidades de ocurrencia de las variables. El formulario fue enviado por correo electrónico y posteriormente se realizó una reunión virtual en la que por medio de consenso se determino los valores para las tablas.

Para realizar dicho formulario se revisó lo mencionado por Hernández-Sampieri y Torres (2018), que mencionan las estructuras de instrumentos de medición, así como la validación del mismo. En este sentido existe la *validez de constructo* que es la construcción de instrumento de medición basado en la representación y medición de un concepto teórico. Esto se refiere a que para poder tener una validez de este tipo, las mediciones de una variable se vinculan de manera congruente con las mediciones de otras variables relacionadas teóricamente. Los autores Hernández-Sampieri y Torres (2018) también mencionan que las etapas para construirlo inician con una base de la revisión de literatura, que establece y especifica la relación entre el concepto o variable medida por el instrumento y los demás conceptos incluidos en la teoría, modelo teórico o hipótesis, después se procede a asociar estadísticamente los conceptos y se analizan las relaciones, por último, se interpreta la evidencia empírica de acuerdo con el nivel en el que se clarifica la validez de constructo de una medición en particular.

Dicho lo anterior el instrumento de medición solo busca establecer valores probabilísticos basados en un sustento teórico del teorema de Bayes y a su vez de las redes bayesianas. Las preguntas buscan la asignación de un valor numérico con base a una sentencia en específico. En este sentido la estructura de las preguntas se basa solo en conocer el juicio de los expertos, a continuación se muestra un ejemplo de pregunta:

1. ¿Cual es la probabilidad de que la variable «Documentación» se encuentre en estado completo o incompleto?

En este sentido la pregunta es directa y solo pretende captar un valor numérico con base al conocimiento de los expertos, las respuestas se estructuran en tablas que se requieren que la suma de los valores sea igual a cien por ciento (ver Apéndice A).

Al utilizar métodos de recolección de información proveniente de fuentes como la experiencia y conocimiento personal, pueden existir ciertos tipos de sesgo respecto a la cantidad y nivel de confianza de la información obtenida, la respuesta a estos cuestionamientos no resulta ser fácil. Dentro del desarrollo de las redes bayesianas una vez que se cuenta con las tablas de distribución de probabilidades se pueden utilizar datos históricos o estimaciones subjetivas de los expertos, en este sentido cuando se obtienen estas estimaciones, aplicar técnicas como promedios entre las ponderaciones no es algo factible, se busca llegar a las estimaciones por consenso de los participantes (Aragón, 2014).

Los sesgos se pueden mitigar cuando se proporciona a la red datos reales del fenómeno, ya que las redes bayesianas tiene la ventaja de mostrar buenos resultados cuando se combina información histórica y estimaciones subjetivas. También se pueden aplicar técnicas como el "back testing" que consiste en comparar las estimaciones actuales con datos de experiencias pasadas (Aragón, 2014).

### 3.4 ALUSIONES DE LAS REDES BAYESIANAS

Como alusiones a la herramienta, es importante mencionar que las redes bayesianas pueden tomar valores probabilísticos a partir de opinión experta (Aragón, 2014), como es el caso de esta investigación, pero otro enfoque podría ser la obtención de valores por medio de datos históricos de operación. Para estructurar una red bayesiana basada en estos valores históricos, se pretende contar con vectores de datos, para ejemplificar el concepto de vectores se puede concebir como una serie de tiempo.

La red puede funcionar con variables basadas tanto en opinión experta como

---

datos históricos (ver Apéndice B), no requiere una rigurosa obtención total de ambos tipos de datos.

En el siguiente capítulo se profundiza en todos los aspectos de la empresa con la cual se colaboró para realizar el caso de estudio, después se realiza el análisis y se muestra los resultados obtenidos del modelo de red bayesiana.

## CAPÍTULO 4

# ANÁLISIS Y RESULTADOS

---

Este capítulo refleja los hallazgos encontrados al aplicar la herramienta de redes bayesianas en el caso de estudio de los Sistemas de Recolección de Componentes (SRC), se comienza por la descripción de la empresa con la que se logró una colaboración y se menciona como es que funciona su estructura operacional. Después se muestran los resultados encontrados y el análisis que derive de ellos.

### 4.1 CASO DE ESTUDIO

La empresa que decidió otorgar datos para la elaboración de la presente investigación es una compañía dedicada a brindar servicio de gestión de los complementos de clase C, esta clasificación hace referencia a los componentes que presentan un tamaño pequeño considerable y un volumen significativo. Dentro de esta clasificación se pueden encontrar insumos tales como: adhesivos, tapones, fusibles, indicadores, accesorios led, sellos de seguridad, alambres, cables, tornillería y terminales para cables, entre otros. Estos complementos para un proceso de manufactura resultan de igual importancia que otros componentes o ensambles para la realización de un producto terminado.

Dicho lo anterior, la empresa realiza una gestión para garantizar a sus clientes

soluciones basadas en los retos que las empresas de manufactura presentan, estos retos son la reducción de los costos totales de propiedad sin arriesgar factores como la calidad del producto y niveles de inventario en el consumo de piezas.

La empresa ofrece la perspectiva de contemplar los costos ocultos, que comúnmente son omitidos en la gestión de componentes de clase C, se hace referencia a que solo el 15 % del valor total de un componente es conocido mientras que el otro 85 % se desconoce o se ignora, estos costos ocultos se manifiestan áreas como logística, gestión de inventarios, ingeniería, calidad y finanzas.

La ventaja que ofrece la empresa es brindar una gestión de la cadena de suministro de los componentes clase C en específico, lo que significará en la consolidación de proveedores en una sola figura de operación, y se traduce para la empresa un menor grado de incertidumbre, disminución de tiempos de entrega y aumento de la productividad. La empresa ofrece cuatro servicios de valor agregado que son: la minimización del riesgo, la optimización del inventario, mejoramiento de operaciones y mejoramiento en la calidad.

Es importante mencionar que la empresa realiza proyectos de acuerdo con los requerimientos de cada cliente en específico, estos requerimientos pueden ser diversos y variados debido a que la empresa cuenta con clientes de diferentes tipos de industria como lo son la automotriz y de electrodomésticos entre otros sectores. Para cada tipo de cliente se realiza un tipo diferente de gestión, por ejemplo, realizar la gestión de los proveedores hasta el control de inventarios mediante sistemas de re-abastecimiento de componentes.

Para fines de confidencialidad con la empresa, se mantendrán datos precisos y el nombre de la empresa en privado, solo se proporcionarán datos que ayuden a entender el contexto operativo de la empresa sin afectar a los involucrados.



### 4.1.1 SITUACIÓN ACTUAL DE LOS SISTEMAS DE RECOLECCIÓN EN LA EMPRESA

Se comenzó por analizar un total de 21 clientes y proveedores proporcionados por la empresa, de los cuales, dieciséis se encuentran dentro de la zona metropolitana de la ciudad de Monterrey, Nuevo León. Dos más se encuentran fuera de la zona conurbada, en las zonas de ciénega de flores y el municipio de Escobedo. Los tres clientes y proveedores restantes se encuentran fuera del estado de Nuevo León, ubicándose en el Estado vecino de Coahuila, en los municipios de Ramos Arizpe y Saltillo. Estas ubicaciones geográficas pueden ser observadas en la figura 4.1.

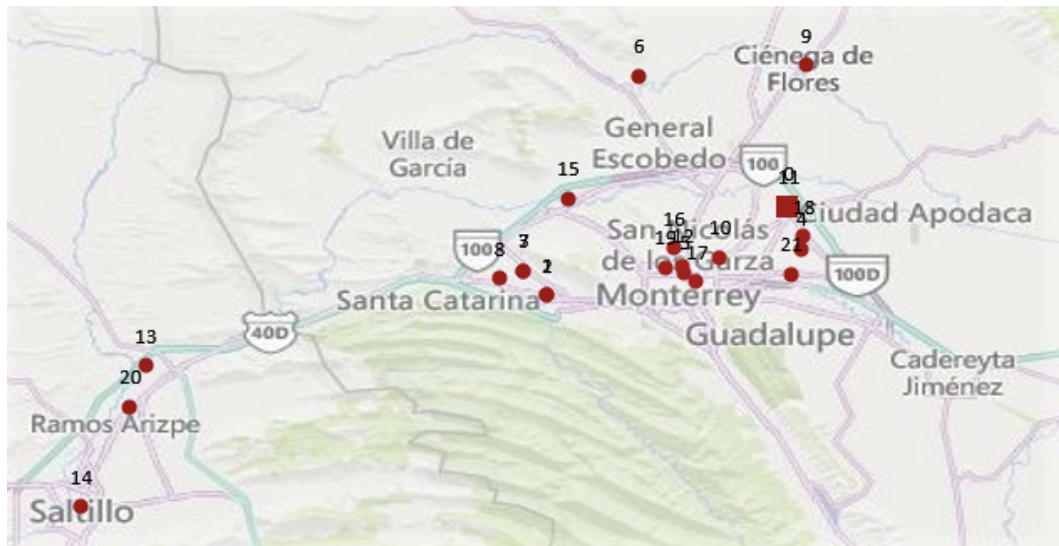


FIGURA 4.1: Ubicación geográfica de clientes y proveedores

Como parte de la comprensión del escenario de operación de las rutas de la empresa, se obtuvieron datos relacionados con la ejecución de estas rutas, a continuación los datos relacionados:

- Vehículos: se conoce que se utilizan dos tipos de vehículos con capacidades de 600 y 3500 kilogramos, el 20 % es flota propia, el 80 % restante es transporte subcontratado.

- Carga: se tiene el número de tarimas y el peso total a cargar.
- Periodicidad: indica los días que se activa la recolección o entrega y con que periodo de tiempo se realizan estas operaciones.
- Distancias y tiempos: Se proporcionó el punto inicial y final de las rutas, así como los kilómetros recorridos y el tiempo en que se ejecuta la ruta.
- Ventanas de tiempo: Se muestra la hora inicial y final de la ventana de recolección o entrega.

Con estos datos proporcionados se establece el escenario de los SRC y se procede a realizar el análisis de incertidumbre, en la siguiente sección se muestra el análisis y los resultados obtenidos.

## 4.2 RED BAYESIANA

La primera parte de la metodología propuesta fue la creación del gráfico acíclico dirigido con el cual se utiliza la máxima expresividad para mostrar el grafo que está basado en las variables del escenario que están involucradas en los SRC de la empresa. En la figura 4.2 se puede observar como es la relación entre variables padres e hijos, y también se puede comprobar que las direcciones de los nodos no crean patrones cíclicos lo cual cumple con las reglas fundamentales de las redes bayesianas.

