

**Optimización de un sistema de distribución de valores con un enfoque de administración del riesgo.**

**Caso: banco central de Colombia**

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para obtener el título de

**Magíster en Gerencia de Operaciones**

(Modalidad de profundización)

Rafael Iván Bermúdez Acosta

Director:

Edgar Alfonso Lizarazo Ph.D.

Universidad de La Sabana

Escuela Internacional de Ciencias Económicas y Administrativas

Chía, Colombia

2017



**Nota de aceptación**

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Presidente del jurado

\_\_\_\_\_

Jurado

\_\_\_\_\_

Jurado

\_\_\_\_\_

Jurado

### **Dedicatoria**

A mi fallecida madre, pues aún después de su deceso, aprendo de ella que el único riesgo de la vida que no debemos asumir, en no vivir.

Rafael Iván

## Agradecimientos

Es esta la oportunidad para expresar nuestros agradecimientos a:

DIOS fuente suprema de toda sabiduría;

El doctor Edgar Alfonso Lizarazo, por su permanente guía para desarrollar y mejorar el proyecto.

A mi esposa e hijos por la inmensa paciencia y comprensión que mostraron con este trabajo que, más de una vez, parecía tornarse infinito.

Rafael Iván Bermúdez Acosta

**Resumen:**

En la medida que las especies monetarias constituyen el medio de pago de mayor uso en la economía, resulta fundamental para los bancos centrales garantizar la provisión de billetes en las cantidades requeridas en cada región de la geografía. Por otra parte, por la naturaleza de estas operaciones, el sistema de distribución se debe clasificar como un sistema de abastecimiento de alto valor, por lo que, su operación conlleva altos niveles de riesgo.

La pretensión de este trabajo es proponer un modelo de optimización que le permita al decisor realizar una planeación de la operación para un periodo de tiempo, haciendo uso de las usuales herramientas de optimización de ruteo, específicamente, modelos que abordan problemas de Flota Heterogénea (VRPHF), en condiciones que comportan riesgo. De esta forma, el trabajo integra modelos de optimización de ruteo que resuelven sistemas de distribución con clientes con demandas variables, vehículos con capacidades y costos variables; con modelos de medición del riesgo operativo que se fundamentan en redes bayesianas.

**Palabras claves:** Optimización de rutas, administración del riesgo, sistemas de distribución, transporte de valores.

**Abstract:**

As far as circulating mediums are the most common means of payment in the economy, it is essential for central banks to provide currency in the required amounts at every region of the country. At the same time, these operations are classified as a high-value supply system, therefore, this operation involves high levels of risk.

The purpose of this work is to put forward an optimization model that allows the planning of an operation for a specific time frame, using routing optimization tools, in particular, those that deal with the heterogeneous vehicle routing problem (HVRP) In conditions that involve risk. In this way, this work integrates routing optimization models, that solve distribution systems with customers with variable demands and vehicles with variable capacities and costs; With models of operational risk based on Bayesian networks.

**Key words:** Optimization of routes, risk management, distribution systems, transport of values.

# Tabla de Contenido

|  |    |
|--|----|
| Lista de Figuras.....  | 12 |
| Lista de Tablas .....  | 17 |
| INTRODUCCIÓN.....  | 22 |
| PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....   | 25 |
| 1.1    Objetivos del estudio .....   | 26 |
| •    Objetivo general.....   | 26 |
| •    Objetivos específicos.....  | 26 |
| 1.2    Justificación y delimitación .....  | 27 |
| 1.3    Marco teórico.....  | 28 |
| 1.3.1    Optimización de una red de distribución.....                              | 28 |
| 1.3.2    Algoritmos exactos.....   | 30 |
| 1.3.3    Heurísticas y Meta heurísticas. ....                                      | 30 |
| 1.3.4    Algoritmos de optimización basados en la teoría de conjuntos difusos..... | 31 |
| 1.3.5    Proceso de modelamiento. ....   | 33 |
| 1.3.6    Gestión del riesgo.....   | 35 |
| 1.3.7    Identificación del riesgo .....   | 40 |
| 1.3.8    Valoración del riesgo.....  | 40 |
| 1.3.9    Medir la correlación entre eficiencia y riesgo.....                       | 43 |
| CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA.....   | 44 |
| 2.1    Sistema de distribución.....  | 44 |
| 2.2    Riesgo inherente .....  | 50 |
| 2.2.1    Identificar la variable de estudio.....                                   | 51 |
| 2.2.2    Identificar las variables relevantes.....                                 | 51 |
| •    Diagrama de causa efecto para el evento de riesgo “Operación Fallida” .....   | 51 |
| •    Diagrama de causa efecto para el evento de riesgo “Catastrófico”. ....        | 52 |
| 2.2.3    Construir la estructura de la red. ....                                   | 54 |
| •    Red bayesiana para el medio de transporte terrestre.....                      | 54 |
| •    Red bayesiana para el medio de transporte aéreo.....                          | 56 |
| OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN MODELO DE APLICACIÓN INMEDIATA.....       | 60 |
| 3.1    Modelación matemática .....   | 60 |
| 3.1.1    Determinación de los conjuntos .....                                      | 62 |
| •    Nodos .....   | 62 |

---

|   |    |
|---|----|
| • Vehículos .....   | 63 |
| • .....   | 63 |
| • Denominaciones.....   | 63 |
| 3.1.2 Parámetros.....   | 64 |
| • Inventario inicial.....   | 64 |
| • Existencia agregada.....  | 64 |
| • Punto de reposición (límite inferior) .....   | 65 |
| • Demanda. ....   | 65 |
| • Demanda agregada. ....  | 65 |
| • Relación porcentual de demanda sobre existencias.....                                 | 66 |
| • Valor nominal de una denominación .....   | 66 |
| • Capacidad de operación en un nodo.....  | 66 |
| • Capacidad de carga de un vehículo.....  | 67 |
| • Costo por minuto de un viaje en un vehículo .....                                     | 67 |
| • Tiempo de viaje .....   | 67 |
| • Máximo tiempo de viaje permitido en una operación.....                                | 67 |
| • Número mínimo de visitas por cada vehículo.....                                       | 67 |
| • Costo del trayecto por vehículo. ....   | 68 |
| • Costo de penalidad por no atender un nodo. ....                                       | 68 |
| • Costo de penalidad por cargar una denominación de baja demanda. ....                  | 68 |
| • Tope permitido por el valor máximo asegurado mediante la póliza global. ....          | 68 |
| 3.1.3 Definición de las variables.....  | 68 |
| • Costo total .....   | 69 |
| • Valor total transportado .....  | 69 |
| • Trayecto.....   | 69 |
| • Tiempo total de viaje.....  | 69 |
| • Variable de precedencia.....  | 70 |
| • Tiempo de viaje. ....   | 70 |
| • Demanda atendida. ....  | 70 |
| • Demanda no atendida.....  | 70 |
| • Carga inicial, para cada vehículo, al momento de iniciar la ruta. en el vehículo. ... | 70 |
| • Cantidad entregada.....   | 71 |
| • Cantidad entregada por denominación. ....   | 71 |
| • Valor en unidades monetarias de la cantidad entregada por denominación.....           | 71 |

---

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 3.1.4 | Formulación.....   | 71  |
|       | • Función objetivo (ruteo).....  | 71  |
|       | • Restricciones .....  | 72  |
|       | • Función secundaria a optimizar (modelo CARGA) .....  | 74  |
|       | • Restricciones (modelo CARGA) .....   | 75  |
| 3.2   | Implementación y ejecución del modelo .....  | 76  |
| 3.2.1 | Implementación computacional .....   | 76  |
| 3.2.2 | Escenario base.....  | 76  |
|       | • Determinación de las políticas .....   | 76  |
|       | • Análisis descriptivos de los datos históricos de las existencias como soporte a la determinación de la demanda inicial ..... | 79  |
|       | • Determinación de la demanda inicial vía simulación.....  | 97  |
| 3.2.3 | Esquema operativo para la ejecución del modelo .....   | 107 |
| 3.2.4 | Análisis de los resultados de la ejecución del modelo de aplicación inmediata sobre la demanda simulada .....                  | 109 |
|       | MODELAMIENTO DEL RIESGO.....   | 138 |
| 5.1   | Implementación de la red bayesiana para modelar el riesgo operativo en operaciones por medio de transporte terrestre.....      | 138 |
| 5.2   | Ejecución del modelo de riesgo para el medio de transporte terrestre .....   | 144 |
| 5.2.1 | Nivel de exposición al riesgo de una operación fallida. ....   | 145 |
| 5.2.2 | Nivel de exposición al riesgo de un evento catastrófico.....   | 145 |
| 5.3   | Implementación de la red bayesiana para modelar el riesgo operativo en operaciones por medio de transporte aéreo.....          | 146 |
| 5.3.1 | Red bayesiana para modelar el riesgo operativo de falla en operaciones por medio de transporte aéreo. ....                     | 147 |
| 5.3.2 | Red bayesiana para modelar el riesgo operativo de un evento catastrófico en operaciones por medio de transporte aéreo.....     | 155 |
| 5.4   | Ejecución del modelo de riesgo para el medio de transporte aéreo .....   | 157 |
| 5.4.1 | Nivel de exposición al riesgo de una operación fallida. ....   | 157 |
| 5.4.2 | Nivel de exposición al riesgo de un evento catastrófico.....   | 158 |
| 5.4.3 | Perfiles de riesgo por nodo. ....  | 159 |
|       | • Perfiles de riesgo para el evento operación fallida, por nodo. ....  | 159 |
|       | • Perfiles de riesgo para el evento catastrófico, por nodo.....  | 160 |
| 5.5   | Perfil de riesgo integral .....  | 161 |
| 5.6   | Análisis correlacional.....  | 161 |
| 5.6.1 | Correlación entre los dos eventos de riesgo.....   | 161 |

---

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| •     | Análisis conjunto del riesgo, para el nivel medio.....  | 162 |
| •     | Análisis conjunto del riesgo, para el nivel alto.....   | 162 |
| •     | Análisis conjunto del riesgo, para el nivel inaceptable. ....   | 163 |
| 5.6.2 | Correlación entre el evento de riesgo falla y costo de la operación.....                                  | 164 |
| •     | Análisis conjunto de los riesgos y costos, para el nivel medio.....                                       | 164 |
| •     | Análisis conjunto de los riesgos y costos, para el nivel alto.....  | 165 |
| •     | Análisis conjunto de los riesgos y costos, para el nivel inaceptable. ....                                | 166 |
| 5.6.3 | Correlación entre el evento de riesgo falla en la operación y los valores transportados a cada nodo. .... | 168 |
| •     | Análisis conjunto de los riesgos y valores transportados, para el nivel medio.....                        | 168 |
| •     | Análisis conjunto de los riesgos y valores transportados, para el nivel alto.....                         | 169 |
| •     | Análisis conjunto de los riesgos y costos, para el nivel inaceptable. ....                                | 169 |
| 5.6.4 | Conclusiones y recomendaciones de la ejecución del modelo de aplicación inmediata. ....                   | 170 |
|       | .....   | 172 |
|       | OPTIMIZACIÓN Y RIESGO DE MANERA CONJUNTA .....  | 173 |
| 6.1   | Modelación matemática del modelo integral de planeación .....   | 174 |
| 6.1.1 | Determinación de los conjuntos del modelo integral de planeación .....                                    | 174 |
| •     | Periodo de planeación .....   | 175 |
| 6.1.2 | Parámetros del modelo integral de planeación .....  | 175 |
| •     | Factor de distancia: .....  | 175 |
| •     | Nivel de riesgo insignificante asociado a un nodo .....   | 175 |
| •     | Nivel de riesgo insignificante asociado a un nodo .....   | 175 |
| •     | Condiciones climáticas en el nodo $j$ en el día $t$ . ....  | 176 |
| •     | Condiciones climáticas en el nodo $j$ en el día $t$ .....   | 176 |
| 6.1.3 | Definición de las variables.....  | 176 |
| •     | Costo total .....   | 176 |
| •     | Valor total transportado .....  | 176 |
| •     | Trayecto.....   | 176 |
| •     | Tiempo total de viaje.....  | 177 |
| •     | Variable de precedencia.....  | 177 |
| •     | Valor en unidades monetarias de la cantidad entregada por denominación.....                               | 177 |
| 6.1.4 | Formulación.....  | 177 |
| •     | Función objetivo (ruteo).....   | 177 |
| •     | Restricciones .....   | 178 |

- Función secundaria a optimizar (modelo CARGA) ..... 179
- Restricciones (modelo CARGA) ..... 180
- 6.2 Implementación y ejecución del modelo integral de planeación ..... 181
  - 6.2.1 Implementación computacional ..... 181
  - 6.2.2 Escenario base para el modelo integral de planeación..... 181
    - Determinación de las políticas ..... 182
    - $t$  ..... 185
  - 6.2.3 Nivel de riesgo asociado a un nodo..... 187
  - 6.2.4 Demanda simulada..... 190
  - 6.2.5 Esquema operativo para la ejecución del modelo ..... 190
  - 6.2.6 Análisis de los resultados de la ejecución del modelo integral de planeación sobre la demanda simulada ..... 190
- CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS DE INVESTIGACIÓN ..... 192
  - 7.1 Conclusiones..... 192
  - 7.2 Perspectivas de investigación ..... 193
- Referencias..... 195

## Lista de Figuras

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| FIGURA 1  | PROCESO DE MODELAMIENTO: ADAPTACIÓN A LA PROPUESTA METODOLÓGICA (TAHA, 2012) CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....  | 34 |
| FIGURA 2  | PROCESO DE GESTIÓN DEL RIESGO OPERATIVO DENTRO DEL MARCO ESTABLECIDO POR LOS COMITÉS DE BASILEA. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....  | 36 |
| FIGURA 3  | MODELO DE ADMINISTRACIÓN DEL RIESGO DEL BANCO DE LA REPÚBLICA. ADAPTADO DE (SUBGERENCIA DE GESTIÓN DE RIESGO OPERATIVO, 2013) .....   | 38 |
| FIGURA 4  | ENFOQUES METODOLÓGICOS PARA LA MEDICIÓN DEL RIESGO OPERATIVO. GRÁFICA TOMADA LA REVISTA DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. (CASTILLO & MENDOZA, 2004)41  | 41 |
| FIGURA 5  | DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE LAS SUCURSALES DEL BANCO DE LA REPÚBLICA CON FUNCIONES DE TESORERÍA. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR.....  | 45 |
| FIGURA 6  | PERSPECTIVA DEL COMPLEJO DE LA CENTRAL DE EFECTIVO. RECUPERADO DE <a href="http://www.banrep.gov.co">HTTP://WWW.BANREP.GOV.CO</a> . ....  | 46 |
| FIGURA 7  | GOOGLE. (S.F.). [MAPA DE BOGOTÁ, INTERCEPCIÓN CALLE 26 CON CARRERA 68) EN GOOGLE MAPS]. RECUPERADO EL 27 DE JULIO, 2017, DE: <a href="https://www.google.com.co/maps/">HTTPS://WWW.GOOGLE.COM.CO/MAPS/</a> . .... | 47 |
| FIGURA 8  | CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE EFECTIVO DEL BANCO DE LA REPÚBLICA. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....  | 49 |
| FIGURA 9  | ESQUEMA DE UNA OPERACIÓN DE TRANSPORTE DE VALORES EN EL BANCO DE LA REPÚBLICA. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR.....   | 50 |
| FIGURA 10 | ESQUEMA DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA VALORACIÓN DEL RIESGO. ADAPTADO DE CASTILLO HERNÁNDEZ, 2006. ....   | 51 |
| FIGURA 11 | DIAGRAMA CAUSA EFECTO PARA EL EVENTO DE RIESGO “OPERACIÓN FALLIDA” CONSISTENTE EN UN ASALTO. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....  | 52 |
| FIGURA 12 | DIAGRAMA CAUSA EFECTO PARA EL EVENTO DE RIESGO “CATASTRÓFICO” CONSISTENTE EN UN ASALTO. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR.....  | 53 |
| FIGURA 13 | DIAGRAMA CAUSA EFECTO PARA EL EVENTO DE RIESGO “CATASTRÓFICO” CONSISTENTE EN UN SINIESTRO AÉREO. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....  | 53 |
| FIGURA 14 | ESQUEMA DE UNA RED BAYESIANA QUE MODELA EL RIESGO INHERENTE A UNA OPERACIÓN DE TRANSPORTE DE VALORES POR VÍA TERRESTRE DESDE UN SITIO ESPECIFICO. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....                                 | 54 |
| FIGURA 15 | ESQUEMA DE UNA RED BAYESIANA QUE MODELA EL RIESGO INHERENTE A UNA OPERACIÓN DE TRANSPORTE DE VALORES POR VÍA AÉREA A UN SITIO ESPECIFICO. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR.....  | 57 |
| FIGURA 16 | DIAGRAMA DE CAJA LA DISTRIBUCIÓN DE DATOS DE LA VARIABLE EXISTENCIAS EN NÚMERO DE PACAS [NPACSA]. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR.....  | 81 |
| FIGURA 17 | HISTOGRAMA LA DISTRIBUCIÓN DE DATOS DE LA VARIABLE EXISTENCIAS EN NÚMERO DE PACAS [NPACSA]. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR.....  | 82 |
| FIGURA 18 | DIAGRAMA DE CAJA COMPARATIVO DE LAS DISTRIBUCIONES DE DATOS DE LA VARIABLE EXISTENCIAS EN NÚMERO DE PACAS [NPACSA], POR DENOMINACIÓN. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR.....  | 83 |
| FIGURA 19 | DIAGRAMA DE BARRAS QUE MUESTRA LA PARTICIPACIÓN DEL TOTAL DE PACAS EN EXISTENCIAS PARA EL PERIODO EN ESTUDIO, POR DENOMINACIÓN. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....   | 84 |
| FIGURA 20 | HISTOGRAMA LA DISTRIBUCIÓN DE DATOS DE LA VARIABLE EXISTENCIAS EN NÚMERO DE PACAS [NPACSA], PARA LA DENOMINACIÓN JÚPITER. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR.....  | 85 |
| FIGURA 21 | DIAGRAMA DE CAJA LA DISTRIBUCIÓN DE DATOS DE LA VARIABLE EXISTENCIAS EN NÚMERO DE PACAS [NPACSA], PARA LA DENOMINACIÓN JÚPITER. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....   | 86 |
| FIGURA 22 | HISTOGRAMA LA DISTRIBUCIÓN DE DATOS DE LA VARIABLE EXISTENCIAS EN NÚMERO DE PACAS [NPACSA], PARA LA DENOMINACIÓN MERCURIO. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR.....   | 87 |

|                  |   |            |
|------------------|---|------------|
| <b>FIGURA 23</b> | DIAGRAMA DE CAJA LA DISTRIBUCIÓN DE DATOS DE LA VARIABLE EXISTENCIAS EN NÚMERO DE PACAS [NPACSA], PARA LA DENOMINACIÓN MERCURIO. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR.....   | <b>87</b>  |
| <b>FIGURA 24</b> | HISTOGRAMA LA DISTRIBUCIÓN DE DATOS DE LA VARIABLE EXISTENCIAS EN NÚMERO DE PACAS [NPACSA], PARA LA DENOMINACIÓN PLUTÓN. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR.....   | <b>88</b>  |
| <b>FIGURA 25</b> | DIAGRAMA DE CAJA LA DISTRIBUCIÓN DE DATOS DE LA VARIABLE EXISTENCIAS EN NÚMERO DE PACAS [NPACSA], PARA LA DENOMINACIÓN PLUTÓN. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....  | <b>89</b>  |
| <b>FIGURA 26</b> | HISTOGRAMA LA DISTRIBUCIÓN DE DATOS DE LA VARIABLE EXISTENCIAS EN NÚMERO DE PACAS [NPACSA], PARA LA DENOMINACIÓN URANO. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....   | <b>90</b>  |
| <b>FIGURA 27</b> | DIAGRAMA DE CAJA LA DISTRIBUCIÓN DE DATOS DE LA VARIABLE EXISTENCIAS EN NÚMERO DE PACAS [NPACSA], PARA LA DENOMINACIÓN URANO. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR.  | <b>90</b>  |
| <b>FIGURA 28</b> | DIAGRAMA DE CAJA COMPARATIVO DE LAS DISTRIBUCIONES DE DATOS DE LA VARIABLE EXISTENCIAS EN NÚMERO DE PACAS [NPACSA], POR OFICINA. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR...   | <b>91</b>  |
| <b>FIGURA 29</b> | DIAGRAMA DE CAJA COMPARATIVO DE LAS DISTRIBUCIONES DE DATOS DE LA VARIABLE EXISTENCIAS EN NÚMERO DE PACAS [NPACSA], PARA LA DENOMINACIÓN JÚPITER, POR OFICINA. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....  | <b>94</b>  |
| <b>FIGURA 30</b> | DIAGRAMA DE CAJA COMPARATIVO DE LAS DISTRIBUCIONES DE DATOS DE LA VARIABLE EXISTENCIAS EN NÚMERO DE PACAS [NPACSA], PARA LA DENOMINACIÓN MERCURIO, POR OFICINA. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....   | <b>94</b>  |
| <b>FIGURA 31</b> | DIAGRAMA DE CAJA COMPARATIVO DE LAS DISTRIBUCIONES DE DATOS DE LA VARIABLE EXISTENCIAS EN NÚMERO DE PACAS [NPACSA], PARA LA DENOMINACIÓN PLUTÓN, POR OFICINA. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....   | <b>95</b>  |
| <b>FIGURA 32</b> | DIAGRAMA DE CAJA COMPARATIVO DE LAS DISTRIBUCIONES DE DATOS DE LA VARIABLE EXISTENCIAS EN NÚMERO DE PACAS [NPACSA], PARA LA DENOMINACIÓN URANO, POR OFICINA. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....  | <b>96</b>  |
| <b>FIGURA 33</b> | HISTOGRAMA DE LA DISTRIBUCIÓN DE DATOS DE LA VARIABLE DEMANDA TOTAL SIMULADA EN NÚMERO DE PACAS. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....  | <b>98</b>  |
| <b>FIGURA 34</b> | DIAGRAMA DE CAJA LAS DISTRIBUCIONES DE DATOS DE LA VARIABLE DEMANDA TOTAL SIMULADA EN NÚMERO DE PACAS [NPACSA], CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR.....  | <b>99</b>  |
| <b>FIGURA 35</b> | DIAGRAMA DE CAJA COMPARATIVO DE LAS DISTRIBUCIONES DE DATOS DE LA VARIABLE DEMANDA TOTAL SIMULADA EN NÚMERO DE PACAS [NPACSA], POR DENOMINACIÓN. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR.....   | <b>100</b> |
| <b>FIGURA 36</b> | DIAGRAMA DE CAJA COMPARATIVO DE LAS DISTRIBUCIONES DE DATOS DE LA VARIABLE DEMANDA TOTAL SIMULADA EN NÚMERO DE PACAS (NPACAS), POR OFICINA. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR.....  | <b>101</b> |
| <b>FIGURA 37</b> | DIAGRAMA DE CAJA COMPARATIVO DE LAS DISTRIBUCIONES DE DATOS DE LA VARIABLE DEMANDA SIMULADA EN NÚMERO DE PACAS (NPACAS), POR OFICINA, PARA LA DENOMINACIÓN JÚPITER. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....   | <b>103</b> |
| <b>FIGURA 38</b> | DIAGRAMA DE CAJA COMPARATIVO QUE MUESTRA LAS DISTRIBUCIONES DE DATOS DE LA VARIABLE DEMANDA SIMULADA EN NÚMERO DE PACAS (NPACAS), POR OFICINA, PARA LA DENOMINACIÓN MERCURIO. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR.....  | <b>104</b> |
| <b>FIGURA 39</b> | DIAGRAMA DE CAJA COMPARATIVO QUE MUESTRA LAS DISTRIBUCIONES DE DATOS DE LA VARIABLE DEMANDA SIMULADA EN NÚMERO DE PACAS (NPACAS), POR OFICINA, PARA LA DENOMINACIÓN PLUTÓN. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR.....  | <b>105</b> |
| <b>FIGURA 40</b> | DIAGRAMA DE CAJA COMPARATIVO QUE MUESTRA LAS DISTRIBUCIONES DE DATOS DE LA VARIABLE DEMANDA SIMULADA EN NÚMERO DE PACAS (NPACAS), POR OFICINA, PARA LA DENOMINACIÓN URANO. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....  | <b>106</b> |
| <b>FIGURA 41</b> | ESQUEMA DEL PROCESO OPERATIVO MEDIANTE EL QUE SE EJECUTA EL MODELO DE OPTIMIZACIÓN. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....   | <b>107</b> |
| <b>FIGURA 42</b> | VISTA DEL TABLERO DEL CONTROL DEL ARCHIVO EXCEL “CENTRO DE CONTROL” MEDIANTE EL QUE SE ADMINISTRA LA INFORMACIÓN QUE SE INVOLUCRA Y QUE RESULTA DE LA EJECUCIÓN DEL MODELO DE OPTIMIZACIÓN. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR.....                              | <b>108</b> |
| <b>FIGURA 43</b> | HISTOGRAMA QUE MUESTRA LA PARTICIPACIÓN PORCENTUAL DE LA VARIABLE NÚMERO DE SUCURSALES VISITADAS EN UNA OPERACIÓN, RESULTADO DE LA EJECUCIÓN DEL MODELO SOBRE LOS ESCENARIOS DETERMINADOS EN EL EJERCICIO DE SIMULACIÓN. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR..... | <b>110</b> |

|                  |  |            |
|------------------|--|------------|
| <b>FIGURA 44</b> | DIAGRAMA DE PARETO QUE MUESTRA LA PARTICIPACIÓN ABSOLUTA Y PORCENTUAL DE LA VARIABLE NÚMERO DE VISITAS POR SUCURSAL, RESULTADO DE LA EJECUCIÓN DEL MODELO SOBRE LOS ESCENARIOS DETERMINADOS EN EL EJERCICIO DE SIMULACIÓN. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR.....                                    | <b>111</b> |
| <b>FIGURA 45</b> | DIAGRAMA DE PARETO QUE MUESTRA LA PARTICIPACIÓN ABSOLUTA Y PORCENTUAL DE LA VARIABLE NÚMERO DE ENTREGAS POR DENOMINACIÓN, RESULTADO DE LA EJECUCIÓN DEL MODELO SOBRE LOS ESCENARIOS DETERMINADOS EN EL EJERCICIO DE SIMULACIÓN. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR.....                               | <b>112</b> |
| <b>FIGURA 46</b> | DIAGRAMA DE CAJAS COMPARATIVO QUE MUESTRA LAS DISTRIBUCIONES DE DATOS, POR OFICINA, DE LA VARIABLE NÚMERO DE PACAS TRANSPORTADAS EN UNA OPERACIÓN. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR.....  | <b>113</b> |
| <b>FIGURA 47</b> | DIAGRAMA DE PARETO QUE MUESTRA LA PARTICIPACIÓN ABSOLUTA Y PORCENTUAL DE LA VARIABLE NÚMERO DE PACAS TRANSPORTADAS EN UNA OPERACIÓN, POR SUCURSAL, RESULTADO DE LA EJECUCIÓN DEL MODELO SOBRE LOS ESCENARIOS DETERMINADOS EN EL EJERCICIO DE SIMULACIÓN. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR.....      | <b>114</b> |
| <b>FIGURA 48</b> | DIAGRAMA DE CAJAS COMPARATIVO QUE MUESTRA LAS DISTRIBUCIONES DE DATOS, POR DENOMINACIÓN, DE LA VARIABLE NÚMERO DE PACAS TRANSPORTADAS EN UNA OPERACIÓN. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....  | <b>115</b> |
| <b>FIGURA 49</b> | DIAGRAMA DE PARETO QUE MUESTRA LA PARTICIPACIÓN ABSOLUTA Y PORCENTUAL DE LA VARIABLE NÚMERO DE PACAS TRANSPORTADAS EN UNA OPERACIÓN, POR DENOMINACIÓN, RESULTADO DE LA EJECUCIÓN DEL MODELO SOBRE LOS ESCENARIOS DETERMINADOS EN EL EJERCICIO DE SIMULACIÓN. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. .... | <b>116</b> |
| <b>FIGURA 50</b> | DIAGRAMA DE CAJAS QUE MUESTRA LA DISTRIBUCIÓN DE DATOS, DE LA VARIABLE COSTO DE UNA OPERACIÓN, EN MILLONES DE PESOS. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....   | <b>117</b> |
| <b>FIGURA 51</b> | HISTOGRAMA QUE MUESTRA LA DISTRIBUCIÓN DE DATOS, DE LA VARIABLE COSTO DE UNA OPERACIÓN. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....  | <b>118</b> |
| <b>FIGURA 52</b> | DIAGRAMA DE CAJAS QUE MUESTRA LA DISTRIBUCIÓN DE DATOS, DE LA VARIABLE COSTO DE UNA OPERACIÓN, POR VEHÍCULO, EN MILLONES DE PESOS. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....   | <b>119</b> |
| <b>FIGURA 53</b> | HISTOGRAMA QUE MUESTRA LA DISTRIBUCIÓN DE DATOS, DE LA VARIABLE COSTO POR VEHÍCULO. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....  | <b>120</b> |
| <b>FIGURA 54</b> | DIAGRAMA DE CAJAS COMPARATIVO QUE MUESTRA LAS DISTRIBUCIONES DE DATOS, POR TIPO DE VEHÍCULO, DE LA VARIABLE NÚMERO DE PACAS TRANSPORTADAS EN UNA OPERACIÓN. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....  | <b>120</b> |
| <b>FIGURA 55</b> | DIAGRAMA DE CAJAS QUE MUESTRA LA DISTRIBUCIÓN DE DATOS, DE LA VARIABLE COSTO DE UNA OPERACIÓN, POR NODO, EN MILLONES DE PESOS. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....   | <b>122</b> |
| <b>FIGURA 56</b> | HISTOGRAMA QUE MUESTRA LA DISTRIBUCIÓN DE DATOS, DE LA VARIABLE COSTO POR NODO. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....  | <b>122</b> |
| <b>FIGURA 57</b> | DIAGRAMA DE CAJAS COMPARATIVO QUE MUESTRA LAS DISTRIBUCIONES DE DATOS, POR NODO, DE LA VARIABLE NÚMERO DE PACAS TRANSPORTADAS EN UNA OPERACIÓN. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR.....   | <b>123</b> |
| <b>FIGURA 58</b> | DIAGRAMA DE CAJAS QUE MUESTRA LA DISTRIBUCIÓN DE DATOS, DE LA VARIABLE VALOR TRANSPORTADO EN UNA OPERACIÓN. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR.....   | <b>124</b> |
| <b>FIGURA 59</b> | HISTOGRAMA QUE MUESTRA LA DISTRIBUCIÓN DE DATOS, DE LA VARIABLE VALOR TRANSPORTADO EN UNA OPERACIÓN. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR.....  | <b>125</b> |
| <b>FIGURA 60</b> | DIAGRAMA DE CAJAS QUE MUESTRA LA DISTRIBUCIÓN DE DATOS, DE LA VARIABLE VALOR TRANSPORTADO POR VEHÍCULO. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR.....   | <b>126</b> |
| <b>FIGURA 61</b> | HISTOGRAMA QUE MUESTRA LA DISTRIBUCIÓN DE DATOS, DE LA VARIABLE VALOR TRANSPORTADO, POR VEHÍCULO. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR.....   | <b>127</b> |
| <b>FIGURA 57</b> | DIAGRAMA DE CAJAS COMPARATIVO QUE MUESTRA LAS DISTRIBUCIONES DE DATOS, POR TIPO DE VEHÍCULO, DE LA VARIABLE VALOR TRANSPORTADO. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR....  | <b>127</b> |
| <b>FIGURA 63</b> | DIAGRAMA DE CAJAS QUE MUESTRA LA DISTRIBUCIÓN DE DATOS, DE LA VARIABLE VALOR TRANSPORTADO POR NODO. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....  | <b>129</b> |
| <b>FIGURA 64</b> | HISTOGRAMA QUE MUESTRA LA DISTRIBUCIÓN DE DATOS, DE LA VARIABLE VALOR TRANSPORTADO, POR NODO. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....  | <b>129</b> |
| <b>FIGURA 65</b> | DIAGRAMA DE CAJAS COMPARATIVO QUE MUESTRA LAS DISTRIBUCIONES DE DATOS, POR NODO, DE LA VARIABLE VALOR TRANSPORTADO. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR.....   | <b>130</b> |

|                  |   |            |
|------------------|---|------------|
| <b>FIGURA 66</b> | DIAGRAMA DE CAJAS COMPARATIVO QUE MUESTRA LAS DISTRIBUCIONES DE DATOS, POR NÚMERO DE VISITAS REALIZADAS, DE LA VARIABLE COSTO DE LA OPERACIÓN. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR.....   | <b>131</b> |
| <b>FIGURA 67</b> | DIAGRAMA DE CAJAS COMPARATIVO QUE MUESTRA LAS DISTRIBUCIONES DE DATOS, POR NÚMERO DE VISITAS REALIZADAS, DE LA VARIABLE VALOR TRANSPORTADO EN UNA OPERACIÓN. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....  | <b>132</b> |
| <b>FIGURA 68</b> | DIAGRAMA DE DISPERSIÓN MUESTRA LA CORRELACIÓN DE LAS VARIABLES COSTO DE LA OPERACIÓN Y EL VALOR DE LA FUNCIÓN OBJETIVO DEL MODELO DE RUTEO. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR.....  | <b>133</b> |
| <b>FIGURA 69</b> | DIAGRAMA DE DISPERSIÓN MUESTRA LA CORRELACIÓN DE LAS VARIABLES COSTO DE LA OPERACIÓN Y EL VALOR TRANSPORTADO EN UNA OPERACIÓN. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR..  | <b>134</b> |
| <b>FIGURA 70</b> | DIAGRAMA DE DISPERSIÓN MUESTRA LA CORRELACIÓN DE LAS VARIABLES COSTO DE LA OPERACIÓN Y EL VALOR DE LA FUNCIÓN OBJETIVO DEL MODELO DE CARGA. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR.....  | <b>135</b> |
| <b>FIGURA 71</b> | DIAGRAMA DE DISPERSIÓN MUESTRA LA CORRELACIÓN DE LAS VARIABLES VALOR DE LA FUNCIÓN OBJETIVO DEL MODELO DE RUTEO Y EL VALOR DE LA FUNCIÓN OBJETIVO DEL MODELO DE CARGA. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR.....                                     | <b>136</b> |
| <b>FIGURA 72</b> | DIAGRAMA ELABORADO EN HUGIN EXPERT DE LA RED BAYESIANA PARA MODELAR EL RIESGO ASOCIADO A UNA OPERACIÓN DE TRANSPORTE REALIZADA POR MEDIO DE TRANSPORTE TERRESTRE.....   | <b>139</b> |
| <b>FIGURA 73</b> | DIAGRAMA CON EL REPORTE DEL RESULTADO DEL NIVEL DE EXPOSICIÓN AL RIESGO DE UNA OPERACIÓN FALLIDA, ELABORADO EN HUGIN EXPERT, ASOCIADO A UNA OPERACIÓN DE TRANSPORTE REALIZADA POR MEDIO DE TRANSPORTE TERRESTRE.....                      | <b>145</b> |
| <b>FIGURA 74</b> | DIAGRAMA CON EL REPORTE DEL RESULTADO DEL NIVEL DE EXPOSICIÓN AL RIESGO DE UN EVENTO CATASTRÓFICO, ELABORADO EN HUGIN EXPERT, ASOCIADO A UNA OPERACIÓN DE TRANSPORTE REALIZADA POR MEDIO DE TRANSPORTE TERRESTRE.....                     | <b>146</b> |
| <b>FIGURA 75</b> | DIAGRAMA ELABORADO EN HUGIN EXPERT DE LA RED BAYESIANA PARA MODELAR EL RIESGO DE FALLA ASOCIADO A UNA OPERACIÓN DE TRANSPORTE REALIZADA POR VÍA AÉREA..   | <b>147</b> |
| <b>FIGURA 76</b> | DIAGRAMA ELABORADO EN HUGIN EXPERT DE LA RED BAYESIANA PARA MODELAR EL RIESGO DE UN EVENTO CATASTRÓFICO ASOCIADO A UNA OPERACIÓN DE TRANSPORTE REALIZADA POR VÍA AÉREA. ....  | <b>156</b> |
| <b>FIGURA 77</b> | DIAGRAMA CON EL REPORTE DEL RESULTADO DEL NIVEL DE EXPOSICIÓN AL RIESGO DE UNA FALLA EN LA OPERACIÓN, ELABORADO EN HUGIN EXPERT, ASOCIADO A UNA OPERACIÓN DE TRANSPORTE REALIZADA POR MEDIO DE TRANSPORTE AÉREO.....                      | <b>158</b> |
| <b>FIGURA 78</b> | DIAGRAMA CON EL REPORTE DEL RESULTADO DEL NIVEL DE EXPOSICIÓN AL RIESGO DE UN EVENTO CATASTRÓFICO, ELABORADO EN HUGIN EXPERT, ASOCIADO A UNA OPERACIÓN DE   | <b>159</b> |
| <b>FIGURA 79</b> | DIAGRAMA TIPO RADAR CON EL PERFIL DEL RIESGO INTEGRAL PARA LA OPERACIÓN DE TRANSPORTE DE VALORES.....   | <b>161</b> |
| <b>FIGURA 68</b> | DIAGRAMA CON LA DISTRIBUCIÓN CONJUNTA DE LOS NIVELES MEDIOS DE RIESGO DE FALLA Y CATASTRÓFICO POR NODO.....   | <b>162</b> |
| <b>FIGURA 81</b> | DIAGRAMA CON LA DISTRIBUCIÓN CONJUNTA DE LOS NIVELES ALTOS DE RIESGO DE FALLA Y CATASTRÓFICO POR NODO.....  | <b>163</b> |
| <b>FIGURA 82</b> | DIAGRAMA CON LA DISTRIBUCIÓN CONJUNTA DE LOS NIVELES INACEPTABLES DE RIESGO DE FALLA Y CATASTRÓFICO POR NODO.....   | <b>164</b> |
| <b>FIGURA 83</b> | DIAGRAMA CON LA DISTRIBUCIÓN CONJUNTA DE LOS NIVELES MEDIOS DE RIESGO DE FALLA, RIESGO DE UN EVENTO CATASTRÓFICO Y COSTO; POR NODO. LA VARIABLE COSTOS ESTÁ REPRESENTADA POR EL TAMAÑO DE LA BURBUJA. ....                                | <b>165</b> |
| <b>FIGURA 84</b> | DIAGRAMA CON LA DISTRIBUCIÓN CONJUNTA DE LOS NIVELES ALTOS DE RIESGO DE FALLA, RIESGO DE UN EVENTO CATASTRÓFICO Y COSTO; POR NODO. LA VARIABLE COSTOS ESTÁ REPRESENTADA POR EL TAMAÑO DE LA BURBUJA. ....                                 | <b>166</b> |
| <b>FIGURA 85</b> | DIAGRAMA CON LA DISTRIBUCIÓN CONJUNTA DE LOS NIVELES INACEPTABLES DE RIESGO DE FALLA, RIESGO DE UN EVENTO CATASTRÓFICO Y COSTO; POR NODO. LA VARIABLE COSTOS ESTÁ REPRESENTADA POR EL TAMAÑO DE LA BURBUJA. ....                          | <b>167</b> |
| <b>FIGURA 86</b> | DIAGRAMA CON LA DISTRIBUCIÓN CONJUNTA DE LOS NIVELES MEDIOS DE RIESGO DE FALLA, RIESGO DE UN EVENTO CATASTRÓFICO Y VALORES TRANSPORTADOS; POR NODO. LA VARIABLE VALORES TRANSPORTADOS ESTÁ REPRESENTADA POR EL TAMAÑO DE LA BURBUJA. .... | <b>168</b> |

- FIGURA 87** DIAGRAMA CON LA DISTRIBUCIÓN CONJUNTA DE LOS NIVELES ALTOS DE RIESGO DE FALLA, RIESGO DE UN EVENTO CATASTRÓFICO Y VALORES TRANSPORTADOS; POR NODO. LA VARIABLE VALORES TRANSPORTADOS ESTÁ REPRESENTADA POR EL TAMAÑO DE LA BURBUJA. **.169**
- FIGURA 88** DIAGRAMA CON LA DISTRIBUCIÓN CONJUNTA DE LOS NIVELES INACEPTABLE DE RIESGO DE FALLA, RIESGO DE UN EVENTO CATASTRÓFICO Y VALORES TRANSPORTADOS; POR NODO. LA VARIABLE VALORES TRANSPORTADOS ESTÁ REPRESENTADA POR EL TAMAÑO DE LA BURBUJA. **.170**
- FIGURA 89** DIAGRAMA CON LA CURVA QUE RELACIONA LAS VARIABLES DISTANCIAS RECORRIDA EN UN TRAYECTO TERRESTRE  $S_j$  Y  $FACTDIS_j$ . **.....187**
- FIGURA 90** DIAGRAMA ELABORADO EN HUGIN EXPERT DE LA RED BAYESIANA PARA MODELAR EL RIESGO DE UN EVENTO CATASTRÓFICO. **.....188**

## Lista de Tablas

|   |           |
|---|-----------|
| <b>TABLA 1</b> SUCURSALES DEL BANCO DE LA REPUBLICA CON FUNCIONES DE TESORERÍA. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR.....  | <b>45</b> |
| <b>TABLA 2</b> LISTADOS DE LAS OFICINAS QUE CONSTITUYEN LOS NODOS QUE CONFORMAN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE EFECTIVO. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....   | <b>62</b> |
| <b>TABLA 3</b> LISTADO DE VEHÍCULOS QUE PARTICIPAN EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE EFECTIVO. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....   | <b>63</b> |
| <b>TABLA 4</b> LISTADO DE LAS DENOMINACIONES QUE SON OBJETO DE TRANSPORTE EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....  | <b>64</b> |
| <b>TABLA 5</b> NIVEL MÍNIMO DE EXISTENCIA, EN NÚMERO DE PACAS, POR OFICINA Y POR DENOMINACIÓN. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....  | <b>77</b> |
| <b>TABLA 6</b> NÚMERO MÍNIMO DE VISITAS POR UN VEHÍCULO EN UNA RUTA. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR.....   | <b>77</b> |
| <b>TABLA 7</b> TIEMPO MÁXIMO DE PERMANENCIA DE UN VEHÍCULO EN UNA RUTA. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR.....  | <b>78</b> |
| <b>TABLA 8</b> CAPACIDAD DE OPERACIÓN, EN NÚMERO DE PACAS, PARA CADA NODO. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....  | <b>78</b> |
| <b>TABLA 9</b> CAPACIDAD DE OPERACIÓN, EN NÚMERO DE PACAS, PARA CADA VEHÍCULO. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....  | <b>79</b> |
| <b>TABLA 10</b> VALORES CALCULADOS DE LOS ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA VARIABLE EXISTENCIAS EN NÚMERO DE PACAS (NPCAS), CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....   | <b>81</b> |
| <b>TABLA 11</b> TABLA DE FRECUENCIAS DEL TOTAL DE PACAS, EN EXISTENCIA POR DENOMINACIONES. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....  | <b>83</b> |
| <b>TABLA 12</b> VALORES CALCULADOS DE LOS ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA VARIABLE EXISTENCIAS EN NÚMERO DE PACAS (NPCAS), PARA LA DENOMINACIÓN JÚPITER. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....   | <b>84</b> |
| <b>TABLA 13</b> VALORES CALCULADOS DE LOS ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA VARIABLE EXISTENCIAS EN NÚMERO DE PACAS (NPCAS), PARA LA DENOMINACIÓN MERCURIO. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....  | <b>86</b> |
| <b>TABLA 14</b> VALORES CALCULADOS DE LOS ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA EXISTENCIAS EN NÚMERO DE PACAS (NPCAS), PARA LA DENOMINACIÓN PLUTÓN. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....   | <b>88</b> |
| <b>TABLA 15</b> VALORES CALCULADOS DE LOS ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA VARIABLE EXISTENCIAS EN NÚMERO DE PACAS (NPCAS), PARA LA DENOMINACIÓN URANO. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....   | <b>89</b> |
| <b>TABLA 16</b> VALORES CALCULADOS DE LOS ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS, RELATIVOS A LA FORMA, DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA VARIABLE EXISTENCIAS EN NÚMERO DE PACAS (NPCAS), POR OFICINA. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....                                   | <b>92</b> |
| <b>TABLA 17</b> VALORES CALCULADOS DE LOS ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS, RELATIVOS A LA POSICIÓN, DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA VARIABLE EXISTENCIAS EN NÚMERO DE PACAS (NPCAS), POR OFICINA. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....                                | <b>92</b> |
| <b>TABLA 18</b> VALORES CALCULADOS DE LOS ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS, RELATIVOS A LA POSICIÓN, DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA VARIABLE EXISTENCIAS EN NÚMERO DE PACAS (NPCAS), POR OFICINA, PARA LA DENOMINACIÓN JÚPITER. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....  | <b>94</b> |
| <b>TABLA 19</b> VALORES CALCULADOS DE LOS ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS, RELATIVOS A LA POSICIÓN, DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA VARIABLE EXISTENCIAS EN NÚMERO DE PACAS (NPCAS), POR OFICINA, PARA LA DENOMINACIÓN MERCURIO. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. .... | <b>95</b> |
| <b>TABLA 20</b> VALORES CALCULADOS DE LOS ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS, RELATIVOS A LA POSICIÓN, DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA VARIABLE EXISTENCIAS EN NÚMERO DE PACAS (NPCAS), POR OFICINA, PARA LA DENOMINACIÓN PLUTÓN. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....   | <b>96</b> |

|   |            |
|---|------------|
| <b>TABLA 21</b> VALORES CALCULADOS DE LOS ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS, RELATIVOS A LA POSICIÓN, DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA VARIABLE EXISTENCIAS EN NÚMERO DE PACAS (NPCAS), POR OFICINA, PARA LA DENOMINACIÓN URANO. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR.....       | <b>97</b>  |
| <b>TABLA 22</b> ESTADÍSTICAS DESCRIPTIVAS DE LA VARIABLE DEMANDA INICIAL TOTAL EN NÚMERO DE PACAS (NPCAS).....  | <b>98</b>  |
| <b>TABLA 23</b> VALORES CALCULADOS DE LOS ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS, RELATIVOS A LA FORMA, DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA VARIABLE DEMANDA SIMULADA EN NÚMERO DE PACAS (NPCAS), POR DENOMINACIÓN. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR.....                            | <b>100</b> |
| <b>TABLA 24</b> VALORES CALCULADOS DE LOS ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS, RELATIVOS A LA FORMA, DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA VARIABLE DEMANDA SIMULADA EN NÚMERO DE PACAS (NPCAS), POR OFICINA CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....                                 | <b>101</b> |
| <b>TABLA 25</b> VALORES CALCULADOS DE LOS ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS, RELATIVOS A LA FORMA, DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA VARIABLE DEMANDA SIMULADA EN NÚMERO DE PACAS (NPCAS), POR OFICINA, PARA LA DENOMINACIÓN JÚPITER. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....  | <b>102</b> |
| <b>TABLA 26</b> VALORES CALCULADOS DE LOS ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS, RELATIVOS A LA FORMA, DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA VARIABLE DEMANDA SIMULADA EN NÚMERO DE PACAS (NPCAS), POR OFICINA, PARA LA DENOMINACIÓN MERCURIO. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. .... | <b>103</b> |
| <b>TABLA 27</b> VALORES CALCULADOS DE LOS ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS, RELATIVOS A LA FORMA, DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA VARIABLE DEMANDA SIMULADA EN NÚMERO DE PACAS (NPCAS), POR OFICINA, PARA LA DENOMINACIÓN PLUTÓN. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....   | <b>105</b> |
| <b>TABLA 28</b> VALORES CALCULADOS DE LOS ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS, RELATIVOS A LA FORMA, DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA VARIABLE DEMANDA SIMULADA EN NÚMERO DE PACAS (NPCAS), POR OFICINA, PARA LA DENOMINACIÓN URANO. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR.....     | <b>106</b> |
| <b>TABLA 29</b> VALORES CALCULADOS DE LOS ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS, RELATIVOS A LA FORMA, DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA VARIABLE PACAS TRANSPORTADA EN NÚMERO DE PACAS (NPCAS), POR OFICINA, CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....                              | <b>113</b> |
| <b>TABLA 30</b> VALORES CALCULADOS DE LOS ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS, RELATIVOS A LA FORMA, DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA VARIABLE PACAS TRANSPORTADA EN NÚMERO DE PACAS (NPCAS), POR DENOMINACIÓN, CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR.....                          | <b>115</b> |
| <b>TABLA 31</b> VALORES CALCULADOS DE LOS ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA VARIABLE COSTO DE LA OPERACIÓN EN MILLONES DE PESOS. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....   | <b>117</b> |
| <b>TABLA 32</b> VALORES CALCULADOS DE LOS ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA VARIABLE COSTO DE LA OPERACIÓN, EN MILLONES DE PESOS, POR TIPO DE VEHÍCULO EN MILLONES DE PESOS. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....                         | <b>119</b> |
| <b>TABLA 33</b> VALORES CALCULADOS DE LOS ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA VARIABLE COSTO DE LA OPERACIÓN, POR NODO, EN MILLONES DE PESOS. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR.....   | <b>121</b> |
| <b>TABLA 34</b> VALORES CALCULADOS DE LOS ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA VARIABLE VALORES TRANSPORTADOS EN UNIDADES MONETARIAS TRANSFORMADAS. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR.....  | <b>124</b> |
| <b>TABLA 35</b> VALORES CALCULADOS DE LOS ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA VARIABLE VALORES TRANSPORTADOS, POR TIPO DE VEHÍCULO, EN UNIDADES MONETARIAS TRANSFORMADAS. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR.....                               | <b>126</b> |
| <b>TABLA 36</b> VALORES CALCULADOS DE LOS ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA VARIABLE VALORES TRANSPORTADOS, POR NODO, EN UNIDADES MONETARIAS TRANSFORMADAS. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....  | <b>128</b> |
| <b>TABLA 37</b> COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON PARA LAS VARIABLES FUNCIÓN OBJETIVO EL MODELO DE CARGA Y VALOR TRANSPORTADO. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....  | <b>135</b> |
| <b>TABLA 38</b> COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON PARA LAS VARIABLES FUNCIÓN OBJETIVO EL MODELO DE RUTEO Y FUNCIÓN OBJETIVO EL MODELO DE CARGA. ....  | <b>136</b> |
| <b>TABLA 39</b> DISTRIBUCIÓN DE LA VARIABLE CONDICIONES DEL ENTORNO DADAS LAS DISTRIBUCIONES DE LAS VARIABLES ORDEN PÚBLICO E INFRAESTRUCTURA. ....   | <b>140</b> |
| <b>TABLA 40</b> DISTRIBUCIÓN DE LA VARIABLE CONDICIONES CLIMÁTICAS. ....  | <b>140</b> |

|   |            |
|---|------------|
| <b>TABLA 41</b> DISTRIBUCIÓN DE LA VARIABLE CONFIABILIDAD TECNOLÓGICA DADAS LAS DISTRIBUCIONES DE LAS VARIABLES CONFIABILIDAD DE LAS COMUNICACIONES Y CONFIABILIDAD DE LOS VEHÍCULOS.....   | <b>141</b> |
| <b>TABLA 42</b> DISTRIBUCIÓN DE LA VARIABLE CONFIABILIDAD EN EL RECURSO HUMANO DADAS LAS DISTRIBUCIONES DE LAS VARIABLES IDONEIDAD DEL RECURSO HUMANO Y NIVEL DE CONDUCCIÓN DEFENSIVA. ....   | <b>141</b> |
| <b>TABLA 43</b> DISTRIBUCIÓN DE LA VARIABLE POSIBILIDAD DE REALIZACIÓN DEL EVENTO DE UNA OPERACIÓN FALLIDA, EN UNA OPERACIÓN TERRESTRE, DADAS LAS DISTRIBUCIONES DE LAS VARIABLES QUE LA CONDICIONAN (CONFIABILIDAD EN EL RECURSO HUMANO, CONFIABILIDAD EN EL SISTEMA TECNOLÓGICO, CONDICIONES CLIMÁTICAS Y CONDICIONES DEL ENTORNO)..... | <b>142</b> |
| <b>TABLA 44</b> DISTRIBUCIÓN DE LA VARIABLE POSIBILIDAD DE REALIZACIÓN DEL EVENTO CATASTRÓFICO, EN UNA OPERACIÓN TERRESTRE, DADAS LAS DISTRIBUCIONES DE LAS VARIABLES QUE LA CONDICIONAN (CONFIABILIDAD EN EL RECURSO HUMANO, CONFIABILIDAD EN EL SISTEMA TECNOLÓGICO, CONDICIONES CLIMÁTICAS Y CONDICIONES DEL ENTORNO).....             | <b>143</b> |
| <b>TABLA 45</b> DISTRIBUCIÓN DE LA VARIABLE COSTO DE REALIZAR UNA OPERACIÓN TERRESTRE. ....   | <b>144</b> |
| <b>TABLA 46</b> DISTRIBUCIÓN DE LA VARIABLE MONTO TRANSPORTADO EN UNA OPERACIÓN TERRESTRE. ....   | <b>144</b> |
| <b>TABLA 47</b> DISTRIBUCIÓN DE LA VARIABLE NODO VISITADO EN UNA OPERACIÓN AÉREA.....   | <b>148</b> |
| <b>TABLA 48</b> DISTRIBUCIÓN DE LA VARIABLE ESTADO DE LA INFRAESTRUCTURA VIAL .....   | <b>148</b> |
| <b>TABLA 49</b> DISTRIBUCIÓN DE LA VARIABLE ESTADO DEL ORDEN PÚBLICO.....   | <b>149</b> |
| <b>TABLA 50</b> DISTRIBUCIÓN DE LA VARIABLE CONDICIONES DEL ENTORNO DADAS LAS DISTRIBUCIONES DE LAS VARIABLES ESTADO DE LA INFRAESTRUCTURA VIAL Y ESTADO DEL ORDEN PÚBLICO.....   | <b>150</b> |
| <b>TABLA 51</b> DISTRIBUCIÓN DE LA VARIABLE CONDICIONES CLIMÁTICAS. ....  | <b>150</b> |
| <b>TABLA 52</b> DISTRIBUCIÓN DE LA VARIABLE CONFIABILIDAD EN LAS COMUNICACIONES. ....   | <b>151</b> |
| <b>TABLA 53</b> DISTRIBUCIÓN DE LA VARIABLE CONFIABILIDAD EN LA OPERACIÓN AÉREA. ....   | <b>151</b> |
| <b>TABLA 54</b> DISTRIBUCIÓN DE LA VARIABLE CONFIABILIDAD EN LOS VEHÍCULOS TERRESTRES.....  | <b>152</b> |
| <b>TABLA 55</b> DISTRIBUCIÓN DE LA VARIABLE CONFIABILIDAD TECNOLÓGICA DADAS LAS DISTRIBUCIONES DE LAS VARIABLES CONFIABILIDAD EN LOS VEHÍCULOS TERRESTRES, EN LAS OPERACIONES AÉREAS Y EN LAS COMUNICACIONES. ....  | <b>152</b> |
| <b>TABLA 56</b> DISTRIBUCIÓN DE LA VARIABLE CONFIABILIDAD EN EL RECURSO HUMANO.....   | <b>153</b> |
| <b>TABLA 57</b> DISTRIBUCIÓN DE LA VARIABLE POSIBILIDAD DE REALIZACIÓN DEL EVENTO OPERACIÓN FALLIDA, EN UNA OPERACIÓN AÉREA, DADAS LAS DISTRIBUCIONES DE LAS VARIABLES QUE LA CONDICIONAN (CONFIABILIDAD EN EL RECURSO HUMANO, CONFIABILIDAD EN EL SISTEMA TECNOLÓGICO, CONDICIONES CLIMÁTICAS Y CONDICIONES DEL ENTORNO).....            | <b>154</b> |
| <b>TABLA 58</b> DISTRIBUCIÓN DE LA VARIABLE COSTO DE VISITAR UN NODO EN UNA OPERACIÓN AÉREA. ....   | <b>155</b> |
| <b>TABLA 59</b> DISTRIBUCIÓN DE LA VARIABLE POSIBILIDAD DE REALIZACIÓN DEL EVENTO CATASTRÓFICO, EN UNA OPERACIÓN AÉREA, DADAS LAS DISTRIBUCIONES DE LAS VARIABLES QUE LA CONDICIONAN (CONFIABILIDAD EN EL RECURSO HUMANO, CONFIABILIDAD EN EL SISTEMA TECNOLÓGICO, CONDICIONES CLIMÁTICAS Y CONDICIONES DEL ENTORNO).....                 | <b>156</b> |
| <b>TABLA 60</b> DISTRIBUCIÓN DE LA VARIABLE VALOR TRANSPORTADO A UN NODO EN UNA OPERACIÓN AÉREA.....  | <b>157</b> |
| <b>TABLA 61</b> PERFILES DE RIESGO PARA EL EVENTO OPERACIÓN FALLIDA, POR NODO. ....   | <b>160</b> |
| <b>TABLA 62</b> PERFILES DE RIESGO PARA UN EVENTO CATASTRÓFICO, POR NODO. ....  | <b>160</b> |
| <b>TABLA 63</b> NIVEL MÍNIMO DE EXISTENCIA, EN NÚMERO DE PACAS, POR OFICINA Y POR DENOMINACIÓN, PARA EJECUCIÓN DEL MODELO INTEGRAL DE PLANEACIÓN. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR.....  | <b>182</b> |
| <b>TABLA 64</b> NÚMERO MÍNIMO DE VISITAS POR UN VEHÍCULO EN UNA RUTA, PARA EJECUCIÓN DEL MODELO DE PLANEACIÓN. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....  | <b>183</b> |
| <b>TABLA 65</b> TIEMPO MÁXIMO DE PERMANENCIA DE UN VEHÍCULO EN UNA RUTA. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR.....   | <b>183</b> |
| <b>TABLA 66</b> CAPACIDAD DE OPERACIÓN, EN NÚMERO DE PACAS, PARA CADA NODO, PARA EJECUCIÓN DEL MODELO DE PLANEACIÓN. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR.....   | <b>183</b> |
| <b>TABLA 67</b> CAPACIDAD DE OPERACIÓN, EN NÚMERO DE PACAS, PARA CADA VEHÍCULO, PARA EJECUCIÓN DEL MODELO DE PLANEACIÓN. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR.....   | <b>184</b> |

|  |            |
|--|------------|
| <b>TABLA 68</b> CONDICIONES CLIMÁTICAS PRONOSTICADAS PARA CADA NODO DURANTE EL PERIODO DE PLANEACIÓN. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....  | <b>185</b> |
| <b>TABLA 69</b> FACTOR DE DISTANCIA CALCULADO PARA CADA NODO, A PARTIR DE LA DISTANCIA DE LA VÍA TERRESTRE DESDE EL DEPÓSITO. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....  | <b>186</b> |
| <b>TABLA 70</b> DISTRIBUCIÓN DE LA VARIABLE POSIBILIDAD DE REALIZACIÓN DEL EVENTO CATASTRÓFICO, EN UNA OPERACIÓN, DADAS LAS DISTRIBUCIONES DE LAS VARIABLES QUE LA CONDICIONAN (CONFIABILIDAD EN EL RECURSO HUMANO, CONFIABILIDAD EN EL SISTEMA TECNOLÓGICO Y CONDICIONES DEL ENTORNO), PARA EJECUCIÓN DEL MODELO DE PLANEACIÓN. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. .... | <b>188</b> |
| <b>TABLA 71</b> PERFILES DE RIESGO PARA UN EVENTO CATASTRÓFICO, POR NODO, PARA EJECUCIÓN DEL MODELO DE PLANEACIÓN. CREACIÓN PROPIA DEL AUTOR. ....   | <b>189</b> |
| <b>TABLA 71</b> RESULTADOS DE LA EJECUCIÓN DEL MODELO INTEGRAL DE PLANEACIÓN. ....   | <b>191</b> |



# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

En Colombia, el Banco de la República ejerce, en forma exclusiva e indelegable, la función estatal de emitir la moneda legal y, en consecuencia, realiza la impresión, acuñación, cambio y destrucción y puesta en circulación de especies monetarias. Fundamentalmente, esta misión es adelantada mediante la operación un complejo sistema logístico que involucra el transporte de las especies monetarias.

En la medida que las especies monetarias constituyen el medio de pago de mayor uso en nuestra economía resulta fundamental para el Emisor garantizar la provisión de las cantidades requeridas en cada región de la geografía. Por otra parte, por la naturaleza de estas operaciones, el sistema de distribución se debe clasificar como un sistema de abastecimiento de alto valor.

No obstante, su trascendencia y riesgo inherente, el sistema de abastecimiento de efectivo a los agentes de la economía, tiene muchos elementos comunes con cualquier sistema de distribución. Por lo anterior, es susceptible de estudiar con miras a su optimización y administración de los riesgos inherentes. En este contexto se hace necesario acudir a la teoría sobre toma de decisiones que comportan riesgo.

En este orden de ideas, la optimización de rutas de transporte es uno de los temas que se debe considerar en primera instancia y que tiene directa relación con las necesidades de los clientes, es decir con la demanda de especies monetarias en las distintas regiones del país. En este punto se debe enfatizar en la compleja forma de determinar la demanda de circulante, pues esta determinada por múltiples variables (Arango Arango & Misas Arango , 2004) En efecto, el cambio en el volumen en circulación, como el deterioro de una denominación dependen no solo de factores macroeconómicos como el crecimiento de la economía, el régimen inflacionario o el cambio en el costo de oportunidad sobre las tenencias en efectivo sino

también, en innumerables factores microeconómicos que determinan el comportamiento transaccional de los individuos y el uso que éstos dan al efectivo. Así, por ejemplo: los cambios tecnológicos en los medios de pago sustitutos del efectivo, la falsificación, los costos de producir especies monetarias, aspectos culturales y los canales de distribución son variables que determinan la demanda de especies monetarias en una economía.

Esta problemática de estimar la demanda se ha abordado, en el Banco de la Republica, como un problema de pronósticos (Arango Arango & Misas Arango , 2004) este trabajo ha buscado metodologías de pronósticos basadas en la teoría de redes neuronales. Estos modelos han sido desarrollados para obtener un estimado de la demanda agregada que sirve de insumo para elaborar los programas de producción de efectivo.

Al respecto se debe mencionar que el Banco cuenta con un complejo de producción de billetes dotado de las más sobresalientes tecnologías en materia de impresión y almacenamiento de especies monetarias. Este complejo industrial es conocido como la Central de Efectivo. La Central de Efectivo posee una bóveda robotizada implementada con una concepción de bóveda abierta que permite el almacenamiento y suministro permanente de las especies monetarias. Desde este complejo, el Banco provee del numerario de requieren las regiones transportando, mediante un conjunto de operaciones de transporte, a las diferentes oficinas del Banco en las capitales más importantes del País. Claramente, estas operaciones de distribución de efectivo conllevan importantes niveles de riesgo, además de ser costosas.

Ciertamente, el hecho de que se concreten eventos de riesgo en la operación de distribución de efectivo en un país es un elemento que resulta costoso y de alto impacto. Como se ha mencionado, las operaciones de distribución de efectivo tienen una estrecha relación con el bienestar económico de la población en general. Por otra parte, es propicio para la estabilidad económica de una Nación, una adecuada percepción sobre la estabilidad de su Banca Central. Por lo anterior, en lo concerniente a las operaciones de distribución de efectivo, para los bancos centrales debe ser prioritario procurar la mayor eficiencia al menor riesgo.

Un sistema de distribución como el descrito debe funcionar de tal forma que garantice una adecuada provisión, es decir sin desabastecimiento, pero sin exceder los niveles de almacenamiento de las bóvedas. Por otro lado, cada vez que se realiza una operación de transporte para provisionar la bóveda se genera un alto nivel de exposición a riesgos con efectos catastróficos y que tienen origen en actos mal intencionados de terceros o en siniestros. Es por esto que este trabajo aborda las metodologías de optimización de rutas de manera conjunta con las metodologías de administración del riesgo.

El documento se organiza en siete capítulos incluido esta introducción. En el segundo capítulo se hace el planteamiento del problema de investigación. En el tercer capítulo se desarrolla la caracterización del sistema, tanto en su componente de ruteo como en lo concerniente al riesgo inherente. El cuarto capítulo se dedica al modelamiento y ejecución de un algoritmo que proporcione una solución para el problema de optimización de ruteo caracterizado en el anterior capítulo, pero considerando una aplicación básica, para un escenario de un día. Este capítulo se desarrolla aplicando un ejercicio de simulación de la demanda. El quinto capítulo se hace la modelación y el análisis del riesgo, mediante el empleo de redes bayesianas y partiendo de los resultados del modelo de optimización ejecutado para los diferentes escenarios simulados. En el sexto capítulo se propone un modelo integrado que considere la optimización y el riesgo y que se aplique a un periodo de tiempo de varios días. Finalmente, en el último capítulo, se dan conclusiones y sugerencias para futura investigación.

## CAPÍTULO 2

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las tesorerías de los Bancos Centrales deben satisfacer las necesidades de efectivo requeridas por los agentes económicos para realizar sus transacciones económicas. En el caso colombiano la misión del Banco de la República es básicamente la de “Contribuir al bienestar de los colombianos mediante la preservación del poder adquisitivo de la moneda y el apoyo al crecimiento económico sostenido, a la generación de conocimiento y a la actividad cultural del país”. (Planeación estratégica del Banco de la República 2013)

Para el logro del objetivo principal en su primer componente, es decir: la preservación del poder adquisitivo de la moneda y el apoyo al crecimiento económico sostenido, el Banco estableció, entre otros, dentro de sus lineamientos estratégicos, una función misional que tiene como propósito el de “Atender de manera oportuna y eficiente las necesidades de efectivo de la economía mediante la provisión de monedas metálicas y billetes, que brinden confianza al público por sus altos estándares de calidad y seguridad.” de (Planeación estratégica del Banco de la república, 2013)

Por lo anterior uno de los objetivos estratégicos relacionado con la misión de producir y distribuir el efectivo es el de fortalecer los mecanismos de distribución de efectivo y moneda metálica en todo el país, ampliando los servicios ofrecidos mediante las extensiones de bóveda. Un segundo objetivo estratégico relacionado con esta actividad misional es la administración de los riesgos asociados a esta actividad y en particular la determinación de los niveles adecuados de inventario de seguridad de billetes y monedas requeridos y estructurar un plan de abastecimiento en caso de ocurrencia de eventos de alto impacto. En efecto, en el pasado, la ocurrencia de un evento de riesgo como el robo de Valledupar han demostrado el impacto en la economía de todo el país. En efecto, la ocurrencia de este evento de riesgo ocurrido a mediados de octubre de 1994 significó la pérdida de un poco más de 24 mil millones de pesos -unos 33 millones de dólares de la época-. No obstante, el gran impacto estuvo en la pérdida de credibilidad en el sistema de pagos que es uno de los activos intangibles de mayor impacto en una economía.

Basado en los anteriores aspectos, el problema de investigación puede ser formulado a través de la siguiente pregunta general:

¿Cómo construir un modelo que permita la optimización de un sistema de distribución de valores evaluando la relación entre la eficiencia operativa y el nivel riesgo operativo inherente a esta actividad?

De esta pregunta se derivan las siguientes preguntas:

¿Es posible diseñar y/o implementar un método de optimización de un sistema de distribución de valores que considere el riesgo operativo inherente?

¿Es posible diseñar y/o implementar un método de optimización de un sistema de distribución de valores que encuentre un punto de equilibrio entre la eficiencia y el riesgo?

## 1.1 Objetivos del estudio

Para guiar la respuesta a los interrogantes formulados en el anterior apartado, se plantean los siguientes objetivos:

- **Objetivo general**

Diseñar y evaluar un modelo de optimización de un sistema de distribución de valores que considere la relación entre la eficiencia operativa y el nivel riesgo operativo.

- **Objetivos específicos**

- Determinar las variables, parámetros y restricciones asociadas a la optimización del sistema de distribución de valores en función de la eficiencia operativa y el nivel de riesgo operativo.
- Diseñar un método de solución asociado al modelo que permita obtener una solución eficiente.

- Validar el modelo y métodos de solución propuestos a través de datos reales o a través de una simulación en el sistema de distribución de numerario del Banco central de Colombia.

## 1.2 Justificación y delimitación

El sistema de abastecimiento de efectivo a los agentes de la economía tiene mucho parecido al sistema de distribución de cualquier industria. De esta forma, el primer paso es estimar las necesidades de efectivo por denominación a corto, mediano y largo plazo con el fin de elaborar los planes de producción para que la disponibilidad de especies monetarias sea suficiente y oportuna.

Esta primera fase del proceso se ha abordado, en el Banco de la Republica, como un problema de pronósticos véase: (Carlos A. Arango A., 2004) y (Martha Misas, 2003) estos trabajos han buscado metodologías de pronósticos basadas en la teoría de redes neuronales. Posteriormente, al cálculo de la demanda, que normalmente se adelanta para un periodo de dos años, se debe adelantar un programa de producción. Aquí, es importante enfatizar en que el cálculo que se obtiene permite estimar la producción nacional de manera agregada, no obstante, para propósitos de distribución se carece de una metodología permita pronosticar las demandas de cada ciudad. Como se mencionó en la introducción, el Banco cuenta con un complejo de producción de billetes, la Central de Efectivo, dotado de las más sobresalientes tecnologías en materia de impresión y almacenamiento de especies monetarias.

Como se hizo mención en la introducción, el Banco traslada cantidades importantes de especies monetarias desde la Central de Efectivo a las regiones del País a través de sus oficinas seccionales en las principales ciudades capitales. En efecto, el Banco cuenta con oficinas de tesorería con bóvedas en catorce (14) de las principales ciudades del País. Con el propósito de aprovisionar las bóvedas de las sucursales, e promedio, tres (3) veces por semana el Banco adelanta complejas operaciones de transporte de valores, con origen en la Central de efectivo y empleando vehículos blindados acompañados de escolta de la Policía Nacional. Adicionalmente, se fletan aviones para adelantar las operaciones de transporte aéreo. Estas

operaciones son costosas, pero sobre todo son actividades que por su naturaleza están expuestas a altos niveles de riesgo.

Ciertamente, los Bancos centrales, por su papel determinante en las dinámicas económicas de los países, les corresponde las más altas exigencias en materia de sostenibilidad. Lo anterior implica una adecuada gestión de los costos de la operación y en la gestión de los riesgos inherentes.

Así las cosas, la definición del problema se concreta en la necesidad de contar con una herramienta metodológica que permita optimizar los costos y, al mismo tiempo, disminuir los niveles del riesgo operativo de la operación de distribución del numerario.

### **1.3 Marco teórico**

Los planteamientos teóricos que soportan este estudio y que se sintetizan a continuación, se enmarcan dentro de dos componentes principales optimización de operaciones y administración del riesgo. En todo caso, estos dos deben confluir en un modelo de optimización en un entorno de incertidumbre.

#### **1.3.1 Optimización de una red de distribución**

En términos generales el problema de optimización de una red de distribución ha sido ampliamente tratado a través de modelos, desde los que se fundamentan en algoritmos exactos, y más recientemente, en los que hacen uso de las heurísticas. En principio un sistema de distribución está conformado por los siguientes elementos básicos:

- **Los clientes:** Con una ubicación geográfica, con una demanda de uno o varios productos o servicios que además puede variar en el tiempo. Estos clientes, además, pueden tener unas restricciones de almacenamiento o de horario de recibo.
- **Los depósitos:** Con una ubicación geográfica, con unas capacidades de almacenamiento, con uno o varios productos o servicios ofrecidos. De igual forma que los clientes, pueden tener unas restricciones de almacenamiento o de horario de despacho.

- **Los vehículos:** Pudiendo ser de varios tipos (terrestres, aéreos, fluviales), además con diferentes capacidades. Estos vehículos cuentan con unos costos de operación.
- **Políticas y normas legales:** adicionalmente a los elementos físico un sistema de distribución debe contar con un marco regulatorio y de política para su operación.

Alfredo Olivera, en su artículo *Heurísticas para Problemas de Ruteo de Vehículos*, (Olivera, 2004) hace una amplia descripción de la evolución de las técnicas de investigaciones desde el planteamiento de Dantzig y Ramser para resolver un problema de ruteo en una red de distribución de combustible, en el año de 1959, hasta los desarrollos de modelos de optimización soportados en heurísticas del tipo de algoritmos genéticos.

En efecto una de las primeras aplicaciones reales al problema teórico del agente viajero, (Dantzin & Ramser, 1959) consistió en encontrar una manera de asignar estaciones y camiones, de tal manera que las demandas de la estación estén satisfechas y el kilometraje total recorridos por la flota es un mínimo. El procedimiento se basó en una formulación de programación lineal. El trabajo de Dantzig y Ramser se destaca por ser la primera aplicación documentada de este tipo. Lo anterior, fue posible gracias al desarrollo de las tecnologías de computación. De esta forma, desde entonces se han adelantado una gran cantidad de trabajos que han permitido ir haciendo más complejo el modelo.

Así las cosas, en la actualidad se han desarrollado modelos para abordar problemas de ruteo de diferente índole, que van desde el clásico TSP (Travelling Salesman Problem) pasado por el mismo problema pero que considera a varios agentes viajeros, conocido como el m-TSP o TSP generalizado, además, se han incorporado a estos modelos las capacidades de los vehículos lo que ha llevado a la aparición de los modelos CVRP (Capacity Vehicle Routing Problem), es decir como un problema de ruteo de vehículos donde la capacidad de la flota se convierte en restrictiva para la formulación. Otros estudios han aportado un sin número de variantes a los modelos CVRP, por ejemplo los que consideran las ventanas de tiempo en las que los vehículos pueden visitar a los clientes, conocidos como los VRPTW, (Vehicle Routing Problem Time Windows) Todos estos desarrollos y sus combinaciones ha implicado la generación de una compleja taxonomía para clasificar los diferentes modelos , pero que en términos generales se

pueden dividirse en dos grandes grupos: Problemas de Flota Homogénea (VRP) y Flota Heterogénea (VRPHF). El primer grupo, (VRP), contiene los modelos de ruteo en los que los vehículos tienen las mismas capacidades y costos, mientras que el segundo grupo, (VRPHF) agrupa a los modelos de sistemas de distribución con clientes con demandas variables, vehículos con capacidades y costos variables. Una extensa descripción de la taxonomía de los modelos de ruteo de vehículos puede ser consultada en (Medina, La Rota, & Castro, 2011)

Actualmente, independientemente del modelo que se escoja como el más apropiado para representar un sistema de distribución, en los que concierne a los métodos de optimización, se puede acudir a cualquiera de los dos siguientes enfoques:

### 1.3.2 Algoritmos exactos

El primer enfoque ha sido tratado extensamente por (Laporte, 1992). En su artículo, Laporte clasifica los métodos exactos en tres grandes categorías: (i) los métodos directos de búsqueda de árboles, (ii) la programación dinámica, y (iii) la programación lineal entera. Teniendo en cuenta que existe una gran cantidad de algoritmos propuestos Laporte aplica sólo seis (6) ejemplos representativos: dos métodos de búsqueda de árboles directos basados en diferentes relajaciones, una formulación de programación dinámica, y tres algoritmos de programación lineal entera.

Concluye Laporte que existen varias versiones del problema, y una amplia variedad de algoritmos exactos para su solución. Si bien es cierto, los algoritmos exactos han resultado muy satisfactorios, sólo pueden resolver problemas relativamente pequeños. Laporte advierte sobre la conveniencia de observar las nuevas herramientas y es precisamente lo que se hace a continuación.

### 1.3.3 Heurísticas y Meta heurísticas.

Las heurísticas aparecen como una eficiente alternativa para encontrar soluciones de buena calidad a los problemas de ruteo de vehículos. Un amplio compendio de la aplicación de las

heurísticas al problema del ruteo de los vehículos se puede observar en (Olivera, 2004). En su artículo Olivera prueba varios algoritmos de las heurísticas clásicas, así como tres técnicas de las técnicas metaheurísticas. En general, las metaheurísticas obtienen mejores resultados que las heurísticas clásicas, pero incurriendo en mayores tiempos de ejecución. Olivera explora tres tipos de meta heurísticas: Algoritmos de Hormigas, Búsqueda Tabú y Algoritmos Genéticos.

Por otra parte, se debe considerar a uno de los investigadores destacados en la aplicación de Meta heurísticas a los problemas de distribución, Roberto Wolfler Calvo, se destaca los trabajos sobre ruteo de vehículos utilizando algoritmos tipo tabu, (Wolfler, 2008).

#### 1.3.4 Algoritmos de optimización basados en la teoría de conjuntos difusos

Tradicionalmente los modelos de optimización parten de datos ciertos, así por ejemplo, uno de los principios de la programación lineal es que se formula sobre un escenario de certidumbre, es decir los parámetros de la función objetivo y de las restricciones se establecen fijos. No obstante, al incorporar el elemento de riesgo, necesariamente estamos en el campo de la incertidumbre. Al revisar la bibliografía se encontró que existe unos desarrollos que mezclan los modelos de optimización con incertidumbre, basándose en la teoría de los conjuntos difusos, conocidos, en inglés, como Fuzzy. Véase: (Figueredo, 1999)

EN 1965 el profesor Lotfi A. Zadeh introdujo el concepto de conjunto “fuzzy” permitiendo la pertenencia de un elemento a un conjunto de forma gradual, y no de manera absoluta como establece la teoría conjuntista clásica como establece la teoría conjuntista clásica.

Por tratarse de un cambio en la concepción matemática, con el correr del tiempo, muchos investigadores han buscado formas de aplicar este nuevo concepto a problemas clásicos y nuevos. Es así que se da inicio a la aplicación del concepto de conjuntos difusos en la programación matemática, específicamente en los modelos de optimización. El primer planteamiento sobre la aplicación de modelos de conjuntos difusos en modelos de decisión fue en el año de 1970 con el trabajo de teoría de la decisión de Bellman y L.A. Zadeh (Bellman,

1970). Sin embargo, el planteamiento formal de modelos de optimización mediante programación lineal basada en los conceptos de conjuntos difusos se planteo de manera simultanea en dos trabajos presentados en el año de 1974: *On Fuzzy Mathematical Programming* . *Journal of Cybernetics* de H. Tanaka, T. Okuda; y en el trabajo sobre optimización in fuzzy environments de H.J. Zimmermann. Si bien es cierto los trabajos se presentaron de forma simultanea fueron abordados con ópticas diferentes. Posteriormente, en el año de 1982 en el trabajo de J.L. Verdegay, problemas de decisión en ambientes difusos, se hizo un planteamiento más general que entre otras cosas resultó ser una generalización de los casos trabajados por Tanaka y Verdegay.

De esta forma, se inicia un periodo de experimentación y aportes a la optimización desde la perspectiva de la lógica difusa. Sin embargo, no se encuentra una aplicación particular como la propuesta es decir un modelo de optimización que reúna la optimización de dos objetivos, claramente contradictorios: la disminución de los costos de una operación y la disminución de la exposición al riesgo. En este punto se debe destacar que la elección de la lógica difusa obedece a la carencia de modelos determinísticos para modelar el riesgo, pues precisamente el riesgo se define como un evento probabilístico, con un valor esperado de ocurrencia bajo, pero con un alto impacto. La anterior circunstancia, eventos poco probables, impiden contar con modelos exactos, de esta forma la lógica difusa provee una alternativa para crear modelos de riesgo. Además, de modelar el riesgo, se debe optimizar las variables tradicionales relacionadas con el costo.

En este sentido, se encuentran trabajos que pretenden la optimización de un sistema multiobjetivo. (Mandal, 2006) . En este trabajo Mandal trata el problema de inventario fuzzy multiobjetivo con dos limitaciones de recursos. Los parámetros de costes y parámetros de índice, el espacio de almacenamiento, el costo presupuestario, y las metas y objetivos de restricción que son imprecisas en la naturaleza. Este es, sin duda, el trabajo que más se aproxima al problema planteado y aplicado en un tema central de la asignatura, los inventarios.

Recientemente, se pueden observar algunos trabajos que centran la aplicación a cadenas de suministros, particularmente (Peidro, 2009) Este trabajo propone un modelo de

programación matemática fuzzy para la planificación de la cadena de suministro, que considera la oferta, la demanda y el proceso de incertidumbres. El modelo ha sido formulado como un modelo de programación lineal entera mixta difusa donde los datos son mal conocidos y modeladas por números difusos triangulares.

### 1.3.5 Proceso de modelamiento.

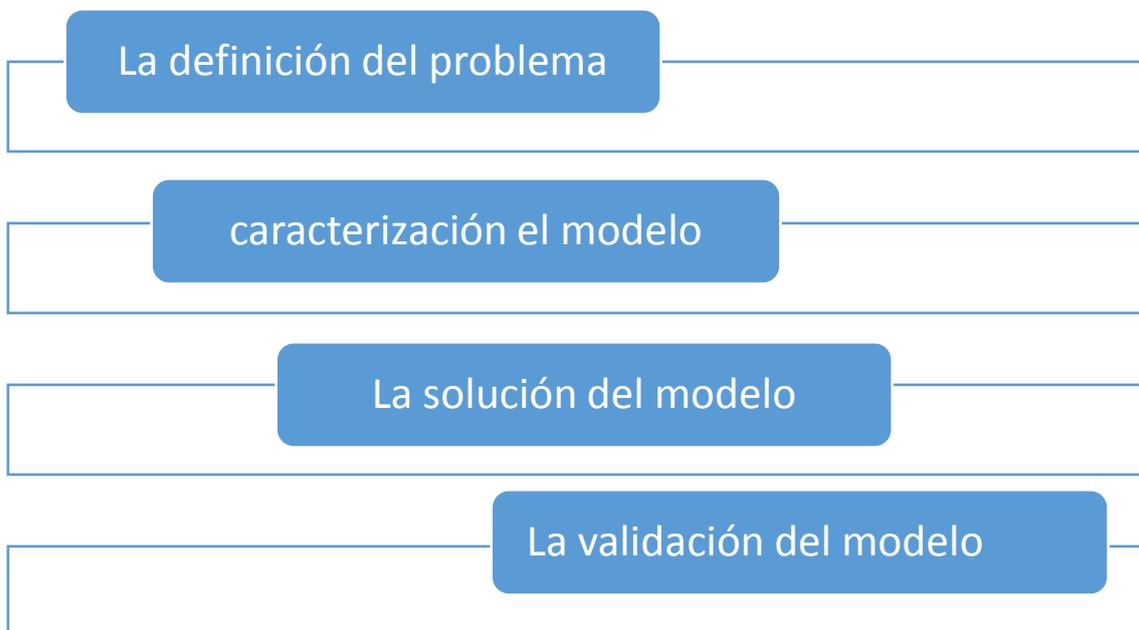
Si bien existe una gran conjunto de posibilidades metodologías para resolver un problema de esta naturaleza, en la revisión de la bibliografía adelantada de puede observar que modelar un sistema de optimización se puede enmarcar dentro de un proceso que de alguna forma constituye un marco metodológico. Para este trabajo se ha adoptado la metodología propuesta por (Taha, 2012), y que establece las siguientes fases:

- **La definición del problema:** Se trata de establecer el objetivo, el alcance, las opciones de solución y las restricciones a considerar. Precisamente, este capítulo esta dedicado a este propósito.
- **La construcción del modelo:** Se trata de traducir la definición del problema a términos matemáticos. Dependiendo de las característica del problema, resultado de la definición realizada en la primera fase de esta metodología general, se puede configurar un determinado tipo de modelo, pudiendo ser un modelo exacto, un modelo heurístico, un modelo basado en simulación o una combinación de los anteriores. En la mayoría de los casos es imposible hacer una representación exacta de la realidad y se debe simplificar el modelo a fin de lograr la representación matemática del mismo.
- **La solución del modelo:** Se trata de la implementación del modelo en un algoritmo de solución en una plataforma computacional. Con este recurso tecnológico dispuesto se puede ejecutar el modelo para observar su consistencia a través de análisis de sensibilidad y, de esta forma, ajustar los parámetros del modelo a fin de garantizar una representación muy cercana a la realidad.
- **La validación del modelo:** Se trata de la ejecución del modelo depurado, resultado del paso anterior, en un entorno real, permitiendo una comparación de los resultados del modelo contra la realidad. Esta fase puede realizarse basándose en datos históricos o una aplicación del modelo en condiciones reales. El resultado de esta fase podría implicar nuevos ajustes al modelo. En cualquier caso, en esta fase, debe ser evidente la utilidad del modelo.

- **La implementación del modelo:** Una vez que el modelo ha sido probado en condiciones reales, el mismo está listo para ser implementado para que los responsables de la administración de la operación puedan utilizarlo. Lo anterior significa la implementación del modelo en un ambiente amigable y la familiarización de los operadores del modelo.

Si bien en este trabajo se ha adoptado la metodología propuesta por (Taha, 2012), se debe aclarar, que no se desarrolla las últimas dos fases, pues no se encuentra dentro del alcance de este trabajo de grado. Por otra parte, se considera conveniente adicionar un paso intermedio entre la definición del problema y la construcción del modelo. Este nuevo paso se ha denominado como la *caracterización el modelo* consistente en la representación idealizada del modelo, especificando las relaciones entre los diferentes elementos del sistema y el funcionamiento del mismo. Este aparte, puede desarrollarse mediante la utilización de técnicas gráficas.

La siguiente ilustración muestra la metodología de este trabajo.



**Figura 1** Proceso de modelamiento: adaptación a la propuesta metodológica (Taha, 2012) creación propia del autor.

### 1.3.6 Gestión del riesgo

Hasta ahora se abordado el problema de distribución desde la óptica de optimización, que como se ha expuesto, ha sido ampliamente estudiado, sin hacer mayor énfasis en el enfoque de la administración del riesgo.

Por consiguiente, en lo que resta del marco teórico se ilustran los enfoques metodológicos que se han encontrado para abordar la administración del riesgo en un entorno de optimización. No obstante, lo anterior, antes de entrar a esbozar los elementos técnicos de las metodologías conviene hacer mención a los fundamentos de la administración del riesgo, en particular, del riesgo operativo.

En todas las actividades del hombre se encuentra presente la incertidumbre, es decir, el desconocimiento de lo que realmente sucederá. Siempre existe la posibilidad que las cosas salgan de forma contraria a lo deseado, existe la probabilidad que suceda algo que atente contra los objetivos planteados. A lo anterior, se le conoce como la ocurrencia de un evento de riesgo. Este elemento, el riesgo, es en esencia la razón de ser de las entidades financieras, por lo que la primera metodología para medir y administrar el riesgo se ha originado en este sector.