El grafo expresa un total de 12 variables, que presentan una dependencia o independencia entre ellas. En la siguiente sección se procede a la asignación de las probabilidades a priori para cada variable o nodo dentro del grafo.

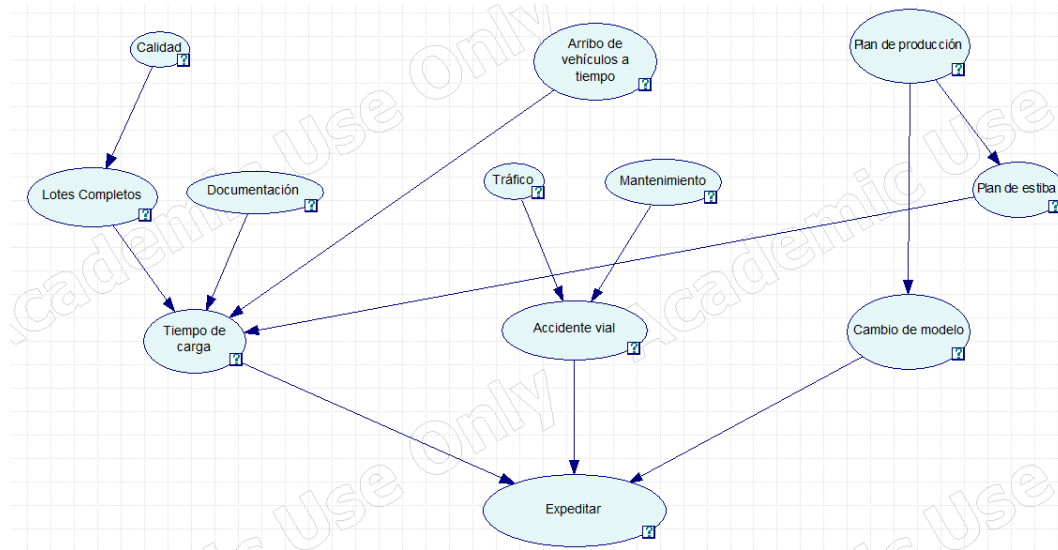


FIGURA 4.2: Gráfico Acíclico Dirigido

### 4.2.1 ASIGNACIÓN DE PROBABILIDADES A PRIORI

El siguiente paso fue la construcción de las tablas de probabilidad condicional, en ellas se muestran los valores asignados por los expertos gestores de los SRC. Primero se desarrollo un cuestionario en el software Excel el cual se muestra a detalle en el anexo 1, la estructura de las tablas fue proporcionada por el software GeNIe 2.4 versión académica. Estas tablas se generan a partir de la relación entre los nodos y los diferentes estados que pueden tomar, a continuación se muestran cada una de estas tablas:

	Lotes Completos	
Calidad	Buena	0.8
	Mala	0.2

TABLA 4.1: Tabla de probabilidades del nodo «Calidad» respecto al nodo «Lotes completos».

Se puede observar una relación entre la variable «Calidad» y la variable «Lotes Completos», como se observa el nodo «Calidad» es el padre. Ahora que se tiene

	Tiempo de Carga	
Documentación	Completa	0.8
	Incompleta	0.2

TABLA 4.2: Tabla de probabilidades del nodo Documentación respecto al nodo Tiempo de Carga.

	Arribo de vehículos	
Tiempo de Carga	A tiempo	0.8
	Retrasado	0.2

TABLA 4.3: Tabla de probabilidades del nodo «Arribo de vehículos» respecto al nodo «Tiempo de Carga».

	Plan de producción	Correcto	Incorrecto
Plan de Estiba	Correcto	0.95	0.9
	incorrecto	0.5	0.1

TABLA 4.4: Tabla de probabilidades del nodo «Plan de producción» respecto al nodo «Plan de Estiba».

las tablas de probabilidades a priori de de los nodos padre, se asignaran al nodo hijo llamado Tiempo de carga. Cabe mencionar que la estructura de esta tabla es amplia ya que se contempla la influencia de todos los nodos padres que influyen, por tal motivo se propone colocara en el anexo 1, cada tabla se visualiza toda estas relaciones por medio de ponderaciones probabilísticas.

	Accidente vial	
Tráfico	Alto	0.6
	Bajo	0.4

TABLA 4.5: Tabla de probabilidades del nodo «Tráfico» respecto al nodo «Accidente vial».

	Accidente vial	
Mantenimiento	Realizado	0.9
	Deficiente	0.1

TABLA 4.6: Tabla de probabilidades del nodo «Mantenimiento» respecto al nodo «Accidente vial».

	Tráfico	Alto		Bajo	
	Mantenimiento	Realizado	Deficiente	Realizado	Deficiente
Accidente vial	Verdadero	0.6	0.8	0.1	0.3
	Falso	0.4	0.2	0.9	0.7

TABLA 4.7: Tabla de probabilidades del nodo «Accidente vial» respecto a los nodos «Tráfico» y «Mantenimiento».

La tabla 4.7 muestra las distribuciones de probabilidad de los posibles estados de una variable, se que observa los valores para el nodo Accidente cambian dado los

nodos padre. Por ejemplo la probabilidad de que un accidente vial en los SRC sea verdadero es de un 80 % contra un 20 % de que no ocurra, dado que el tráfico es alto y el mantenimiento del vehículo fue deficiente.

	Cambio en el modelo	
Plan de producción	Correcto	0.95
	Incorrecto	0.05

TABLA 4.8: Tabla de probabilidades del nodo «Plan de producción» respecto al nodo «Cambio en el modelo».

	Plan de producción	Correcto	Incorrecto
Cambio de modelo	Verdadero	0.05	0.1
	Falso	0.95	0.9

TABLA 4.9: Tabla de probabilidades del nodo «Cambio de modelo» respecto al nodo «Plan de producción» y «Plan de estiba».

Las tablas 4.8 y 4.9 muestran las probabilidades de que surja un cambio en el modelo de una pieza manufacturada dado que el plan de producción fue correcto o incorrecto, el porcentaje de fallo es muy bajo, pero se contempla como factor que podría fallar en algún momento futuro.

A continuación se muestra la tabla 4.10 es la última de las tablas de probabilidades a priori, y la más relevante para esta investigación. Muestra la relación de las variables «Tiempo de carga», «Accidente vial» y «Cambio de modelo» con la variable de salida que se nombró como «Expeditar».

Se puede observar, dentro de la evidencia, que el mejor escenario es cuando el tiempo de carga no está retrasado, cuando no ocurrió un accidente vial y cuando no hubo un cambio en el modelo a manufacturar, la probabilidad de que se realice la

	Tiempo de carga	A tiempo				Retrasado			
	Accidente vial	Verdadero		Falso		Verdadero		Falso	
	Cambio de modelo	V	F	V	F	V	F	V	F
Expeditar	Verdadero	0.4	0.3	0.2	0.1	0.8	0.5	0.8	0.5
	Falso	0.6	0.7	0.8	0.9	0.2	0.5	0.2	0.5

TABLA 4.10: Tabla de probabilidades del nodo «Expeditar» respecto a los nodos

«Tiempo de carga», «Accidente vial» y «Cambio de modelo».

expeditación de un componente es de un 10 %, mientras que la probabilidad de que no se utilice este tipo de servicio es de un 90 %. Otro escenario alterno plantea que pasa cuando el tiempo de carga está retrasado y/o surge un cambio con el modelo a manufacturar, ya que la probabilidad de «Expeditar» componentes incrementa a un 80 %, independientemente de que exista o no un «Acidente vial».

De esta manera con la evidencia registrada se obtienen las probabilidades a priori, en la figura 4.3 se ilustran los valores de ocurrencia para cada nodo, se observa el valor de la variable de salida que es «Expeditar» con un 77 % de que no ocurra, mientras que un 23 % de que se utilice el transporte expeditado de componentes.

El gráfico también muestra las relaciones con más influencia entre variables por medio de los arcos con tonalidad fuerte, por ejemplo, se observa que la variable «Calidad» tiene un gran influencia sobre los «Lotes de componentes», mientras que el «Tiempo de carga» es dependiente en gran medida de la variable «Arribo de vehículos», también se puede observar como la variable «Tráfico» que influye de manera significativa en la ocurrencia de un accidente vial. Para la variable de salida «Expeditar», importa en gran medida el estatus de la variable «Tiempo de carga».

Como conclusión de esta sección, donde se abordaron las de las probabilidades a priori de la red bayesiana, se pueden observar las probabilidades de ocurrencia un evento con base en la opinión de expertos y formalizarlo en un factor de certeza

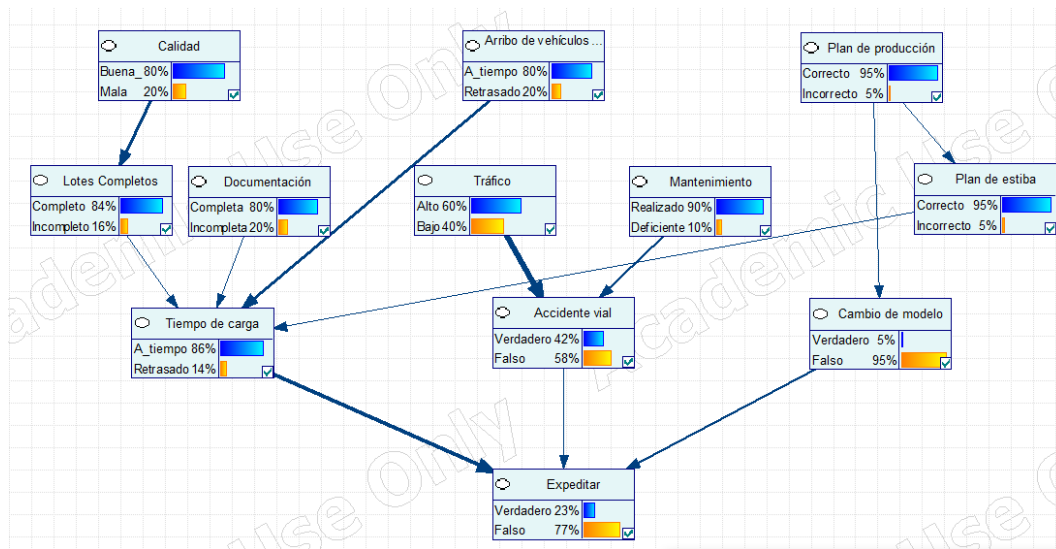


FIGURA 4.3: Gráfico Acíclico Dirigido representado por los porcentajes de probabilidad

mediante un valor de probabilidad. A continuación se muestran las probabilidades a posteriori.