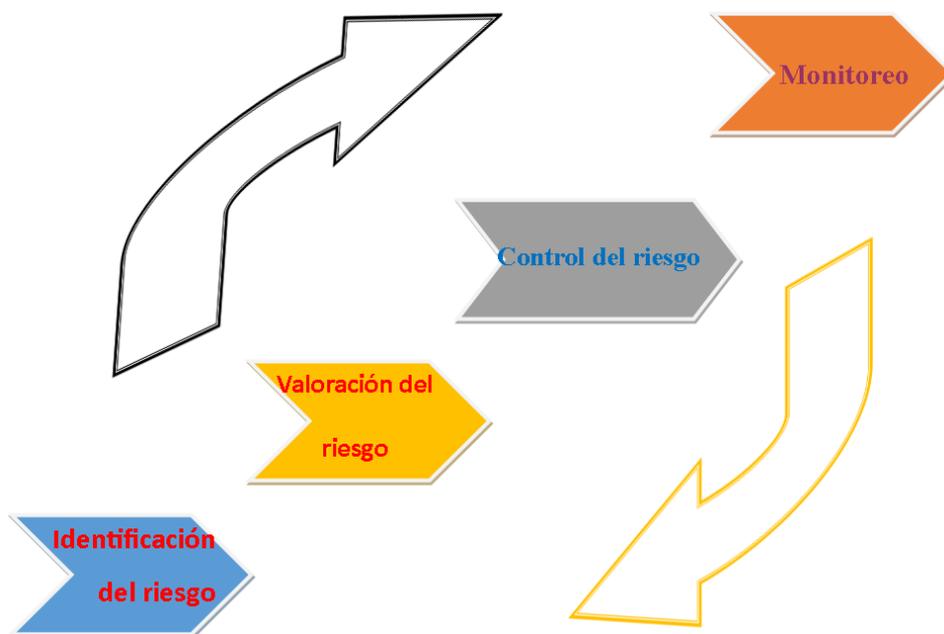
De esta forma, es en el contexto del sector financiero se ha observado intentos por implementar sistemas de administración del riesgo sustentados en metodologías que van desde unas muy sencillas hasta, recientemente, metodologías complejas. Inicialmente, el riesgo crediticio y de mercado abarcaban todo el interés de los banqueros, pero con el correr del tiempo otro tipo de riesgo fue mostrando su impacto, ganado importancia, se trata del riesgo operativo, es decir el que se presenta por el simple hecho de operar. En efecto, en el marco del Comité de Basilea, se establecieron acuerdos para que los países afiliados incorporaran metodologías para que las instituciones financieras administren el riesgo operativo. En el caso colombiano, la Superintendencia Financiera define el riesgo operativo, en las circulares 048 y 049 de 2006, de la siguiente forma:

**Riesgo Operativo (RO):** “Se entiende por Riesgo Operativo, la posibilidad de incurrir en pérdidas por deficiencias, fallas o inadecuaciones, en el recurso humano, los procesos, la tecnología, la infraestructura o por la ocurrencia de acontecimientos externos.”

En este sentido, el riesgo operativo involucra tres componentes principales: una posibilidad, que para efectos metodológicos se define en términos de una probabilidad; por otro lado, un evento no deseado o inconveniente; y finalmente, una pérdida, que puede ser precisada en términos monetarios. Intuitivamente, se deduce, que la administración del riesgo debe estar orientada a la disminución de la probabilidad de ocurrencia de los eventos no deseados, o a la disminución de la pérdida ante la posibilidad real de que estos eventos ocurran.

En principio el Comité de Basilea establece un proceso general para la administración de este tipo de riesgo que conlleva las siguientes fases: Identificación del riesgo, valoración del riesgo, control del riesgo y monitoreo del riesgo.

La siguiente gráfica muestra el proceso de gestión el riesgo operativo que propone el Comité de Basilea.

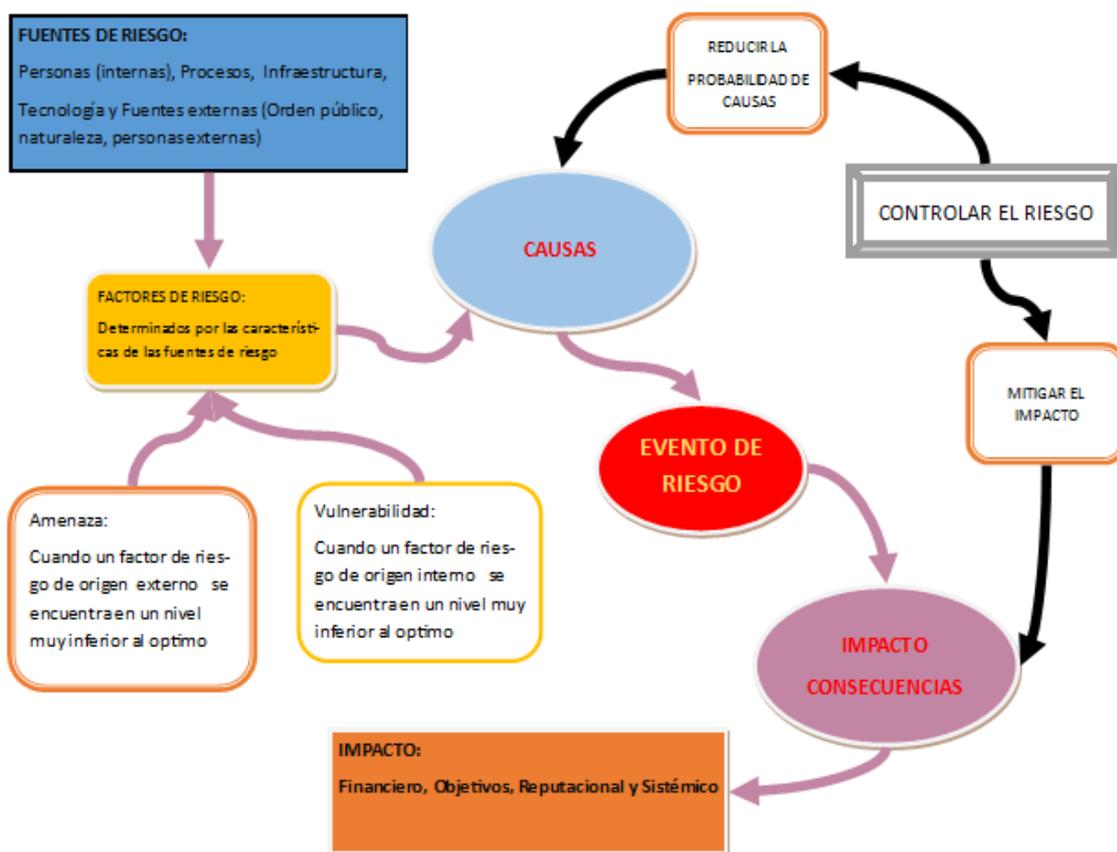


**Figura 2** Proceso de gestión del riesgo operativo dentro del marco establecido por los comités de Basilea. Creación propia del autor.

Resulta interesante observar como el estudio de este tipo de riesgo, nacido en el sector financiero, es aplicable a cualquier operación que resulte de alta criticidad por el impacto que puede llegar a generar. Particularmente, el objetivo de esta propuesta abarca la distribución de especies monetarias en el banco central de Colombia, es decir el Banco de la República. En este aparte se debe anotar que a pesar de que el Banco de la República es el banco central, es decir, no es una entidad financiera comercial, en Colombia, es sujeto de control de la Superintendencia Financiera, por lo que le son aplicables las recomendaciones del Comité de Basilea.

Simultáneamente, en los documentos de planeación estratégica del Banco de la República se han incorporado objetivos que buscan fortalecer la actividad de distribución de efectivo y administrar el riesgo inherente a la misma. En efecto, en el pasado, eventos como el robo de Valledupar han demostrado el impacto en la economía de todo el país, la ocurrencia de un evento de riesgo.

En efecto, el Banco de la Republica desarrollo un modelo de administración del riesgo operativo que se explica esquemáticamente en la siguiente ilustración:



**Figura 3** Modelo de administración del riesgo del Banco de la República. Adaptado de (Subgerencia de Gestión de Riesgo Operativo, 2013)

El modelo de administración de riesgo planteado para el Banco de la República es aplicable al proceso de distribución de efectivo, de la forma que se muestra a continuación.

- **Las fuentes del riesgo:** Los riesgos operativos tienen origen en una diversidad de fuentes que pueden ser clasificadas como: internas o externas. En el caso particular que nos ocupa los conductores, los vehículos terrestres, aviones, sistemas de comunicación, procedimientos, etc; constituyen ejemplos de fuentes internas. Por otro lado, las condiciones de las vías, las organizaciones delincuenciales, la fuerza pública, los terremotos, las condiciones climáticas, etc; constituyen fuentes externas de riesgo.
- **Los factores del riesgo:** Las características de las fuentes de riesgo inciden en la ocurrencia de los eventos de riesgo. Así, por ejemplo, un vehículo terrestre (fuente de riesgo) en mal estado mecánico, constituye un factor de riesgo de origen interno. De otra parte, altos niveles de corrupción en la fuerza pública de una región constituye un factor riesgo de origen externo. Otro ejemplo de fuente externa, y que resulta representativo en nuestro análisis son las condiciones climáticas.
- **Vulnerabilidad:** Si los factores de riesgo internos presentan circunstancias muy alejadas a las óptimas, se habla de vulnerabilidad. En nuestro ejemplo, si los vehículos en general presentan fallas frecuentes, se puede afirmar que hay una situación de vulnerabilidad respecto de este factor de riesgo.
- **Amenaza:** Si los factores de riesgo externos presentan circunstancias muy alejadas a las óptimas, se habla de amenaza. En nuestro ejemplo, si la fuerza pública se asocia a las organizaciones delincuenciales, se puede afirmar que las operaciones de transporte de valores están amenazadas.

- **Causas de un evento de riesgo:** Las causas se refieren a las acciones que se originan en las fuentes de riesgo, pudiendo ser intencionales, accidentales o naturales. Así, por ejemplo, retomando nuestro ejemplo, si los vehículos están en malas condiciones mecánicas, es decir constituyen un factor de riesgo que incluso puede calificarse como vulnerabilidad, ciertamente, en una operación un vehículo puede fallar. Lo anterior, ocurre de manera “accidental”, pero genera un evento que para el caso es la cancelación de la operación. Por supuesto, se puede seguir analizando las causas de la falta de mantenimiento y encontrar que es, por ejemplo, la falta de presupuesto, la falta de capacitación de los responsables, etc. Se trata de encontrar un nivel de análisis práctico que permita la toma de decisiones oportunas y que se concentre en los factores más relevantes.

De otra parte, en el ejemplo del factor de riesgo asociado a un alto nivel de corrupción en la fuerza pública, un ataque planeado o consensuado con organizaciones delincuenciales sería la causa del evento asalto. En este caso, la causa es intencional. Finalmente, resulta oportuno resaltar que las condiciones climáticas, cuando impiden las operaciones aéreas se desarrollen normalmente, constituyen causa frecuente para cancelar las operaciones y eventualmente podrían provocar un siniestro. Estas son un buen ejemplo de causas naturales.

- **Consecuencias (nivel de impacto):** La materialización de un evento de riesgo genera una alta gama de consecuencias. Así, por ejemplo, la cancelación de una operación para transportar efectivo a una ciudad genera una pérdida económica pues se comprometen recursos en la operación que no pueden reembolsarse. Por otra parte, se incurre en riesgos reputacionales, pues al no poder abastecer oportunamente el sistema financiero se pierde confiabilidad en el Banco. La ocurrencia de un evento de tipo catastrófico, por ejemplo, un siniestro aéreo, podría tener consecuencias inclusive en el desempeño económico del País, es decir, de alto impacto.

Se debe advertir que el modelo de administración de riesgo planteado para el Banco de la República constituye un interesante marco de referencia. No obstante, en los apartes siguientes se retomará los pasos del proceso planteado por Basilea.

### 1.3.7 Identificación del riesgo

En este aparte, se hace precisión sobre los eventos de riesgo que se consideran como los fundamentales y que son inherentes a las operaciones de distribución de efectivo. Para el efecto, luego de varias entrevistas con los responsables de las operaciones de transporte de valores y de la tesorería del Banco, se concluye que existen dos eventos de riesgo fundamentales y que deben ser valorados:

- *Operación fallida*: Es decir, que una operación de transporte de valores que se encuentra debidamente programada no se pueda ejecutar.
- *Evento catastrófico*: Se considera un evento catastrófico la ocurrencia de un suceso que ponga en riesgo de pérdida a la carga. En particular, se han establecido los siguientes hechos: Un accidente aéreo y un ataque.

¿Cómo evitar que estas situaciones acontezcan? No existe respuesta puntual, pues se trata de eventos inciertos que se sitúan en el mundo de la incertidumbre. ¿La pregunta debe enfocarse a cómo hacer para caracterizar y gestionar la incertidumbre? Para el anterior cuestionamiento, si existen muchas respuestas que se obedecen a al desarrollo de las teorías de administración del riesgo que, en general, como se ha anotado se ha originado en el sector financiero.

Claramente, la administración efectiva del riesgo operativo solo es posible sobre una adecuada medición del riesgo. Es aquí donde el trabajo pretende hacer un aporte , en la medida que se tenga una adecuada medición del riesgo, dentro de un contexto de optimización, se podrán tomar decisiones administrativas coherentes a una operación de alto riesgo y alto costo como lo es la distribución de especies monetarias.

### 1.3.8 Valoración del riesgo

En lo que corresponde a la fase de valoración del riesgo, el Comité de Basilea no estableció metodologías en particular, sino que ha otorgado a las instituciones un importante nivel de flexibilidad, el desarrollo de técnicas para la medición del riesgo ha sido muy dinámica incursionando en métodos de medición avanzada.

El anterior proceso de generación de nuevas técnicas obedece, además de lo comentado en el párrafo anterior, al hecho de que hasta hace relativamente pocos años se definió el riesgo operativo como tal, por lo que no se cuentan con bases de datos importantes que permitan hacer estimaciones del nivel del riesgo haciendo uso de las técnicas tradicionales que se basan en la estimación a partir del análisis de un importante cumulo de datos.

Ciertamente, en la actualidad se encuentra evidencia sobre diversas metodologías mediante las que se ha abordado el problema. La siguiente gráfica, expuesta en la Revista de Ingeniería de la Universidad de los Andes, ilustra los diferentes enfoques metodológicos empleados en la medición del riesgo operativo. (Castillo & Mendoza, 2004)

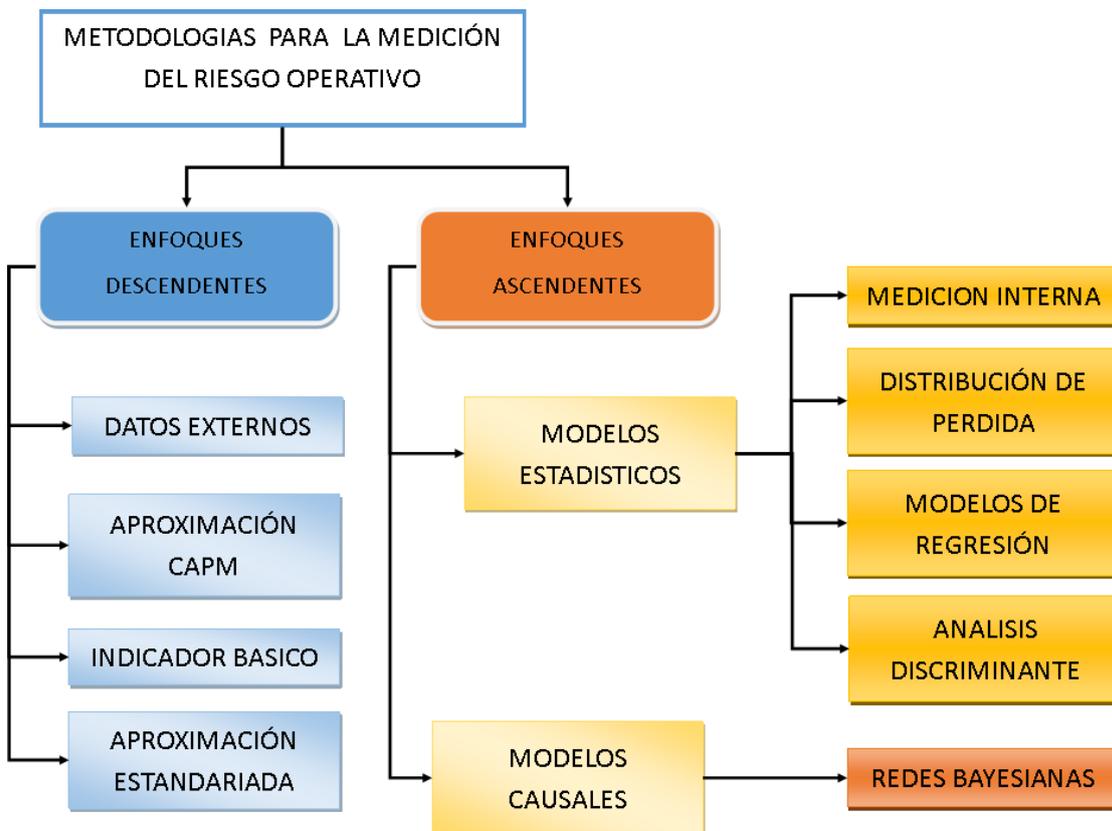


Figura 4 Enfoques metodológicos para la medición del riesgo operativo. Gráfica tomada la revista de ingeniería de la universidad de los andes. (CASTILLO & MENDOZA, 2004)

En efecto, se reconocen dos grandes categorías en las metodologías que son pertinentes para desarrollar la fase de valoración del riesgo: los enfoques descendentes y los enfoques ascendentes. Las metodologías descendentes tienden a centrarse en medidas más amplias de riesgo operativo con el objetivo de estimar la provisión que la entidad debe realizar, mientras que las metodologías ascendentes producen medidas más precisas del nivel de exposición al riesgo. Este último tipo de metodologías se basan principalmente en dos tipos de modelos cuantitativos: modelos estadísticos y modelos causales. Los primeros se basan en información histórica sobre la frecuencia y el monto de los eventos de pérdida, mientras que los modelos causales, adicionalmente a la información histórica, tienen en cuenta el juicio de expertos. Dentro del conjunto de modelos causales, uno de los más utilizados son las Redes Bayesianas, que es precisamente el que se ha adoptado para el desarrollo de este trabajo. Como se ha mencionado con anterioridad uno de las mayores dificultades que se enfrenta al intentar medir el riesgo operativo es la ausencia de datos históricos. En efecto, el enfoque bayesiano se muestra como una alternativa viable, pues los modelos bayesianos permiten incorporar información subjetiva, como la opinión de expertos.

Como es lógico, la implementación de una red bayesiana exige una metodología. Ciertamente, se puede encontrar en la literatura, una amplia gama de propuestas. En este caso, se muestra la metodología propuesta por Castillo (Castillo Hernández, 2006), que involucra los siguientes pasos:

1. Identificar las variables relevantes para explicar las variables que se requieren analizar.
2. Construir la estructura de la red, estableciendo relaciones de causalidad entre las variables identificadas.
3. Verificar conceptualmente los supuestos de independencia condicional y ausencia de relaciones circulares.
4. Definir los estados posibles para diferentes variables.
5. Estimar las distribuciones de probabilidad para las variables que no dependen de otras. Se utiliza información histórica y o juicios de expertos.
6. Estimar las distribuciones de probabilidad condicional para las variables que dependen de otras.
7. Validar la estructura y las probabilidades de la red.
8. Realizar la evaluación de la red utilizando un paquete computacional.

9. Analizar los resultados. Básicamente se analizan las distribuciones de probabilidad obtenidas en las variables de interés. Adicionalmente, se puede hacer un análisis de sensibilidad.

### 1.3.9 Medir la correlación entre eficiencia y riesgo

La complejidad del trabajo propuesto radica en proponer una metodología que integre los sistemas de optimización con los sistemas de valoración del riesgo, de tal forma que permitan representar la operación de un sistema de distribución de valores determinando el punto para el cual la operación es óptima dado un nivel de riesgo permitido.

## CAPÍTULO 3

### CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA

El primer paso que se debe ejecutar en procura de resolver el objetivo de este trabajo de investigación es el de caracterizar el sistema, por lo que este acápite se dedica a representar de manera gráfica y descriptiva los elementos básicos del sistema, las características de los mismos y las relaciones entre ellos. Lo anterior, para los dos componentes principales sobre los que se desarrolla el trabajo, es decir, la optimización y la valoración del riesgo.

#### 2.1 Sistema de distribución

El sistema de distribución de efectivo en el Banco de la república está conformado por los siguientes elementos básicos, según fueron expuestos en el numeral 2.3.1, de la siguiente forma:

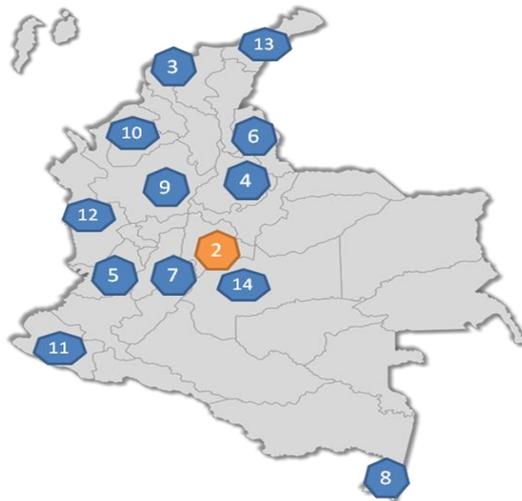
**Los clientes:** Para el propósito de este trabajo los clientes son fundamentalmente las sucursales del Banco con Tesorería. Una sucursal con tesorería es una unidad organizacional que está facultada para adelantar la función de tesorería del banco en el área geográfica correspondiente, lo anterior implica que tiene como funciones el procesamiento de efectivo (Clasificación y destrucción), así como la provisión y distribución del efectivo al sistema financiero y al público en general.

Las sucursales con tesorería están dotadas de la infraestructura necesaria, consistente básicamente en bóvedas con altos niveles de seguridad, patios de maniobras para la operación de cargue de los vehículos blindados. De manera complementaria, las sucursales con tesorería cuentan con complejos sistemas de seguridad compuestos por dispositivos electrónicos, rigurosos procedimientos y recurso humano calificado. Adicionalmente, las sucursales con tesorería cuentan con los equipos de clasificación y destrucción del numerario.

Actualmente, el Banco cuenta con catorce (14) sucursales con tesorería como se muestra en la tabla y figura siguientes.

**TABLA 1** Sucursales del Banco de la Republica con funciones de tesorería. Creación propia del autor.

| CÓDIGO | SUCURSAL      |
|--------|---------------|
| 1      | ARMENIA       |
| 2      | BOGOTÁ        |
| 3      | BARRANQUILLA  |
| 4      | BUCARAMANGA   |
| 5      | CALI          |
| 6      | CÚCUTA        |
| 7      | IBAGUÉ        |
| 8      | LETICIA       |
| 9      | MEDELLÍN      |
| 10     | MONTERÍA      |
| 11     | PASTO         |
| 12     | QUIBDÓ        |
| 13     | RIOHACHA      |
| 14     | VILLAVICENCIO |



**Figura 5** Distribución geográfica de las sucursales del banco de la república con funciones de tesorería. creación propia del autor.

Por otra parte se debe mencionar que en la actualidad y mediante contratos con transportadoras privadas el Banco de la República cuenta con la posibilidad de distribuir efectivo. Actualmente se tienen dos tipos de Bóvedas Anexas: Los Centros de Efectivo y los Centros Únicos de Efectivo, la diferencia radica en que los Centros Únicos de Efectivo operan dentro de la misma ciudad o región que las Sucursales con Tesorería, mientras que los Centros de Efectivo operan en ciudades donde no hay Sucursal con Tesorería. Normalmente las bóvedas Anexas son provistas por la Sucursal con Tesorería más cercana. En este caso las sucursales con Tesorería operan como un nodo intermedio (almacén) en esta cadena logística. En este sentido, se debe resaltar que para los

propósitos de este trabajo, únicamente, constituyen clientes las sucursales con tesorería que son administradas directamente por el Banco de la República.

**La demanda:** La operación de un sistema de distribución de estas características existe, fundamentalmente, para resolver la necesidad de los clientes en relación al producto que se transporta. Dicho de forma general, se puede afirmar que el sistema de distribución existe para atender la demanda de especies monetarias de la economía nacional. Para determinar la demanda se deben considerar dos aspectos básicos: Las políticas de nivel de inventarios y la demanda estimada. En efecto, por tratarse de un sistema de distribución que conlleva el almacenamiento del producto, las cantidades a demandar están condicionadas por las políticas de inventario, que propenden por garantizar la previsión oportuna sin incurrir en sobre costos o en altos niveles de exposición al riesgo de pérdida. Por otra parte, el comportamiento esperado de la demanda de los agentes está determinada por un importante número de variables que han sido ampliamente estudiadas, de manera agregada, por investigadores de estudios económicos del Banco de la República (Arango Arango & Misas Arango, 2004) La modelación de la demanda se realizará de forma desagregada, puesto que para los propósitos de este trabajo de debe estimar la demanda para cada “cliente”.

**El depósito:** La central de efectivo es un complejo industrial de alta seguridad en la que se adelantan dos actividades principales: La impresión de las especies monetarias y el almacenamiento y distribución del efectivo. Este complejo está ubicado en la avenida 68 con calle 26, como se muestra en las siguientes gráficas. De esta forma, para los propósitos de este trabajo, la central de efectivo, es el único depósito, con una capacidad de almacenamiento, una ubicación geográfica y una variedad de productos,



**Figura 6** Perspectiva del complejo de la central de efectivo. Recuperado de <http://www.banrep.gov.co>.

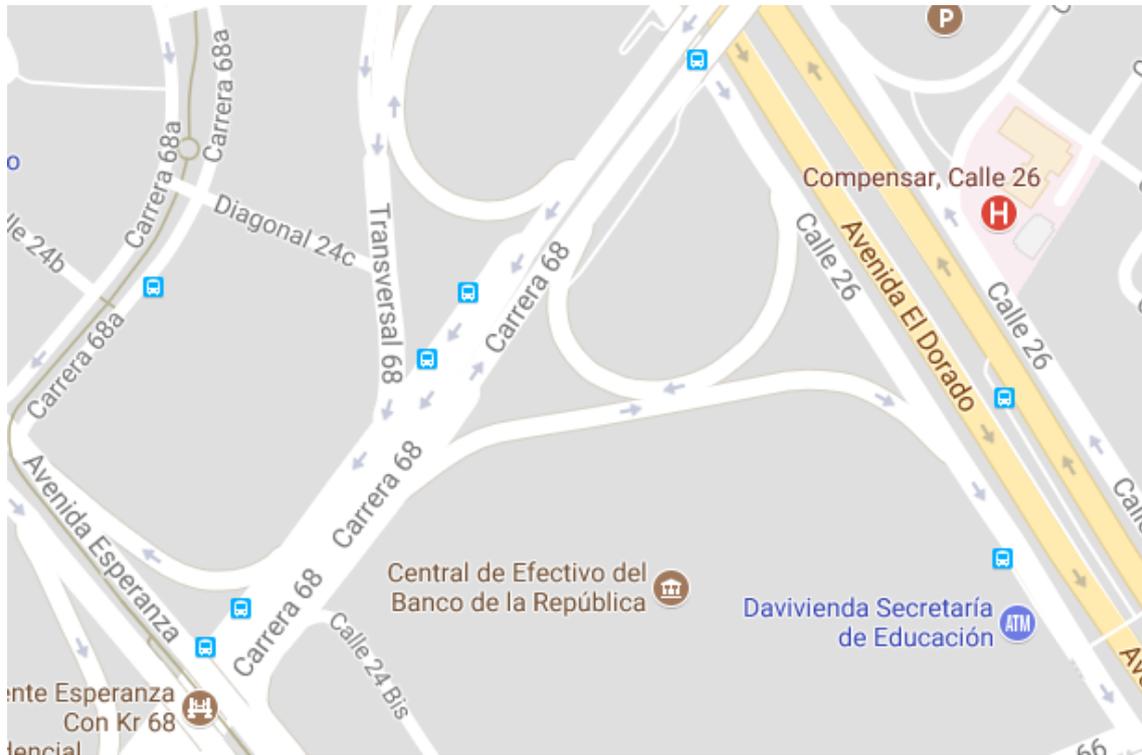


Figura 7 Google. (s.f.). [mapa de Bogotá, intersección calle 26 con carrera 68] en google maps]. Recuperado el 27 de julio, 2017, de: <https://www.google.com.co/maps/>.

En la central de efectivo se integró, en un solo centro, el control de las actividades de producción (Imprenta de Billetes), movimiento y manejo de valores (Tesorería), su diseño permite que las actividades producción de especies monetarias y la custodia y distribución de las mismas operen de manera automática con la mínima intervención del factor humano.

En el área de tesorería se encuentra una sola bóveda dotada de sistemas automatizados de almacenamiento y control. Esta bóveda es el componente físico del depósito principal del sistema de distribución que se está modelando. No obstante, lo anterior, se debe mencionar que en algunas ocasiones las Sucursales con Tesorería, que son esencialmente clientes, pueden operar como depósitos para proveer a las bóvedas delegadas.

**Los canales:** Existen diversas formas en las que se pueden transportar las especies monetarias a la economía. Actualmente, en el Banco se utilizan tres canales,

dependiente del tipo de cliente, de la siguiente forma: La operación de transporte de valores que tiene como destino las Sucursales con Tesorería se adelanta con recursos propios, mientras que las operaciones que tiene como destino las Bóvedas Adjuntas se adelantan con las transportadoras que administran las Bóvedas o mediante una mezcla de los sistemas antes enunciados, es decir una fase de la Central de efectivo a la Sucursal con Tesorería, por cuenta del Banco y de las Sucursales con Tesorería a las Bóvedas Adjuntas, por cuenta de la transportadora privada. Seguidamente se especifican los canales antes señalados:

- Central de Efectivo a Sucursales con Tesorería: El traslado se adelanta en tres fases:
  - Central de Efectivo – Aeropuerto El Dorado: Caravana de vehículos blindados (dispositivo propio)
  - Aeropuerto El Dorado - Aeropuerto Sucursal con Tesorería: Aviones fletados
  - Aeropuerto Sucursal con Tesorería \_ Sucursal con Tesorería: Caravana de vehículos blindados (dispositivo propio)
  
- Central de Efectivo a Bóvedas Adjuntas: El traslado lo adelanta la transportadora de valores con recursos propios. Utilizan sus vehículos en el trayecto Central de Efectivo – Aeropuerto el Dorado, transportan el efectivo en las aerolíneas comerciales en el trayecto Aeropuerto El Dorado – Aeropuerto de la ciudad de la Bóveda Adjunta; y para el trayecto final, Aeropuerto de la ciudad a la Bóveda Adjunta, utilizan vehículos propios.
  
- Sucursales con Tesorería a Bóvedas Adjuntas: El traslado lo adelanta la transportadora de valores con recursos propios.

**Los vehículos:** Como se deduce de lo expuesto en el anterior aparte, en la operación participan vehículos terrestres y aviones. Los vehículos propios son camiones furgonados con nivel de blindaje cinco. Los aviones son aeronaves fletadas operados por aerolíneas de carga.

**La carga:** Es claro que los sistemas de distribución existen fundamentalmente para proveer a los clientes unos bienes que en términos generales se denomina la carga.

Particularmente, para el sistema de distribución que es objeto de análisis en este trabajo la carga consiste en especies monetarias por lo que el sistema se puede caracterizar como un sistema de distribución de alto valor. Lo anterior, implica que el valor de la carga se establece en el análisis como una variable central.

**Políticas y normas legales:** adicionalmente a los elementos físico un sistema de distribución debe contar con un marco regulatorio y de política para su operación. En particular existen disposiciones legales que regula la cantidad de efectivo que se puede almacenar en una sucursal, que se puede transportar en una sola operación. Se debe resaltar que las políticas determinadas inciden de manera directa en la eficiencia de la operación y en el nivel de riesgo asumido. En este sentido, están directamente relacionadas con el objetivo de este estudio, pues los resultados que se obtengan permitirán conocer el impacto esperado en la eficiencia y en la exposición al riesgo al adoptar un esquema de políticas en particular.

De manera esquemática el sistema de distribución de efectivo en Colombia funciona como se muestra en la siguiente figura:

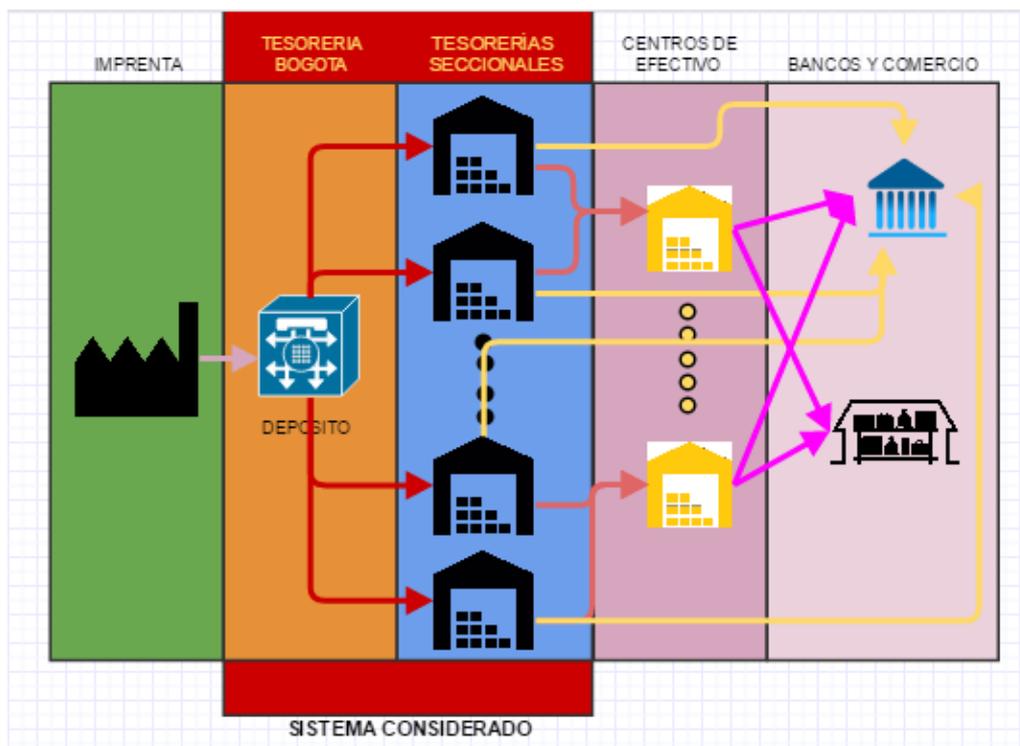


Figura 8 Caracterización del sistema de distribución de efectivo del Banco de la República. Creación propia del autor.

Este trabajo limita su alcance al sistema de distribución que es administrado por el Banco de la República, es decir el que inicia en la central de efectivo (deposito) a las sucursales con tesorería. En este sentido, la figura ilustra, de manera más detallada, como funciona la operación de distribución del efectivo en el sistema objeto de estudio.

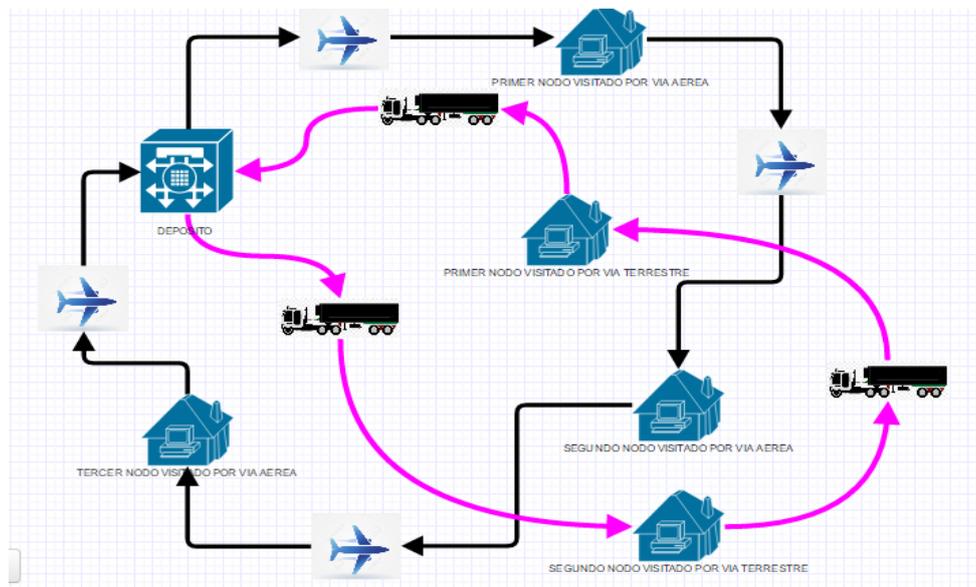


Figura 9 Esquema de una operación de transporte de valores en el Banco de la República. Creación propia del autor.

## 2.2 Riesgo inherente

Partiendo de la metodología expuesta en el aparte 2.3.8, del marco teórico, puede observarse que los tres primeros pasos están encaminados a la caracterización de la red, en el caso en estudio, una red que modele el riesgo. Por esto, en este aparte, caracterizamos el componente del riesgo desarrollando los tres primeros pasos de la metodología propuesta por (Castillo Hernández, 2006). No obstante, a lo anterior, se propone dividir el primer paso en dos pasos, de tal forma que el primer paso sea la definición de la variable que se quiere explicar y en una segunda fase identificar las variables relevantes que podrían explicar la variable de análisis.

La metodología que se utiliza para caracterizar el riesgo es la que se muestra en la figura 10 que comprende los cuatro primeros pasos de la metodología propuesta adaptada de la expuesta por (Castillo Hernández, 2006).

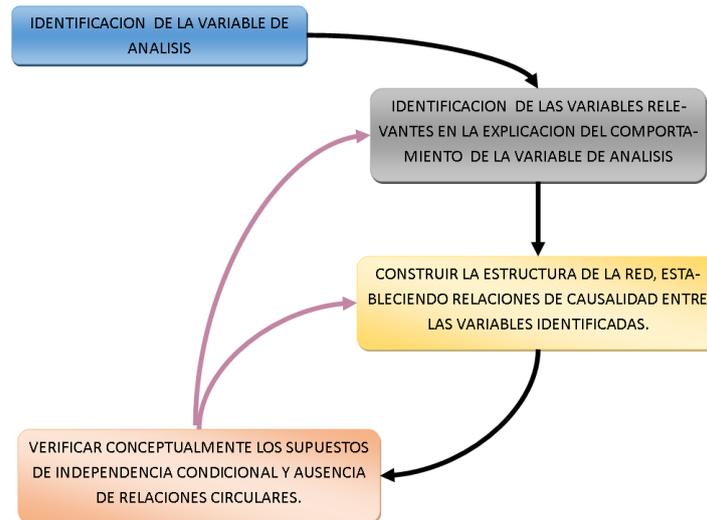


Figura 10 Esquema de la metodología propuesta para la valoración del riesgo. Adaptado de Castillo Hernández, 2006.

### 2.2.1 Identificar la variable de estudio.

El riesgo operativo involucra tres componentes principales: i) una posibilidad, que para efectos metodológicos se define en términos de una probabilidad; por otro lado, un ii) evento no deseado o inconveniente; y finalmente, iii) una pérdida, que puede ser precisada en términos de una pérdida monetaria esperada. En síntesis, la variable de estudio es la pérdida monetaria esperada en un periodo de tiempo asociada a los eventos de riesgo inherente a la actividad de distribución de efectivo.

### 2.2.2 Identificar las variables relevantes.

Este aparte se desarrolla empleando la técnica denominada análisis causa-efecto ampliamente conocida y que fue creada por el profesor Ishikawa. Al respecto se han encontrado aplicaciones concretas de esta técnica en la caracterización del riesgo. (Martínez Sánchez & Venegas Martínez, 2011). El resultado de esta técnica es el que se plasma en los gráficos que se presentan a continuación, para cada uno de los tipos de eventos de riesgo definidos en el aparte 2.3.7.

- Diagrama de causa efecto para el evento de riesgo “Operación Fallida”.

De la manera que se mencionó en los apartes anteriores uno de los eventos de riesgo que se analizarán es que la operación no termine de la forma inicialmente planeada,

es decir, que se determine que la operación ha sido fallida. Para este evento, los expertos, han elaborado el siguiente diagrama causa efecto.

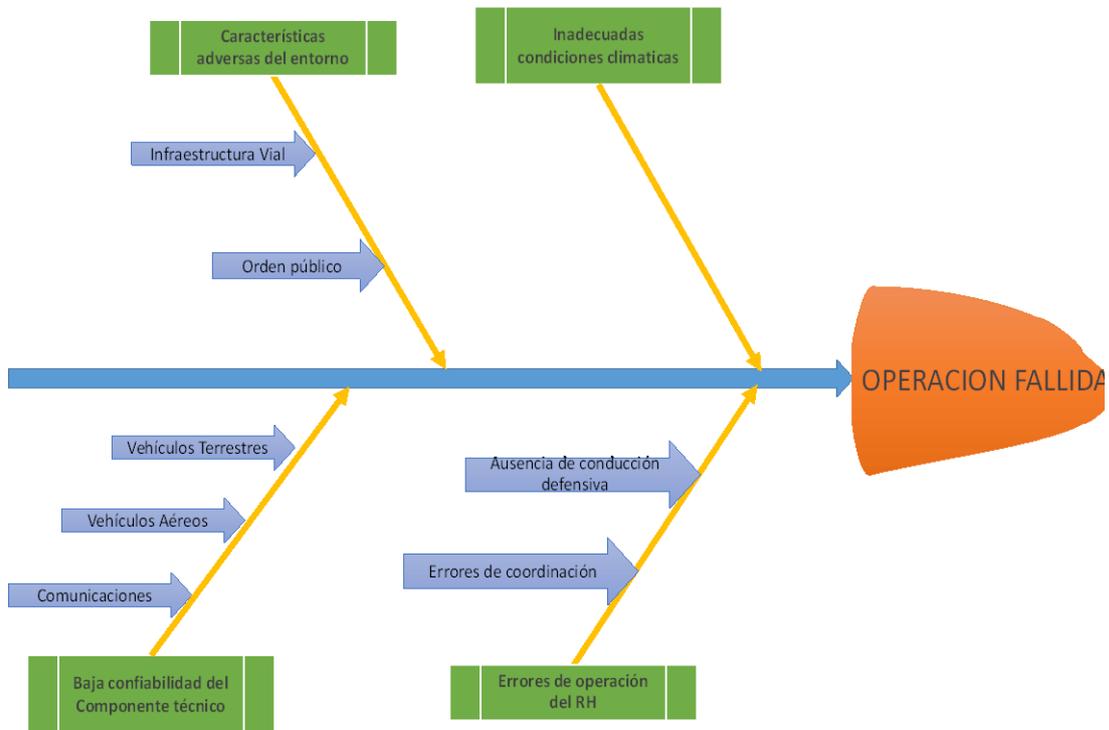


Figura 11 Diagrama causa efecto para el evento de riesgo “operación fallida” consistente en un asalto. Creación propia del autor.

- Diagrama de causa efecto para el evento de riesgo “Catastrófico”.

De acuerdo con lo establecido el aparte 2.3.7 se ha definido como un evento catastrófico aquel que pone en riesgo la integridad de los valores transportados, específicamente para este trabajo se ha determinado que un siniestro del avión que transporta los valores o un ataque planeado con Intenciones de robo o de terrorismo son eventos que en definitiva constituyen un evento catastrófico.

De lo anterior, se infiere que es pertinente utilizar la técnica de análisis de causa y efecto para cada uno de los eventos determinados como catastróficos. En este sentido, para que un asalto se concrete pueden concurrir una o varias de las siguientes causas, según el análisis de causas efecto adelantado por los expertos.