#### 4.2.2 ASIGNACIÓN DE PROBABILIDADES A POSTERIORI

Los resultados de estas probabilidades se obtienen de la evidencia previa con la que se cuenta, nos referimos a evidencia como el conocimiento certero de que una variable presenta cierto estado. Por ejemplo, se tiene la certeza de que ha ocurrido un accidente en la ruta de recolección de componentes, la evidencia proporcionada para el nodo «Accidente vial» se modifica en un 100 % a su estado verdadero, con lo cual los porcentajes del nodo «Expeditar» cambian también, a estas nuevas probabilidades se les nombra como probabilidades a posteriori.

A continuación se muestran el comportamiento de la red bayesiana con la nueva evidencia otorgada, tomando como referencia el valor del nodo con más influencia en la red, que es la variable de salida «Expeditar». El comportamiento de la red cambia de acuerdo a la evidencia que se coloque en cada nodo, para lo cual se muestra a



continuación los resultados que expresa la red bayesiana, con base en la evidencia de posibles escenarios existentes en los SRC de la empresa.

Se comienza por analizar las variables padre que afectan al primer nodo «Tiempo de carga» que tiene influencia directa en el nodo de salida «Expeditar», estas variables son «Lotes completos», «Documentación», «Arribo de vehículos» y «Plan de estiba».

La nueva evidencia arroja cambios en las probabilidades de ocurrencia de los nodos, podemos observar en la figura 4.4 el nuevo comportamiento de la red contemplando evidencia negativa otorgada a los nodos que influyen en el «Tiempo de carga». Estas valores influyen en todas las probabilidades de la red, ahora la probabilidad de que se utilice el transporte expeditado aumento significativamente a un 45 % contra un 55 % de que no suceda.

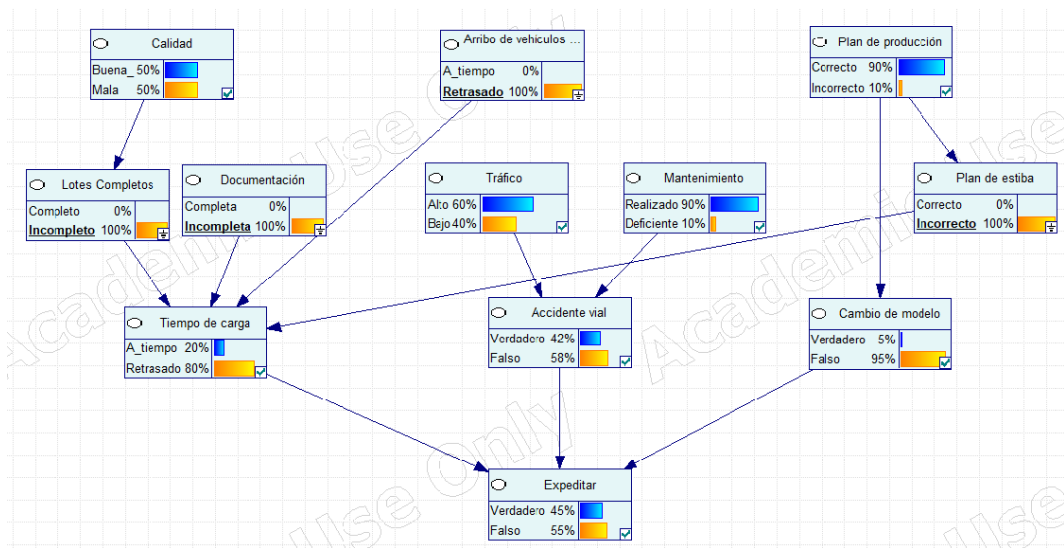


FIGURA 4.4: Gráfico Acíclico Dirigido representado por los porcentajes de probabilidad a posteriori para el nodo «Tiempo de Carga».

También es importante observar como el nodo «Calidad» modifica su valores con base en la nueva evidencia, ahora la probabilidad de que el nodo «Calidad» se la causa de un atraso en el «Tiempo de carga» se modifica a 50 %, con esto se comprueba que las redes bayesianas también identifican y ponderan las causas de la

variable de salida «Expeditar».

En el gráfico anterior se observó el comportamiento de la red dada evidencia negativa de los estados en las variables, a continuación se observa en la figura 4.5 la probabilidad a posteriori de las mismas variables pero con estados favorables en la ejecución de los SRC.

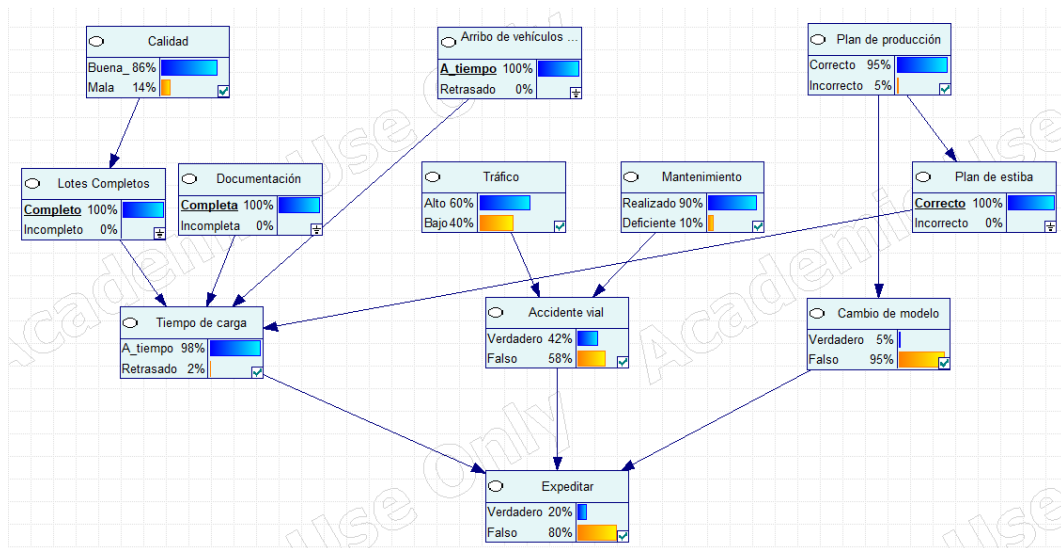


FIGURA 4.5: Gráfico Acíclico Dirigido representado por los porcentajes positivos de probabilidad a posteriori para el nodo «Tiempo de Carga».

Dicho esto, la probabilidad de que se expediten componentes es un 80% falsa y representa un cambio significativo con base al estado anterior de la variable «Expeditar», también se puede observar como el nodo «Calidad» muestra cambios la probabilidad de su estado, ahora es 86% positiva.

Dados estos hallazgos, se procede al siguiente análisis, en el cual se otorgará evidencia solo a los nodos intermedios, con el fin de obtener sus probabilidades a posteriori, en la figura 4.6 se observa la evidencia negativa otorgada a los nodos «Tráfico» y «Mantenimiento», con esta nueva evidencia la probabilidad de que un «Accidente vial» sea verdadero se incrementa a un 80%, y la variable de salida «Expeditar» aumenta a un 30% de que suceda, pero aún con evidencia alta de que ha ocurrido un «Accidente vial», la probabilidad de que no se expediten componentes continúa siendo de un

70 %, lo cual continua siendo un escenario favorable, y por lo consiguiente se infiere que la variable «Accidente vial» no tiene un gran peso en la variable «Expeditar», como lo muestra la intensidad de los arcos o flechas de gráfico acíclico dirigido.

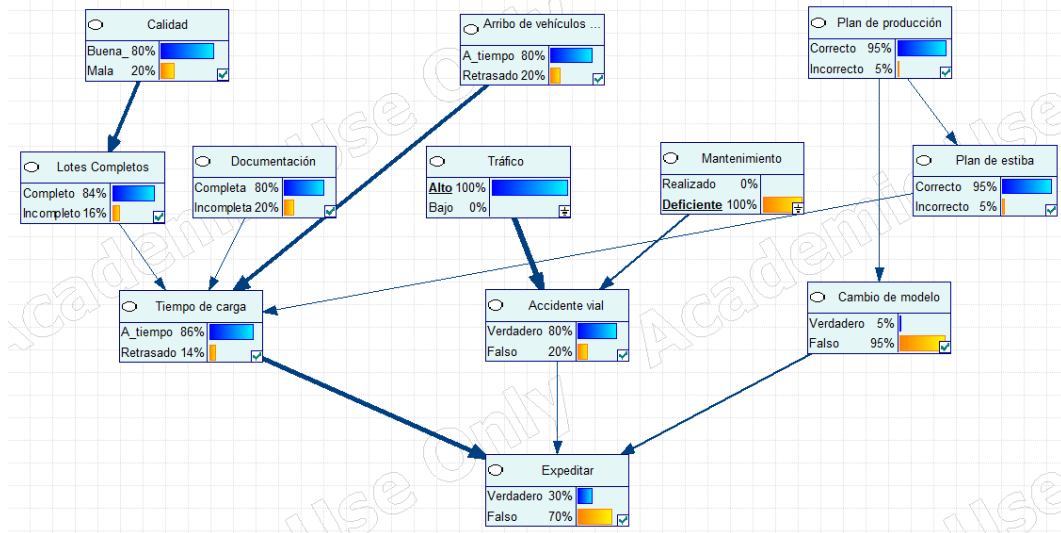


FIGURA 4.6: Gráfico Acíclico Dirigido representado por los porcentajes negativos de probabilidad a posteriori para el nodo «Accidente vial».

Ahora corresponde colocar evidencia positiva a dichas variables con la intención de observar el conocimiento de la red bayesiana. Otorgando una evidencia positiva, observada en la figura 4.7, a los nodos «Tráfico» y «Mantenimiento», la nueva evidencia de probabilidad de que un «Accidente vial» suceda es un 90 % falsa, y por consiguiente el nodo de salida «Expeditar» presenta un estado favorable de 82 % de que no se realice este tipo de envíos expeditados, en este sentido se visualiza que la evidencia positiva otorgada a los nodos padre influye directamente en los nodos dependientes de estos.

Continuando con la tercera parte del análisis, se procede a otorgar evidencia a los nodos «Plan de producción» y «Plan de estiba» para conocer en nuevo comportamiento de la red bayesiana. En la figura 4.8 se otorgó evidencia negativa a dichos nodos, y como esta indicado en la fuerza de influencia de los arcos con tonalidad azul fuerte, estas variables presentan una influencia tenue en cuanto a los resultados de probabilidad de la variable de salida «Expeditar» continúan siendo favorables con un

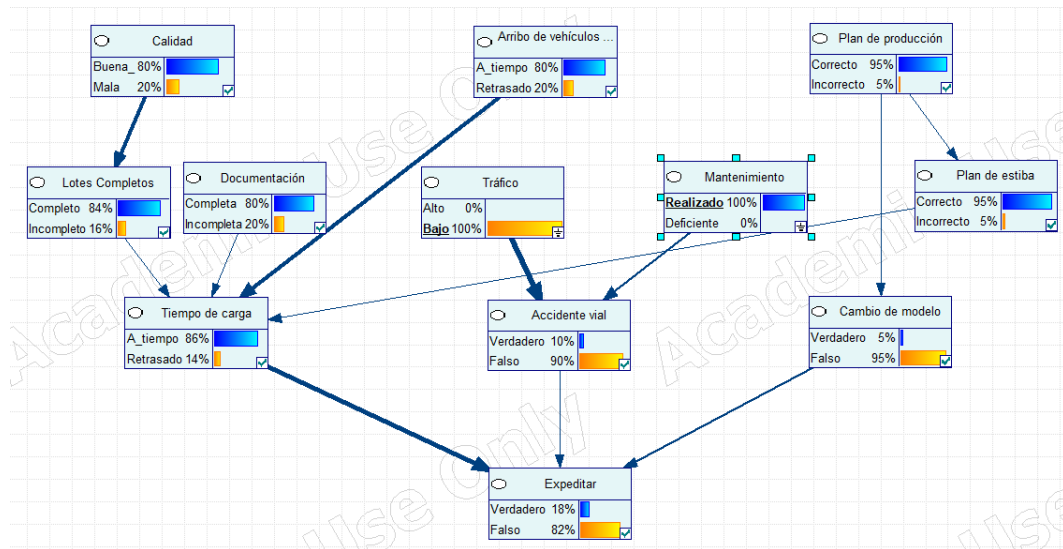


FIGURA 4.7: Gráfico Acíclico Dirigido representado por los porcentajes positivos de probabilidad a posteriori para el nodo «Accidente vial».

75 % de que no suceda un evento de estos, la variable «Cambio de model» se mantiene con una probabilidad alta del 95 % de que no ocurra, dado que se conoce que el plan de producción esta incorrecto.

En la cuarta y última parte del análisis se mostrará el comportamiento de la red bayesiana bajo evidencia de los nodos padres de la variable de salida «Expeditar», estos nodos son: «Tiempo de carga», «Accidente vial» y «Cambio de modelo». También se adjunta las tablas de probabilidad condicional con la intención de observar los nuevos valores de las variables con base en la nueva evidencia otorgada. Estos valores nos indicarán, no solo el comportamiento de la red la variable de salida «Expeditar», sino que nos mostrará cuales son las principales causas que propician estos estados en las variables.

Para el primer escenario donde se otorgó evidencia negativa al nodo «Tiempo de carga» el comportamiento de la red se modifica de manera importante, ya que es un nodo que presenta influencia de 4 nodos padre, por lo cual al modificar los valores de su evidencia, no solo modifica a la variable que es dependiente de ella, también mostrará las probabilidades de las causas que propician que la variable «Tiempo de

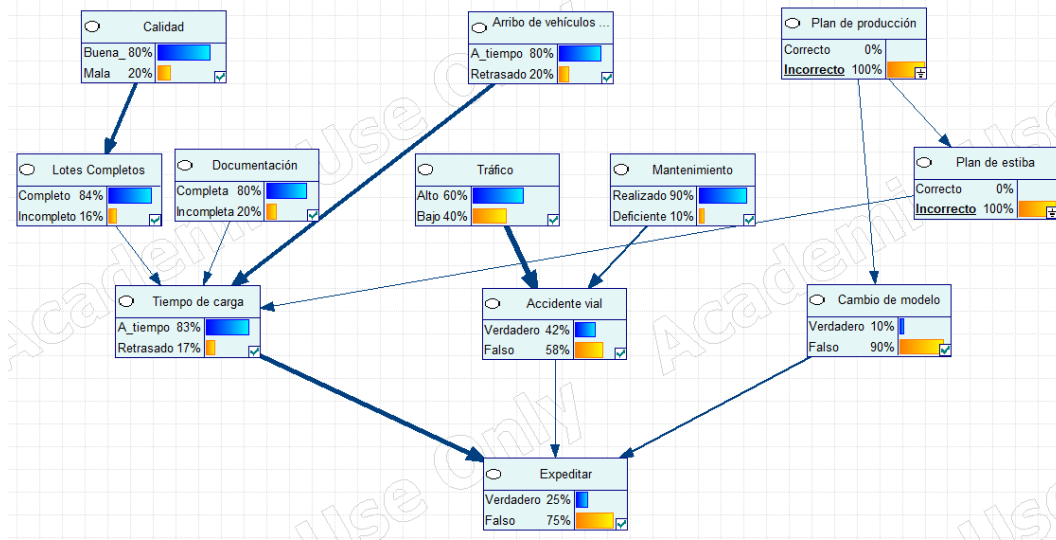


FIGURA 4.8: Gráfico Acíclico Dirigido representado por los porcentajes negativos de probabilidad a posteriori para el nodo «Cambio de modelo».

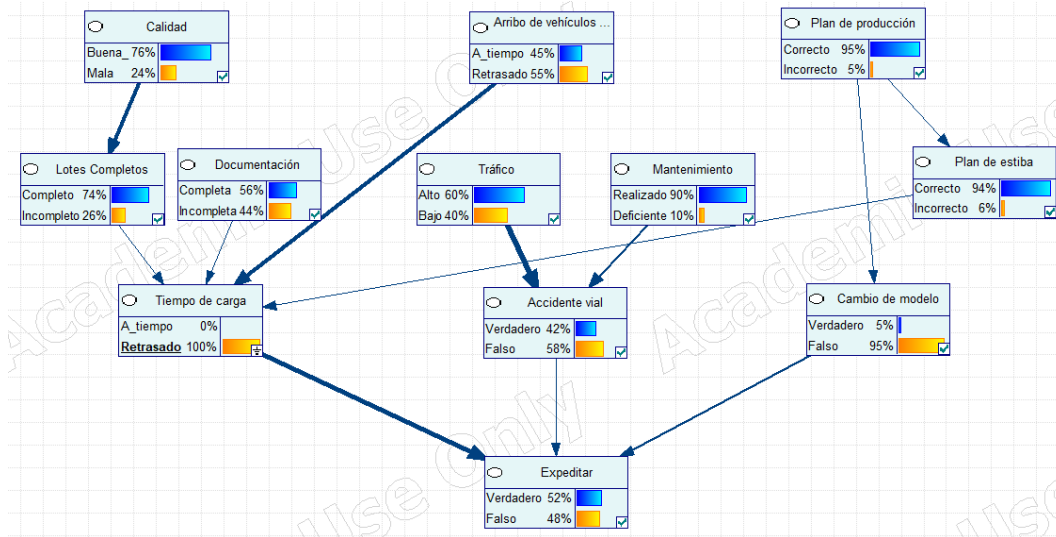


FIGURA 4.9: Gráfico Acíclico Dirigido representado por los porcentajes negativos de probabilidad a posteriori para el nodo «Tiempo de carga».

carga» presente esta evidencia negativa.

En la figura 4.9 se observa este comportamiento de la red con la evidencia otorgada y como la viable dependiente de este nodo cambia su valor, la probabilidad de «Expeditar» ahora es de un 52 % en su estado verdadero, la probabilidad aumentó significativamente para este nodo y como causas probables negativas existen dos variables más significativas, estas son la «Documentación» que presenta un 44 % de falla y el «Arribo de vehículos» con un 55 % de que se encuentre retrasado. Esta es la variable con más influencia sobre la red bayesiana de los SRC en el caso de estudio.

Como parte fundamental del análisis de incertidumbre presentado, la asignación de evidencia positiva a los nodos padre también muestra un comportamiento inverso y muy ilustrativo de como es el comportamiento de las variables involucradas en escenarios favorables.

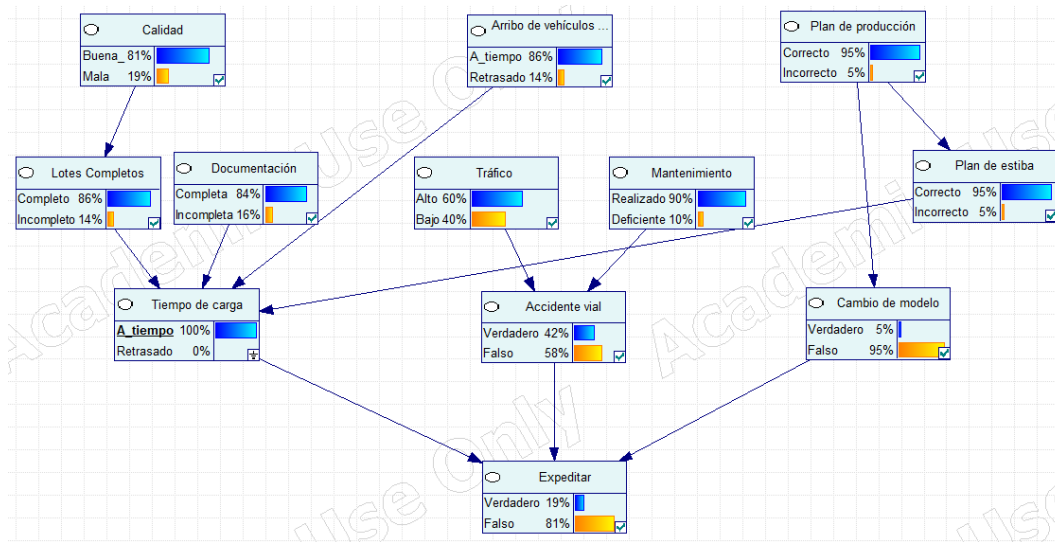


FIGURA 4.10: Gráfico Acíclico Dirigido representado por los porcentajes positivos de probabilidad a posteriori para el nodo «Tiempo de carga».