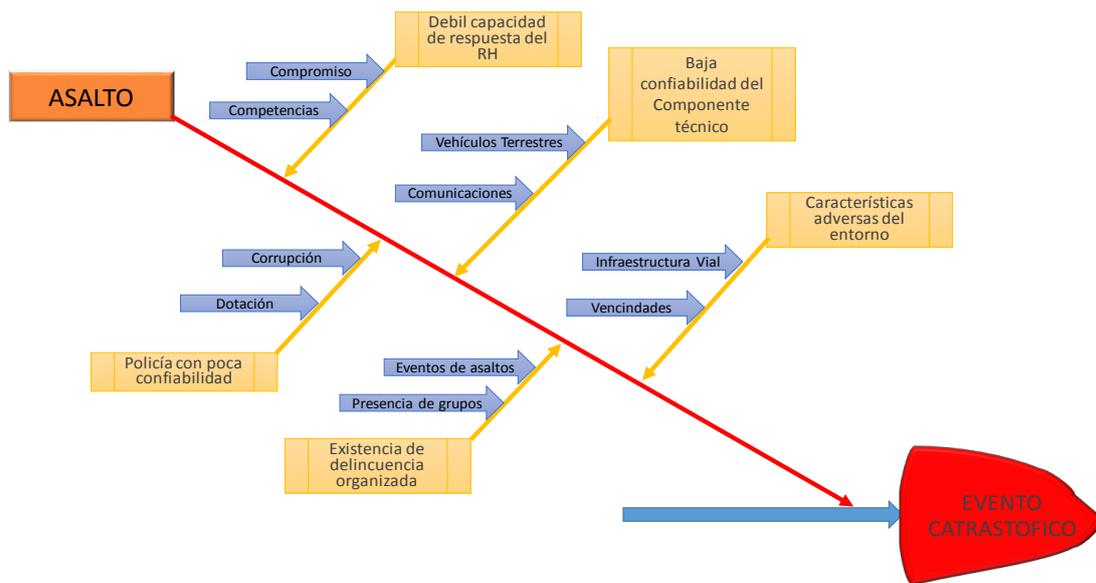


Figura 12 Diagrama causa efecto para el evento de riesgo “catastrófico” consistente en un asalto. Creación propia del autor.

De igual forma, para que un siniestro aéreo se concrete pueden concurrir una o varias de las siguientes causas, según el análisis de causas efecto adelantado por los expertos.

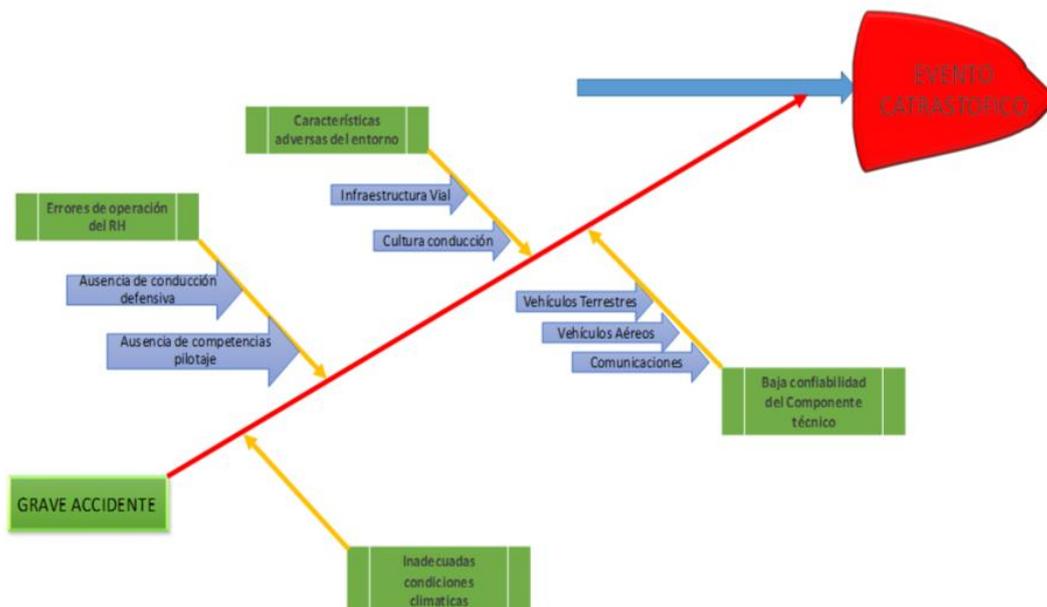


Figura 13 Diagrama causa efecto para el evento de riesgo “catastrófico” consistente en un siniestro aéreo. Creación propia del autor.

### 2.2.3 Construir la estructura de la red.

Partiendo de los diagramas de causa efecto resulta muy natural la construcción de la red bayesiana. Seguidamente se presenta de manera esquemática las obtenidas para cada uno de los eventos de riesgos modelados. En este punto se debe comentar que si bien se realizó un diagrama causa efecto para cada uno de los eventos de riesgo, en la construcción de la red se debe independizar cada una de los medios de transporte, es decir el terrestre del aéreo. Lo anterior, pues el modelo de optimización establece rutas diferentes para cada medio de transporte, quedando expuesto el sistema de distribución a diferentes niveles de riesgo, según el tipo de la ruta determinada en la solución óptima. En razón de lo anterior se construye un diagrama de red para cada medio de transporte. Además de lo anterior, en la construcción de la red se debe considerar el resultado de la simulación, de la que se hablará con posterioridad, pero que básicamente establece los escenarios más probables dados los datos históricos de demanda.

- Red bayesiana para el medio de transporte terrestre.

De manera esquemática la red que modela el riesgo inherente a las operaciones de transporte terrestres de valores es la que se observa a continuación:

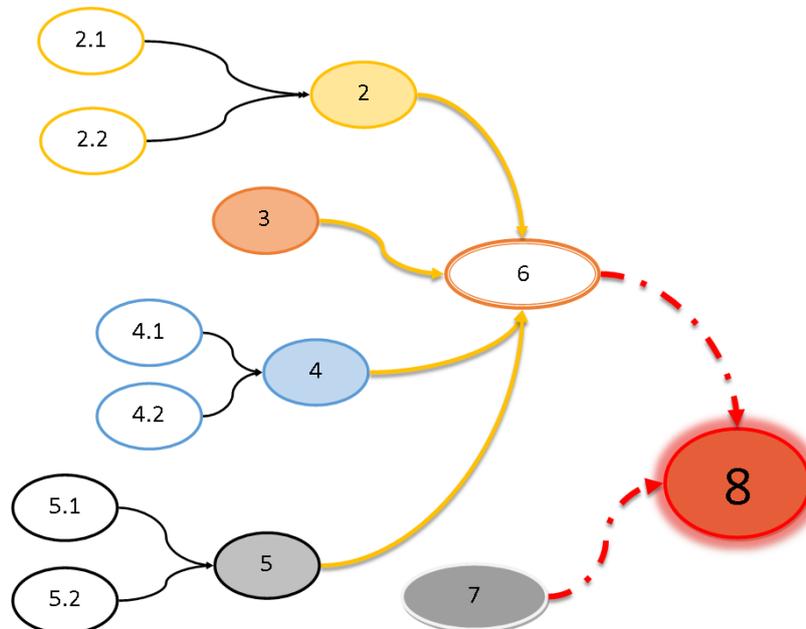


Figura 14 Esquema de una red bayesiana que modela el riesgo inherente a una operación de transporte de valores por vía terrestre desde un sitio específico. Creación propia del autor.

Los nodos de la red que caracteriza el riesgo de las operaciones terrestres, se definen de la siguiente forma:

- Nodo 1: Corresponde a la Oficina que será visitada en la ruta terrestre, de acuerdo con los resultados del ejercicio de simulación con el modelo de optimización.
- Nodo 2: Corresponde al nivel de riesgo asociado al entorno, determinado este, por los dos siguientes factores de riesgo:
  - Nodo 2.1: Se refiere el nivel de riesgo asociado a la infraestructura vial en la ruta del depósito a la Oficina de destino. En particular, se trata de: la condición de la vía, la amplitud, topografía, vías alternas, etc.
  - Nodo 2.2: Se refiere el nivel de riesgo asociado al orden público en la ruta del depósito a la Oficina de destino. En particular, se trata de: la presencia de grupos armados, delincuencia común y alteraciones del orden público (protestas, marchas, etc.)
- Nodo 3: Corresponde al nivel de riesgo asociado a las condiciones climáticas. Así, por ejemplo, climas lluviosos y nublados pueden incrementar las probabilidades de un incidente.
- Nodo 4: Corresponde al nivel de riesgo asociado a la confiabilidad en el sistema tecnológico, determinado este, por los dos siguientes factores de riesgo:
  - Nodo 4.1: En las operaciones de transporte de valores resulta de especial importancia el sistema de comunicaciones. De esta forma, la confiabilidad del sistema de comunicaciones constituye un elemento fundamental en la determinación del nivel de riesgo.
  - Nodo 4.2: Indiscutiblemente, en las operaciones terrestres los vehículos se convierten en elementos tecnológicos fundamentales que, dependiendo de su condición de confiabilidad, pueden incrementar el nivel de riesgo para que una operación resulte fallida o catastrófica.

- Nodo 5: Corresponde al nivel de riesgo asociado a la confiabilidad en el recurso humano, determinado este, por los dos siguientes factores de riesgo:
  - Nodo 5.1: Carencia de conducción defensiva: Definida como la aptitud del conductor para evitar accidentes. Este factor involucra elementos culturales y de formación que determinan la confiabilidad de un conductor en la operación de un vehículo.
  - Nodo 5.2: Idoneidad del recurso humano. Es factor conlleva una serie de elementos particulares, como: capacidad técnica, formación, compromiso, desarrollo de competencias, valores; pero que para los efectos de este trabajo de evalúan de manera conjunta.
  
- Nodo 6: Este nodo resultado establece la posibilidad de una falla en la operación o la posibilidad de un evento catastrófico.
  
- Nodo 7: Este juega dos roles diferentes, dependiendo del evento de riesgo que se este modelando, de la siguiente forma:
  - Tratándose del evento de riesgo falla de la operación, este nodo está determinado por la distribución de probabilidad del valor del costo de realizar la operación a un nodo específico.
  
  - Tratándose del evento de riesgo catastrófico, este nodo está determinado por la distribución de probabilidad del valor monetario expuesto al momento de transportar una carga de especies monetarias a un nodo específico.
  
- Nodo 8: El nodo resultado del modelo establece el nivel de exposición al riesgo considerando el comportamiento y resultado de los nodos precedentes.
  
- Red bayesiana para el medio de transporte aéreo.

De forma similar y con casi la mayoría de los componentes coincidentes se construye la red bayesiana para las operaciones de transporte aéreo. La siguiente gráfica contiene el esquema correspondiente:

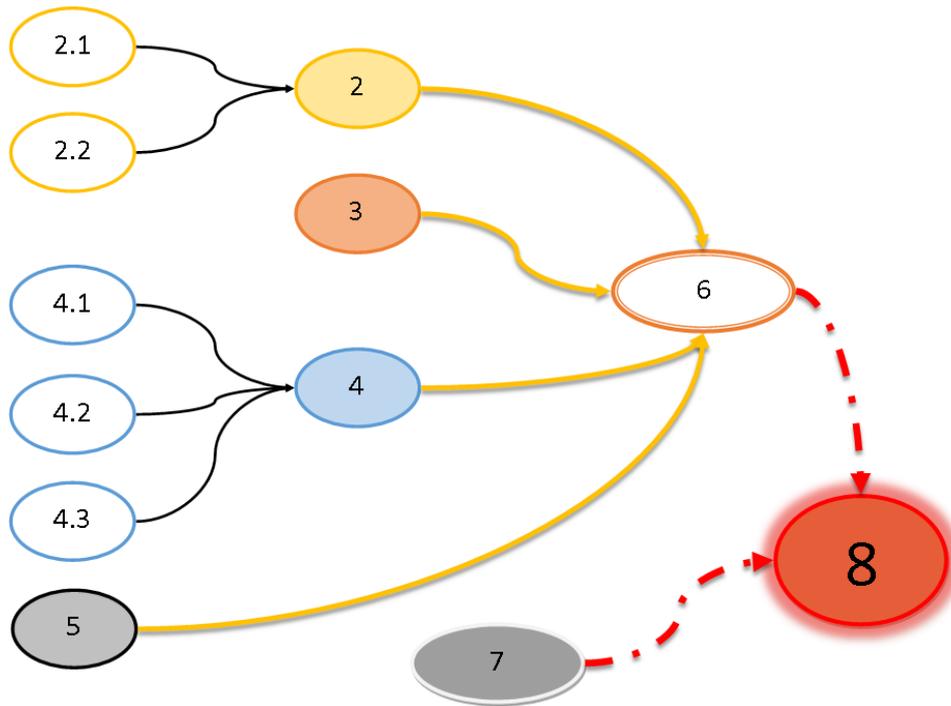


Figura 15 Esquema de una red bayesiana que modela el riesgo inherente a una operación de transporte de valores por vía aérea a un sitio específico. Creación propia del autor.

Seguidamente, se muestran las descripciones de los nodos de la red que caracterizan el riesgo de las operaciones aéreas y que en términos generales coinciden con los de la red que caracteriza el riesgo de las operaciones terrestres.

- Nodo 1: Corresponde a una Oficina que será visitada en la ruta aérea establecida por el modelo de optimización. Las frecuencias esperadas corresponden al resultado del ejercicio de simulación con el modelo optimización.
- Nodo 2: Corresponde al nivel de riesgo asociado al entorno, determinado este, por los dos siguientes factores de riesgo:
  - Nodo 2.1: Se refiere el nivel de riesgo asociado a la infraestructura vial en la ruta del aeropuerto a la Oficina de destino. En particular, se trata de: la condición de la vía, la amplitud, topografía, vías alternas, etc. Adicionalmente, considera el estado de la infraestructura aeroportuaria. Número de pistas, características de las pistas, equipos de emergencia, etc.

- Nodo 2.2: Se refiere el nivel de riesgo asociado al orden público en la ruta del aeropuerto a la Oficina de destino. En particular, se trata de: la presencia de grupos armados, delincuencia común y alteraciones del orden público (protestas, marchas, etc.)
- Nodo 3: Corresponde al nivel de riesgo asociado a las condiciones climáticas. Así, por ejemplo, climas lluviosos y nublados pueden incrementar las probabilidades de un incidente.
- Nodo 4: Corresponde al nivel de riesgo asociado a la confiabilidad en el sistema tecnológico, determinado este, por los dos siguientes factores de riesgo:
  - Nodo 4.1: En las operaciones de transporte de valores resulta de especial importancia el sistema de comunicaciones. De esta forma, la confiabilidad del sistema de comunicaciones constituye un elemento fundamental en la determinación del nivel de riesgo.
  - Nodo 4.2: Indiscutiblemente, en las operaciones aéreas, las aeronaves, se convierten en elementos tecnológicos fundamentales que, dependiendo de su condición de confiabilidad, pueden incrementar el nivel de riesgo para que una operación resulte fallida o catastrófica.
  - Nodo 4.3: Si bien es cierto, en las operaciones aéreas el trayecto terrestre, del aeropuerto a la oficina destino, es usualmente corto y seguro, se deben considerar los furgones blindados pues, dependiendo de su condición de confiabilidad, pueden incrementar el nivel de riesgo para que una operación resulte fallida o catastrófica.
- Nodo 5: Corresponde al nivel de riesgo asociado a la confiabilidad en el recurso humano. Es factor conlleva una serie de elementos particulares, como: capacidad técnica, formación, compromiso, desarrollo de competencias, valores; pero que para los efectos de este trabajo de evalúan de manera conjunta.
- Nodo 6: Este nodo resultado establece la posibilidad de una falla en la operación o de la ocurrencia de un evento catastrófico, dependiendo del evento de riesgo que se este modelando.

- Nodo 7: Este juega dos roles diferentes, dependiendo del evento de riesgo que se este modelando, de la siguiente forma:
  - Tratándose del evento de riesgo falla de la operación, este nodo está determinado por la distribución de probabilidad del valor del costo de realizar la operación a un nodo específico.
  - Tratándose del evento de riesgo catastrófico, este nodo está determinado por la distribución de probabilidad del valor monetario expuesto al momento de transportar una carga de especies monetarias a un nodo específico.
  
- Nodo 8: El nodo resultado del modelo establece el nivel de exposición al riesgo considerando el comportamiento y resultado de los nodos precedentes.

El sistema bajo análisis se ha caracterizado mediante un sistema de distribución al que se le adjunta una red bayesiana para modelar el riesgo inherente asociado. El desarrollo matemático y computacional de estos dos componentes del modelo se muestra en los capítulos siguientes.

Dada la complejidad del modelo de optimización, se propone un desarrollo en dos fases, de la siguiente forma: Una primera fase para hacer una aplicación a una situación diaria, que en el resto del documento denominaremos modelo de aplicación inmediata y una segunda aplicación para un modelo para una aplicación para un escenario de planeación mayor que abarque la visita a todas las oficinas que denominaremos modelo de planeación.

## CAPÍTULO 4

### OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN MODELO DE APLICACIÓN INMEDIATA

El anterior capítulo se caracterizó el sistema de distribución, en este capítulo se debe proceder con la implementación y aplicación del modelo. En este punto se debe hacer énfasis en la razón por la cual el modelo se presenta en dos versiones: un modelo de aplicación inmediata y un modelo para la planeación en un periodo de tiempo. Si bien es cierto, ambos modelos comparten esencialmente la misma conceptualización del problema, el modelo de aplicación inmediata resulta un paso esencial en la construcción del modelo de planeación. En efecto, la aplicación de un modelo más sencillo sobre un conjunto importante de escenarios probables permitirá evaluar las condiciones en que opera el modelo en sus elementos esenciales de tal forma que en la construcción del modelo completo se puedan realizar los ajustes que se deriven del análisis de los resultados observados en la simulación con el modelo sencillo.

En alineación con lo expuesto en el marco teórico, existen muchos trabajos que presentan modelos de optimización para sistemas de distribución como el caracterizado en el capítulo anterior. En general se trata de modelos de ruteo para sistemas con limitaciones de capacidad y flota de vehículos heterogénea, conocidos como modelos (VRPHF). Complementariamente y en procura de los objetivos propuestos el modelo debe tener un componente de asignación de carga que garantice una administración de los valores a transportar de tal forma que el valor expuesto sea el mínimo. Así las cosas, el modelo se integra con dos componentes principales: un modelo de ruteo (VRPHF) y un modelo de asignación de carga.

#### 3.1 Modelación matemática

De manera general, el problema de ruteo, se representa mediante un grafo no dirigido  $G = (V, A)$  donde  $V = \{0, 1, \dots, n\}$ , un conjunto no vacío de objetos simples llamados vértices o nodos y  $A \subseteq \{ (i, j) \in V \times V : i \neq j \}$  es un conjunto de pares ordenados de elementos de  $V$  denominados aristas o arcos, donde por definición un arco va del primer

nodo (i) al segundo nodo (j) dentro del par. Los nodos 1 a n representan los clientes, es decir:  $V' = V \setminus \{0\}$ ; y el nodo 0 corresponde al depósito.

Por otra parte, existe un conjunto de vehículos K, cada uno con una capacidad  $CK$ , que están disponibles en el depósito. Adicionalmente, existe un costo  $CMK$  no negativo asociado a cada arco  $(i,j) \in A$  y representa el costo del viaje para ir desde el nodo i al nodo j en el vehículo k.

Existe un conjunto de elementos M, cada un valor asociado, que son susceptibles de transportar del nodo i al nodo j, en el vehículo K.

Cada cliente  $i \in V$  está asociado con un nivel de existencias o inventario inicial, de elementos M, no negativo conocido  $l(i)$ . Existe una política de reposición que establece que a partir de cierto nivel mínimo de existencias en los inventarios de un nodo i hay una demanda de elementos m en el nodo i  $D_{(im)}$  que se debe atender.

Se trata de encontrar un conjunto de V rutas, una por vehículo, con el mínimo costo, que:

- Los clientes, con demandas positivas, sean atendidos no más de una vez por una cualquiera de las rutas.
- Cada ruta inicia y termina en el depósito
- Se atienda el mayor número de clientes posible.
- Cada ruta no exceda el máximo tiempo permitido para la operación de un vehículo.
- Las sumas de las cantidades transportadas no excedan las capacidades de los vehículos.
- Las sumas de las cantidades transferidas en un nodo no excedan la capacidad de operación del nodo.
- Se atienda prioritariamente los clientes con demandas más críticas.
- Se transporte el menor valor total de unidades monetarias.
- Se transporten prioritariamente las denominaciones con demandas más críticas.
- No se transporten valores por encima de los valores cubiertos por la póliza global bancaria.
- El sistema debe minimizar el valor de carga que se expone en una operación.

### 3.1.1 Determinación de los conjuntos

El primer paso en la modelación es la definición de los conjuntos que conformaran el modelo, de la siguiente forma:

- Nodos

$\dot{I}$  es el conjunto de todos los nodos de origen, en total catorce (14). Este conjunto esta compuesto por el depósito único y trece sucursales.  $\dot{I} \in \{0,1,2,\dots,V\}$

$\dot{J}$  Es el conjunto de todos los nodos de destino. Este conjunto está compuesto por el depósito único y trece sucursales.  $\dot{J} \in \{0,1,2,\dots,V\}$

La siguiente tabla muestra la lista de los nodos de origen y destino que como se puede advertir son los mismos. Para efectos del modelo se han codificado de la siguiente forma: OCE, para el depósito; para el resto de nodos se codifican de la siguiente forma: número del nodo/tipo de sucursal/código IATA<sup>1</sup>.

**TABLA 2** Listados de las oficinas que constituyen los nodos que conforman el sistema de distribución de efectivo. Creación propia del autor.

| $\dot{i}, \dot{j}$ | TIPO           | NOMBRE              | CODIGO MODELO |
|--------------------|----------------|---------------------|---------------|
| 0                  | DEPOSITO UNICO | CENTRAL DE EFECTIVO | OCE           |
| 1                  | SUCURSAL A     | ARMENIA             | ISA_AXM       |

<sup>1</sup> La Organización Internacional para el Transporte Aéreo (International Air Transport Association) establece estos códigos oficiales únicos para identificar los aeropuertos para efectos de navegación.

|    |                   |               |          |
|----|-------------------|---------------|----------|
| 2  | <b>REGIONAL</b>   | BARRANQUILLA  | 2R_BAQ   |
| 3  | <b>SUCURSAL B</b> | BUCARAMANGA   | 3SB_BGA  |
| 4  | <b>REGIONAL</b>   | CALI          | 4R_CLO   |
| 5  | <b>SUCURSAL B</b> | CUCUTA        | 5SB_CUC  |
| 6  | <b>SUCURSAL B</b> | IBAGUE        | 6SB_IBE  |
| 7  | <b>SUCURSAL B</b> | LETICIA       | 7SB_LET  |
| 8  | <b>REGIONAL</b>   | MEDELLIN      | 8R_MDE   |
| 9  | <b>SUCURSAL A</b> | MONTERÍA      | 9SA_MTR  |
| 10 | <b>SUCURSAL A</b> | PASTO         | 10SA_PSO |
| 11 | <b>SUCURSAL B</b> | QUIBDÓ        | 11SB_UIB |
| 12 | <b>SUCURSAL B</b> | RIOHACHA      | 12SB_RCH |
| 13 | <b>SUCURSAL B</b> | VILLAVICENCIO | 13SB_VVC |

- Vehículos

$K$  Es el conjunto de los vehículos empleados en la actualidad en la operación.  $K \in$

$\{1,2,\dots,K\}$

**TABLA 3** Listado de vehículos que participan en el sistema de distribución de efectivo. Creación propia del autor.

| $K$ | MEDIO     | ESPECIFICACIONES VEHICULOS | CODIGO MODELO |
|-----|-----------|----------------------------|---------------|
| 1   | Aéreo     | BOEING 727-100             | ABOEI100      |
| 2   | Aéreo     | ANTONOVAN-32               | AANT32        |
| 3   | Terrestre | CAMION INTERNACIONAL 4000  | TFBINT        |

- Denominaciones

$M$  Es el conjunto de las denominaciones de las especies monetarias.  $M \in \{$

$1,2,\dots,M\}$

Actualmente, circulan en el país billetes con las siguientes denominaciones:

**TABLA 4** Listado de las denominaciones que son objeto de transporte en el sistema de distribución. Creación propia del autor.

| $\mathcal{M}$ | <b>CODIGO</b> | <b>DENOMINACIÓN</b> |
|---------------|---------------|---------------------|
| <b>1</b>      | <i>1MIL</i>   | \$ 1.000            |
| <b>2</b>      | <i>2MIL</i>   | \$ 2.000            |
| <b>3</b>      | <i>5MIL</i>   | \$ 5.000            |
| <b>4</b>      | <i>10MIL</i>  | \$ 10.000           |
| <b>5</b>      | <i>20MIL</i>  | \$ 20.000           |
| <b>6</b>      | <i>50MIL</i>  | \$ 50.000           |

No obstante, lo anterior, para efectos de este trabajo y por las razones de confidencialidad ya expuestas se ha cambiado las denominaciones por un nuevo conjunto en el que simplemente se codifican las denominaciones con utilizando las tres (3) primeras letras de seis (6) planetas del sistema solar de la siguiente forma: SAT, VEN, JUP, PLU, URA y MER.

### 3.1.2 Parámetros

El modelo está configurado por los siguientes parámetros:

- Inventario inicial

$II_{(jm)}$  : Es la cantidad de pacas de especies monetarias de inventario que se custodian en el nodo  $j$ , de la denominación  $\mathcal{M}$  al inicio del ejercicio.

- Existencia agregada.

$EA_{(j)}$  : Es la cantidad de pacas de todas las especies monetarias que están custodiadas en el nodo  $j$ . En términos algebraicos la existencia agregada se enuncia de la siguiente forma:

$$EA_{(j)} = \sum_{m \in M} II_{(jm)} \forall j \in V$$

- Punto de reposición (límite inferior)

$LI_{(jm)}$  : Es la cantidad mínima de pacas de especies monetarias en inventario que mantener como en el nodo  $j$ , de la denominación por debajo de esta cantidad se considera que hay demanda.

- Demanda.

$D_{(jm)}$  : Es la cantidad de pacas de especies monetarias que deben ser provistas en el nodo  $j$ , de la denominación  $M$ . La demanda es el resultado de la diferencia entre el inventario inicial y el punto de reposición. En el evento que la anterior diferencia sea menor que cero, la demanda sera cero. En términos algebraicos la demanda se enuncia de la siguiente forma:

$$D_{(jm)} = LI_{(jm)} - II_{(jm)}$$

- Demanda agregada.

$DA_{(j)}$  : Es la cantidad de pacas de todas las especies monetarias que debe ser provistas en el nodo  $j$ . En términos algebraicos la demanda agregada se enuncia de la siguiente forma:

$$DA_{(j)} = \sum_{m \in M} D_{(jm)} \forall j \in V$$

- Relación porcentual de demanda sobre existencias.

$PST_{(j)}$  : Es la relación, en términos porcentuales, de la demanda agregada, sobre las existencias agregadas en el nodo,  $j$ . Esta variable se puede interpretar como un indicador de urgencia de abastecimiento. De esta forma, entre mayor sea el valor de esta variable existe mayor urgencia en realizar envíos. En términos algebraicos esta relación se enuncia de la siguiente forma:

$$PST_{(j)} = \frac{DA_{(j)}}{EA_{(j)}}$$

- Valor nominal de una denominación

$N_{(m)}$  : Es el valor nominal de la especie monetaria  $\mathcal{M}$ . Es el valor monetario y que, en la práctica, se corresponde de manera directa con su nombre. No obstante, lo anterior, y de la forma que se ha mencionado, por razones de confidencialidad, se utilizaran valores transformados para asociar a las especies monetarias con su valor económico.

- Capacidad de operación en un nodo

$CO_{(j)}$  : Es la máxima capacidad de operación, en número de pacas, que tiene el nodo  $j$ . En efecto, por razones logísticas cada nodo puede transferir en una operación hasta un determinado número de pacas.

- Capacidad de carga de un vehículo

$CK_{(k)}$  : Es la máxima capacidad de carga del vehículo  $\mathcal{K}_k$ , en número de pacas.

- Costo por minuto de un viaje en un vehículo

$CMK_{(k)}$  : Es el costo por minuto de la operación del vehículo  $\mathcal{K}_k$ .

- Tiempo de viaje

$TV_{(ijk)}$  : Es el tiempo, en minutos, que tarda el vehículo  $\mathcal{K}_k$ , desplazándose desde el nodo  $\acute{i}$  al nodo,  $\acute{j}$ .

- Máximo tiempo de viaje permitido en una operación

$MAXTV_{(k)}$  : Máximo tiempo de viaje permitido en una operación por el vehículo  $\mathcal{K}_k$ .

- Número mínimo de visitas por cada vehículo

$NV_{(k)}$  : Número mínimo de visitas que deben realizar el vehículo  $\mathcal{K}_k$ .

- Costo del trayecto por vehículo.

$C_{(ijk)}$  : Costo en millones de pesos de trasladar el vehículo  $\mathcal{K}$  del nodo  $\acute{i}$ , al nodo  $\acute{j}$ . Algebraicamente, es costo por trayecto, se expresa de la siguiente forma:

$$C_{(ijk)} = CMK_{(k)}TV_{(ijk)}$$

- Costo de penalidad por no atender un nodo.

$CPNA_{(j)}$  : Costo en millones de pesos por no atender el nodo  $\acute{j}$  con demanda.

- Costo de penalidad por cargar una denominación de baja demanda.

$CDEM_{(j,m)}$  : Costo por cargar de la denominación  $\mathcal{M}$  con baja participación relativa en la demanda de un nodo  $\acute{j}$ .

- Tope permitido por el valor máximo asegurado mediante la póliza global.

**TOPOL** : Valor máximo, en unidades monetarias, que se encuentra amparado por la póliza global bancaria.

### 3.1.3 Definición de las variables

Se puede hacer una clara distinción entre variables principales de resultado, de decisión y variables auxiliares. Las primeras determinan el valor óptimo obtenido por el modelo, las

segundas constituyen el valor que deben adoptar las decisiones para lograr el resultado óptimo y finalmente las variables auxiliares establecen valores intermedios, necesarios para los cálculos del modelo de optimización.

- Costo total

$Z$  Esta es una variable de resultado calcula la sumatoria de los costos de la operación de transporte adicionados a los costos de penalización por dejar de visitar nodos.

- Valor total transportado

$ZY$  Esta es una variable de resultado calcula el valor total en unidades monetarias transformadas que se transporta durante la operación.

- Trayecto

$X_{(ijk)}$  Es la primera variable de decisión binaria que toma el valor uno (1) si el trayecto  $(i,j)$  es recorrido por el vehículo  $k$  en la solución óptima; toma el valor cero (0), de lo contrario.  $X \in \{0,1\}$

- Tiempo total de viaje.

$TTV_{(k)}$  : Calcula el tiempo total de viaje empleado por el vehículo  $k$  en la solución óptima.

- Variable de precedencia.

$U_{(ik)}$  : Es una variable entera positiva que se utiliza para calcular la precedencia de las visitas, de los nodos  $i$ , para cada vehículo  $k$ .

- Tiempo de viaje.

$TTV_{(k)}$  : Calcula el tiempo empleado por cada vehículo.

- Demanda atendida.

$DIA_{(j)}$  : Calcula, para el nodo  $j$ , la demanda suplida, en número de pacas.

- Demanda no atendida.

$DNA_{(j)}$  : Calcula, para el nodo  $j$ , la demanda no suplida, en número de pacas.

- Carga inicial, para cada vehículo, al momento de iniciar la ruta. en el vehículo.

$QI_{(k)}$  : Calcula, para el vehículo  $k$ , la carga inicial embarcada en el depósito, en número de pacas que es requerida por los nodos visitados.

- Cantidad entregada.

$YE_{(j,k)}$  Calcula la cantidad entregada, en pacas, por el vehículo  $K$ , en el nodo  $j$ .

- Cantidad entregada por denominación.

$YEM_{(j,k,m)}$  Calcula la cantidad entregada, en pacas, de la denominación  $M$ , por el vehículo  $K$ , en el nodo  $j$ .

- Valor en unidades monetarias de la cantidad entregada por denominación.

$VYEM_{(j,k,m)}$  Calcula la cantidad entregada, en valor de unidades monetarias transformadas, de la denominación  $M$ , por el vehículo  $K$ , en el nodo  $j$ .

### 3.1.4 Formulación

Con base en las definiciones de los numerales anteriores, la formulación matemática de modelo de programación lineal, tanto en su componente de ruteo, como en su componente de asignación.

- Función objetivo (ruteo)

①

$$\min Z = \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k=K} C_{ij}^k X_{ij}^k + \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k=K} (1 - X_{ij}^k) PST_j CPNA$$

- Restricciones

①

$$\sum_{i \in V} \sum_{k \in K} X_{ij}^k \leq 1; \forall j \in V' \wedge i \neq j$$

②

$$\sum_{j \in V} \sum_{k \in K} X_{ij}^k \leq 1; \forall i \in V' \wedge i \neq j$$

③

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} X_{ij}^k \geq NV(k) + 1; \forall k \in K \wedge i \neq j$$

④

$$\sum_{i=0} \sum_{j \in V} X_{ij}^k = 1; \forall k \in K$$

⑤

$$\sum_{i \in V} \sum_{j=0} X_{ij}^k = 1; \forall k \in K$$

⑥

$$\sum_{i \in V} X_{ip}^k = \sum_{j \in V} X_{pj}^k; \forall p \in V', \forall k \in K$$

⑦

$$U_i - U_j + [card(i) - 1] X_{ijk} \leq card(i) - 2; \forall ij \in V', \forall k \in K$$

⑧

$$TTV_K = \sum_{j \in V} X_{ij}^k TV_{ij}^k; \forall k \in K$$

⑨

$$TTV_K \leq MAXTTV_k; \forall k \in K$$

**0 Función objetivo principal (modelo HVRPD).** Calcula el costo total de la operación óptima que se obtiene de totalizar el costo de transporte más el costo de penalización por no atender nodos con demanda. El costo de penalización se calcula como la sumatoria de los nodos visitados por el costo de penalización ponderado por la relación porcentual de la demanda agregada sobre las existencias agregadas. De esta forma, el modelo evitará no atender nodos con alta urgencia de envíos.

**R1 Destino único.** Todos los nodos (oficinas sucursales) deben ser visitadas como máximo una sola vez por un vehículo.

**R2 Origen único.** Todos los nodos (oficinas sucursales) deben ser punto de partida como máximo una sola vez por un vehículo.

**R3 Número mínimo de visitas.** Cada vehículo, dependiendo del tipo, debe realizar como mínimo un determinado número de visitas. Se adiciona uno para no considerar el retorno al depósito como una visita.

**R4 Inicio desde el depósito.** Cada vehículo debe iniciar el recorrido en el depósito.

**R5 Retorno al Depósito.** Cada vehículo debe retornar al depósito.

**R6 Flujo.** El mismo vehículo que ingresa a una sucursal debe abandonarla.

**R7 Subciclos.** Evita subciclos

**R8 Tiempo de viaje.** Calcula, para cada vehículo, el tiempo de viaje empleado en cada ruta.

**R9 Limita el tiempo de viaje.** Impide que cada vehículo emplee más tiempo del máximo establecido en la política.

Sobre la solución establecida por el modelo de ruteo, se ejecuta, en una segunda fase, el componente del modelo de asignación de carga, de la siguiente forma:

- Función secundaria a optimizar (modelo CARGA)

①

$$\min ZYEM = \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} VYEM_{ki}^{jm} +$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} VYEM_{ki}^{jm} (CDEM)_{j,m}$$

②

$$\sum_{i,j}^m Y_{i,j}^m \geq D_{i,m}; i = 0CE \wedge \forall j \in V' \wedge \forall m \in M$$

③

$$\sum_{i,j}^m Y_{i,j}^m \leq CO_j; i = 0CE \wedge \forall j \in V' \wedge \forall m \in M$$

④

$$\sum_{i,j}^m Y_{i,j}^m \leq CK_K; i = 0CE \wedge \forall j \in V' \wedge \forall m \in M$$

⑤

$$\sum_{i,j}^m Y_{i,j}^m \geq 0.9CK_K; i = 0CE \wedge \forall j \in V' \wedge \forall m \in M$$

⑥

$$\sum_{i,j}^m Y_{i,j}^m N_m \leq TOPOL; i = 0CE \wedge \forall j \in V' \wedge \forall k \in K$$

- Restricciones (modelo CARGA)

**0 Función objetivo (modelo CARGA).** Calcula el valor óptimo del valor en unidades monetarias transformadas de todos los valores transportados. El segundo componente de la función objetivo considera una penalización para evitar transportar valores de baja denominación y poca demanda relativa en relación con otras denominaciones de mayor demanda y valor.

**R1 Limita la cantidad entregada a demanda.** Restringe la cantidad de pagas total entregadas, por denominación, desde el depósito a cada oficina, como mínimo, a la demanda total para cada denominación.

**R2 Limita la cantidad entregada a la capacidad operativa.** Restringe la cantidad de pagas total entregadas desde el depósito a cada oficina, como máximo, a la capacidad operativa en esa oficina.

**R3 Limita la cantidad máxima cargada a la capacidad de carga del vehículo.** Restringe la cantidad de pagas total entregadas desde el depósito a cada oficina, para cada vehículo, como máximo, a la capacidad de cada vehículo.

**R4 Limita la cantidad mínima cargada a la capacidad de carga del vehículo.** Restringe la cantidad de pagas total entregadas desde el depósito a cada oficina, para cada vehículo, como mínimo, al 90% de la capacidad de cada vehículo. Mediante esta restricción, además de garantizar que no se excederá la capacidad del vehículo, también se evita su subutilización.

**R5 Limita el valor máximo cargado al asegurado por la póliza global.** Restringe, para cada vehículo, el valor cargado en unidades monetarias transformadas al valor máximo asegurado en la póliza global bancaria.

## 3.2 Implementación y ejecución del modelo

Seguidamente se procede con la implementación computacional del modelo y la determinación del escenario base.

### 3.2.1 Implementación computacional

El modelo fue implementado utilizando el software comercial GAMS empleando el solver CPLEX. La ejecución de este desarrollo se realizó en un equipo computacional con las siguientes características: Computador portátil de la marca ASUS, modelo K45VD, con procesador Intel Core i5 y seis (6) GB de memoria RAM.

### 3.2.2 Escenario base

El escenario base para la ejecución del modelo de aplicación inmediata es el que corresponde a la caracterización del modelo expuesto en el numeral 3.1. En ese sentido y como se deduce de la lectura de ese aparte, de los elementos que conforman la caracterización del sistema existen dos que deben ser determinados, de forma particular, estos son: Las políticas y la demanda.

- Determinación de las políticas

En relación a las políticas para el sistema de distribución modelado se establecen las siguientes:

- *Nivel mínimo de existencias* ( $LI_{(jm)}$ ): Establece el nivel mínimo de inventario de una oficina con tesorería, tal que, valores inferiores implican que existe una demanda. Los valores sobre los niveles mínimos de existencia se establecieron resultado de un análisis descriptivo de los datos históricos. Como es de esperarse las sucursales con mayores volúmenes exigen niveles mínimos más altos. La siguiente tabla muestra el valor de

este parámetro, para cada sucursal y para cada denominación, en número de pacas.

**TABLA 5** Nivel mínimo de existencia, en número de pacas, por oficina y por denominación. Creación propia del autor.

| <b>LIMITE INFERIOR PACAS <math>LI_{(jm)}</math></b> |            |            |            |            |            |            |
|---|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>NODO</b>   | <b>SAT</b> | <b>VEN</b> | <b>JUP</b> | <b>PLU</b> | <b>URA</b> | <b>MER</b> |
| <b>0CE</b>  | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| <b>1SA_AXM</b>                                      | 20         | 20         | 400        | 100        | 200        | 200        |
| <b>2R_BAQ</b>                                       | 20         | 20         | 600        | 100        | 100        | 100        |
| <b>3SB_BGA</b>                                      | 20         | 20         | 20         | 100        | 100        | 200        |
| <b>4R_CLO</b>                                       | 20         | 20         | 300        | 20         | 100        | 100        |
| <b>5SB_CUC</b>                                      | 20         | 20         | 300        | 600        | 600        | 100        |
| <b>6SB_IBE</b>                                      | 20         | 20         | 200        | 300        | 200        | 200        |
| <b>7SB_LET</b>                                      | 20         | 20         | 20         | 20         | 20         | 20         |
| <b>8R_MDE</b>                                       | 20         | 20         | 400        | 100        | 200        | 200        |
| <b>9SA_MTR</b>                                      | 20         | 20         | 200        | 100        | 200        | 200        |
| <b>10SA_PSO</b>                                     | 20         | 20         | 100        | 200        | 200        | 300        |
| <b>11SB_UIB</b>                                     | 20         | 20         | 20         | 20         | 20         | 20         |
| <b>12SB_RCH</b>                                     | 20         | 20         | 100        | 100        | 100        | 100        |
| <b>13SB_VVC</b>                                     | 20         | 20         | 100        | 20         | 100        | 100        |

- **Número mínimo de visitas por un vehículo en una ruta  $NV_{(k)}$** : Establece la cantidad mínima de oficinas visitadas por un vehículo en una ruta. Por debajo de este número, no resulta favorable realizar el recorrido.

**TABLA 6** Número mínimo de visitas por un vehículo en una ruta. Creación propia del autor.

| <b>VEHICULO</b>                  | <b>COD</b> | <b><math>NV_{(k)}</math></b> |
|----------------------------------|------------|------------------------------|
| <b>CAMION INTERNACIONAL 4000</b> | TFBINT     | 1                            |
| <b>AEREO1</b>                    | AANT32     | 2                            |
| <b>AEREO2</b>                    | ABOEI100   | 2                            |

- *Tiempo máximo de permanencia de un vehículo en una ruta*  $MAXTV_{(k)}$ : limita el tiempo que un vehículo puede permanecer en una ruta. Esta es una política de seguridad que busca el menor tiempo de exposición de la carga fuera de las bóvedas de las tesorerías.

**TABLA 7** Tiempo máximo de permanencia de un vehículo en una ruta. Creación propia del autor.

| VEHICULO                         | COD      | $MAXTV_{(k)}$ |
|----------------------------------|----------|---------------|
| <b>CAMION INTERNACIONAL 4000</b> | TFBINT   | 420,00        |
| <b>AEREO1</b>                    | AANT32   | 420,00        |
| <b>AEREO2</b>                    | ABOEI100 | 480,00        |

- *Capacidad operativa máxima de una tesorería*  $CO_{(j)}$ : limita, para cada tesorería, la cantidad de carga que puede ser recibida en una operación.

**TABLA 8** Capacidad de operación, en número de pacas, para cada nodo. Creación propia del autor.

| NODO            | $CO_{(j)}$ |
|-----------------|------------|
| <b>OCE</b>      | 18.500     |
| <b>1SA_AXM</b>  | 5.000      |
| <b>2R_BAQ</b>   | 8.500      |
| <b>3SB_BGA</b>  | 5.000      |
| <b>4R_CLO</b>   | 10.000     |
| <b>5SB_CUC</b>  | 5.000      |
| <b>6SB_IBE</b>  | 5.000      |
| <b>7SB_LET</b>  | 3.500      |
| <b>8R_MDE</b>   | 10.000     |
| <b>9SA_MTR</b>  | 5.000      |
| <b>10SA_PSO</b> | 3.500      |
| <b>11SB_UIB</b> | 3.500      |
| <b>12SB_RCH</b> | 5.000      |
| <b>13SB_VVC</b> | 5.000      |

- *Capacidad operativa máxima de un vehículo*  $CK_{(k)}$  : limita, para cada vehículo, la cantidad de carga, en número de pacas, que puede transportar.

**TABLA 9** Capacidad de operación, en número de pacas, para cada vehículo. Creación propia del autor.

| VEHICULO                         | COD      | $CK_{(k)}$ |
|----------------------------------|----------|------------|
| <b>CAMION INTERNACIONAL 4000</b> | TFBINT   | 18.500     |
| <b>AEREO1</b>                    | AANT32   | 15.000     |
| <b>AEREO2</b>                    | ABOEI100 | 10.000     |

- *Valor máximo transportado por un vehículo en una ruta* **TOPOL** : limita, para cada vehículo, el valor transportado a las sumas aseguradas por la póliza global bancaria. El tope en unidades monetarias transformadas es 7.652.689.675.
- Análisis descriptivos de los datos históricos de las existencias como soporte a la determinación de la demanda inicial

El insumo fundamental para la ejecución del modelo de optimización es la demanda inicial de cada especie monetaria en cada oficina receptora, en particular. Sin embargo, la demanda de cada especie monetaria, es a su vez, resultado de la demanda de efectivo que la economía colombiana establece resultado, de las complejas interacciones de las variables macroeconómicas, en particular, de la política monetaria, que no son objeto de este trabajo, pero que a efecto de poner en contexto se hará una mención al trabajo realizado por investigadores de Banco de la República. (Arango Arango & Misas Arango , 2004)

El objetivo principal del trabajo de Arango y Misas fue el de mejorar los pronósticos del efectivo para el caso colombiano, reconociendo la naturaleza no lineal de la relación entre el efectivo y sus variables explicativas, como también, explorar los modelos de redes neuronales ANN (artificial neural network). Se concluye de este trabajo que el comportamiento de la

demanda de efectivo resulta muy difícil de pronosticar, pues subyacen relaciones de tipo no lineal que dificultan la elaboración de pronósticos con los modelos tradicionales. Los autores encuentran que variables como la inflación, las tasas de interés, la producción nacional, son significativas en la explicación del comportamiento de la demanda de efectivo. Adicionalmente, resaltan los autores, que cambios en las costumbres en los usos de los medios de pago; como por ejemplo el uso de las tarjetas débito, han influenciado la demanda de especies monetarias.

En todo caso, para el propósito de este trabajo, se hará un modelamiento de los datos obtenidos, para un periodo de un año, del El Sistema de Información General para el Manejo y Análisis de Datos SIGMA<sup>2</sup>.

Así las cosas, con el modelamiento de la demanda de cada especie monetaria en cada tesorería se podrá simular el comportamiento esperado las veces que se requiera para obtener el conjunto de escenarios bases sobre los que se ejecutará el modelo de optimización. Es importante recordar que la administración de los inventarios se determina en número de pacas, por lo que la demanda que, es una variable resultado del nivel de existencias, se establecerá en número de pacas. En efecto, en la formulación del modelo de optimización, numeral 4.1.3, se definió la variable demanda con la unidad número de pacas.

Seguidamente, se presentan los resultados obtenidos de un análisis de datos de tipo descriptivo con el conjunto de datos obtenidos de SIGMA para la existencia, en número de pacas. Se presenta, también, los resultados del análisis por oficina y denominación.

- *Datos generales de la variable existencia en número de pacas:* Los datos descriptivos se presentan de las siguientes tres formas: Un reporte de los estadísticos que determinan la estructura y forma de la distribución de los datos, incluyendo el valor de los percentiles más representativos; se presenta, también, el diagrama de caja que muestra visualmente la forma de la

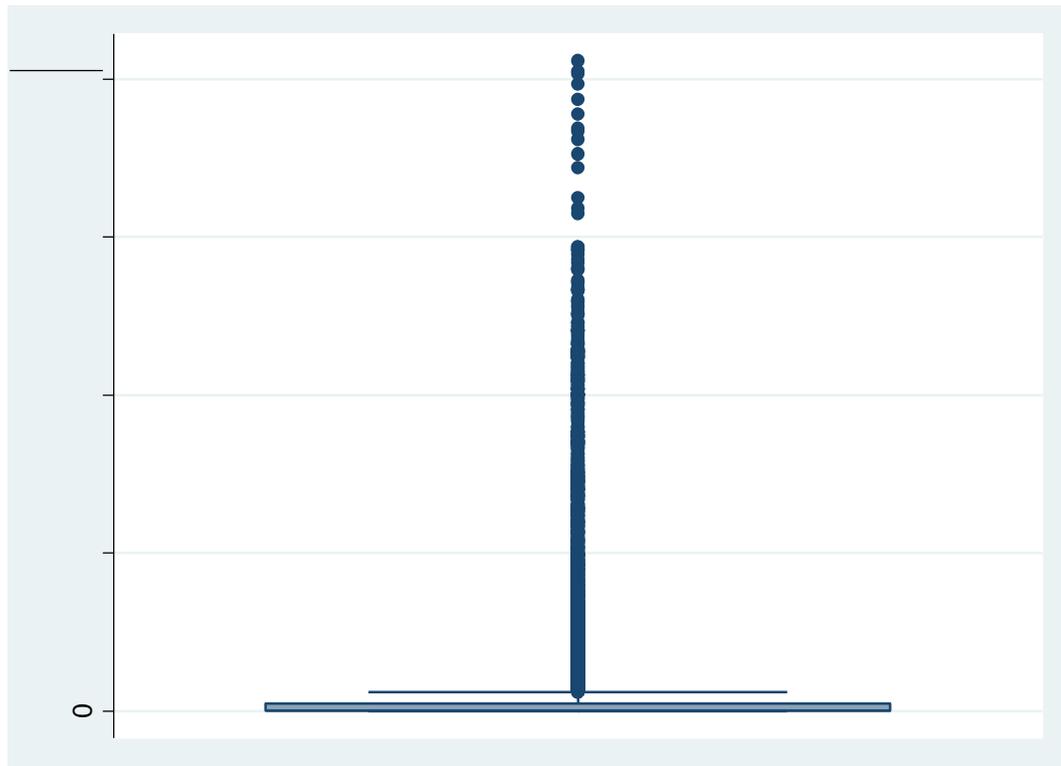
---

<sup>2</sup> El Sistema de Información SIGMA, es un sistema de información de tipo estadístico para el almacenamiento diario de las variables inherentes a las funciones del Departamento de Tesorería del Banco de la República con base en los datos locales de cada oficina recopilados por MASTER (Sistema Maestro de Tesorería), además de mantener almacenada de manera permanente, en la base de datos diseñada para tal fin, la información generada en cada una de las sucursales y en la Oficina Principal.

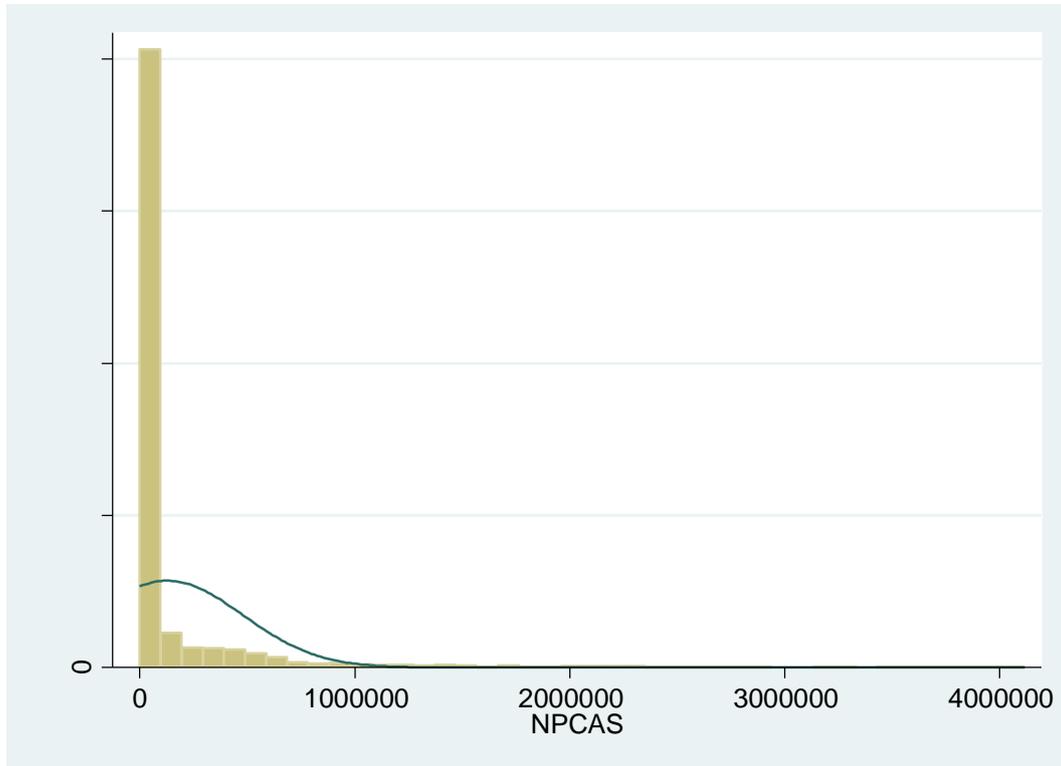
distribución y; finalmente, se presenta el histograma de la distribución de los datos.

**TABLA 10** Valores calculados de los estadísticos descriptivos de la distribución de la variable existencias en número de pacas (NPCAS), Creación propia del autor.

| NPCAS       |         |          |             |  |          |
|-------------|---------|----------|-------------|--|----------|
| Percentiles |         | Smallest |             |  |          |
| 1%          | 0       | 0        |             |  |          |
| 5%          | 0       | 0        |             |  |          |
| 10%         | 0       | 0        | Obs         |  | 19026    |
| 25%         | .027    | 0        | Sum of Wgt. |  | 19026    |
| 50%         | 1227    |          | Mean        |  | 128769.5 |
|             |         | Largest  | Std. Dev.   |  | 349432.8 |
| 75%         | 48267   | 3966366  |             |  |          |
| 90%         | 425028  | 4036394  | Variance    |  | 1.22e+11 |
| 95%         | 734367  | 4046517  | Skewness    |  | 4.37656  |
| 99%         | 1928472 | 4116628  | Kurtosis    |  | 27.02559 |



**Figura 16** Diagrama de caja la distribución de datos de la Variable EXISTENCIAS en número de pacas [NPACSA]. Creación propia del autor.

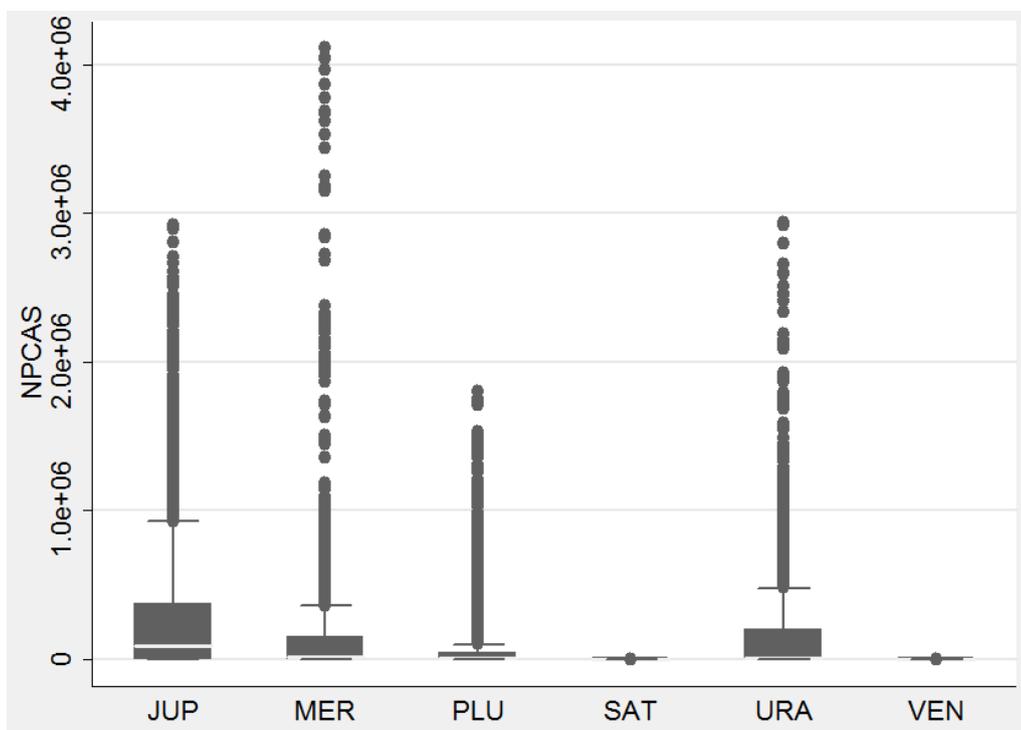


**Figura 17** Histograma la distribución de datos de la Variable EXISTENCIAS en número de pacas [NPACSA]. Creación propia del autor.

Una simple observación de los diagramas permite concluir que se trata de una población altamente dispersa y con un importante sesgo a la derecha. En efecto, el cálculo del coeficiente de variación (desviación estándar / media) =  $349432/128769 = 2.71$ , así lo muestra. De otra parte, el coeficiente de Skewness de 4.37 deja en claro que se trata de una distribución con alto grado de sesgo a la derecha. Lo anterior, tiene explicación en que el comportamiento de la variable existencia en número de pacas obedece a la denominación y a la sucursal, por lo que conviene realizar un análisis de la composición de la existencia en número de pacas por denominación y por oficina.

- *Análisis de la distribución de las existencias por denominación:* Antes de hacer el análisis descriptivo de los datos, de la forma en se realizó en el anterior aparte para la variable sola, conviene hacer un análisis comparativo de las

distribuciones de la variable existencia en número de pacas, paca cada denominación. Una de las formas más inmediatas de lograr el anterior propósito es mediante un diagrama de caja comparativo, de la siguiente forma:

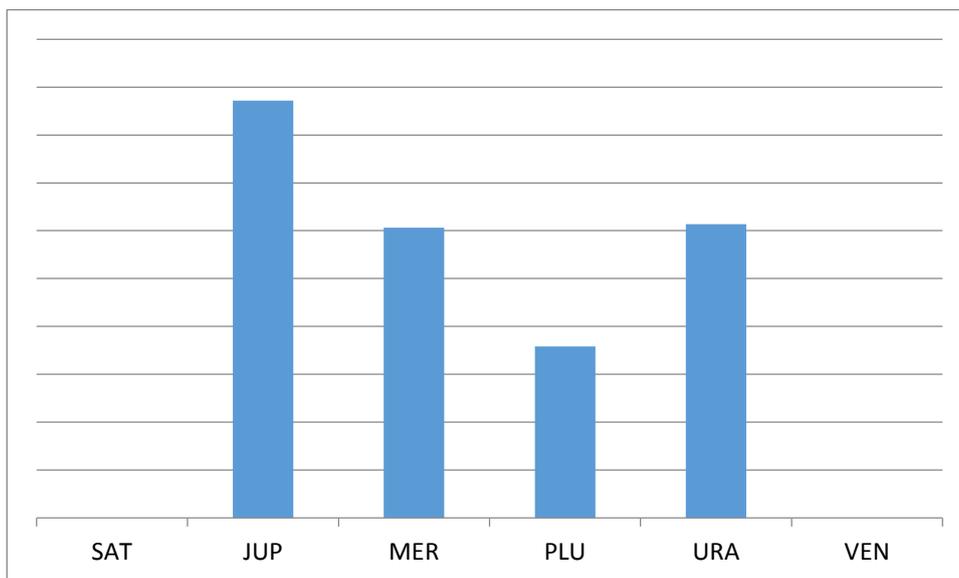


**Figura 18** Diagrama de caja comparativo de las distribuciones de datos de la Variable EXISTENCIAS en número de pacas [NPACSA], por denominación. Creación propia del autor.

Es evidente que dos de las denominaciones: Saturno y venus registran datos significativamente inferiores a los datos observados para las denominaciones Júpiter, Mercurio, Plutón y Urano. La siguiente tabla y diagrama de barras muestran esta situación.

**TABLA 11** Tabla de frecuencias del total de pacas, en existencia por denominaciones. Creación propia del autor.

| DENOMINACION | TOTAL PACAS          | %      |
|--------------|----------------------|--------|
| SAT          | 151                  | 0.00%  |
| JUP          | 871,911,023          | 35.59% |
| MER          | 606,082,435          | 24.74% |
| PLU          | 358,057,347          | 14.61% |
| URA          | 613,918,144          | 25.06% |
| VEN          | 89                   | 0.00%  |
| <b>TOTAL</b> | <b>2,449,969,190</b> |        |



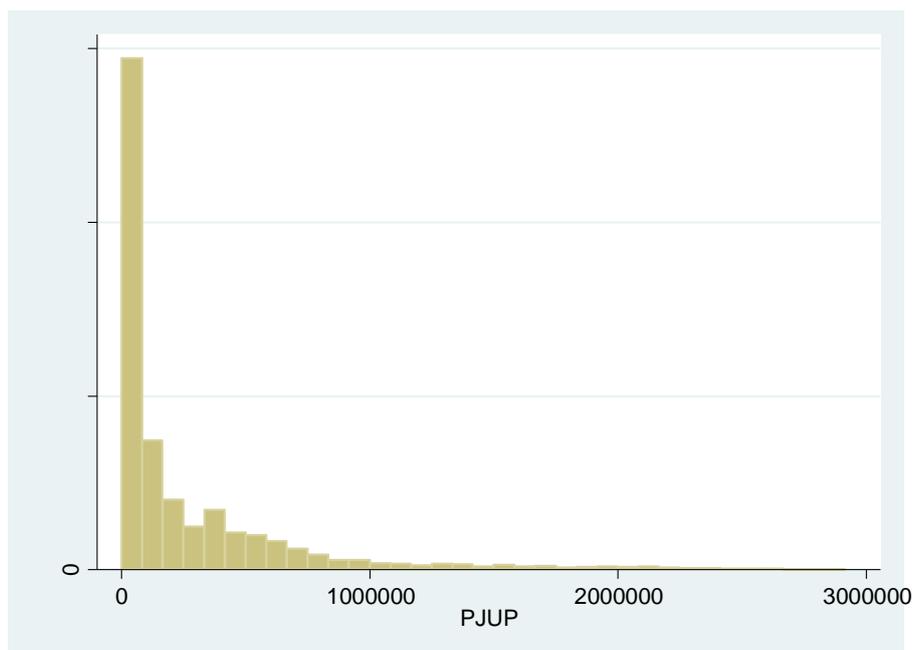
**Figura 19** Diagrama de barras que muestra la participación del total de pacas en existencias para el periodo en estudio, por denominación. Creación propia del autor.

Por lo expuesto en los apartes anteriores, resulta evidente que no aporta a los objetivos de este trabajo el considerar las denominaciones: Saturno y venus. Adicionalmente, se debe mencionar que la Tesorería del Banco confirma la política de no circulación de papel moneda para estas dos denominaciones. Por lo anterior, en lo que resta del trabajo, se consideraran representativas únicamente las denominaciones Júpiter, Mercurio, Plutón y Urano.

Así las cosas, seguidamente se presenta, para cada denominación representativa, un reporte de los estadísticos que determinan la estructura y forma de la distribución de los datos, incluyendo el valor de los percentiles más representativos; se presenta, también, el diagrama de caja que muestra visualmente la forma de la distribución y; finalmente, se presenta el histograma de la distribución de los datos.

**TABLA 12** Valores calculados de los estadísticos descriptivos de la distribución de la variable existencias en número de pacas (NPCAS), para la denominación Júpiter. Creación propia del autor.

| PJUP        |         |          |             |          |
|-------------|---------|----------|-------------|----------|
| Percentiles |         | Smallest |             |          |
| 1%          | .043    | .001     |             |          |
| 5%          | .303    | .004     |             |          |
| 10%         | .5395   | .006     | Obs         | 3170     |
| 25%         | 434.17  | .006     | Sum of Wgt. | 3170     |
|             |         |          | Mean        | 275050.8 |
| 50%         | 92813.5 |          | Std. Dev.   | 450595.6 |
|             |         |          | Largest     |          |
| 75%         | 371785  | 2708124  |             |          |
| 90%         | 758759  | 2804092  | Variance    | 2.03e+11 |
| 95%         | 1277983 | 2891426  | Skewness    | 2.630115 |
| 99%         | 2180698 | 2915838  | Kurtosis    | 10.77383 |



**Figura 20** Histograma la distribución de datos de la Variable EXISTENCIAS en número de pacas [NPACSA], para la denominación Júpiter. Creación propia del autor.

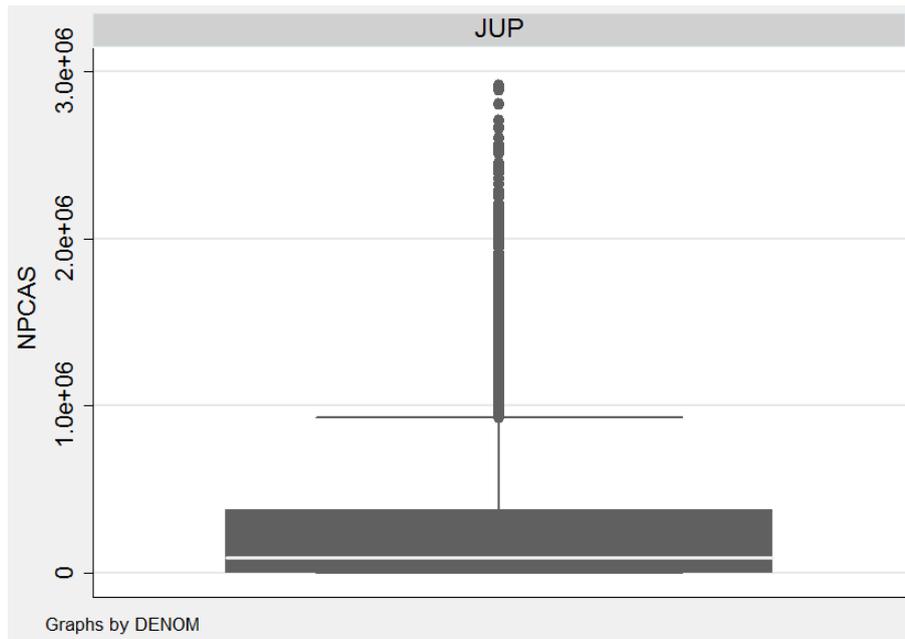
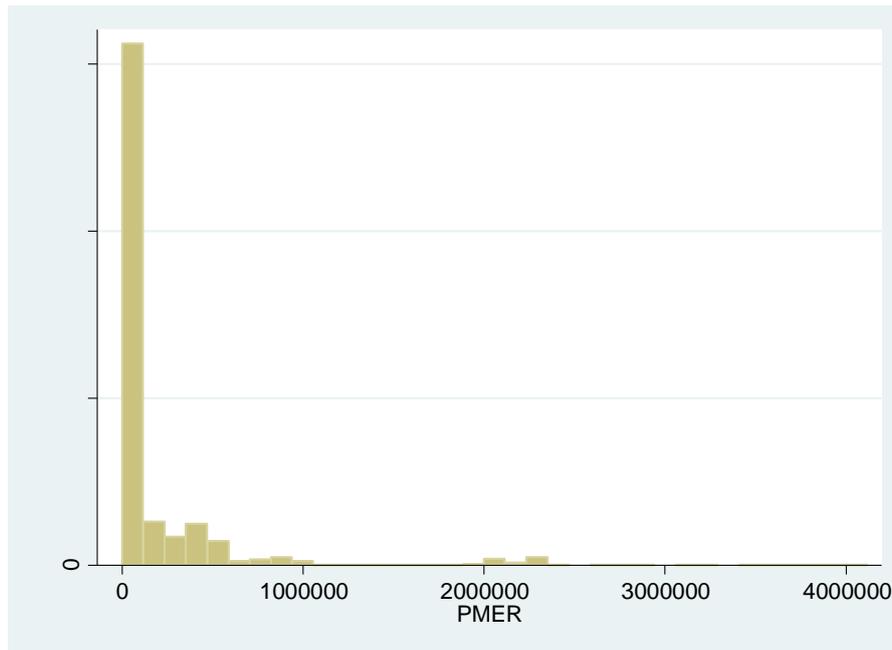


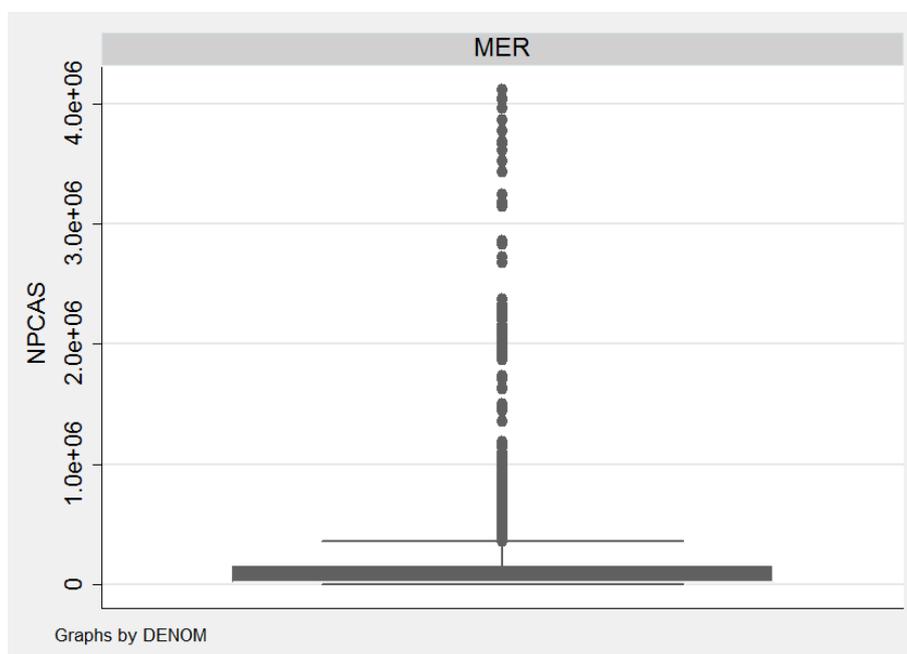
Figura 21 Diagrama de caja la distribución de datos de la Variable EXISTENCIAS en número de pacas [NPACSA], para la denominación Júpiter. Creación propia del autor.

TABLA 13 Valores calculados de los estadísticos descriptivos de la distribución de la variable existencias en número de pacas (NPCAS), para la denominación Mercurio. Creación propia del autor.

| PMER |             |          |             |          |
|------|-------------|----------|-------------|----------|
|      | Percentiles | Smallest |             |          |
| 1%   | .027        | .001     |             |          |
| 5%   | .185        | .001     |             |          |
| 10%  | .957        | .003     | Obs         | 3169     |
| 25%  | 2557        | .003     | Sum of Wgt. | 3169     |
| 50%  | 19662       |          | Mean        | 191253.5 |
|      |             | Largest  | Std. Dev.   | 468402.3 |
| 75%  | 145025      | 3966366  |             |          |
| 90%  | 483032      | 4036394  | Variance    | 2.19e+11 |
| 95%  | 893753      | 4046517  | Skewness    | 4.278023 |
| 99%  | 2282263     | 4116628  | Kurtosis    | 24.35685 |



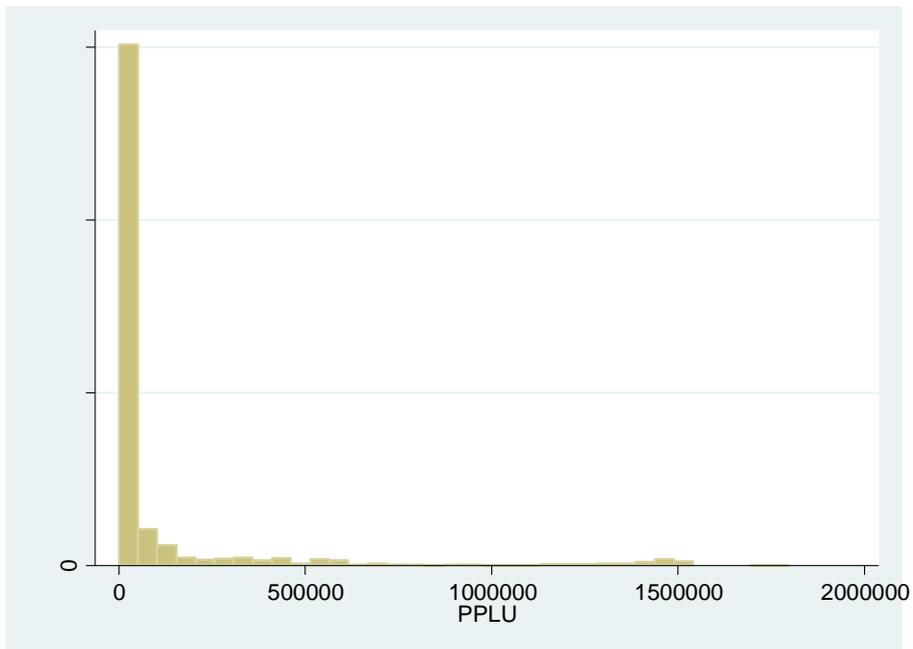
**Figura 22** Histograma la distribución de datos de la Variable EXISTENCIAS en número de pacas [NPACSA], para la denominación Mercurio. Creación propia del autor.



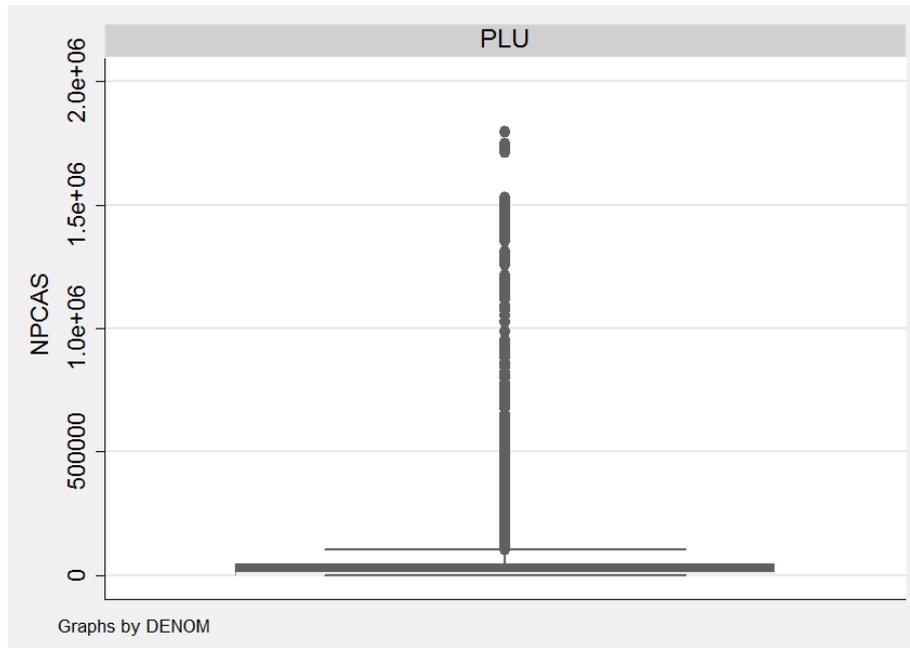
**Figura 23** Diagrama de caja la distribución de datos de la Variable EXISTENCIAS en número de pacas [NPACSA], para la denominación Mercurio. Creación propia del autor.

**TABLA 14** Valores calculados de los estadísticos descriptivos de la distribución de la existencias en número de pacas (NPCAS), para la denominación Plutón. Creación propia del autor.

| PPLU        |          |          |             |          |
|-------------|----------|----------|-------------|----------|
| Percentiles |          | Smallest |             |          |
| 1%          | .043     | .002     | Obs         | 3170     |
| 5%          | .194     | .004     | Sum of Wgt. | 3170     |
| 10%         | .504     | .005     | Mean        | 112951.8 |
| 25%         | 50.8     | .007     | Std. Dev.   | 299108.6 |
| 50%         | 5959     |          | Variance    | 8.95e+10 |
|             |          | Largest  | Skewness    | 3.479097 |
| 75%         | 41182    | 1730762  | Kurtosis    | 14.81032 |
| 90%         | 350744.5 | 1730775  |             |          |
| 95%         | 724035   | 1748713  |             |          |
| 99%         | 1475336  | 1797694  |             |          |



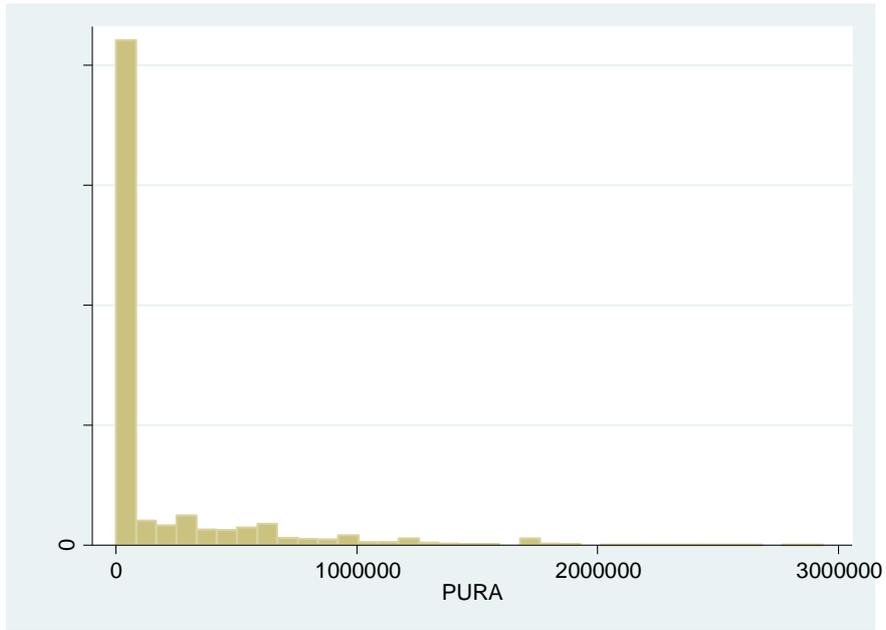
**Figura 24** Histograma la distribución de datos de la Variable EXISTENCIAS en número de pacas [NPACSA], para la denominación Plutón. Creación propia del autor.



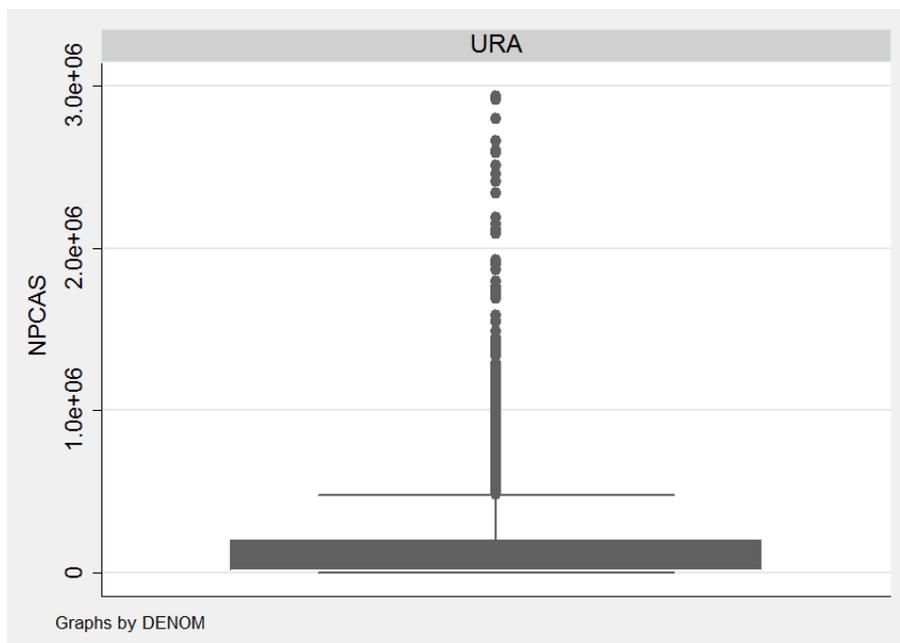
**Figura 25** Diagrama de caja la distribución de datos de la Variable EXISTENCIAS en número de pacas [NPACSA], para la denominación Plutón. Creación propia del autor.

**TABLA 15** Valores calculados de los estadísticos descriptivos de la distribución de la variable existencias en número de pacas (NPCAS), para la denominación Urano. Creación propia del autor.

| PURA |             |          |             |          |
|------|-------------|----------|-------------|----------|
|      | Percentiles | Smallest |             |          |
| 1%   | .019        | .001     |             |          |
| 5%   | .14         | .001     |             |          |
| 10%  | 2.63        | .004     | Obs         | 3168     |
| 25%  | 2214.5      | .005     | Sum of Wgt. | 3168     |
| 50%  | 10643       |          | Mean        | 193787.3 |
|      |             | Largest  | Std. Dev.   | 397873.9 |
| 75%  | 193683.5    | 2918495  |             |          |
| 90%  | 640288      | 2924418  | Variance    | 1.58e+11 |
| 95%  | 1002686     | 2934515  | Skewness    | 3.04636  |
| 99%  | 1764893     | 2935471  | Kurtosis    | 14.12599 |



**Figura 26** Histograma la distribución de datos de la Variable EXISTENCIAS en número de pacas [NPACSA], para la denominación Urano. Creación propia del autor.

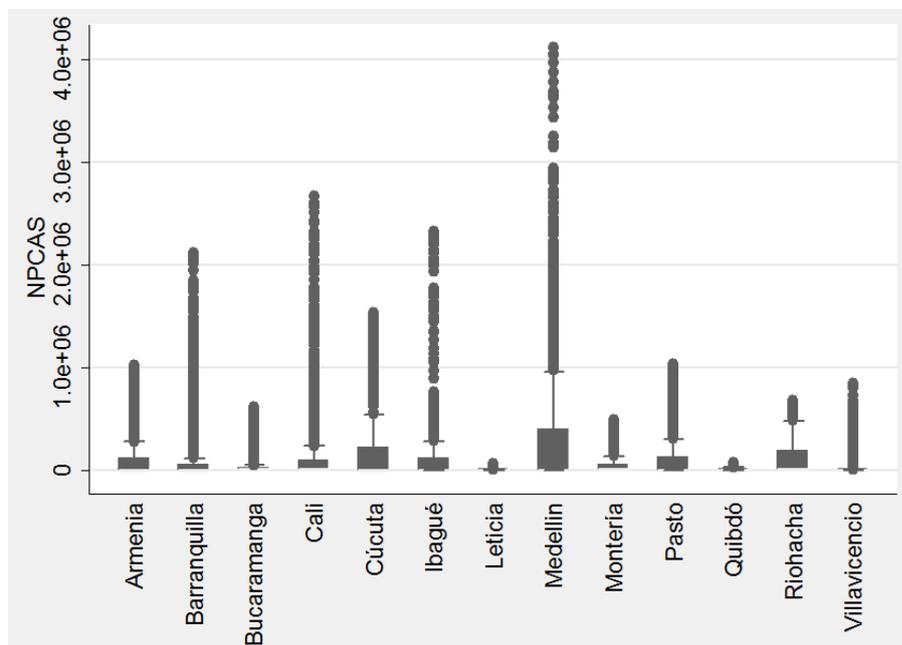


**Figura 27** Diagrama de caja la distribución de datos de la Variable EXISTENCIAS en número de pacas [NPACSA], para la denominación Urano. Creación propia del autor.

Al haber segmentado la población de las operaciones por la denominación y habiendo excluido dos de las denominaciones por no resultar importantes, se encuentran distribuciones más consistentes. No obstante, aún se trata de poblaciones altamente dispersas con coeficientes de variación promedios de 2,19 y con altos valores del coeficiente de Skewness, que se traducen en importantes sesgos a la derecha.

Lo anterior tienen explicación en el hecho de que estas distribuciones mezclan a las diferentes oficinas que varían de manera importante en lo referente al monto de las operaciones. Por lo anterior seguidamente se continua con el análisis estadístico de la por oficina.

- *Análisis de la distribución de las existencias por Oficina  $EA_{(j)}$* : De la forma que se realizó el análisis descriptivo de la variable de interés por denominación iniciaremos con análisis comparativo, mediante un diagrama de caja, de la forma que se muestra a continuación:



**Figura 28** Diagrama de caja comparativo de las distribuciones de datos de la Variable EXISTENCIAS en número de pacas [NPACSA], por oficina. Creación propia del autor.

A simple vista se puede inferir que buena parte de la variación se explica por el hecho de que cada oficina posee una distribución diferente, aunque se puede apreciar que algunas distribuciones tienen formas similares lo que podría traducirse en la existencia de grupos. Con el propósito de contar con información más precisa la siguiente tabla muestra los datos de los estadísticos descriptivos obtenidos, por oficina, de la variable en cuestión.

**TABLA 16** Valores calculados de los estadísticos descriptivos, relativos a la forma, de la distribución de la variable existencias en número de pacas (NPCAS), por oficina. Creación propia del autor.

| CIUDAD        | mean     | max     | min  | sd       | skewness | kurtosis | cv       | p50    |
|---------------|----------|---------|------|----------|----------|----------|----------|--------|
| Armenia       | 116731.2 | 1022238 | 0    | 219062   | 1.948193 | 5.96184  | 1.876637 | 1287.5 |
| Barranquilla  | 161127.5 | 2112538 | 0    | 353835.2 | 2.55258  | 9.611257 | 2.195995 | 2075.5 |
| Bucaramanga   | 35448.46 | 608582  | 0    | 84463.45 | 3.900711 | 19.54587 | 2.382712 | 6152   |
| Cali          | 181046.5 | 2663129 | 0    | 409210.9 | 3.179068 | 14.28135 | 2.260252 | 5815   |
| Cúcuta        | 243670.3 | 1530113 | 0    | 443444.9 | 1.740119 | 4.519403 | 1.819856 | 3477   |
| Ibagué        | 212721.1 | 2322448 | .066 | 509772.1 | 2.998063 | 11.07447 | 2.396434 | 3365.5 |
| Leticia       | 5449.012 | 61781   | 0    | 12697.53 | 2.977661 | 11.72561 | 2.330245 | .477   |
| Medellin      | 378419.5 | 4116628 | 0    | 732988.4 | 2.308743 | 8.051653 | 1.936973 | 1353   |
| Montería      | 46818.88 | 485665  | 0    | 86595.23 | 2.68901  | 10.63298 | 1.849579 | 4938.5 |
| Pasto         | 119560.5 | 1033774 | 0    | 230272.7 | 2.119718 | 6.779373 | 1.925993 | 1121.5 |
| Quibdó        | 8810.63  | 76355   | 0    | 15547.73 | 2.373276 | 8.105612 | 1.764656 | 1062   |
| Riohacha      | 123891.7 | 670656  | 0    | 176908.8 | 1.465579 | 4.056608 | 1.427931 | 7440.5 |
| Villavicencio | 40259.34 | 841027  | 0    | 121236.7 | 3.730086 | 17.05266 | 3.011394 | .083   |
| Total         | 128769.5 | 4116628 | 0    | 349432.8 | 4.37656  | 27.02559 | 2.71363  | 1227   |

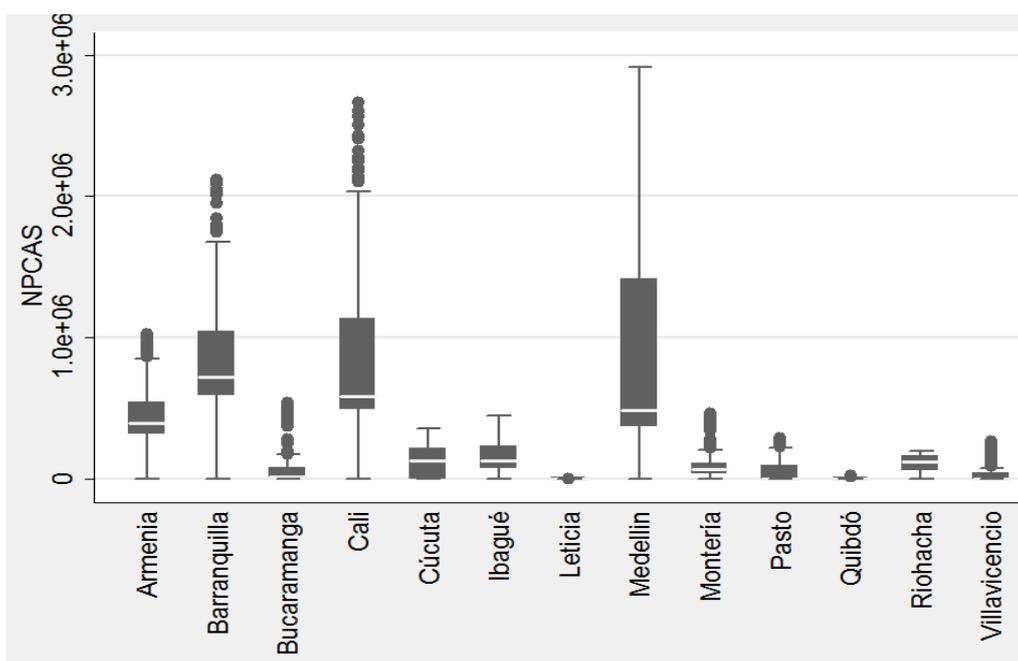
Complementariamente, a continuación, se presenta una tabla con los estadísticos obtenidos para los estadísticos de posicionamiento.