En la figura 4.10 se asignó evidencia positiva al «Tiempo de carga», los resultados muestran que la probabilidad de que no ocurra la variable «Expeditar» es del 81 % ahora, lo cual es algo positivo y refleja la influencia de cada una de las variables. Dada la evidencia de que el «Tiempo de carga» fue 100 % a tiempo, se puede

inferir que los «Lotes completos» presentaron un 86 % de estado positivo, mientras que la «Documentación» tuvo la probabilidad de estar 84 % completa y el «Arribo de vehículos» fue en un 86 % a tiempo. Para en nodo «Plan de estiba» no se presentó ningún cambio en la probabilidad de ocurrencia, por lo cual se infiere que este no influye en que el «Tiempo de carga» se retrase o este a tiempo.

La siguiente parte del análisis de las probabilidades a posteriori, es observar el comportamiento de la red cuando se el otorga evidencia negativa y positiva al nodo «Accidente vial». Al otorgar evidencia negativa de que un «Accidente vial» es 100 % verdadero, los valores en los nodos dependientes de esta variable cambian, en la figura 4.11 ahora la red nos indica que dado el estado anterior, la probabilidad de que el «Tráfico» vehicular en la ciudad fuera alto es de un 89 %, mientras que la variable «Mantenimiento» no presenta tanta influencia por la nueva evidencia otorgada y permanece en 86 % en su estado positivo.

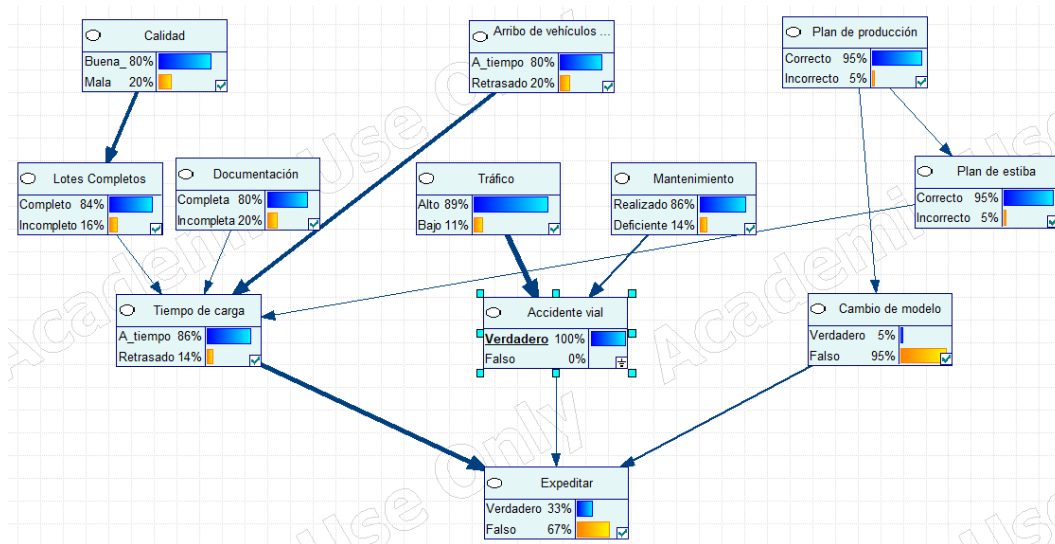


FIGURA 4.11: Gráfico Acíclico Dirigido representado por los porcentajes negativos de probabilidad a posteriori para el nodo «Accidente vial».

La figura 4.11 también nos muestra el nuevo valor de la variable de salida «Expeditar», que aumenta 10 puntos porcentuales su probabilidad de ocurrencia contra el estado a priori de la variable, la probabilidad de «Expeditar» aumenta a 33 % de que se realice y un 67 % de que no se realice.

Cuando se otorga evidencia positiva a la red sobre el nodo «Accidente vial», como se observa en la 4.12, la probabilidad de que el «Tráfico» vehicular en la ciudad fuera alto disminuye a un 39% y 61% de que fuera bajo, mientras que la variable «Mantenimiento» aumenta su estado positivo a un 93%. Ahora la probabilidad de «Expeditar» aumenta a 84% de que no se realice.

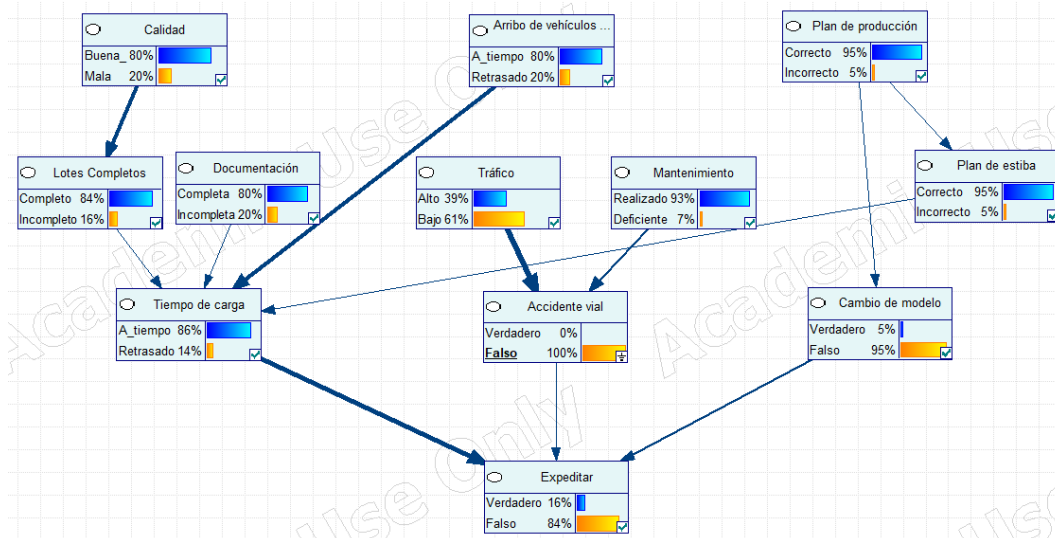


FIGURA 4.12: Gráfico Acíclico Dirigido representado por los porcentajes negativos de probabilidad a posteriori para el nodo «Accidente vial».

Para el nodo «Cambio de modelo» la probabilidad positiva otorgada no tiene ningún tipo de influencia sobre el nodo de salida «Expeditar», por lo cual no se muestra esta evidencia, solo se mostrará la figura 4.13, en la cual se otorga evidencia negativa a la red de que existe un «Cambio de modelo» a manufacturar en una línea de producción, cuando se realiza esta modificación a la red, expresa que el nodo «Plan de producción» no cambia sus valores de manera súbita ya que la probabilidad de que este plan sea incorrecto es de un 10%, se puede inferir que el nodo de salida «Expeditar» ha aumentado su probabilidad de ocurrencia a un 36%, esto nos indica que si existe una influencia, aunque de manera mínima, entre estas dos variables.

Como culminación del análisis de la red bayesiana se mostrará dos escenarios más, en los cuales se brindará evidencia positiva y negativa a las variables padre del nodo de salida «Expeditar», con el fin de inferir sobre escenarios pesimistas y



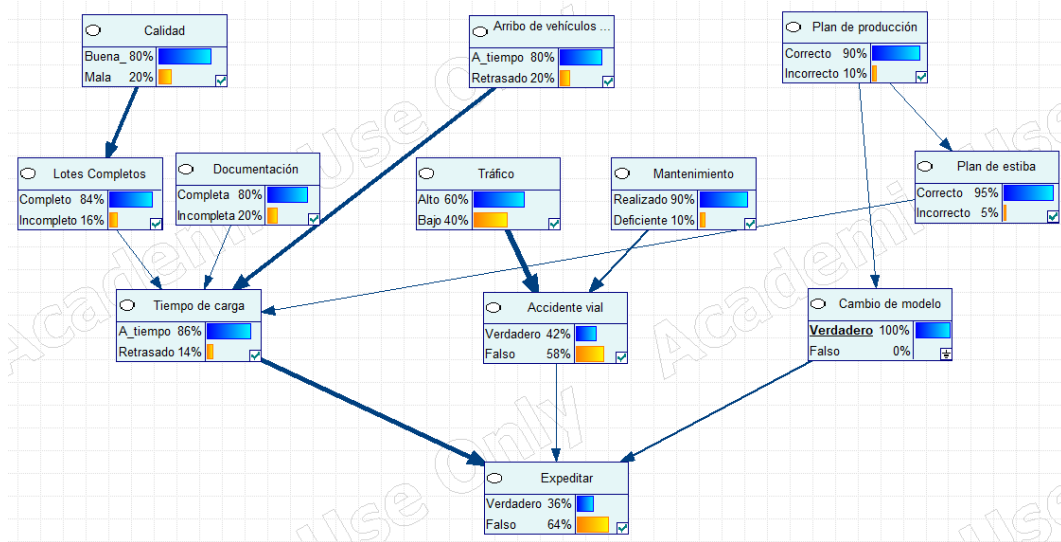


FIGURA 4.13: Gráfico Acíclico Dirigido representado por los porcentajes negativos de probabilidad a posteriori para el nodo «Cambio de modelo».

optimistas, en los cuales no solo se observará la probabilidad del nodo de salida, también se podrán observar la ponderación de las causas que generan estos eventos.

Se comienza por el escenario optimista en el cual, se coloca evidencia negativa en los nodos «Tiempo de carga», «Accidente vial» y «Cambio de modelo». Los resultados observados en la figura 4.14, muestran que una vez que se han presentado problemas en estas tres variables, la probabilidad acumulada de «Expeditar» es 80 % verdadera, con lo cual también se pueden observar que variables propician este escenario con resultados no favorables.

Para analizar el escenario optimista, se otorga evidencia positiva a la red, como se puede observar en la figura 4.15, y se muestra la nueva probabilidad acumulada del nodo de salida se modifica 90 % de que no se tenga que utilizar el transporte expeditado de mercancías. Como parte del análisis también se observan cuales serían los estados adecuados para que se tenga una baja probabilidad de «Expeditar» componentes, en la cual la mayor parte de las variables se encuentran arriba del 80 % de probabilidad en sus estados positivos.