**TABLA 17** Valores calculados de los estadísticos descriptivos, relativos a la posición, De la distribución de la variable existencias en número de pacas (NPCAS), Por oficina. Creación propia del autor.

| CIUDAD        | p5   | p10  | p25  | p50    | p75     | p90     | p95     |
|---------------|------|------|------|--------|---------|---------|---------|
| Armenia       | 0    | 0    | 0    | 1287.5 | 111863  | 422825  | 662946  |
| Barranquilla  | 0    | 0    | 0    | 2075.5 | 48093.5 | 689383  | 944988  |
| Bucaramanga   | 0    | 0    | 0    | 6152   | 20800.5 | 98969   | 189405  |
| Cali          | 0    | 0    | 0    | 5815   | 95937.5 | 584108  | 960968  |
| Cúcuta        | 0    | 0    | 0    | 3477   | 219479  | 1111449 | 1366963 |
| Ibagué        | .129 | .215 | .429 | 3365.5 | 113725  | 550241  | 1708299 |
| Leticia       | .02  | .035 | .067 | .477   | 3789    | 22338   | 35666   |
| Medellin      | 0    | .001 | .016 | 1353   | 391936  | 1548452 | 2087402 |
| Montería      | 0    | 0    | 0    | 4938.5 | 55829   | 146485  | 231491  |
| Pasto         | 0    | 0    | .004 | 1121.5 | 124181  | 489327  | 624434  |
| Quibdó        | .01  | .024 | .075 | 1062   | 11117   | 26033   | 48267   |
| Riohacha      | 0    | 0    | 0    | 7440.5 | 191019  | 431908  | 532614  |
| Villavicencio | .013 | .021 | .042 | .083   | 2628    | 108431  | 316053  |
| Total         | 0    | 0    | .027 | 1227   | 48267   | 425028  | 734367  |

Los datos corroboran lo observado en la gráfica de caja. Adicionalmente, muestra que las distribuciones por sucursales mantienen el sesgo a la derecha observado en las distribuciones por denominación, no obstante, muestran menor dispersión.

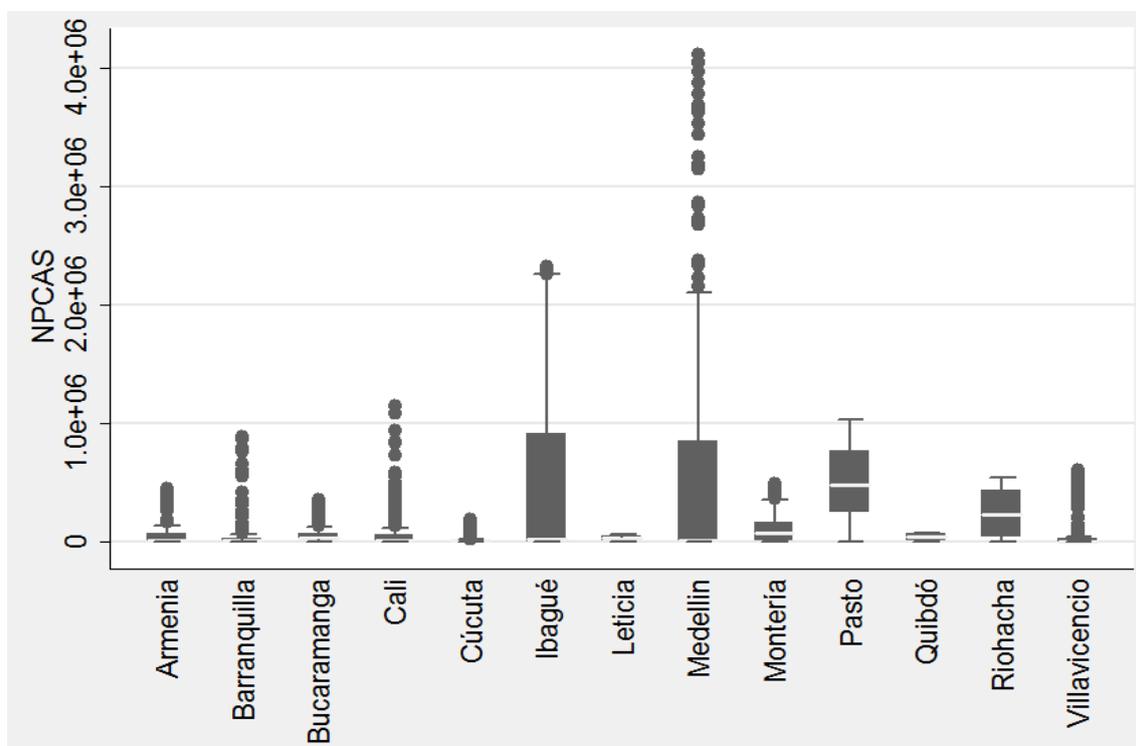
- *Análisis de la distribución de las existencias por Oficina y por denominación :* Esta doble segmentación busca encontrar distribuciones más homogéneas que permitan modelar las existencias y en consecuencia la demanda. Como se ha venido adelantando hasta el momento, conviene iniciar con un análisis comparativo gráfico utilizando un diagrama de caja para cada denominación.



**Figura 29** Diagrama de caja comparativo de las distribuciones de datos de la Variable EXISTENCIAS en número de pacas [NPACSA], para la denominación Júpiter, por oficina. Creación propia del autor.

**TABLA 18** Valores calculados de los estadísticos descriptivos, relativos a la posición, De la distribución de la variable existencias en número de pacas (NPCAS), por oficina, para la denominación Júpiter. Creación propia del autor.

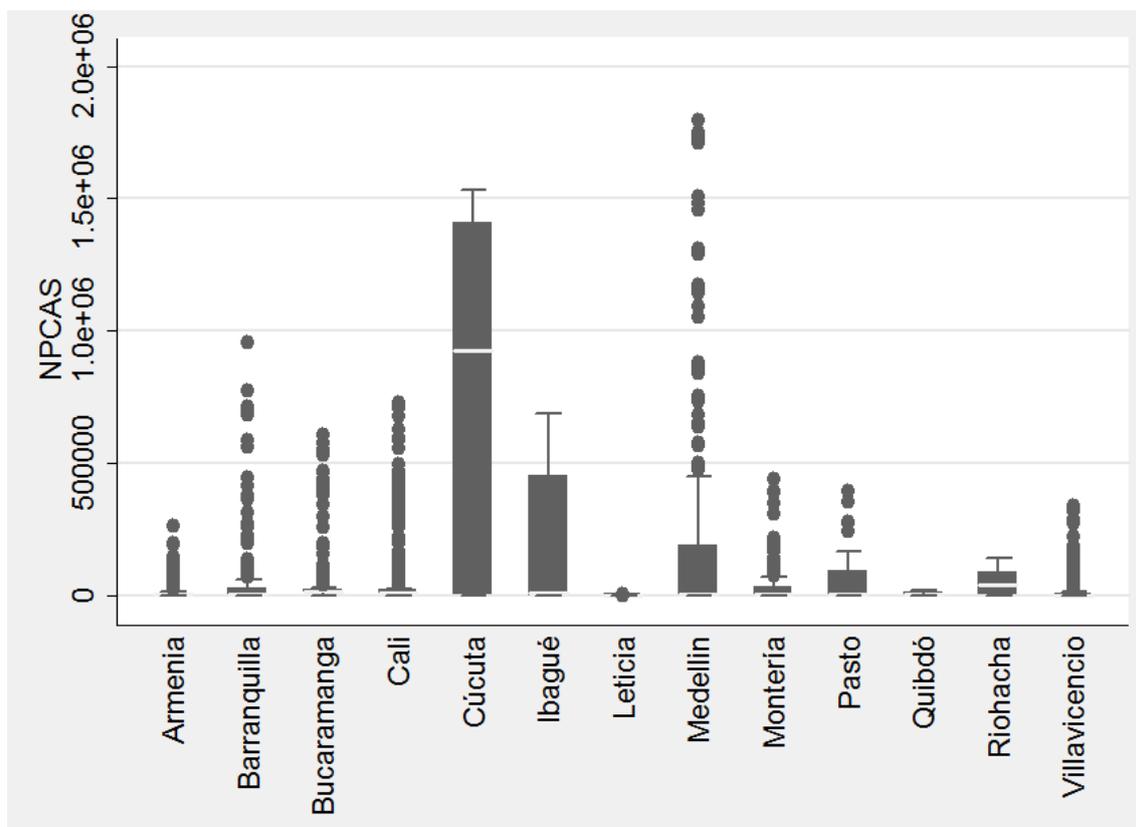
| CIUDAD        | p5     | p10     | p25     | p50      | p75     | p90      | p95     |
|---------------|--------|---------|---------|----------|---------|----------|---------|
| Armenia       | 795.58 | 276749  | 320105  | 391666   | 320105  | 534665   | 881076  |
| Barranquilla  | 671.72 | 1507.27 | 594622  | 719187   | 594622  | 1038503  | 1624876 |
| Bucaramanga   | 9.87   | 132.61  | 4546    | 12940    | 4546    | 72088    | 374002  |
| Cali          | 953.54 | 402528  | 489978  | 583671   | 489978  | 1131928  | 2180698 |
| Cúcuta        | .162   | .409    | 89.52   | 126192   | 89.52   | 208061   | 302402  |
| Ibagué        | 127.69 | 309.21  | 76452.5 | 127059.5 | 76452.5 | 229901.5 | 358004  |
| Leticia       | .052   | .109    | .3      | .507     | .3      | .795     | .936    |
| Medellin      | 434.17 | 1002.61 | 367675  | 481782   | 367675  | 1408199  | 2099973 |
| Montería      | 71.54  | 154.73  | 40409   | 67793    | 40409   | 106763.5 | 190337  |
| Pasto         | .372   | .65     | .916    | 1349.5   | .916    | 87615    | 173198  |
| Quibdó        | .36    | .454    | .7205   | 1139     | .7205   | 3132     | 3651    |
| Riohacha      | 128.4  | 194.83  | 58675   | 122913   | 58675   | 156949.5 | 192578  |
| Villavicencio | .03    | .049    | .3065   | .7985    | .3065   | 33850    | 108431  |
| Total         | .301   | .536    | 430.15  | 92786    | 430.15  | 371785   | 758759  |



**Figura 30** Diagrama de caja comparativo de las distribuciones de datos de la Variable EXISTENCIAS en número de pacas [NPACSA], para la denominación Mercurio, por oficina. Creación propia del autor.

**TABLA 19** Valores calculados de los estadísticos descriptivos, relativos a la posición, De la distribución de la variable existencias en número de pacas (NPCAS), por oficina, para la denominación Mercurio. Creación propia del autor.

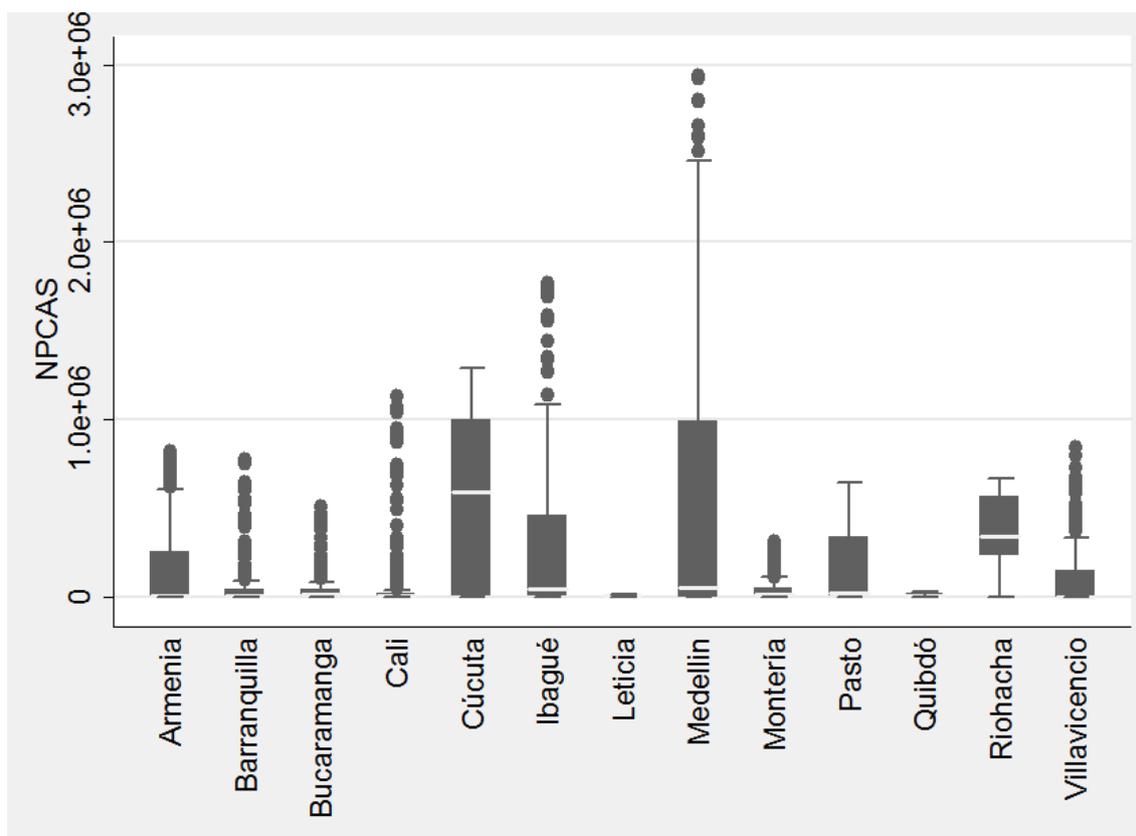
| CIUDAD        | p5    | p10    | p25      | p50      | p75      | p90      | p95     |
|---------------|-------|--------|----------|----------|----------|----------|---------|
| Armenia       | .474  | .654   | 24.77    | 13462    | 24.77    | 58213    | 395573  |
| Barranquilla  | .104  | .206   | 1073     | 5635.5   | 1073     | 24638    | 345141  |
| Bucaramanga   | 53.51 | 5555   | 15738    | 30252.5  | 15738    | 64301.5  | 258797  |
| Cali          | 10.02 | 279.45 | 3500     | 10399.5  | 3500     | 51960    | 472917  |
| Cúcuta        | .559  | .907   | 1634.5   | 4292     | 1634.5   | 8337     | 84914   |
| Ibagué        | .539  | 17.2   | 1309     | 17314.5  | 1309     | 903903   | 2275106 |
| Leticia       | 24.23 | 56.6   | 12255.5  | 25617.5  | 12255.5  | 38776.5  | 61688   |
| Medellin      | .563  | .767   | 1186     | 9653.5   | 1186     | 845743   | 3181402 |
| Montería      | 41.08 | 114.65 | 10328.5  | 73950    | 10328.5  | 150779.5 | 401466  |
| Pasto         | 440.9 | 704.42 | 251016.5 | 473139.5 | 251016.5 | 755157   | 981264  |
| Quibdó        | 7.21  | 48.2   | 8815     | 36329    | 8815     | 57227.5  | 66433   |
| Riohacha      | .329  | 243.13 | 40009    | 226810.5 | 40009    | 424904   | 511852  |
| Villavicencio | .004  | .018   | .0505    | .1055    | .0505    | 18027.5  | 467057  |
| Total         | .178  | .954   | 2544     | 19606    | 2544     | 145025   | 893753  |



**Figura 31** Diagrama de caja comparativo de las distribuciones de datos de la Variable EXISTENCIAS en número de pacas [NPACSA], para la denominación Plutón, por oficina. Creación propia del autor.

**TABLA 20** Valores calculados de los estadísticos descriptivos, relativos a la posición, De la distribución de la variable existencias en número de pacas (NPCAS), por oficina, para la denominación Plutón. Creación propia del autor.

| CIUDAD        | p5     | p10     | p25    | p50     | p75    | p90      | p95     |
|---------------|--------|---------|--------|---------|--------|----------|---------|
| Armenia       | .535   | .691    | 10.18  | 3401    | 10.18  | 5894     | 127971  |
| Barranquilla  | .076   | .122    | 2075.5 | 6090    | 2075.5 | 26689    | 378148  |
| Bucaramanga   | 9.78   | 530.55  | 9149   | 13189   | 9149   | 19934.5  | 396408  |
| Cali          | 8.4    | 3522    | 5492   | 8381.5  | 5492   | 17211.5  | 419746  |
| Cúcuta        | 729.69 | 1306.49 | 5534.5 | 923406  | 5534.5 | 1404687  | 1509921 |
| Ibagué        | .664   | .89     | 1419.5 | 9241    | 1419.5 | 447464   | 600488  |
| Leticia       | .063   | .125    | .267   | .56     | .267   | .829     | 1389    |
| Medellin      | .295   | .323    | .8865  | 3537    | .8865  | 188444.5 | 1140638 |
| Montería      | .552   | .738    | 1324.5 | 6857    | 1324.5 | 29165.5  | 165447  |
| Pasto         | .611   | 4.8     | 1202   | 5913.5  | 1202   | 90599.5  | 243049  |
| Quibdó        | .716   | .768    | 17.175 | 6572.5  | 17.175 | 11736.5  | 17132   |
| Riohacha      | 82.87  | 1373    | 2197.5 | 39807.5 | 2197.5 | 85242.5  | 133709  |
| Villavicencio | .027   | .048    | .1515  | .7      | .1515  | 5190     | 158132  |
| Total         | .193   | .503    | 50.56  | 5957    | 50.56  | 41182    | 724035  |



**Figura 32** Diagrama de caja comparativo de las distribuciones de datos de la Variable EXISTENCIAS en número de pacas [NPACSA], para la denominación Urano, por oficina. Creación propia del autor.

**TABLA 21** Valores calculados de los estadísticos descriptivos, relativos a la posición, De la distribución de la variable existencias en número de pacas (NPCAS), por oficina, para la denominación Urano. Creación propia del autor.

| CIUDAD        | p5     | p10     | p25     | p50      | p75     | p90      | p95     |         |
|---------------|--------|---------|---------|----------|---------|----------|---------|---------|
| Armenia       | .583   | .787    | 800.55  | 6288     | 800.55  | 246124   | 713321  | 761089  |
| Barranquilla  | .085   | .121    | 1138.5  | 9611.5   | 1138.5  | 38580    | 96116   | 280101  |
| Bucaramanga   | 8.51   | 62.46   | 5122.5  | 11552    | 5122.5  | 39489.5  | 129294  | 226132  |
| Cali          | 7.73   | 1053.17 | 2152.5  | 7711.5   | 2152.5  | 17586    | 210606  | 550677  |
| Cúcuta        | 924.23 | 1206.41 | 10616.5 | 592797.5 | 10616.5 | 990767   | 1175674 | 1199744 |
| Ibagué        | .97    | 61.49   | 4127    | 43599    | 4127    | 451665   | 1702514 | 1735028 |
| Leticia       | .198   | 2.63    | 2563.5  | 4665.5   | 2563.5  | 9027     | 11062   | 11993   |
| Medellín      | .94    | 473.19  | 2223.5  | 49629    | 2223.5  | 988380   | 1928479 | 2454515 |
| Montería      | .803   | 33.42   | 3428    | 13550    | 3428    | 47027.5  | 157769  | 239576  |
| Pasto         | 7.38   | 274.27  | 3390.5  | 20431.5  | 3390.5  | 335716   | 509033  | 547422  |
| Quibdó        | 3.02   | 10.08   | 4707    | 9489     | 4707    | 17615    | 26018   | 30512   |
| Riohacha      | 361.55 | 624.71  | 233642  | 337955.5 | 233642  | 560974.5 | 622121  | 634867  |
| Villavicencio | .009   | .016    | .0455   | .095     | .0455   | 142022.5 | 585042  | 651084  |
| Total         | .132   | 2.55    | 2193    | 10634    | 2193    | 193671   | 640197  | 1002686 |

- Determinación de la demanda inicial vía simulación

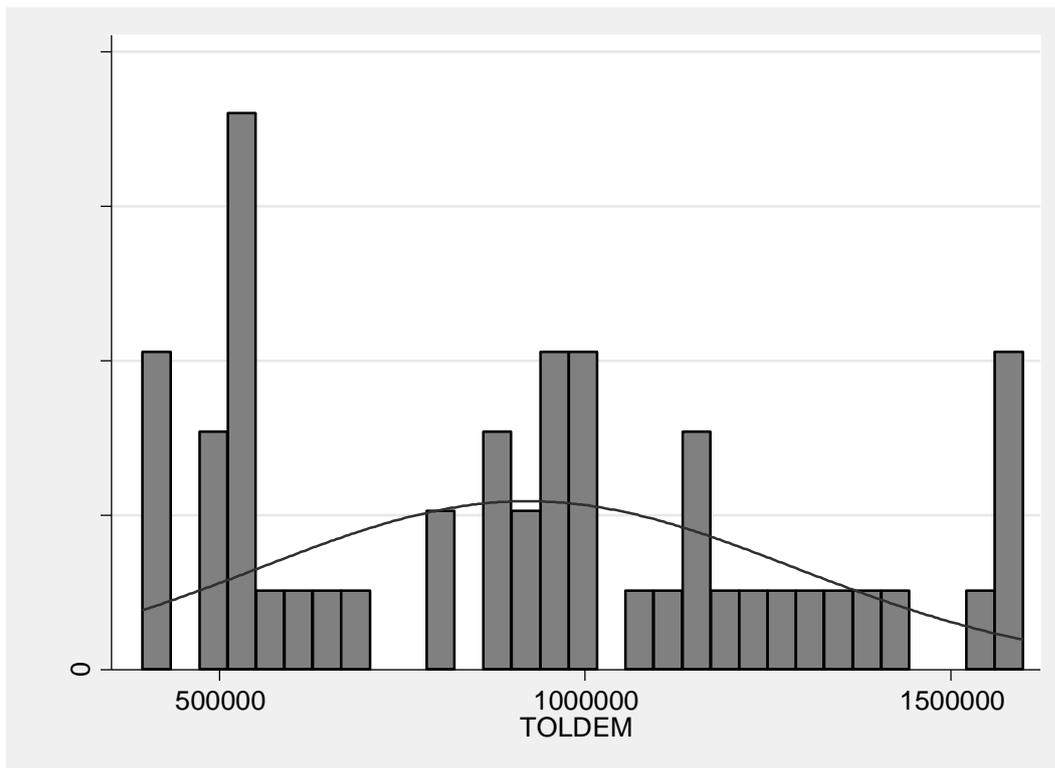
De las estadísticas descriptivas calculadas en el numeral anterior, en particular en lo referente a la forma de la distribución de las existencias para cada denominación por oficina, es decir de la doble simulación, y de la política de existencias mínimas establecidas en la Tabla 5 se obtienen, a través de un proceso de simulación<sup>3</sup>, la demanda inicial en por lo menos cincuenta escenarios.

En este aparte se muestra un resumen, con los estadísticos descriptivos básicos, de la demanda inicial simulada. Para mantener homogeneidad en este tipo de análisis de datos se presentan una tabla con el resumen de los estadísticos descriptivos y los correspondientes diagramas de caja e histograma.

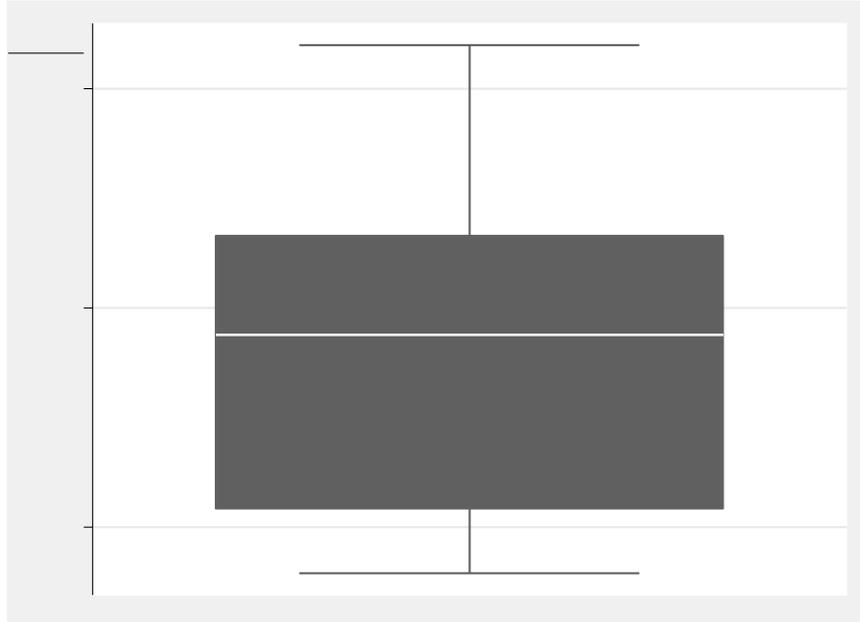
<sup>3</sup> Se implementó un proceso de simulación de Montecarlo en Excel que mediante la generación de números aleatorios, y con base en las formas de las distribuciones encontradas, establece valores teóricos de existencias, en número de pacas, de especies monetarias en cada nodo para cada denominación.

**TABLA 22** Estadísticas descriptivas de la variable demanda inicial total en número de pacas (NPCAS)

| TOLDEM |             |          |             |          |
|--------|-------------|----------|-------------|----------|
|        | Percentiles | Smallest |             |          |
| 1%     | 394791.2    | 394791.2 |             |          |
| 5%     | 431814.3    | 405258.1 |             |          |
| 10%    | 497054.5    | 431814.3 | Obs         | 50       |
| 25%    | 540941.3    | 433095.7 | Sum of Wgt. | 50       |
| 50%    | 937436      |          | Mean        | 920859.5 |
|        |             | Largest  | Std. Dev.   | 365111.4 |
| 75%    | 1163607     | 1578127  |             |          |
| 90%    | 1485655     | 1578127  | Variance    | 1.33e+11 |
| 95%    | 1578127     | 1598887  | Skewness    | .2939293 |
| 99%    | 1598887     | 1598887  | Kurtosis    | 2.008921 |



**Figura 33** Histograma de la distribución de datos de la variable DEMANDA TOTAL SIMULADA en número de pacas. Creación propia del autor.



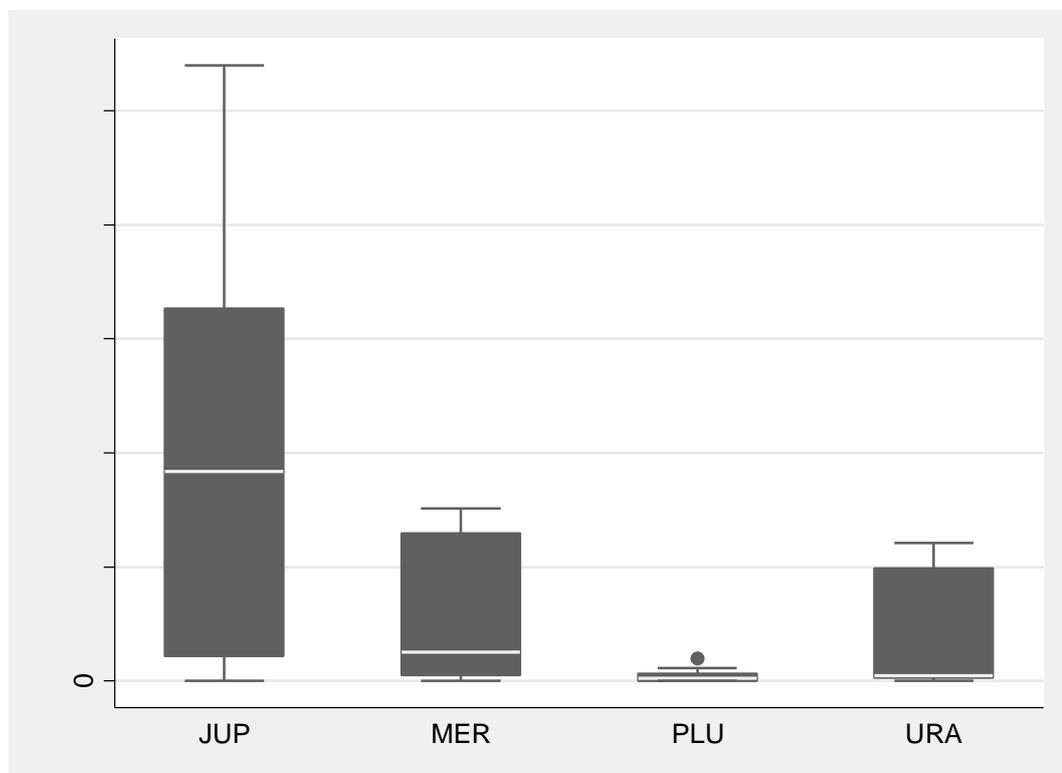
**Figura 34** Diagrama de caja las distribuciones de datos de la variable demanda total simulada en número de pacas [NPACAS], Creación propia del autor.

De los diagramas permite concluir que se trata de una población homogénea, con un coeficiente de variación (desviación estándar / media) =  $365111/920859 = 0.39$ , y más o menos simétrica. En efecto, el coeficiente de Skewness de 0.20 así lo establece. Lo anterior, tiene explicación en que al calcular la demanda se tienen en cuenta unos límites establecidos por la política de existencias que de alguna forma regulan la distribución de datos. En todo caso y teniendo en cuenta los resultados del análisis descriptivo de las existencias, conviene realizar un análisis comparativo de la composición de la demanda en número de pacas por denominación y por oficina.

- *Análisis de la distribución de la demanda por denominación:* Se presenta una tabla con el resultado de las estadísticas descriptivas, así como un diagrama comparativo de caja.

**TABLA 23** Valores calculados de los estadísticos descriptivos, relativos a la forma, de la distribución de la variable demanda simulada en número de pacas (NPCAS), por denominación. Creación propia del autor.

| k     | mean     | p50   | sd       | cv       | skewness | kurtosis | p25 | p75     |
|-------|----------|-------|----------|----------|----------|----------|-----|---------|
| JUP   | 31190.88 | 16.24 | 107474.2 | 3.445695 | 3.998575 | 18.63134 | 1   | 99.546  |
| MER   | 18659.65 | 99.3  | 57578.46 | 3.08572  | 3.494196 | 13.69676 | 1   | 6651    |
| PLU   | 1034.307 | 1     | 2724.243 | 2.633882 | 3.980569 | 21.20822 | 1   | 191     |
| URA   | 14890.84 | 1     | 51029.5  | 3.426905 | 3.576005 | 14.2503  | 1   | 2599.44 |
| Total | 16443.92 | 1     | 66934.87 | 4.070493 | 5.515387 | 37.8339  | 1   | 1482.8  |



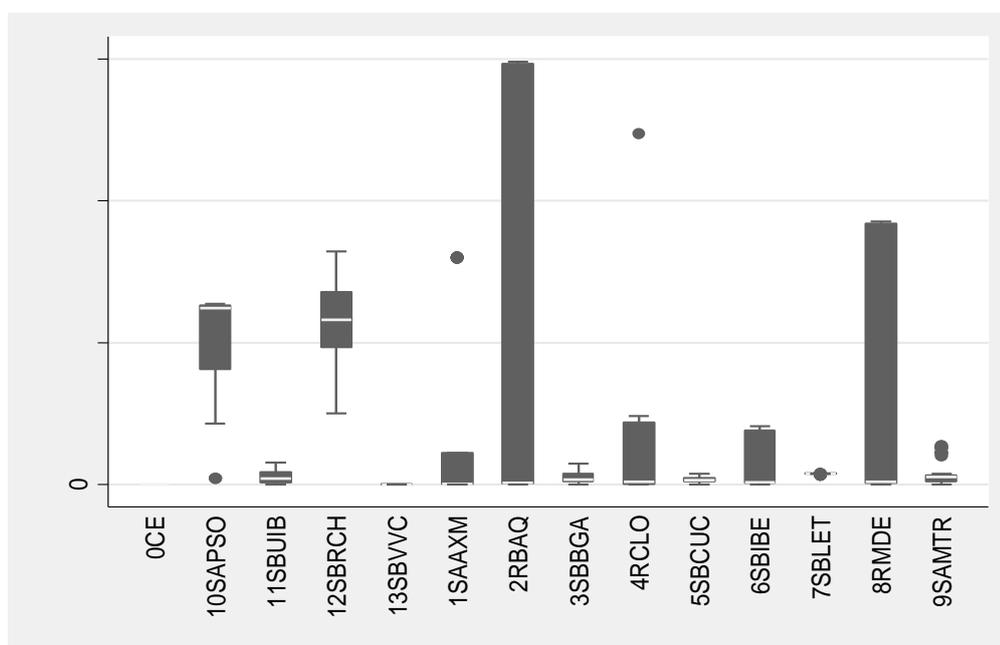
**Figura 35** Diagrama de caja comparativo de las distribuciones de datos de la Variable DEMANDA TOTAL SIMULADA en número de pacas [NPACSA], Por denominación. Creación propia del autor.

Claramente la distribución de la denominación Júpiter presenta una distribución más dispersa y con mayores valores, en promedio, que la de las otras denominaciones. Por otra parte, la distribución de datos para Plutón, es significativamente inferior al resto.

- *Análisis de la distribución de la demanda total por oficina:* Se presenta una tabla con el resultado de las estadísticas descriptivas, así como un diagrama comparativo de caja.

**TABLA 24** Valores calculados de los estadísticos descriptivos, relativos a la forma, de la distribución de la variable demanda simulada en número de pacas (NPCAS), por oficina Creación propia del autor.

| J       | mean     | p50      | sd       | cv       | skewness  | kurtosis | p25      | p75      |
|---------|----------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|
| OCE     | 4        | 4        | 0        | 0        | .         | .        | 4        | 4        |
| 10SAPSO | 217980.5 | 248583.7 | 60388.79 | .2770376 | -2.009337 | 6.787239 | 162799.1 | 252196.1 |
| 11SBUIB | 9815.815 | 8437.273 | 8383.474 | .8540782 | .547357   | 2.357752 | 2330.5   | 17154.8  |
| 12SBRCH | 224211.6 | 232221.3 | 57024.85 | .254335  | -.5240189 | 2.508233 | 193895.5 | 271362.9 |
| 13SBVVC | 302.1886 | 300.531  | 90.19753 | .298481  | -.5270595 | 2.33759  | 201.904  | 398.2755 |
| 1SAAXM  | 65851.18 | 991.2255 | 121410.2 | 1.843705 | 1.59797   | 3.655072 | 167.05   | 44352.31 |
| 2RBAQ   | 167401.5 | 2102.896 | 268816.3 | 1.605818 | .979929   | 1.960329 | 1030     | 593195.7 |
| 3SBEGA  | 9171.2   | 7080.39  | 6816.771 | .7432802 | .9864068  | 3.509941 | 3648     | 14887.13 |
| 4RCLO   | 35140.71 | 3505.1   | 77148.24 | 2.195409 | 4.391005  | 26.22626 | 25       | 87475    |
| 5SBCUC  | 6408.199 | 5700.684 | 4390.753 | .6851774 | .4459215  | 2.44429  | 3968.5   | 9396.51  |
| 6SBIBE  | 21853.67 | 2806.75  | 33969.21 | 1.554394 | 1.090621  | 2.203185 | 1485.8   | 76193.79 |
| 7SBLET  | 14772.08 | 14999.55 | 504.7037 | .034166  | -1.709183 | 3.992971 | 14999.11 | 14999.87 |
| 8RMDE   | 133757.6 | 3500.227 | 177905.6 | 1.33006  | .58326    | 1.340419 | 1202.677 | 367898.5 |
| 9SAMTR  | 14189.27 | 10447.36 | 15728.25 | 1.108461 | 1.618834  | 4.245854 | 4830.35  | 12666.95 |
| Total   | 65775.68 | 5710.592 | 125503.5 | 1.908054 | 2.302334  | 8.187202 | 398.4193 | 44352.31 |



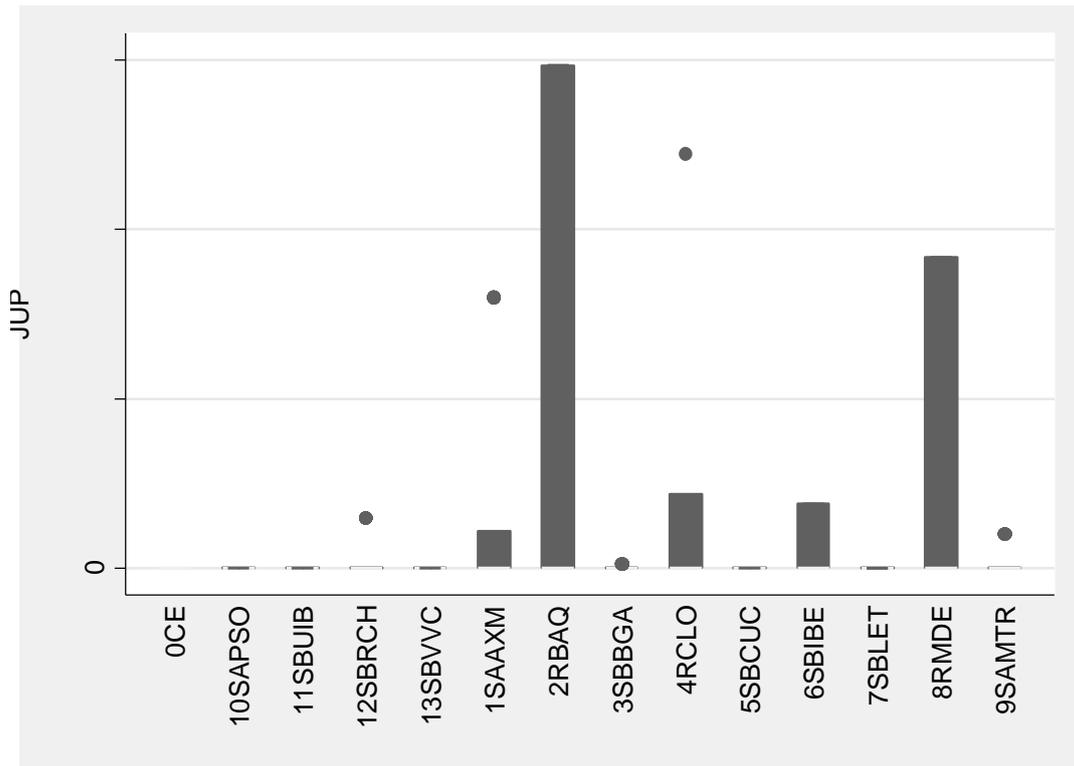
**Figura 36** Diagrama de caja comparativo de las distribuciones de datos de la variable demanda total simulada en número de pacas (NPCAS), por oficina. Creación propia del autor.

De este análisis comparativo se destacan las distribuciones de Pasto y Riohacha, significativamente más altas que otras sucursales de su mismo tipo, en particular el caso de Riohacha, que se clasifica como una sucursal B. Por otro lado, se resaltan las grandes dispersiones observadas para las sucursales de Barranquilla y Medellín. En cualquier caso, por los resultados de los análisis estadísticos previos se considera conveniente efectuar un análisis por denominación.

- *Análisis de la distribución de la demanda para la denominación Júpiter por oficina:* Se presenta una tabla con el resultado de las estadísticas descriptivas, así como un diagrama comparativo de caja.

**TABLA 25** Valores calculados de los estadísticos descriptivos, relativos a la forma, de la distribución de la variable demanda simulada en número de pacas (NPCAS), por oficina, para la denominación Júpiter. Creación propia del autor.

| J       | mean     | p50     | sd       | cv       | skewness  | kurtosis | p25    | p75      |
|---------|----------|---------|----------|----------|-----------|----------|--------|----------|
| OCE     | 1        | 1       | 0        | 0        | .         | .        | 1      | 1        |
| 10SAPSO | 44.25996 | 1       | 49.29958 | 1.113864 | .2417818  | 1.058505 | 1      | 99.084   |
| 11SBUIB | 56.09546 | 99.2795 | 49.33284 | .8794445 | -.2417323 | 1.058454 | 1      | 99.2795  |
| 12SBRCH | 12885.54 | 1       | 24496.56 | 1.90109  | 1.351854  | 2.827511 | 1      | 25       |
| 13SEVVC | 68.03828 | 99.2015 | 46.45562 | .6827866 | -.7716263 | 1.595575 | 1      | 99.6935  |
| 1SAXM   | 65327.78 | 48      | 121367.9 | 1.857831 | 1.598357  | 3.655737 | 1      | 43451    |
| 2RBAQ   | 166192.1 | 1       | 269173.2 | 1.619651 | .97996    | 1.960325 | 1      | 593192.7 |
| 3SBBGA  | 1011.78  | 54      | 1884.148 | 1.862212 | 1.352171  | 2.830611 | 1      | 54       |
| 4RCLO   | 32530.67 | 22      | 76361.36 | 2.347365 | 4.447405  | 26.69873 | 1      | 87472    |
| 5SECUC  | 30.72072 | 5.74    | 43.61185 | 1.419623 | .9560566  | 1.947196 | 1      | 99.591   |
| 6SBIBE  | 19845.15 | 47.5    | 33788.11 | 1.702588 | 1.094311  | 2.197529 | 1      | 76190.79 |
| 7SBLT   | 99.52302 | 99.493  | .2877903 | .0028917 | -.2582686 | 1.923856 | 99.205 | 99.7     |
| 8RMDE   | 132096.6 | 25      | 177904.5 | 1.346776 | .5833361  | 1.340285 | 1      | 366697.4 |
| 9SAMTR  | 6483.083 | 1       | 14928.76 | 2.302726 | 1.854823  | 4.440421 | 1      | 91       |
| Total   | 31190.88 | 16.24   | 107474.2 | 3.445695 | 3.998575  | 18.63134 | 1      | 99.546   |



**Figura 37** Diagrama de caja comparativo de las distribuciones de datos de la variable demanda simulada en número de pacas (NPACAS), por oficina, para la denominación Júpiter. Creación propia del autor.

Barranquilla es la sucursal que presenta una distribución con la más alta dispersión, seguida de Medellín. Se destacan, también Ibagué y Cali.

- *Análisis de la distribución de la demanda para la denominación Mercurio por oficina:* Se presenta una tabla con el resultado de las estadísticas descriptivas, así como un diagrama comparativo de caja.

**TABLA 26** Valores calculados de los estadísticos descriptivos, relativos a la forma, de la distribución de la variable demanda simulada en número de pacas (NPCAS), por oficina, para la denominación Mercurio. Creación propia del autor.

| J       | mean     | p50      | sd       | cv       | skewness  | kurtosis | p25      | p75      |
|---------|----------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|
| OCE     | 1        | 1        | 0        | 0        | .         | .        | 1        | 1        |
| 10SAPSO | 216276.5 | 245186.5 | 59842.63 | .276695  | -2.013729 | 6.807606 | 160500.5 | 251095.2 |
| 11SBUIB | 2169.199 | 1        | 3146.029 | 1.450318 | 1.439117  | 3.611058 | 1        | 2327.5   |
| 12SBRCH | 17069.68 | 292.5    | 19293.98 | 1.130307 | .2442422  | 1.063343 | 1        | 37902.5  |
| 13SBVVC | 77.95325 | 99.3     | 41.28452 | .5296061 | -1.351699 | 2.827337 | 99.3     | 99.8485  |
| 1SAAXM  | 53.7944  | 89.82    | 47.4071  | .8812645 | -.2248031 | 1.072549 | 1        | 99.309   |
| 2RBAQ   | 264.7381 | 1        | 474.0902 | 1.79079  | 1.217562  | 2.482456 | 1        | 1        |
| 3SBBGA  | 5918.782 | 2611     | 5381.42  | .9092107 | .8913099  | 2.471238 | 2611     | 6651     |
| 4RCLO   | 629.308  | 1        | 1354.66  | 2.152618 | 1.665853  | 3.775068 | 1        | 1        |
| 5SBCUC  | 160.7326 | 1        | 308.2074 | 1.917516 | 1.833001  | 5.066686 | 1        | 393.51   |
| 6SBIBE  | 280.6265 | 1        | 564.9309 | 2.013106 | 1.5       | 3.25     | 1        | 1        |
| 7SBLET  | 12160.73 | 12299.44 | 420.8068 | .0346037 | -2.666665 | 8.111105 | 12299.17 | 12299.88 |
| 8RMDE   | 528.2973 | 1        | 600.911  | 1.137449 | .2417472  | 1.058442 | 1        | 1199.113 |
| 9SAMTR  | 5643.808 | 6309.25  | 4469.277 | .7918903 | -.1779252 | 1.276763 | 1        | 10399.26 |
| Total   | 18659.65 | 99.3     | 57578.46 | 3.08572  | 3.494196  | 13.69676 | 1        | 6651     |

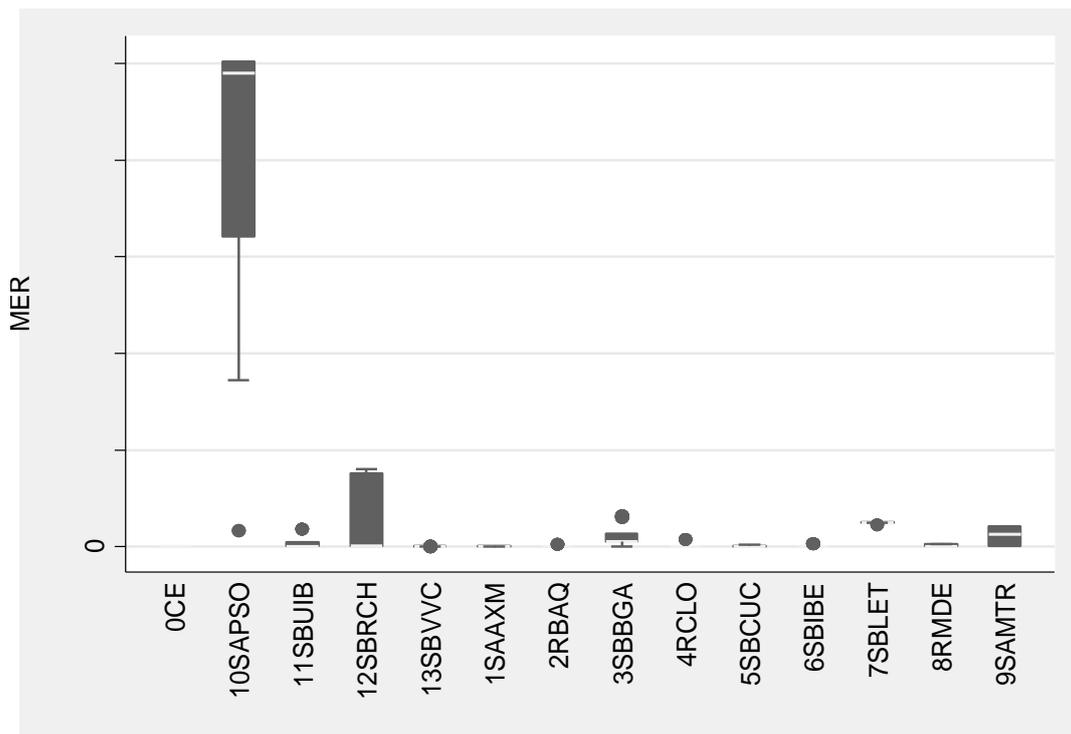


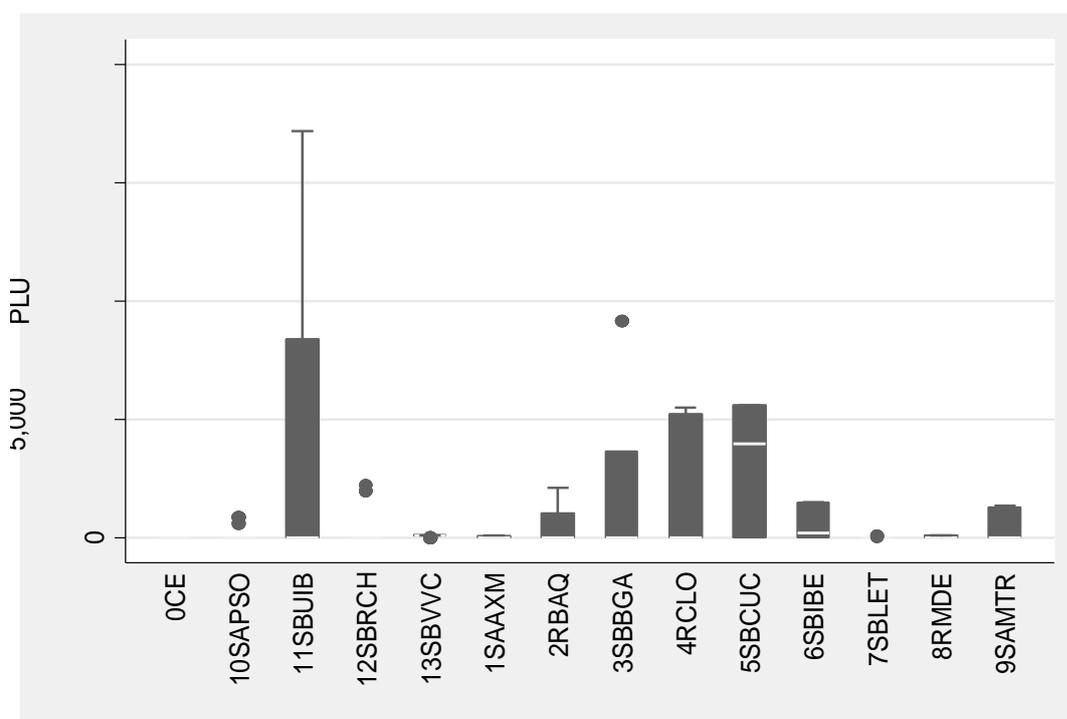
Figura 38 Diagrama de caja comparativo que muestra las distribuciones de datos de la variable demanda simulada en número de pacas (NPACAS), por oficina, para la denominación Mercurio. Creación propia del autor.

Para esta denominación, es la sucursal de Pasto la que presenta los mayores valores, siendo significativamente superior al resto de las sucursales.

- *Análisis de la distribución de la demanda para la denominación Plutón por oficina:* Se presenta una tabla con el resultado de las estadísticas descriptivas, así como un diagrama comparativo de caja.

**TABLA 27** Valores calculados de los estadísticos descriptivos, relativos a la forma, de la distribución de la variable demanda simulada en número de pacas (NPCAS), por oficina, para la denominación Plutón. Creación propia del autor.

| J       | mean     | p50     | sd       | cv       | skewness  | kurtosis | p25     | p75      |
|---------|----------|---------|----------|----------|-----------|----------|---------|----------|
| OCE     | 1        | 1       | 0        | 0        | .         | .        | 1       | 1        |
| 10SAPSO | 156.8088 | 1       | 319.4736 | 2.037345 | 1.59754   | 3.673532 | 1       | 1        |
| 11SBUIB | 5958.115 | 1       | 6972.418 | 1.170239 | .6200387  | 1.824372 | 1       | 8385     |
| 12SBRCH | 445.8595 | 1       | 847.6966 | 1.901264 | 1.36553   | 2.888046 | 1       | 1        |
| 13SBVVC | 84.10514 | 99.8945 | 36.63831 | .4356251 | -1.854848 | 4.440468 | 99.8945 | 99.9495  |
| 1SAAXM  | 39.49388 | 1       | 42.89776 | 1.086187 | .2696103  | 1.21711  | 1       | 75.23    |
| 2RBAQ   | 583.9911 | 1       | 822.8741 | 1.409053 | .9647465  | 2.338433 | 1       | 1027     |
| 3SBBGA  | 1461.439 | 1       | 2713.17  | 1.856505 | 1.865674  | 5.51218  | 1       | 3645     |
| 4RCLO   | 1804.485 | 1       | 2416.795 | 1.339327 | .720541   | 1.647033 | 1       | 5220.55  |
| 5SBCUC  | 2905.571 | 3965.5  | 2352.659 | .8097063 | -.0323096 | 1.293793 | 1       | 5599.093 |
| 6SBIBE  | 554.8784 | 191     | 678.4883 | 1.222769 | .6366313  | 1.456632 | 1       | 1482.8   |
| 7SBLET  | 9.5256   | 1       | 22.18714 | 2.329212 | 2.364602  | 6.978533 | 1       | 1        |
| 8RMDE   | 28.52156 | 1       | 44.58076 | 1.563055 | .979962   | 1.960332 | 1       | 99.233   |
| 9SAMTR  | 446.5074 | 1       | 627.3518 | 1.40502  | .6790066  | 1.466049 | 1       | 1285.35  |
| Total   | 1034.307 | 1       | 2724.243 | 2.633882 | 3.980569  | 21.20822 | 1       | 191      |



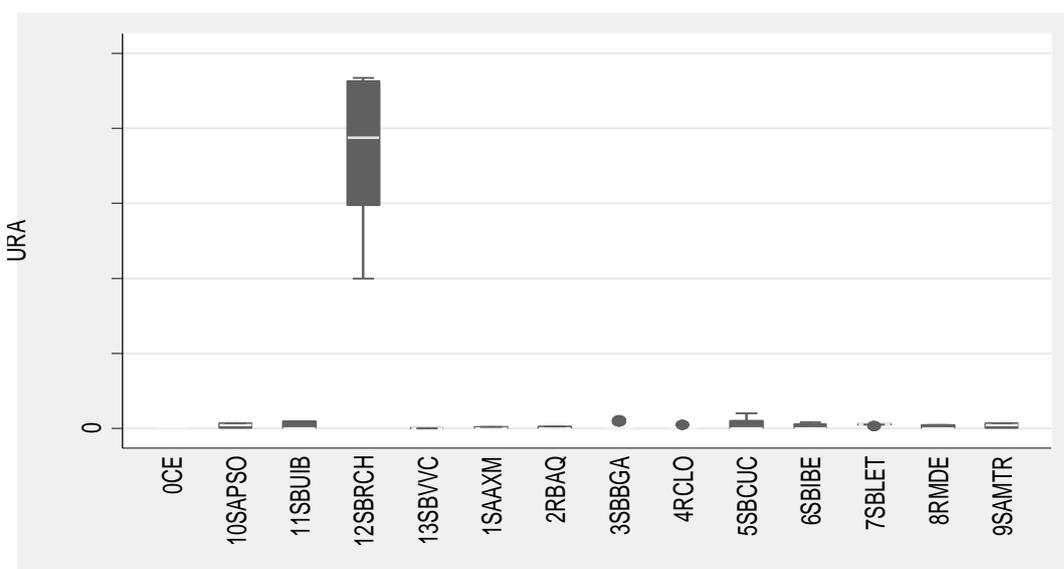
**Figura 39** Diagrama de caja comparativo que muestra las distribuciones de datos de la variable demanda simulada en número de pacas (NPACAS), por oficina, para la denominación Plutón. Creación propia del autor.

De este análisis se puede observar que las distribuciones más representativas están en las sucursales de Ibagué, Bucaramanga, Cúcuta y Cali.

- *Análisis de la distribución de la demanda para la denominación Urano por oficina:* Se presenta una tabla con el resultado de las estadísticas descriptivas, así como un diagrama comparativo de caja.

**TABLA 28** Valores calculados de los estadísticos descriptivos, relativos a la forma, de la distribución de la variable demanda simulada en número de pacas (NPCAS), por oficina, para la denominación Urano. Creación propia del autor.

| J       | mean     | p50      | sd       | cv       | skewness  | kurtosis | p25      | p75      |
|---------|----------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|
| OCE     | 1        | 1        | 0        | 0        | .         | .        | 1        | 1        |
| 10SAPSO | 1502.935 | 2198     | 1520.118 | 1.011433 | .1419917  | 1.23814  | 1        | 3395.2   |
| 11SBUIB | 1632.405 | 1        | 2296.05  | 1.406544 | .6755205  | 1.456328 | 1        | 4799.232 |
| 12SBRCH | 193810.5 | 193892.5 | 43840.04 | .2262005 | -.7913344 | 2.305066 | 148457.5 | 231502.5 |
| 13SBVVC | 72.09188 | 99.8485  | 44.7843  | .6212114 | -.9798648 | 1.960273 | 1        | 99.952   |
| 1SAAXM  | 430.1163 | 1        | 451.1853 | 1.048984 | .0802275  | 1.006654 | 1        | 899.309  |
| 2RBAQ   | 360.6689 | 1        | 554.9812 | 1.538755 | .8728716  | 1.761905 | 1        | 1199.878 |
| 3SBEGA  | 779.1982 | 1        | 1804.057 | 2.315274 | 1.868103  | 4.514531 | 1        | 1        |
| 4RCLO   | 176.248  | 1        | 600.3285 | 3.406158 | 3.096281  | 10.58696 | 1        | 1        |
| 5SBCUC  | 3311.174 | 1        | 4040.167 | 1.220161 | .5904831  | 1.649075 | 1        | 5165.5   |
| 6SBIBE  | 1173.021 | 1        | 1701.426 | 1.450465 | .8620493  | 1.971277 | 1        | 2780.5   |
| 7SBLET  | 2502.303 | 2599.44  | 336.7648 | .134582  | -3.213557 | 11.59594 | 2599.171 | 2599.733 |
| 8RMDE   | 1104.23  | 1        | 1159.936 | 1.050448 | .0800642  | 1.00641  | 1        | 2299.113 |
| 9SAMTR  | 1615.867 | 2175.5   | 1529.667 | .9466536 | .0567448  | 1.291881 | 1        | 3499.262 |
| Total   | 14890.84 | 1        | 51029.5  | 3.426905 | 3.576005  | 14.2503  | 1        | 2599.44  |



**Figura 40** Diagrama de caja comparativo que muestra las distribuciones de datos de la variable demanda simulada en número de pacas (NPCAS), por oficina, para la denominación Urano. Creación propia del autor.

Es fácil observar que la distribución de datos que sobresale en esta denominación es la de la sucursal de Riohacha, con altísimos valores de demanda en relación a las demás oficinas.

En general, se puede establecer que algunas denominaciones concentran su demanda en sucursales específicas, coincidiendo con sucursales ubicadas en la frontera: Así, por ejemplo, la denominación Mercurio concentra su demanda en la sucursal de Pasto y la denominación Urano, que concentra su demanda en la denominación de Riohacha. La denominación Júpiter, que es la más demandada de todas las denominaciones concentran su demanda en las sucursales regionales de Medellín y Cali. Finalmente, la denominación de Pluto, que es la de menor demanda, concentra sus datos en las varias sucursales, destacándose las del oriente, Bucaramanga y Cúcuta.

### 3.2.3 Esquema operativo para la ejecución del modelo

La ejecución del modelo de optimización de aplicación inmediata sobre los cincuenta escenarios simulados exige de la interacción de un conjunto de recursos informáticos. La siguiente grafica ilustra el conjunto de recursos y sus interacciones.

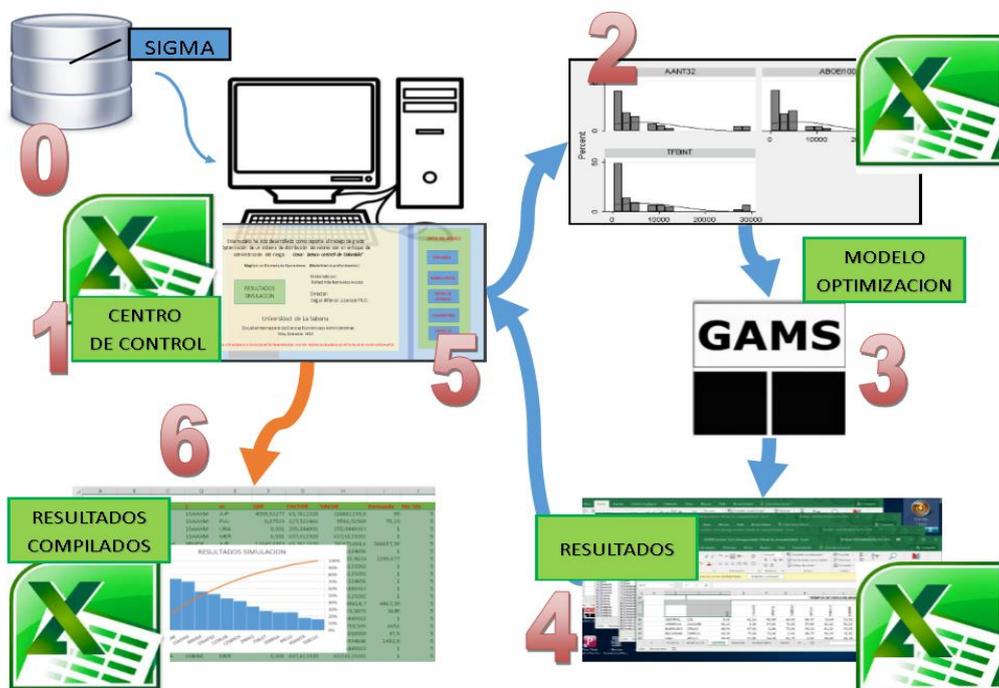


Figura 41 Esquema del proceso operativo mediante el que se ejecuta el modelo de optimización. Creación propia del autor.

Inicialmente, el paso señalado como cero (0) en la gráfica corresponde a la obtención de los datos del sistema de información de la tesorería del Banco, SIGMA. Es de mencionar que los datos administrados en SIGMA se utilizan con propósitos distintos a los planteados en este trabajo, por lo que se requirió de un procesamiento previo antes de incorporarlos en el proceso de optimización.

Mediante una herramienta desarrollada en Excel, denominada, “Centro de Control”, se incorporan los datos históricos obtenidos de SIGMA, se administran los parámetros del sistema de optimización y se ejecuta el método de Montecarlo mediante el que se obtienen las existencias iniciales por denominación para cada sucursal. La siguiente gráfica muestra el tablero de control de la herramienta Excel que interviene en el proceso y que en la figura 39 corresponde al paso 1. Desde este tablero y mediante el uso de hipervínculos se accede a las diferentes hojas de cálculo que contienen información sobre los datos de entrada, parámetros de ejecución del modelo y datos de salida.

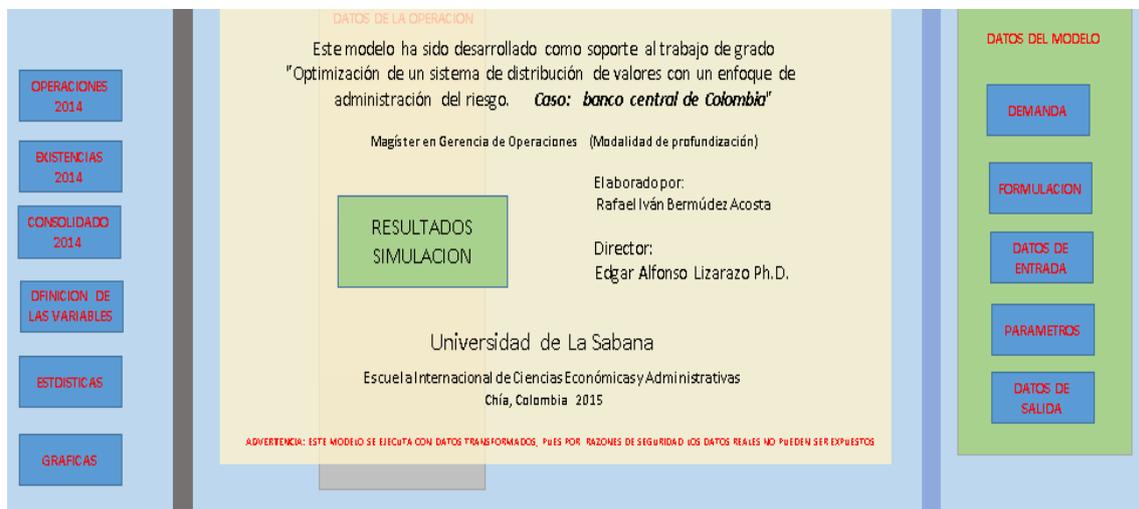


Figura 42 Vista del tablero del control del archivo Excel “Centro de Control” mediante el que se administra la información que se involucra y que resulta de la ejecución del modelo de optimización. Creación propia del autor.

Resultado del proceso que se ejecuta mediante la herramienta “Centro de Control” del paso 1 se obtiene un conjunto de archivos Excel con los datos de los parámetros y las existencias iniciales para ser exportados hacia el modelo de optimización, es decir se cuenta con la información de entrada del modelo. Se debe anotar que este paso escribe la información de entrada en el formato adecuado para su lectura por el aplicativo GAMS. Este paso en la figura 42 se ha identificado con el número 2.

El paso 3 de este proceso consiste en la ejecución del modelo de optimización. En términos prácticos se ejecuta el código del algoritmo desarrollado en el lenguaje GAMS. El resultado del paso 3, datos de salida, es exportado a un conjunto de hojas Excel. Este paso se identifica como el paso 4.

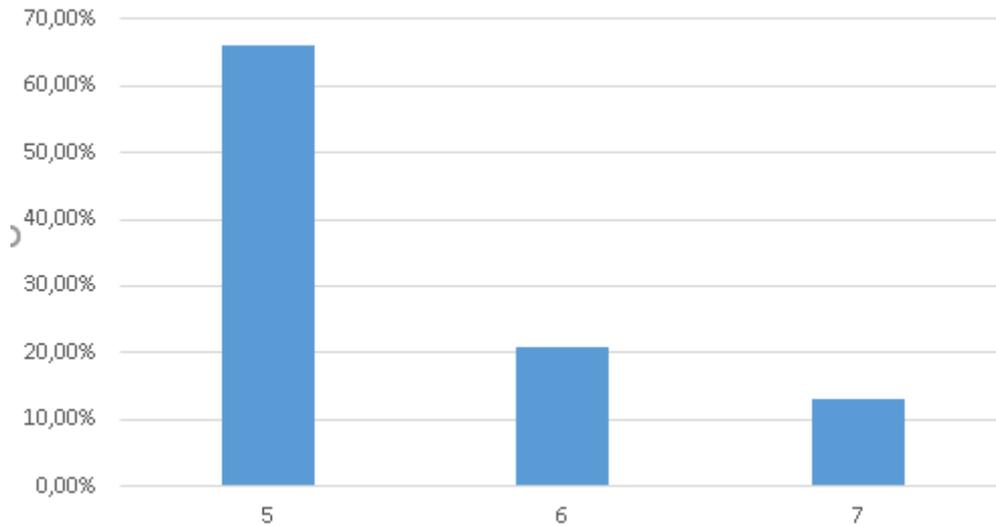
Posteriormente, en el paso 5, se incluyen los datos con los resultados de la ejecución del modelo, datos de salida, en la herramienta “Centro de Control”. De esta forma, se obtiene un conjunto de datos que integra los datos de entrada, los parámetros y los datos de salida, para cada ejecución del modelo. Finalmente, el paso 6 consiste en la exportación de los datos integrados de todas las ejecuciones conformando un gran conjunto de datos que puede ser analizado a través de las diferentes herramientas de análisis de datos, que para el caso particular de este trabajo es STATA.

### 3.2.4 Análisis de los resultados de la ejecución del modelo de aplicación inmediata sobre la demanda simulada

La ejecución del modelo de optimización de aplicación inmediata sobre los cincuenta escenarios

Simulados generan un conjunto de resultados que se resumen en los siguientes apartes:

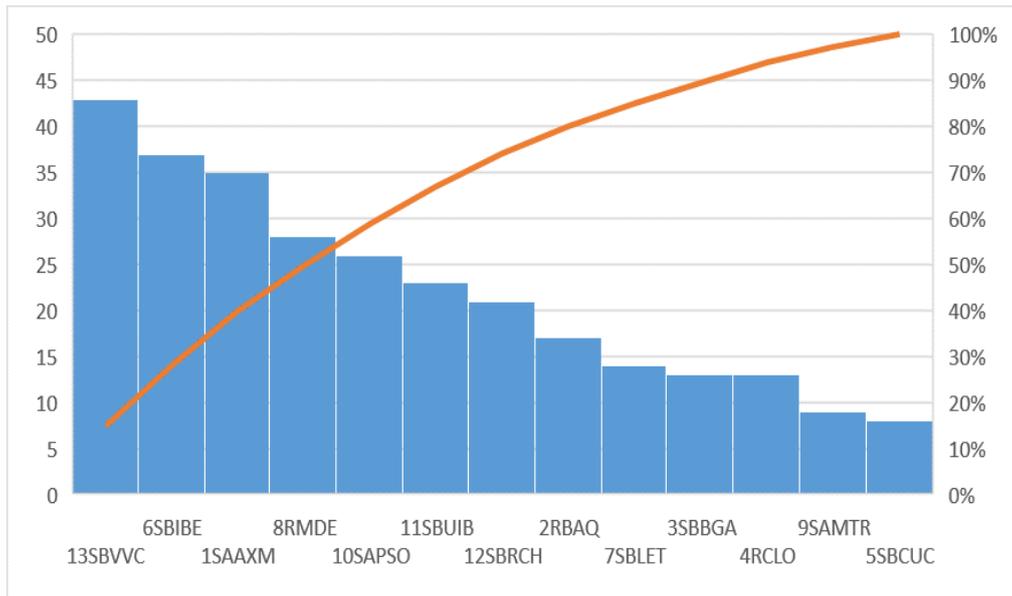
- *Número de sucursales visitadas en un día:* Se presenta una gráfica con un diagrama de barras donde se muestra en términos porcentuales la participación del número de visitas por sucursal.



**Figura 43** Histograma que muestra la participación porcentual de la variable número de sucursales visitadas en una operación, resultado de la ejecución del modelo sobre los escenarios determinados en el ejercicio de simulación. Creación propia del autor.

En el 66% de las ejecuciones el modelo visitó a cinco (5) sucursales, en 21 % de los casos visitó seis (6) y tan solo en el 13% de los casos alcanzó a visitar siete (7) sucursales. Teniendo en cuenta que el número de sucursales es de trece (13), se puede concluir que el modelo en el 66% de los casos visita el 38% de las oficinas, en el 21 % de los casos el modelo ofrece una solución que visita el 46% de las oficinas y, finalmente, en el 13% de los casos el modelo visita el 53% de las oficinas. En conclusión, el modelo plantea una amplia cobertura de los nodos clientes en una sola ejecución.

- *Número de visitas por sucursal:* Se presenta una gráfica con un diagrama de Pareto donde se muestra en términos porcentuales la participación del número de visitadas para cada sucursal, resultado del ejercicio de simulación.

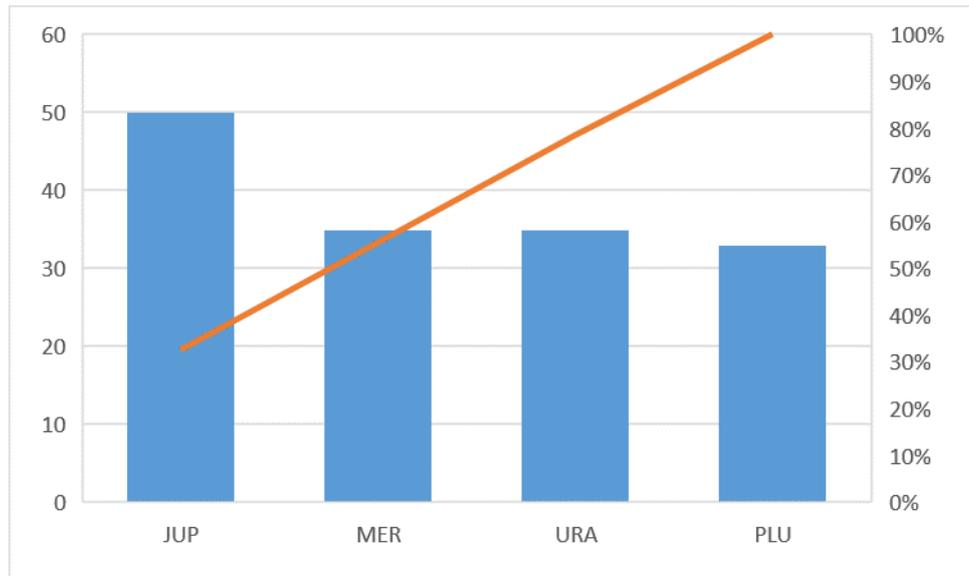


**Figura 44** Diagrama de Pareto que muestra la participación absoluta y porcentual de la variable número de visitas por sucursal, resultado de la ejecución del modelo sobre los escenarios determinados en el ejercicio de simulación. Creación propia del autor.

La sucursal más visitada es la ciudad de Villavicencio. Lo anterior es predecible en la medida que esta sucursal, para el modelo, supone una ruta terrestre con costo significativamente inferior a los costos de los trayectos aéreos. Siguen en número de visitas las sucursales de Ibagué y Armenia, que, por encontrarse a cortas distancias, son frecuentemente seleccionadas por el modelo en la solución óptima. También se destacan las sucursales de Riohacha y Pasto, a pesar de que se encuentran a grandes distancias, y por ende altos costos de transporte, son seleccionadas, por el modelo, con bastante frecuencia en la solución óptima, pues registran altas demandas.

En principio se puede anotar que el modelo hace una adecuada selección de las sucursales a visitar equilibrando costos de transporte y nivel de demanda. Adicionalmente, se debe resaltar que en el proceso de simulación todas las sucursales registraron visitas.

- *Número de cargas por denominación:* Se presenta una gráfica con un diagrama de Pareto donde se muestra en términos porcentuales la participación del número de visitas con carga de una denominación.



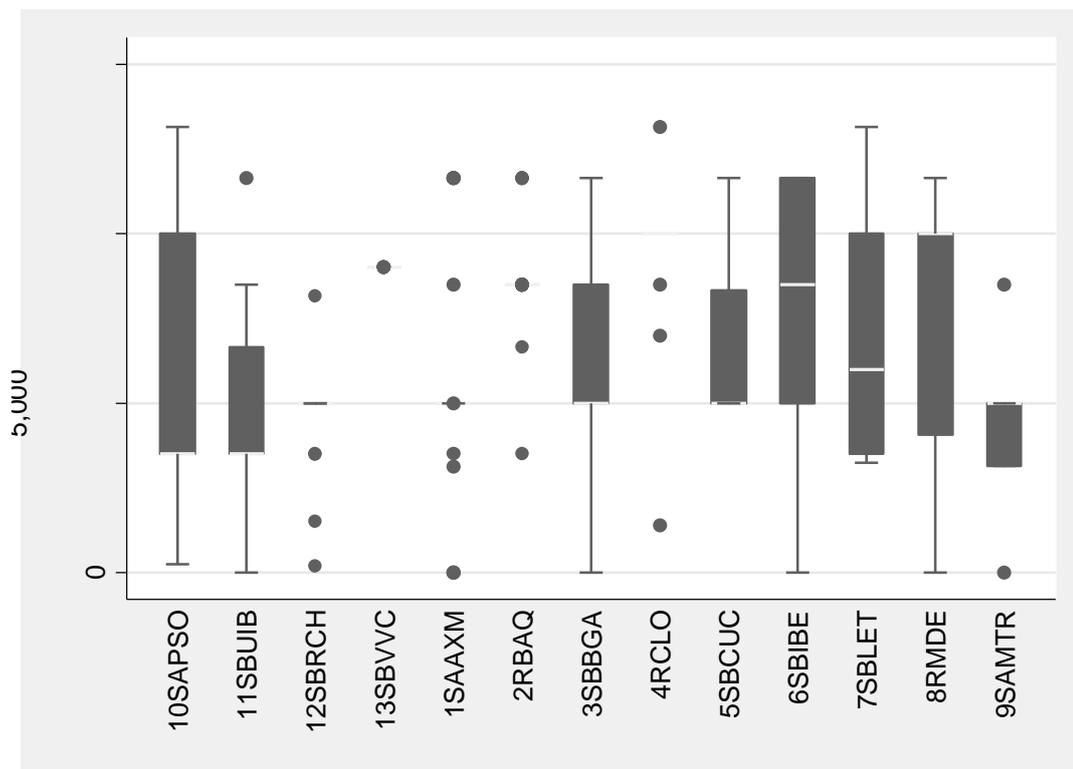
**Figura 45** Diagrama de Pareto que muestra la participación absoluta y porcentual de la variable número de entregas por denominación, resultado de la ejecución del modelo sobre los escenarios determinados en el ejercicio de simulación. Creación propia del autor.

Como era de esperarse, basados en los resultados del análisis de la demanda, el mayor número de transportes se realizan con la denominación Júpiter, pues es la de mayor demanda. Adicionalmente, por ser la de menor valor monetario, el modelo en su componente de carga la selecciona con mayor frecuencia. Las demás se comportan de forma constante alrededor de 34 transportes, en las cincuenta simulaciones efectuadas. Llama la atención que en contraste con la demanda simulada la denominación de Plutón, registra un número de entregas cercano al de Urano. Lo anterior, puede explicarse en el hecho de que las distribuciones de Urano y Mercurio se concentran en pocas sucursales, mientras que la demanda de la denominación de Plutón se distribuye en varias oficinas, por lo que en la mayoría de las rutas propuestas por el modelo se entregarán pacas de esta denominación.

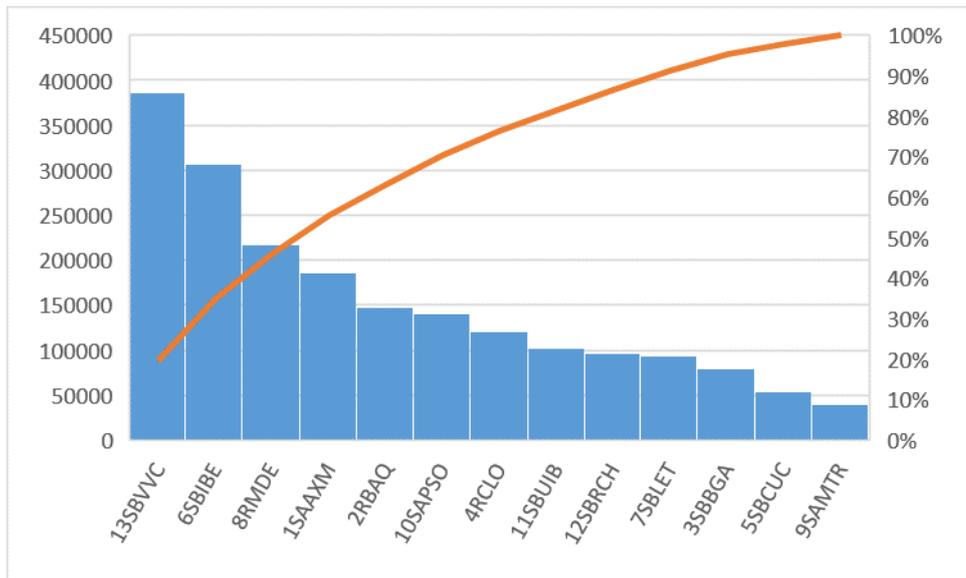
- *Número de pacas transportados por oficina:* Los resultados obtenidos para esta variable, resultado de la ejecución del modelo, se presentan mediante una tabla con las estadísticas descriptivas básicas. Adicionalmente, se presentan un diagrama comparativo de cajas y un diagrama de Pareto.

**TABLA 29** Valores calculados de los estadísticos descriptivos, relativos a la forma, de la distribución de la variable pacas transportada en número de pacas (NPCAS), por oficina, Creación propia del autor.

| OFICINA | mean     | sum      | sd       | cv       | min      | max   | p50   | iqr      |
|---------|----------|----------|----------|----------|----------|-------|-------|----------|
| 10SAPSO | 5415.881 | 140812.9 | 4092.08  | .7555705 | 250.7591 | 13150 | 3500  | 6500     |
| 11SBUIB | 4452.34  | 102403.8 | 2723.14  | .61162   | .004     | 11650 | 3500  | 3150     |
| 12SBRCH | 4610.663 | 96823.93 | 1527.192 | .3312303 | 194.187  | 8150  | 5000  | 1.82e-12 |
| 13SBVVC | 9000     | 387000   | 1.01e-12 | 1.12e-16 | 9000     | 9000  | 9000  | 0        |
| 1SAAXM  | 5335.217 | 186732.6 | 2796.692 | .5241946 | .09282   | 11650 | 5000  | 9.09e-13 |
| 2RBAQ   | 8652.883 | 147099   | 1900.597 | .219649  | 3500     | 11650 | 8500  | 0        |
| 3SBBGA  | 6088.663 | 79152.61 | 2958.588 | .4859176 | 2.614    | 11650 | 5000  | 3500     |
| 4RCLO   | 9234.448 | 120047.8 | 2700.851 | .2924756 | 1399.241 | 13150 | 10000 | 1.82e-12 |
| 5SBCUC  | 6662.5   | 53300    | 3078.352 | .4620416 | 5000     | 11650 | 5000  | 3325     |
| 6SBIBE  | 8289.189 | 306700   | 3450.888 | .4163119 | .004     | 11650 | 8500  | 6650     |
| 7SBLET  | 6724.358 | 94141.01 | 3580.946 | .5325336 | 3245.503 | 13150 | 6000  | 6500     |
| 8RMDE   | 7773.917 | 217669.7 | 3877.23  | .4987485 | 2.42491  | 11650 | 10000 | 5925     |
| 9SAMTR  | 4422.336 | 39801.03 | 2265.657 | .5123213 | 3.546    | 8500  | 5000  | 1850.093 |
| Total   | 6869.981 | 1971684  | 3299.803 | .4803221 | .004     | 13150 | 6650  | 4000     |



**Figura 46** Diagrama de cajas comparativo que muestra las distribuciones de datos, por oficina, de la variable número de pacas transportadas en una operación. Creación propia del autor.



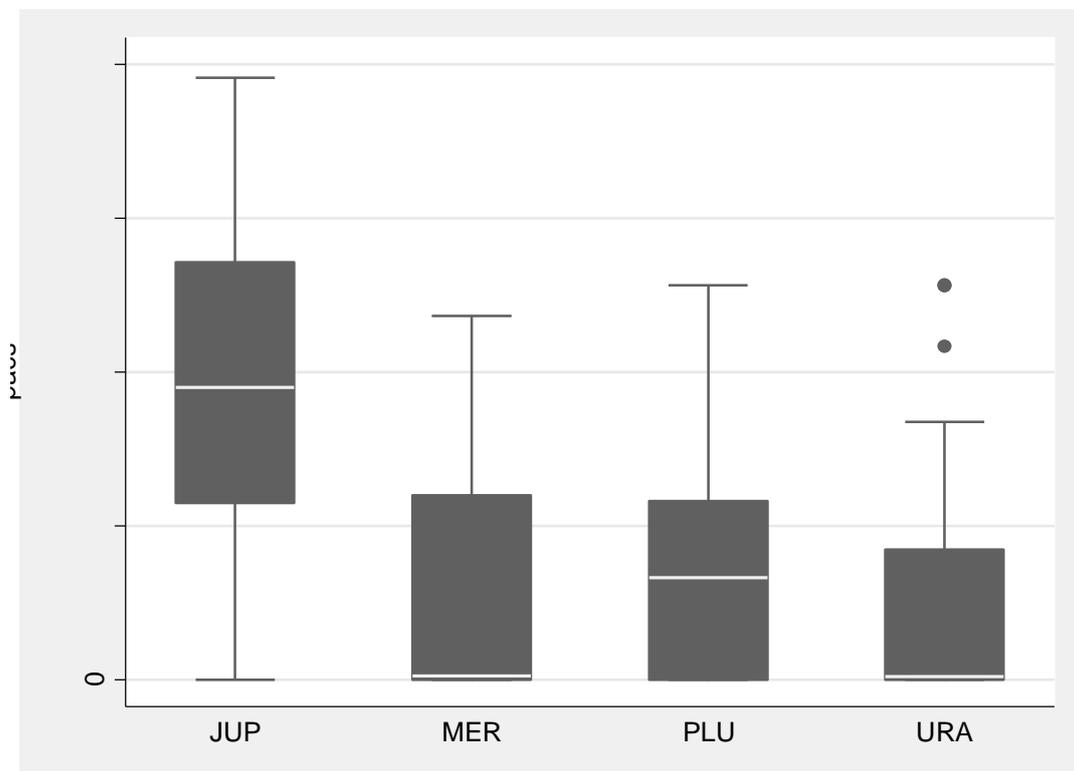
**Figura 47** Diagrama de Pareto que muestra la participación absoluta y porcentual de la variable número de pacas transportadas en una operación, por sucursal, resultado de la ejecución del modelo sobre los escenarios determinados en el ejercicio de simulación. Creación propia del autor.

Respondiendo a lo esperado, en general, las sucursales más visitadas son también las que más pacas reciben. No obstante, se destacan las sucursales regionales de Barranquilla y Medellín que mejoran su posición. Lo anterior se puede explicar en el hecho de que las sucursales regionales como Barranquilla y Medellín pueden operar con vehículos aéreos de gran capacidad que le permiten recibir en una visita una gran cantidad de pacas. Por otro lado, se puede observar que Barranquilla presenta una alta demanda de especies monetarias de la denominación Júpiter, que es la de menor valor monetario, por lo que el modelo, en su solución óptima, le permite transportar grandes cantidades, que no incrementan de manera importante el valor monetario transportado.

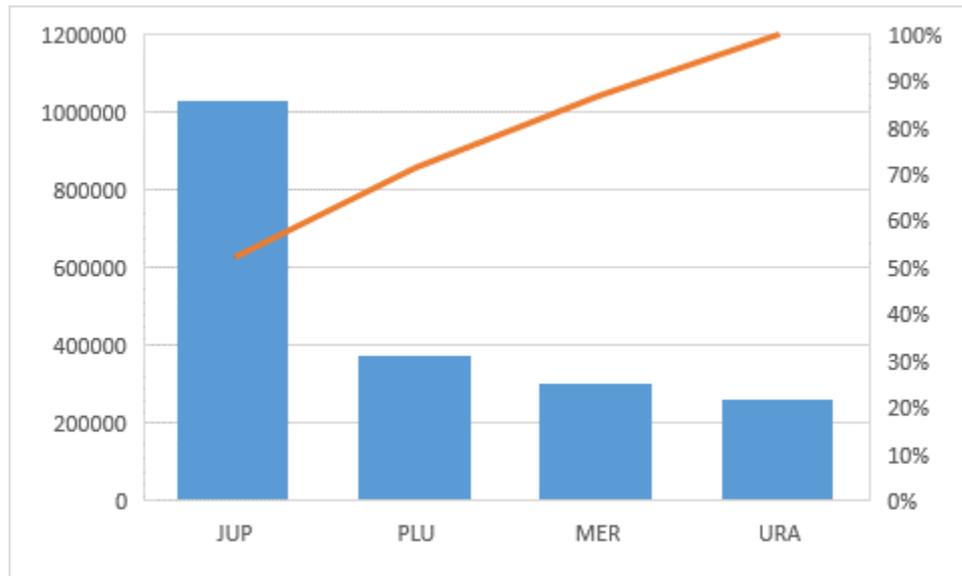
- *Número de pacas transportados por denominación:* Los resultados obtenidos para esta variable, resultado de la ejecución del modelo, se presentan mediante una tabla con las estadísticas descriptivas básicas. Adicionalmente, se presentan un diagrama comparativo de cajas y un diagrama de Pareto.