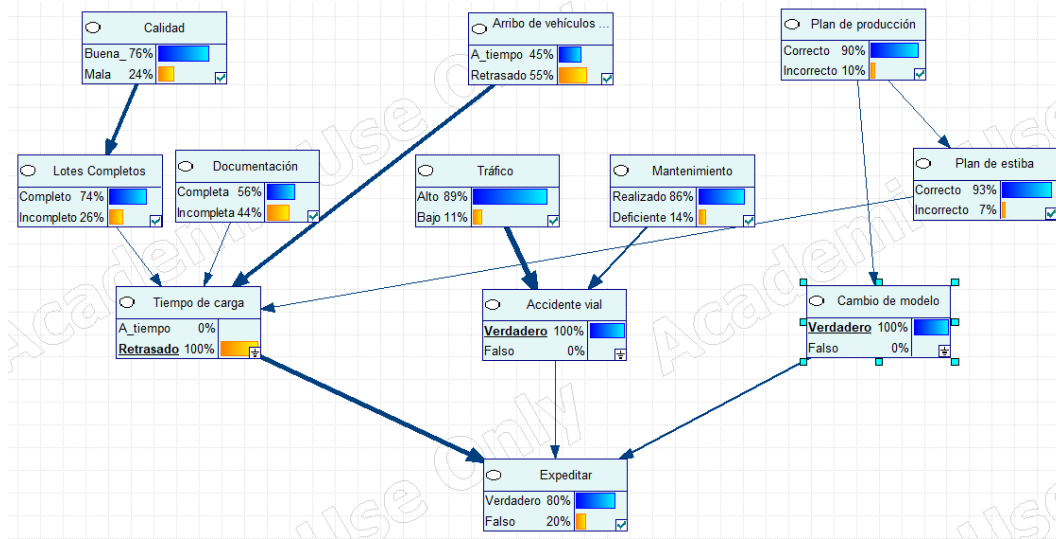


FIGURA 4.14: Gráfico Acíclico Dirigido representado por los porcentajes negativos de probabilidad a posteriori para los nodos «Tiempo de carga», «Accidente vial» y «Cambio de modelo».

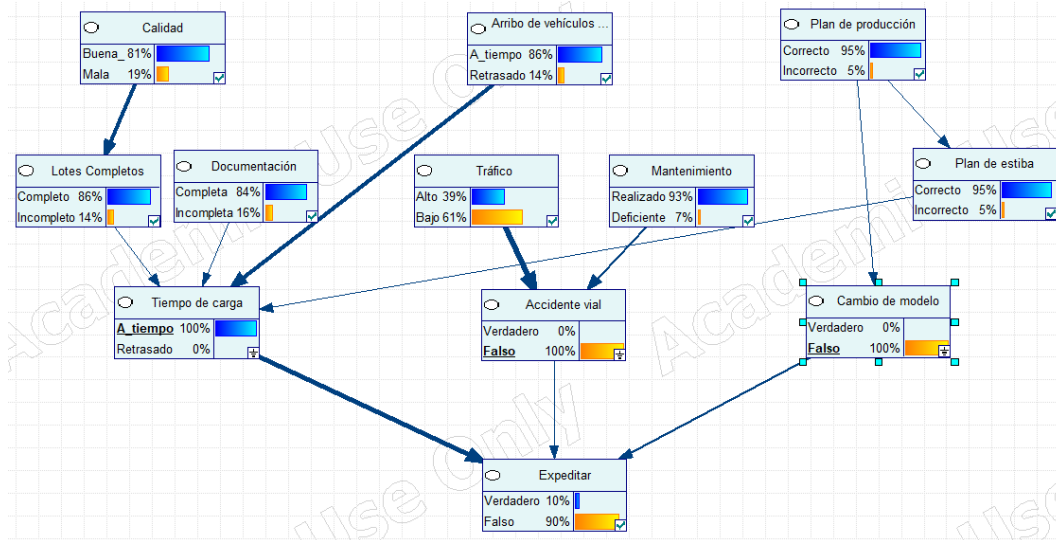


FIGURA 4.15: Gráfico Acíclico Dirigido representado por los porcentajes positivos de probabilidad a posteriori para los nodos «Tiempo de carga», «Accidente vial» y «Cambio de modelo».

### 4.2.3 ACUMULACIÓN DE RESULTADOS EN LOS ESCENARIOS

Este apartado pretende ofrecer la acumulación de los resultados del análisis realizado para poder visualizar y comparar el comportamiento de las probabilidades en su primera propagación en la red bayesiana ("Probabilidades a priori") y su propagación posterior a brindar evidencia de un escenario ("Probabilidades a posteriori").

En la Tabla 4.11 se muestra de manera completa el comportamiento de los valores para cada variable según la propagación realizada. Esta visualización ayuda a identificar como es el comportamiento de cada variable de acuerdo a la evidencia proporcionada. Las inferencias realizadas anteriormente se pueden observar como mayor detalle esta tabla, lo cual ayudará a tomar mejor decisiones con base en los resultados mostrados.

<b>Variable</b>	<b>Estado</b>	<b>Probabilidad a priori</b>	<b>Escenario Negativo</b>	<b>Escenario Positivo</b>
<b>Calidad</b>	Buena	80 %	76 %	81 %
	Mala	20 %	24 %	19 %
<b>Lotes completos</b>	Completo	84 %	74 %	86 %
	Incompleto	16 %	26 %	14 %
<b>Documentación</b>	Completa	80 %	56 %	84 %
	Incompleta	20 %	44 %	16 %
<b>Tiempo de carga</b>	A tiempo	80 %	0 %	100 %
	Retrasado	20 %	100 %	0 %
<b>Arribo de vehículos</b>	A tiempo	80 %	45 %	86 %
	Retrasado	20 %	55 %	14 %
<b>Tráfico</b>	Alto	60 %	89 %	39 %
	Bajo	40 %	11 %	61 %
<b>Mantenimiento</b>	Realizado	90 %	86 %	93 %
	Deficiente	10 %	14 %	7 %
<b>Accidente vial</b>	Verdadero	42 %	100 %	0 %
	Falso	58 %	0 %	100 %
<b>Plan de producción</b>	Correcto	95 %	90 %	95 %
	Incorrecto	5 %	10 %	5 %
<b>Plan de estiba</b>	Correcto	95 %	93 %	95 %
	Incorrecto	5 %	7 %	5 %
<b>Cambio de modelo</b>	Verdadero	5 %	100 %	0 %
	Falso	95 %	0 %	100 %
<b>Expeditar</b>	Verdadero	23 %	80 %	10 %
	Falso	77 %	20 %	90 %

TABLA 4.11: Tabla de los perfiles de los expertos.

## CAPÍTULO 5

# CONCLUSIONES

---

La presente investigación tuvo como propósito estudiar un tema logístico, los Sistemas de Recolección de Componentes (SRC), los cuales son usados con frecuencia en la industria metalmeccánica y de electrodomésticos, se logró obtener una perspectiva de su estructura operacional, diseño, planificación y ejecución de los mismos, a partir de dos fuentes, la primera es la literatura revisada y la segunda es la comparación de un caso de estudio. Dentro de la revisión de literatura se encontró enfoques interesantes con los cuales han sido abordados los SRC, estos estudios muestran las variantes de los VRP para buscar soluciones a los problemas de los SRC, dichos estudios en su mayoría son deterministas, la adyacencia de estudios con directrices estocásticas o estudios donde se contemplara ampliamente la incertidumbre en los SRC es mínima. Los SRC, por su parte, no solo se utilizan para operaciones externas de las empresas, el termino *Milk-run* es asociado también al diseño y planificación de estructuras de SRC internos en las empresas.

Es importante mencionar que la incertidumbre en los SRC no es un tópico que se logre encontrar con facilidad, para lograr asociar la incertidumbre con los SRC, se tuvo que relacionar factores implícitos en los SRC, como lo son las operaciones del transporte de carga, cuyos hallazgos corroboraron la presencia de incertidumbre en dichas operaciones, la búsqueda también incluyo a los eventos disruptivos en logística, este termino es muy adecuado para ser relacionado con la incertidumbre

en los SRC, ya que describe muy bien las fallas que pueden existir.

En la parte de la cuantificación de incertidumbre, la herramienta de redes bayesianas fue seleccionada por las características que posee frente a otros métodos estadísticos, en este sentido la herramienta logró ser de utilidad para poder conseguir el objetivo de esta investigación, el cual era realizar un análisis del escenario de los SRC y cuantificar la incertidumbre de este. La construcción de la red bayesiana significó un reto, ya que la comprensión de la herramienta presenta un grado de complejidad, no solo en su construcción, sino también en la interpretación de los datos de entrada y de salida.

Como se mencionó, el origen de estos datos fue cualitativo basado en opinión experta, se consiguió la colaboración de una empresa del estado de Nuevo León, la cual aportó grandes conocimientos de aplicación a la investigación, se pudo documentar la ejecución de sus SRC y observar algunas de sus áreas de oportunidad. En este sentido las redes bayesianas mostraron a la empresa, las probabilidades de ocurrencia de la variable objetivo «Expeditar», estos resultados se traducen en que se puede conocer las posibles causas que intervienen o propician en que la variable «Expeditar» ocurra.

Como reflexión final se logró ver a las red bayesianas como una herramienta extremadamente útil en la representación gráfica de sus resultados probabilísticos, con la cual se pueden realizar análisis de riesgos efectivos que logren dimensionar el comportamiento causal de las variables de un escenario dado. También es importante mencionar que las red bayesianas tienen un sin fin de parámetros que pueden ayudar a resultados más certeros a partir de la obtención de datos cuantitativos y con estructuras de costos que puedan medir los impactos al medir y cuantificar la incertidumbre en los SRC.

## 5.1 CONTRIBUCIONES

- Los SRC han sido poco estudiados en la literatura Nacional, es necesario abordar más este tópico ya que un gran número de empresas utilizan estas estructuras en sus operaciones logísticas.
- Dentro de la literatura consultada no fue posible encontrar a los SRC con objetivos de cuantificación de la incertidumbre, lo cual lo convierte en un tema que podría ser estudiado a profundidad.
- Las redes bayesianas normalmente son utilizadas en estudios de biomédicos, reconocimiento de imágenes y estudios de riesgos financieros, pero se encontró muy poca aplicación en el área de logística y cadena de suministro.

## 5.2 TRABAJO FUTURO

- Realizar una revisión de literatura profunda de los Sistemas de Recolección de Componentes (*Milk-runs*) en la cual se incluyan a detalle el diseño, planeación y ejecución de los mismos abordado desde una perspectiva nacional.
- Comparar resultados obtenidos utilizando redes bayesianas, contra otros métodos de cuantificación de la incertidumbre, así se podrá obtener un marco de resultados con múltiples herramientas.
- Realizar una búsqueda exhaustiva sobre incertidumbre y análisis de riesgos en los SRC, para poder obtener mejores referencias y comprensión de estos temas dentro de los SRC.
- Buscar la obtención de datos históricos de operación en los SRC para poder aplicar la herramienta y poder observar el comportamiento con los nuevos datos.

## APÉNDICE A

# CUESTIONARIO DE LOS SISTEMAS DE RECOLECCIÓN (*Milk-runs*)

---

### Análisis de los escenarios de Milk-runs

Este cuestionario busca conocer la opinión experta de las probabilidades de ocurrencia de los factores asociados a los sistemas

Indique su nombre y puesto dentro de la organización:

Indique los años de experiencia laboral y los años laborados dentro de la organización

A continuación se muestra el gráfico que refleja el escenario propuesto, en el cual se identifican tres actores principales, la empresa en amarillo, en rojo los servicios de transporte contratados y en verde factores de los clientes.

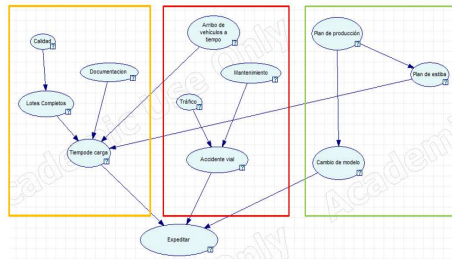


FIGURA A.1: Parte 1. Presentación de los Expertos



Observando el escenario amarillo, el factor "calidad" influye sobre el factor de "lotes completos", y "lotes completos" influye sobre el "tiempo de carga". Considerando siempre el factor "expeditar" como factor objetivo. En este aspecto se busca que usted, con base a su experiencia, determine la probabilidad de ocurrencia de los factores en las siguientes tablas, usando valores entre 0 y 1, y que sumados dan como resultado = 1. Donde 0.6 o un valor mayor indica que un estado es más probable que otro.

1.- ¿Cuál es la probabilidad de que "calidad", ya sea buena o mala, influya en problemas de "lotes completos"?

		Lotes Completos	
Calidad	Buena		
	Mala		

ejemplo: Estados: Calidad buena y mala  
0.2  
0.8  
R=1

2.- ¿Cómo influye los lotes completos en el tiempo de carga? Por ejemplo, cuál es la probabilidad de que un lote este completo dado que la calidad fue buena.

		Calidad Buena	Calidad Mala
Lote completo	Completo	0.9	
	Incompleto	0.1	

R= Esta respuesta significaría que dada una buena calidad, existe alta probabilidad de que un lote este

3.- ¿Cuál es la probabilidad de que el "tiempo de carga" este a tiempo o retrasado, dado que la "documentación" pueda ser completa o incompleta?

		Tiempo de carga	
Documentación	Completa		
	Incompleta		

FIGURA A.2: Parte 2. Preguntas 1-2

Indique la probabilidad del factor tiempo de carga en sus respectivos estados, considerando los factores que influyen en este. Por ejemplo, cuál es la probabilidad dado que el factor "arribo de vehículo" este a tiempo, el factor "lotes completos" sea completo, el factor "documentación" sea completa y que el "plan de estiba" sea correcto. ¿Si esto es cierto, cuál es la probabilidad de que el "tiempo de carga" se encuentre a tiempo o retrasado?

Arribo de Vehículos		A tiempo							
Lotes Completos		Completo				Incompleto			
Documentación		Completa		Incompleta		Completa		Incompleta	
Plan de estiba		Correcto	Incorrecto	Correcto	Incorrecto	Correcto	Incorrecto	Correcto	Incorrecto
Tiempo de Carga	A tiempo								
	Retrasado								

Arribo de Vehículos		Retrasado							
Lotes Completos		Completo				Incompleto			
Documentación		Completa		Incompleta		Completa		Incompleta	
Plan de estiba		Correcto	Incorrecto	Correcto	Incorrecto	Correcto	Incorrecto	Correcto	Incorrecto
Tiempo de Carga	A tiempo								
	Retrasado								

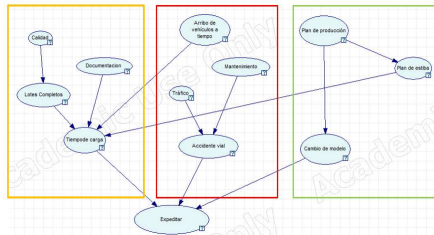


FIGURA A.3: Parte 2. Preguntas 3-5

4.- Continuando con los factores del recuadro en color rojo pertenecientes a los servicios de transporte tercerizado; ¿Cuál es la probabilidad de que el tráfico sea alto o bajo en la ejecución de alguna ruta programada?

Tráfico	
Alto	
Bajo	

5.- ¿Cuál es la probabilidad de que ocurra un problema dado que se realizó un correcto u incorrecto mantenimiento del vehículo?

Mantenimiento	
Correcto	
Incorrecto	

6.- ¿Cómo influye los factores "tráfico" vehicular y "mantenimiento" en un "accidente vial"? desde su experiencia, indique que tan probable es que estos factores influyan para que el factor "accidente vial" sea verdadero o falso.

	Tráfico	Alto		Bajo	
	Mantenimiento	Correcto	Incorrecto	Correcto	Incorrecto
<b>Accidente vial</b>	VERDADERO				
	FALSO				

7.- En el recuadro verde se observan factores de la empresa comenzando por el "plan de estiba" que es totalmente dependiente del "plan de producción". ¿Cuál es la probabilidad de que el plan de producción este correcta o incorrectamente planeado?

Plan de producción	
Correcto	
Incorrecto	

FIGURA A.4: Parte 2. Preguntas 6-7

8.- Una vez que se conoce el estado del plan de producción, ¿Cuál es la probabilidad de que dado el plan de producción el plan de estiba sea correcto o incorrecto?

	Plan de producción	Correcto	Incorrecto
Plan de estiba	Correcto		
	Incorrecto		

9.- ¿Cuál es la probabilidad de que dada una correcta o incorrecta planeación de la producción, surja un cambio de modelo de ensamblaje y por ende de requerimientos de un componente?

	Plan de producción	Incorrecto	Correcto
Cambio de modelo	VERDADERO		
	FALSO		

En esta parte, es el momento de ponderar la probabilidad más importante dado los valores de los factores anteriores.

10.- ¿Qué tan probable es que el "tiempo de carga", un "accidente vial" o un "cambio de modelo" de una línea de producción, puedan influir sobre el hecho de "expeditar" o no componentes?

	Tiempo de carga	A tiempo				Retrasado			
	Accidente vial	Verdadero		Falso		Verdadero		Falso	
	Cambio de modelo	Verdadero	Falso	Verdadero	Falso	Verdadero	Falso	Verdadero	Falso
Expeditar componentes	Verdadero								
	Falso								

FIGURA A.5: Parte 2. Preguntas 8-10

## APÉNDICE B

# DESARROLLO DE UNA RED BAYESIANA

---

En este apéndice se pretende ofrecer una perspectiva del desarrollo de una red bayesiana cuando se cuenta con datos históricos o se utiliza el conocimiento experto. Dado que en esta investigación se utilizó el conocimiento experto a falta de datos históricos, en este apéndice se mostrara el camino a seguir cuando se cuenta con datos históricos, el proceso se puede observar en la Figura B.1.

Un ejemplo de esta aplicación podría ser una serie de tiempo, tomando como referencia esta podría ser la hora en que arriba un vehículo para ser cargado, este dato tendrá valores reflejados en horas, minutos y segundos, pero la probabilidad de los estados se determinará con las políticas de ventanas de tiempo, ejemplificando, si la ventana de tiempo del arribo de un vehículo es a las nueve de la mañana, la serie de tiempo debería mostrar el comportamiento de esta variable, dicho de otra manera, que porcentaje de retrasos presentan los vehículos y que porcentaje llegan a tiempo.

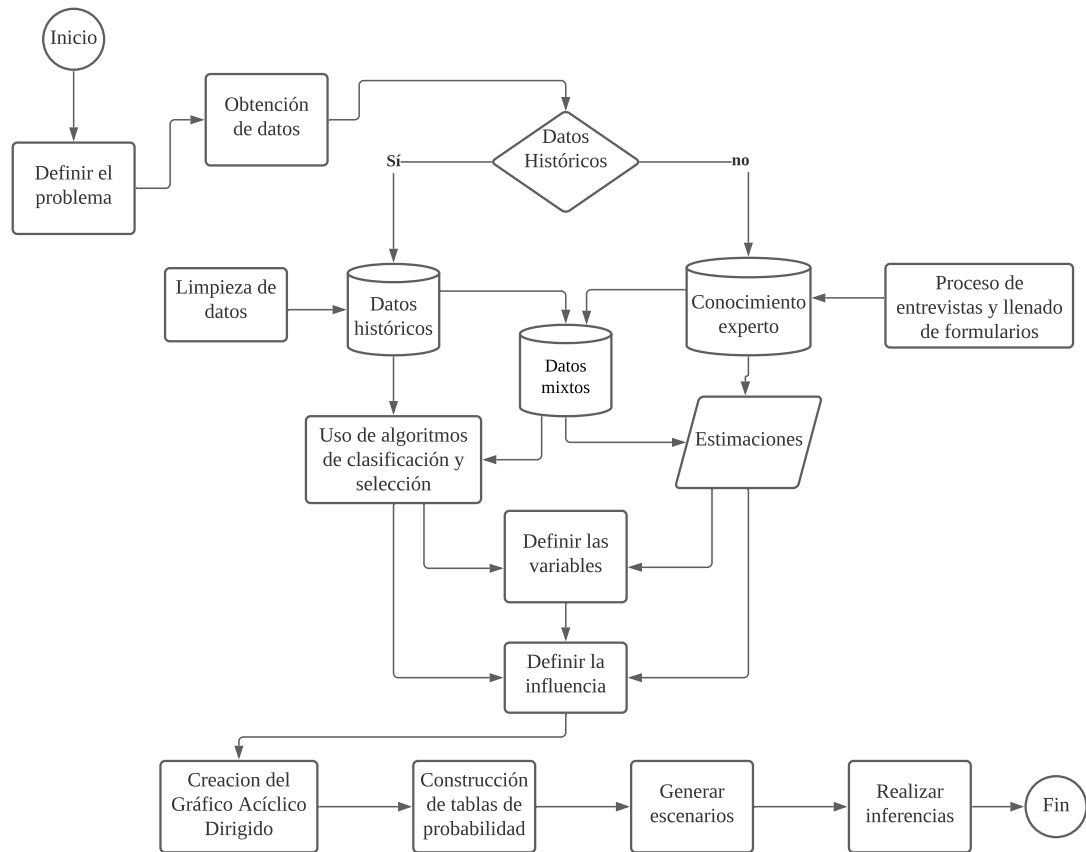


FIGURA B.1: Figura ilustrativa del desarrollo de una red bayesiana cuando se cuenta o no con datos históricos.

# BIBLIOGRAFÍA

---

- ABOLBASHARI, M. H., E. CHANG, O. K. HUSSAIN y M. SABERI (2018), «Smart buyer: a Bayesian network modelling approach for measuring and improving procurement performance in organisations», *Knowledge-Based Systems*, **142**, págs. 127–148.
- AGÜERO DÍAZ, A. (2018), *Modelo para caracterizar y evaluar la integración entre actores pertenecientes a una cadena de suministro del sector automotriz.*, Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- ALVAREZ, R. B. (2013), «Estructura y recomposición de la industria automotriz mundial. Oportunidades y perspectivas para México», *Economía Unam*, **10**(30), págs. 75–92.
- ARAGÃO, D., A. GALVÃO-NOVAES y M. MENDES-LUNA (2016), «An agent-based approach to enable dynamic vehicle routing in milk-run OEM operations», en *XXVIII Congreso de Pesquisa e Ensino em Transportes. Curitiba*.
- ARAGÓN, G. D. (2014), «Uso de redes bayesianas para medir el riesgo operacional, un caso de aplicación», .
- BAUDIN, M. (2005), *Lean logistics: the nuts and bolts of delivering materials and goods*, CRC press.
- BENNETT, D. y F. KLUG (2012), «Logistics supplier integration in the automotive industry», *International Journal of Operations & Production Management*.

- BOCEWICZ, G., P. NIELSEN y B. ZBIGNIEW (2019), «Milk-run routing and scheduling subject to different pick-up/delivery profiles and congestion-avoidance constraints», *IFAC-PapersOnLine*, **52**(8), págs. 313–320.
- BORGSTEDT, P., B. NEYER y G. SCHEWE (2017), «Paving the road to electric vehicles—A patent analysis of the automotive supply industry», *Journal of cleaner production*, **167**, págs. 75–87.
- CÁRDENAS-MONSALVE, J. J., A. F. RAMÍREZ-BARRERA y E. DELGADO-TREJOS (2018), «Evaluación y aplicación de la incertidumbre de medición en la determinación de las emisiones de fuentes fijas: una revisión», *TecnoLógicas*, **21**(42), págs. 231–244.
- CHRISTENSEN, T. B. (2011), «Modularised eco-innovation in the auto industry», *Journal of Cleaner Production*, **19**(2-3), págs. 212–220.
- CHUNG, W., S. TALLURI y G. KOVÁCS (2018), «Investigating the effects of lead-time uncertainties and safety stocks on logistical performance in a border-crossing JIT supply chain», *Computers & Industrial Engineering*, **118**, págs. 440–450.
- DE MOURA, D. A. y R. C. BOTTER (2016), «Delivery And Pick-Up Problem Transportation-Milk Run or Conventional Systems», *Independent Journal of Management & Production*, **7**(3), págs. 746–770.
- DÍAZ-MADROÑERO, M., J. MULA y D. PEIDRO (2017), «A mathematical programming model for integrating production and procurement transport decisions», *Applied Mathematical Modelling*, **52**, págs. 527–543.
- DICIEMBRE SANAHUJA, S. (2017), «Sistemas de Control con Lógica Difusa: Métodos de Mamdani y de Takagi-Sugeno-Kang (TSK)», .
- DU, T., F. WANG y P.-Y. LU (2007), «A real-time vehicle-dispatching system for consolidating milk runs», *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **43**(5), págs. 565–577.



- ERSHADI, M. M. y A. SEIFI (2020), «An efficient Bayesian network for differential diagnosis using experts' knowledge», *International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics*.
- FERRÀS-HERNÁNDEZ, X., E. TARRATS-PONS y N. ARIMANY-SERRAT (2017), «Disruption in the automotive industry: A Cambrian moment», *Business horizons*, **60**(6), págs. 855–863.
- GREEN JR, K. W., R. A. INMAN, L. M. BIROU y D. WHITTEN (2014), «Total JIT (T-JIT) and its impact on supply chain competency and organizational performance», *International Journal of Production Economics*, **147**, págs. 125–135.
- HERNÁNDEZ-SAMPIERI, R. y C. P. M. TORRES (2018), *Metodología de la investigación*, McGraw-Hill Interamericana México DF.
- HOSSEINI, S. D., M. A. SHIRAZI y B. KARIMI (2014), «Cross-docking and milk run logistics in a consolidation network: A hybrid of harmony search and simulated annealing approach», *Journal of Manufacturing Systems*, **33**(4), págs. 567–577.
- HU, H., K. CHEN, J. HE y L. DU (2019), «Whole cycle disruption analysis of petroleum supply chain (PSC) based on UASNs monitoring», *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, **2019**(1), pág. 119.
- HU, Z., D. DU y Y. DU (2018), «Generalized polynomial chaos-based uncertainty quantification and propagation in multi-scale modeling of cardiac electrophysiology», *Computers in biology and medicine*, **102**, págs. 57–74.
- INEGI, A. (2018), «Conociendo la industria automotriz», *Informe técnico*, Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- JAYARAM, J., A. DAS y M. NICOLAE (2010), «Looking beyond the obvious: Unraveling the Toyota production system», *International Journal of Production Economics*, **128**(1), págs. 280–291.
- JIMÉNEZ SÁNCHEZ, J. E. (2006), «Un análisis del sector automotriz y su modelo de gestión en el suministro de las autopartes», *Publicación técnica*, (288).

- KANEKO, J. y W. NOJIRI (2008), «The logistics of Just-in-Time between parts suppliers and car assemblers in Japan», *Journal of transport geography*, **16**(3), págs. 155–173.
- KENT, R. Y. M. S., JENNIFER Y DOWLING (2017), «Catalizadores para transiciones de transporte: cerrar la brecha entre interrupciones y cambios», *Diario de geografía del transporte*, **60**, págs. 200–207.
- KNOLL, D., M. PRÜGLMEIER y G. REINHART (2016), «Predicting future inbound logistics processes using machine learning», *Procedia CIRP*, **52**, págs. 145–150.
- LARRAÑAGA, P. y S. MORAL (2011), «Probabilistic graphical models in artificial intelligence», *Applied soft computing*, **11**(2), págs. 1511–1528.
- LOCKAMY, A. y K. MCCORMACK (2012), «Modeling supplier risks using Bayesian networks», *Industrial Management & Data Systems*.
- MA, J. y G. SUN (2013), «Mutation ant colony algorithm of milk-run vehicle routing problem with fastest completion time based on dynamic optimization», *Discrete Dynamics in Nature and Society*, **2013**.
- MEYER, A. (2017), *Milk run design: Definitions, concepts and solution approaches*, tomo 88, KIT Scientific Publishing.
- MEYER, A. y B. AMBERG (2018), «Transport concept selection considering supplier milk runs—an integrated model and a case study from the automotive industry», *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **113**, págs. 147–169.
- MORENO GARZA, O. H. (2006), *Redes Bayesianas una Aplicación de Control de Tráfico.*, Tesis Doctoral, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- OICA (2018), «Automobiles.(2018a). World motor vehicle production.», *Informe técnico*, Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles.

- OTTEMÖLLER, O. y H. FRIEDRICH (2017), «Modelling change in supply-chain-structures and its effect on freight transport demand», *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*.
- PALADUGU, B. S. y D. GRAU (2019), «Toyota Production System–Monitoring Construction Work Progress With Lean Principles», .
- PALMA VÁZQUEZ, F. (2018), *Solución Colaborativa de Eventos disruptivos en la Cadena de Suministro*, Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- PASCUAL, M. B., A. M. MARTÍNEZ y Á. M. ALAMILLOS (2014), «Redes bayesianas aplicadas a problemas de credit scoring. Una aplicación práctica», *Cuadernos de Economía*, **37**(104), págs. 73–86.
- PÉREZ, M. P. y A. M. SÁNCHEZ (2001), «Supplier relations and flexibility in the Spanish automotive industry», *Supply Chain Management: An International Journal*.
- PIRES, S. R. y M. S. NETO (2008), «New configurations in supply chains: the case of a condominium in Brazil’s automotive industry», *Supply Chain Management: An International Journal*.
- PIRTTILÄ, M., V. M. VIROLAINEN, L. LIND y T. KÄRRI (2019), «Working capital management in the Russian automotive industry supply chain», *International Journal of Production Economics*.
- RINCÓN, L. (2014), *Introducción a la probabilidad*, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias.
- ROCHE BELTRÁN, F. (2002), *Métodos para obtener conocimiento utilizando redes bayesianas y procesos de aprendizaje con algoritmos evolutivos*, Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla.
- SABBAGHA, O., M. N. AB RAHMAN, W. R. ISMAIL y W. M. H. W. HUSSAIN (2016), «Impact of quality management systems and after-sales key performan-

- ce indicators on automotive industry: A literature review», *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, **224**, págs. 68–75.
- SE (2012), «Monografía de la industria automotriz.», *Informe técnico*, Secretaría de Economía México.
- SUCAR, L. E. (2015), «Modelos gráficos probabilísticos», *Avances en visión por computadora y reconocimiento de patrones. Londres: Springer London*, **10**, págs. 978–1.
- ULIN HERNÁNDEZ, E. J. (2019), *Optimización de la red de distribución en el servicio de paquetería empleando una tecnología emergente*, Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- UNGER, K. (1991), «The automotive industry: Technological change and sourcing from Mexico», *North American Review of Economics and Finance*, **2**(2), págs. 109–128.
- YAN, B., X. CHEN, Y. LIU y C. XIA (2019), «Replenishment decision and coordination contract in cluster supply chain», *Industrial Management & Data Systems*.
- YIN, Z., C. WANG y Q. YIN (2018), «Coordinating overseas and local sourcing through a capacitated expediting transportation policy», *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **118**, págs. 258–271.
- ZAHRAEI, S. M. y C.-C. TEO (2017), «Optimizing a supply network with production smoothing, freight expediting and safety stocks: An analysis of tactical trade-offs», *European Journal of Operational Research*, **262**(1), págs. 75–88.
- ZHENG, C., B. PENG y G. WEI (2020), «Operational risk modeling for cold chain logistics system: a Bayesian network approach», *Kybernetes*.