**TABLA 30** Valores calculados de los estadísticos descriptivos, relativos a la forma, de la distribución de la variable pacas transportada en número de pacas (NPCAS), por denominación, Creación propia del autor.

| DENOM | mean     | sum      | sd       | cv       | min     | max      | p50      | iqr      |
|-------|----------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|----------|
| JUP   | 19471.57 | 1031993  | 10799.46 | .5546273 | 4.61953 | 39144.62 | 18999.9  | 15642.67 |
| MER   | 5695.169 | 301844   | 6775.723 | 1.189732 | .09682  | 23652.11 | 262.4062 | 11991.69 |
| PLU   | 7090.389 | 375790.6 | 7249.229 | 1.022402 | .008    | 25645.51 | 6645.206 | 11648.68 |
| URA   | 4944.475 | 262057.2 | 7068.485 | 1.429572 | .008    | 25659.14 | 236.6953 | 8492.191 |
| Total | 9300.401 | 1971685  | 10028.19 | 1.078254 | .008    | 39144.62 | 7383.35  | 13983.46 |



**Figura 48** Diagrama de cajas comparativo que muestra las distribuciones de datos, por denominación, de la variable número de pacas transportadas en una operación. Creación propia del autor.



**Figura 49** Diagrama de Pareto que muestra la participación absoluta y porcentual de la variable número de pacas transportadas en una operación, por denominación, resultado de la ejecución del modelo sobre los escenarios determinados en el ejercicio de simulación. Creación propia del autor.

De la forma que se esperaba, en concordancia con el análisis de la demanda, la denominación Júpiter registra altos valores en número de pacas transportados. Por otro lado, el hecho de que la denominación Júpiter sea la de menor valor monetario, es la que el modelo intentará transportar con mayor frecuencia.

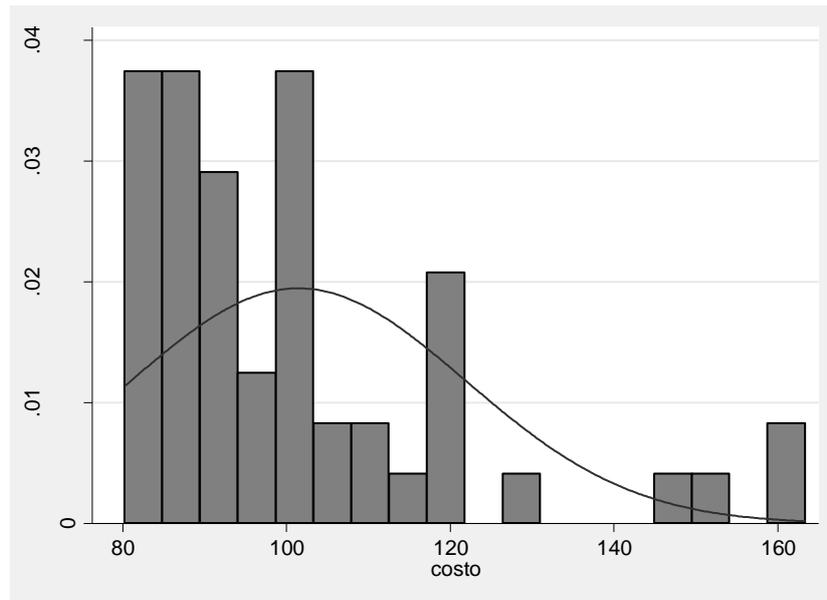
- **Costo de la operación:** Esta es claramente es una de las variables que resulta de la mayor relevancia para el objetivo de este trabajo. Los resultados obtenidos para esta variable, generados por la ejecución del modelo, se presentan, en millones de pesos, mediante una tabla con las estadísticas descriptivas básicas. Adicionalmente, se presentan un diagrama comparativo de cajas y un histograma.

**TABLA 31** Valores calculados de los estadísticos descriptivos de la distribución de la variable costo de la operación en millones de pesos. Creación propia del autor.

| costo |                 |                 |             |  |                 |
|-------|-----------------|-----------------|-------------|--|-----------------|
|       | Percentiles     | Smallest        |             |  |                 |
| 1%    | <b>80.18386</b> | <b>80.18386</b> |             |  |                 |
| 5%    | <b>80.65884</b> | <b>80.65884</b> |             |  |                 |
| 10%   | <b>81.29134</b> | <b>80.65884</b> | Obs         |  | <b>52</b>       |
| 25%   | <b>88.88123</b> | <b>80.65884</b> | Sum of Wgt. |  | <b>52</b>       |
| 50%   | <b>97.41577</b> |                 | Mean        |  | <b>101.4491</b> |
|       |                 | Largest         | Std. Dev.   |  | <b>20.48103</b> |
| 75%   | <b>107.9041</b> | <b>148.9174</b> |             |  |                 |
| 90%   | <b>121.6306</b> | <b>153.5175</b> | Variance    |  | <b>419.4725</b> |
| 95%   | <b>153.5175</b> | <b>161.2489</b> | Skewness    |  | <b>1.522824</b> |
| 99%   | <b>163.3837</b> | <b>163.3837</b> | Kurtosis    |  | <b>4.912753</b> |



**Figura 50** Diagrama de cajas que muestra la distribución de datos, de la variable costo de una operación, en millones de pesos. Creación propia del autor.



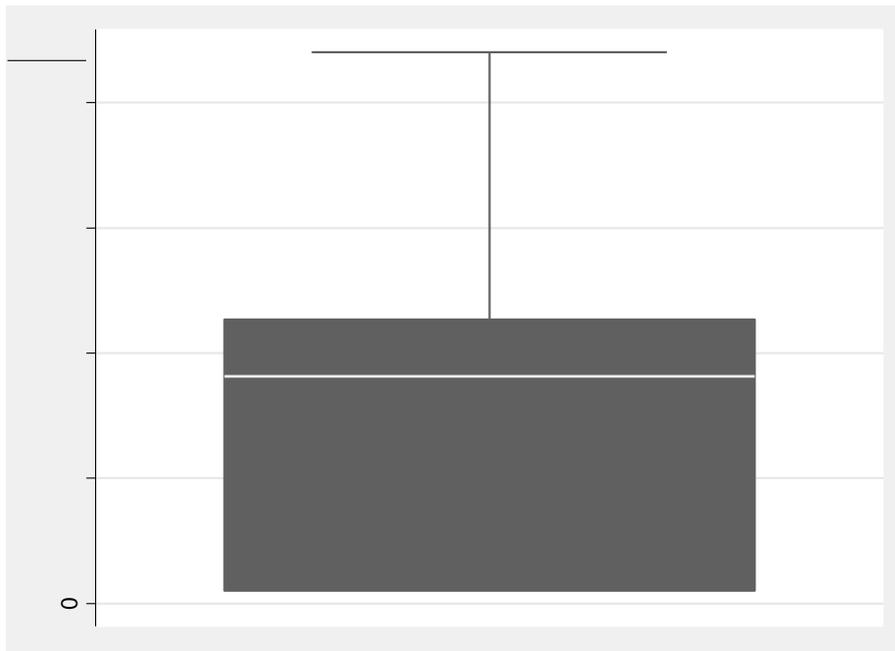
**Figura 51** Histograma que muestra la distribución de datos, de la variable costo de una operación. Creación propia del autor.

Con una media y mediana cercana a los 100 millones se trata de una distribución homogénea con un sesgo a la derecha y la presencia de algunos valores atípicos superiores.

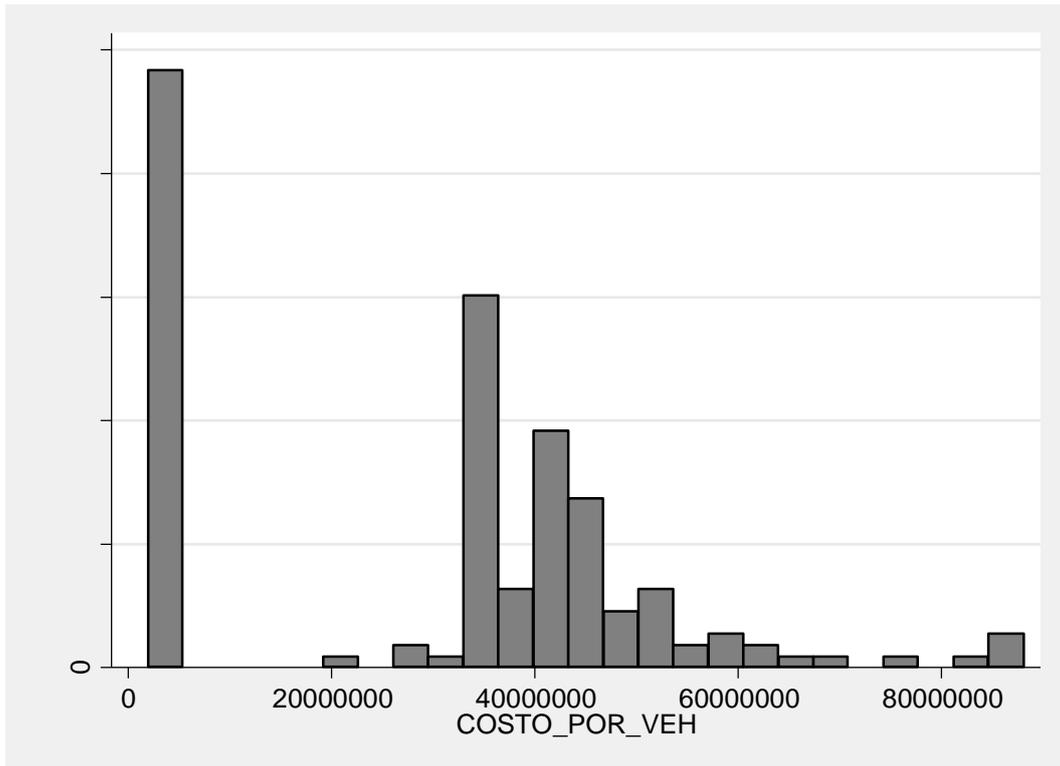
- *Costo de la operación por vehículo:* Para los propósitos de este trabajo resulta relevante establecer el costo de una operación por vehículo, pues el riesgo de una operación fallida está directamente asociado al tipo de vehículo. Los resultados obtenidos para esta variable, generados por la ejecución del modelo, se presentan mediante una tabla con las estadísticas descriptivas básicas. Adicionalmente, se presentan un diagrama comparativo de cajas y un histograma.

**TABLA 32** Valores calculados de los estadísticos descriptivos de la distribución de la variable costo de la operación, en millones de pesos, por tipo de vehículo en millones de pesos. Creación propia del autor.

| COSTO_POR_VEH |                 |                 |             |                 |
|---------------|-----------------|-----------------|-------------|-----------------|
|               | Percentiles     | Smallest        |             |                 |
| 1%            | <b>1953000</b>  | <b>1953000</b>  |             |                 |
| 5%            | <b>1953000</b>  | <b>1953000</b>  |             |                 |
| 10%           | <b>1953000</b>  | <b>1953000</b>  | Obs         | <b>159</b>      |
| 25%           | <b>1953000</b>  | <b>1953000</b>  | Sum of Wgt. | <b>159</b>      |
| 50%           | <b>3.63e+07</b> |                 | Mean        | <b>3.01e+07</b> |
|               |                 | Largest         | Std. Dev.   | <b>2.23e+07</b> |
| 75%           | <b>4.54e+07</b> | <b>8.40e+07</b> |             |                 |
| 90%           | <b>5.31e+07</b> | <b>8.55e+07</b> | Variance    | <b>4.96e+14</b> |
| 95%           | <b>6.38e+07</b> | <b>8.72e+07</b> | Skewness    | <b>.0537513</b> |
| 99%           | <b>8.72e+07</b> | <b>8.81e+07</b> | Kurtosis    | <b>2.32102</b>  |

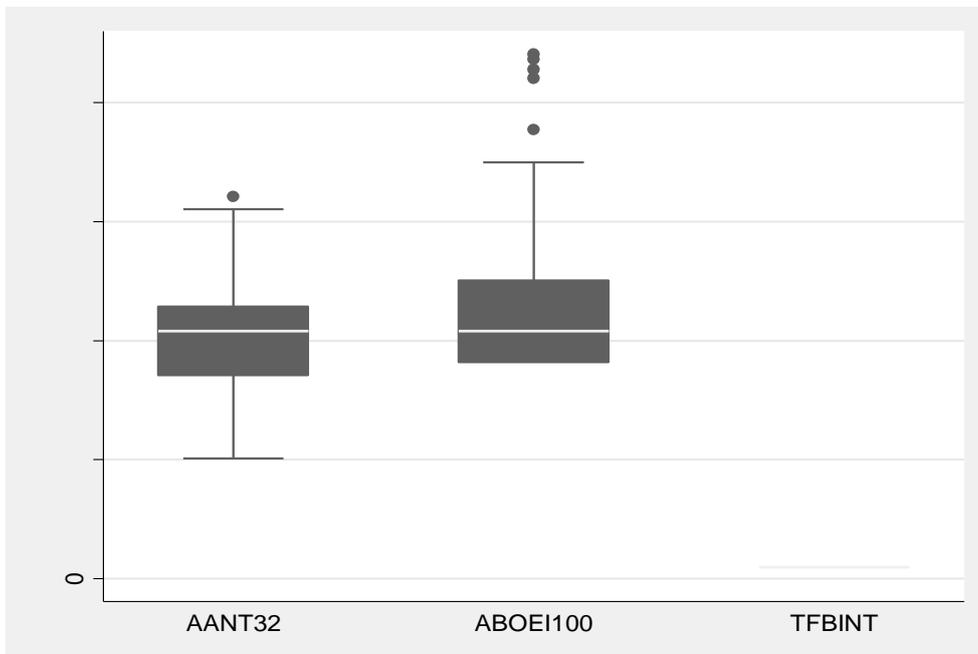


**Figura 52** Diagrama de cajas que muestra la distribución de datos, de la variable costo de una operación, por vehículo, en millones de pesos. Creación propia del autor.



**Figura 53** Histograma que muestra la distribución de datos, de la variable costo por vehículo. Creación propia del autor.

Resulta conveniente observar, el comportamiento de esta variable de forma comparativa por vehículo. Para este proposito, se utiliza un diagrama de cajas.



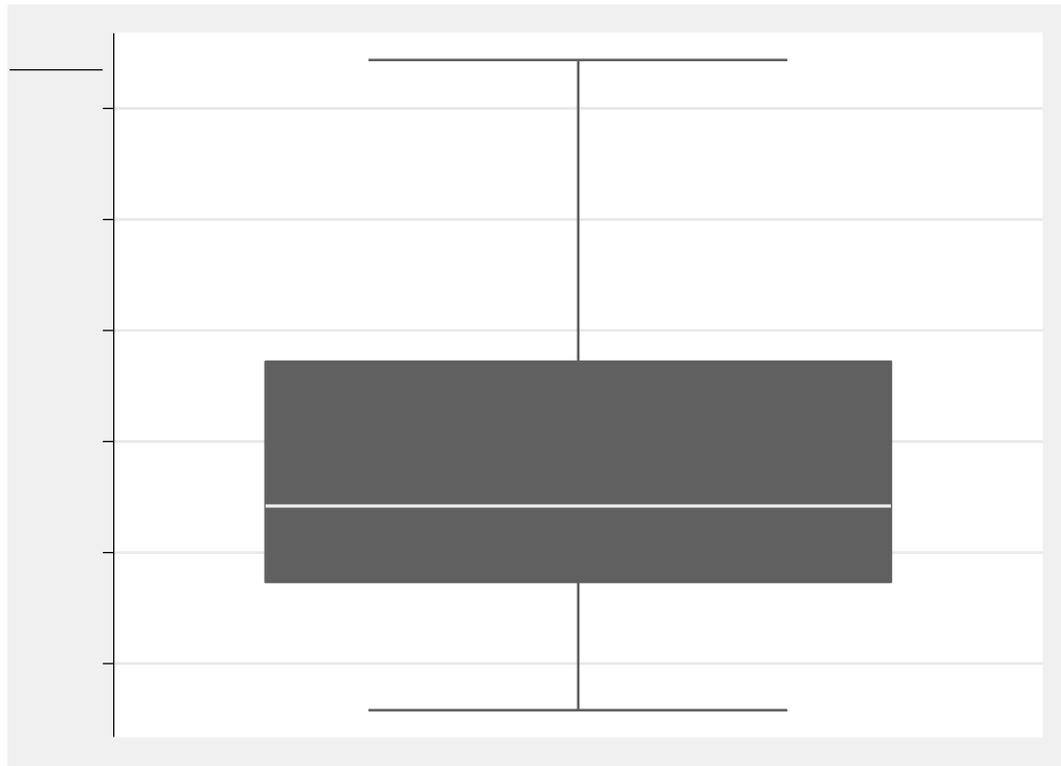
**Figura 54** Diagrama de cajas comparativo que muestra las distribuciones de datos, por tipo de vehículo, de la variable número de pacas transportadas en una operación. Creación propia del autor.

Como es de esperarse, se observan dos distribuciones: la que corresponde a los vehículos aereros y la que corresponde al vehículo terrestre, que claramente se trata de una distribución constante, con un valor significativamente inferior a los valores observados para las operaciones aereas.

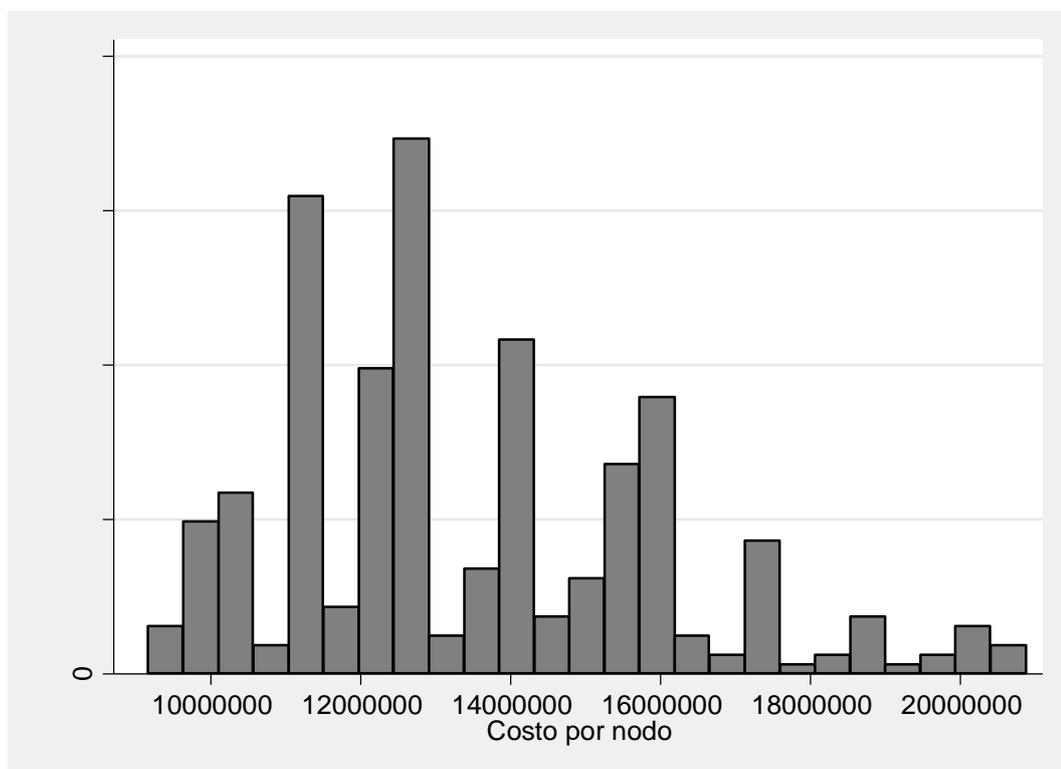
- *Costo de la operación por nodo visitado:* Resulta relevante para el objeto de este trabajo establecer el costo de una operación para cada nodo visitado, pues el riesgo de una operación fallida esta directamente asociado al nodo que se visita. Como se deduce del ejercicio de simulación, la operación terrestre establece como único nodo visitado a la sucursal de Villavicencio, de esta forma, en este aparte se obtienen las estadísticas descriptivas básicas para los nodos que son visitados en las rutas aéreas. La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos, adicionalmente, se presentan un diagrama comparativo de cajas y un histograma.

**TABLA 33** Valores calculados de los estadísticos descriptivos de la distribución de la variable costo de la operación, por nodo, en millones de pesos. Creación propia del autor.

| Costo por nodo |                 |                 |             |                 |
|----------------|-----------------|-----------------|-------------|-----------------|
|                | Percentiles     | Smallest        |             |                 |
| 1%             | <b>9166400</b>  | <b>9166400</b>  |             |                 |
| 5%             | <b>9846400</b>  | <b>9166400</b>  |             |                 |
| 10%            | <b>1.03e+07</b> | <b>9166400</b>  | Obs         | <b>345</b>      |
| 25%            | <b>1.15e+07</b> | <b>9166400</b>  | Sum of Wgt. | <b>345</b>      |
| 50%            | <b>1.28e+07</b> |                 | Mean        | <b>1.35e+07</b> |
|                |                 | Largest         | Std. Dev.   | <b>2514456</b>  |
| 75%            | <b>1.54e+07</b> | <b>1.99e+07</b> |             |                 |
| 90%            | <b>1.71e+07</b> | <b>2.05e+07</b> | Variance    | <b>6.32e+12</b> |
| 95%            | <b>1.84e+07</b> | <b>2.07e+07</b> | Skewness    | <b>.6528621</b> |
| 99%            | <b>1.99e+07</b> | <b>2.09e+07</b> | Kurtosis    | <b>2.942971</b> |



**Figura 55** Diagrama de cajas que muestra la distribución de datos, de la variable costo de una operación, por nodo, en millones de pesos. Creación propia del autor.



**Figura 56** Histograma que muestra la distribución de datos, de la variable costo por nodo. Creación propia del autor.

En principio se puede afirmar que se trata de una distribución ajustada a una distribución normal, muy poco dispersa. Por otra parte, resulta conveniente observar, el comportamiento de esta variable de forma comparativa por nodo, excluyendo al nodo origen. Para este propósito, se utiliza un diagrama de cajas.

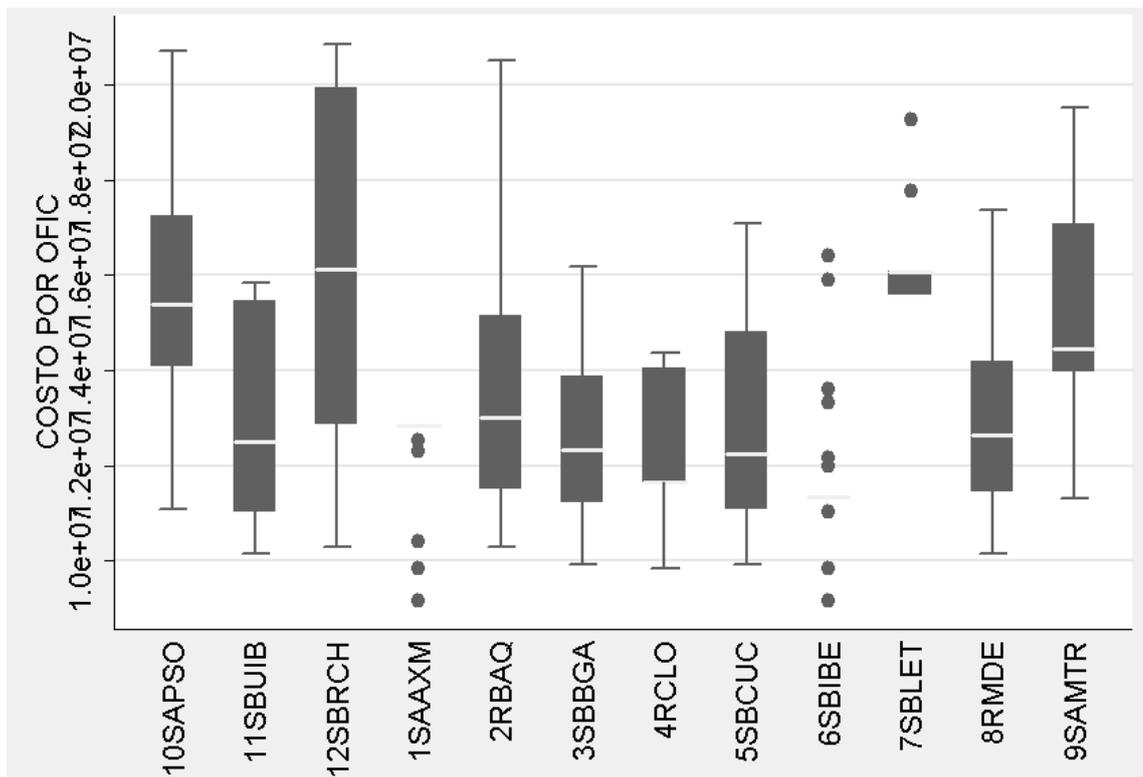
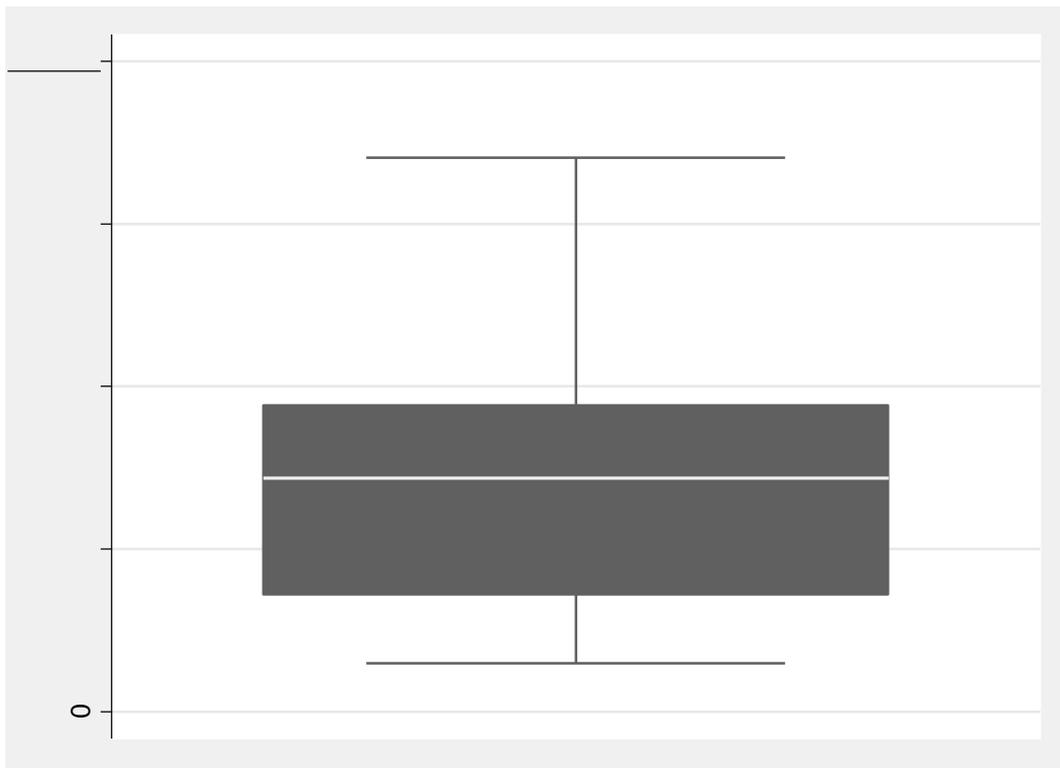


Figura 57 Diagrama de cajas comparativo que muestra las distribuciones de datos, por nodo, de la variable número de pacas transportadas en una operación. Creación propia del autor.

- **Valor total transportado por operación:** Esta variable tiene una relación directa con el riesgo, en efecto, en la medida que representa la dimensión de la exposición al riesgo catastrófico.

**TABLA 34** Valores calculados de los estadísticos descriptivos de la distribución de la variable valores transportados en unidades monetarias transformadas. Creación propia del autor.

|     |                 | valor           |             |  |                 |
|-----|-----------------|-----------------|-------------|--|-----------------|
|     | Percentiles     | Smallest        |             |  |                 |
| 1%  | <b>1.48e+09</b> | <b>1.48e+09</b> |             |  |                 |
| 5%  | <b>2.50e+09</b> | <b>2.03e+09</b> |             |  |                 |
| 10% | <b>2.56e+09</b> | <b>2.50e+09</b> | Obs         |  | <b>53</b>       |
| 25% | <b>3.60e+09</b> | <b>2.50e+09</b> | Sum of Wgt. |  | <b>53</b>       |
| 50% | <b>7.17e+09</b> |                 | Mean        |  | <b>7.04e+09</b> |
|     |                 | Largest         | Std. Dev.   |  | <b>3.88e+09</b> |
| 75% | <b>9.41e+09</b> | <b>1.25e+10</b> |             |  |                 |
| 90% | <b>1.15e+10</b> | <b>1.55e+10</b> | Variance    |  | <b>1.50e+19</b> |
| 95% | <b>1.55e+10</b> | <b>1.62e+10</b> | Skewness    |  | <b>.6031214</b> |
| 99% | <b>1.70e+10</b> | <b>1.70e+10</b> | Kurtosis    |  | <b>2.717545</b> |



**Figura 58** Diagrama de cajas que muestra la distribución de datos, de la variable valor transportado en una operación. Creación propia del autor.

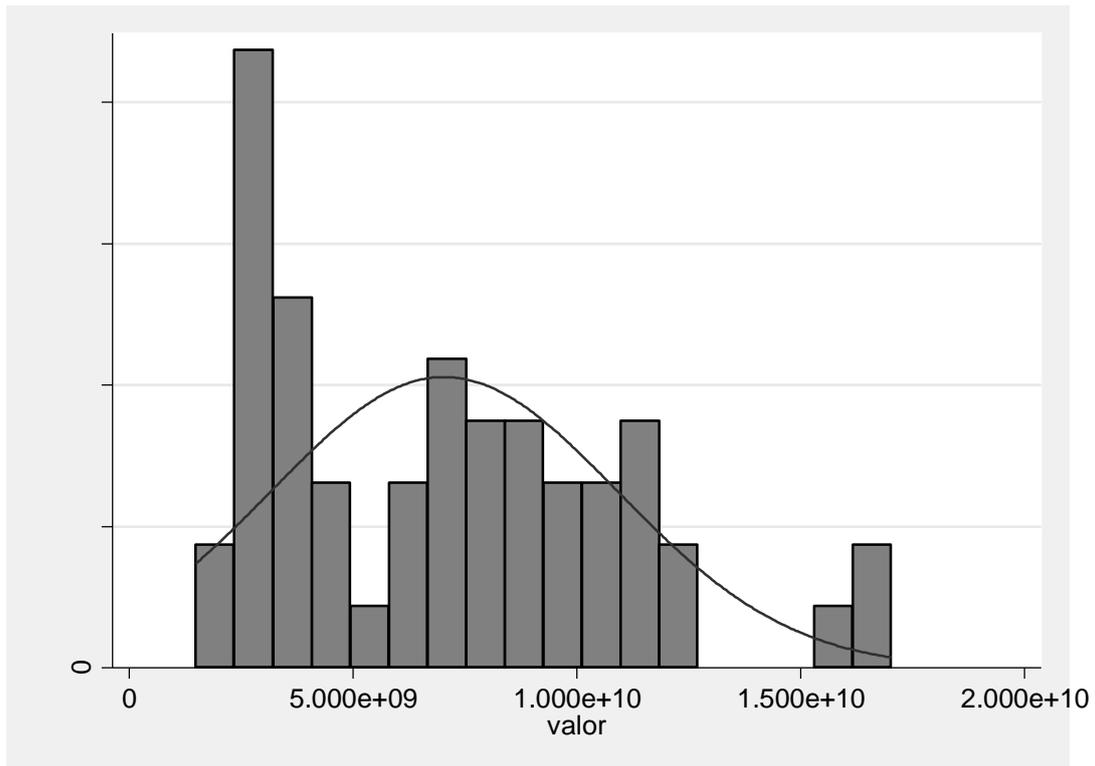


Figura 59 Histograma que muestra la distribución de datos, de la variable valor transportado en una operación. Creación propia del autor.

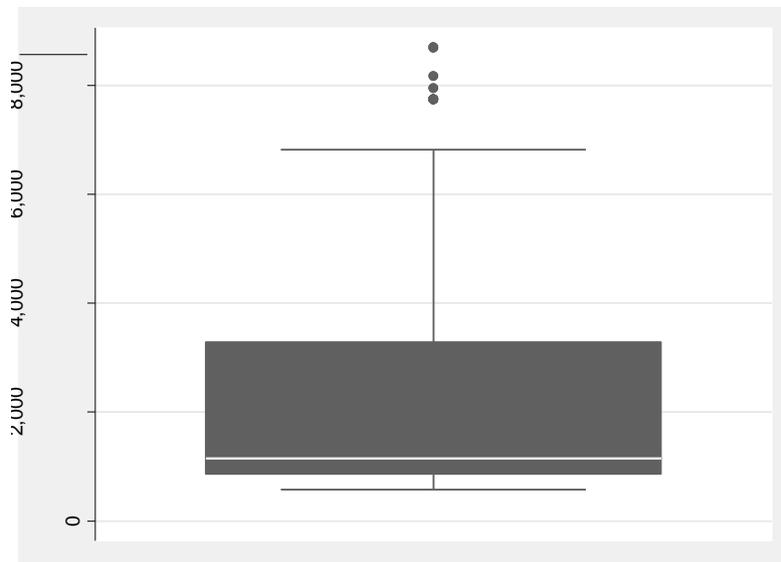
De todas las distribuciones analizadas esta es la que presenta menor dispersión relativa (coeficiente de variación de 0.55) y con una forma mucho más simétrica. Lo anterior, es una observación importante, en la medida que la implementación de un modelo de optimización con consideración al riesgo pretende que los valores transportados, nivel de exposición al riesgo, sea lo menos dispersa, es decir más predecible y por ende controlable.

- *Valor transportado por vehículo:* Como se estableció en el capítulo tercero al momento de caracterizar el sistema, se contemplan tres vehículos: dos aeronaves y un convoy de vehículos terrestres. Claramente, el riesgo está directamente asociado a la cantidad que se transporta en cada vehículo. Por lo anterior, en este aparte, se hace un análisis estadístico descriptivo de la variable monto transportado por vehículos. Los resultados obtenidos para esta variable, generados por la ejecución del modelo, se presentan mediante una tabla con las estadísticas descriptivas básicas. Adicionalmente, se presentan un diagrama de cajas y un histograma. Se debe mencionar que las unidades

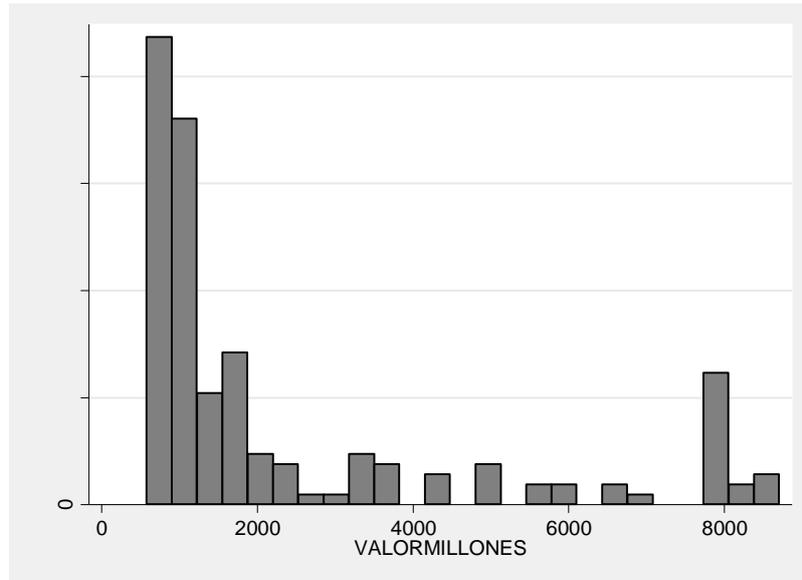
utilizadas para este análisis son millones de unidades monetarias transformadas.

**TABLA 35** Valores calculados de los estadísticos descriptivos de la distribución de la variable valores transportados, por tipo de vehículo, en unidades monetarias transformadas. Creación propia del autor.

| VALORMILLONES |                 |                 |             |                 |
|---------------|-----------------|-----------------|-------------|-----------------|
|               | Percentiles     | Smallest        |             |                 |
| 1%            | <b>573.859</b>  | <b>573.859</b>  |             |                 |
| 5%            | <b>573.9095</b> | <b>573.859</b>  |             |                 |
| 10%           | <b>573.9284</b> | <b>573.8716</b> | Obs         | <b>162</b>      |
| 25%           | <b>861.3382</b> | <b>573.8778</b> | Sum of Wgt. | <b>162</b>      |
| 50%           | <b>1147.767</b> |                 | Mean        | <b>2393.388</b> |
|               |                 | Largest         | Std. Dev.   | <b>2413.932</b> |
| 75%           | <b>3290.057</b> | <b>8173.126</b> |             |                 |
| 90%           | <b>7746.927</b> | <b>8703.33</b>  | Variance    | <b>5827066</b>  |
| 95%           | <b>7749.17</b>  | <b>8703.33</b>  | Skewness    | <b>1.465631</b> |
| 99%           | <b>8703.33</b>  | <b>8703.383</b> | Kurtosis    | <b>3.740294</b> |

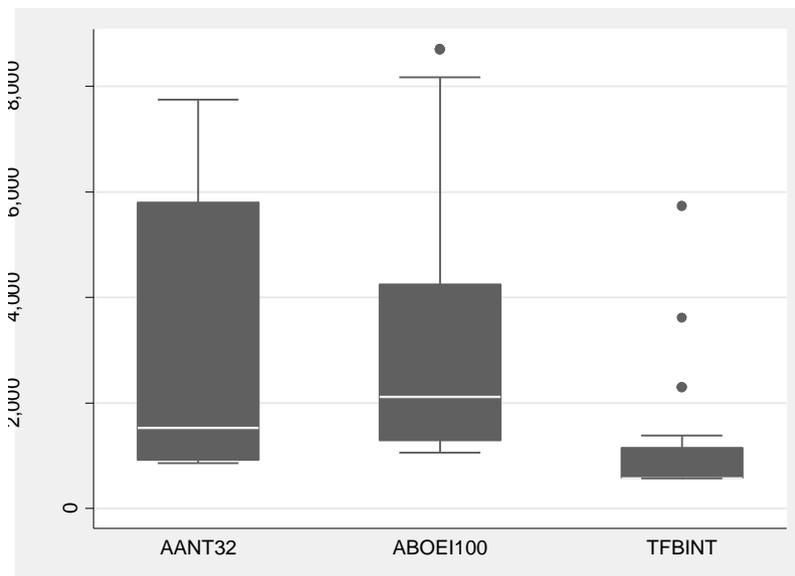


**Figura 60** Diagrama de cajas que muestra la distribución de datos, de la variable valor transportado por vehículo. Creación propia del autor.



**Figura 61** Histograma que muestra la distribución de datos, de la variable valor transportado, por vehículo. Creación propia del autor.

Resulta conveniente observar, el comportamiento de esta variable de forma comparativa por vehículo. Para este propósito, se utiliza un diagrama de cajas.



**Figura 62** Diagrama de cajas comparativo que muestra las distribuciones de datos, por tipo de vehículo, de la variable valor transportado. Creación propia del autor.

Se destaca como el vehículo terrestre transporta en promedio menos valor que los vehículos aéreos. Lo anterior, se puede explicar por el hecho de que con el vehículo terrestre solamente se puede visitar una oficina.

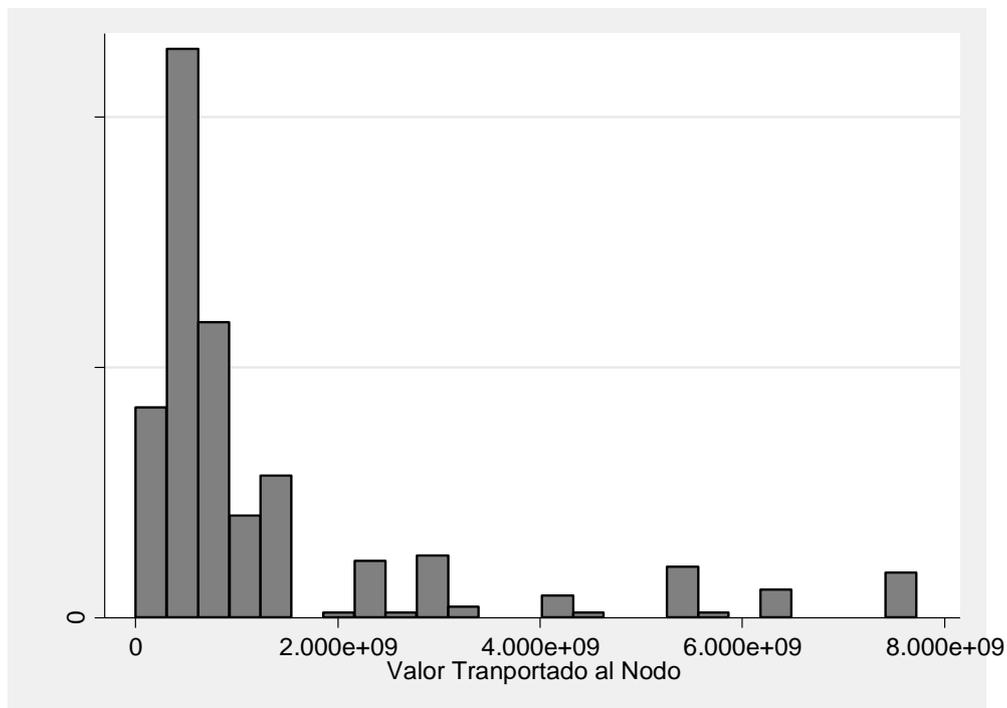
- *Valor total transportado por nodo:* Resulta de trascendental importancia determinar el comportamiento de la variable valores transportados a cada nodo. En efecto, el nivel de exposición al riesgo dependerá, en ultimas, de los valores expuestos en cada etapa de la operación. Como en los casos anteriores, los resultados obtenidos para esta variable, generados por la ejecución del modelo, se presentan mediante una tabla con las estadísticas descriptivas básicas. Adicionalmente, se presentan un diagrama de cajas y un histograma. Se debe mencionar que las unidades utilizadas para este análisis son millones de unidades monetarias transformadas.

**TABLA 36** Valores calculados de los estadísticos descriptivos de la distribución de la variable valores transportados, por nodo, en unidades monetarias transformadas. Creación propia del autor.

| Valor Transportado al Nodo |             |          |             |          |
|----------------------------|-------------|----------|-------------|----------|
|                            | Percentiles | Smallest |             |          |
| 1%                         | 299343.2    | 57270.34 |             |          |
| 5%                         | 1.59e+08    | 239612.9 |             |          |
| 10%                        | 2.23e+08    | 299343.2 | Obs         | 285      |
| 25%                        | 3.25e+08    | 600769.4 | Sum of Wgt. | 285      |
| 50%                        | 6.38e+08    |          | Mean        | 1.31e+09 |
|                            |             | Largest  | Std. Dev.   | 1.74e+09 |
| 75%                        | 1.28e+09    | 7.58e+09 |             |          |
| 90%                        | 3.19e+09    | 7.63e+09 | Variance    | 3.02e+18 |
| 95%                        | 5.52e+09    | 7.72e+09 | Skewness    | 2.282372 |
| 99%                        | 7.63e+09    | 7.73e+09 | Kurtosis    | 7.439337 |



**Figura 63** Diagrama de cajas que muestra la distribución de datos, de la variable valor transportado por nodo. Creación propia del autor.



**Figura 64** Histograma que muestra la distribución de datos, de la variable valor transportado, por nodo. Creación propia del autor.

Observar el comportamiento de esta variable de forma comparativa por nodo aporta información relevante para el análisis del riesgo. Para este propósito, se utiliza un diagrama de cajas.

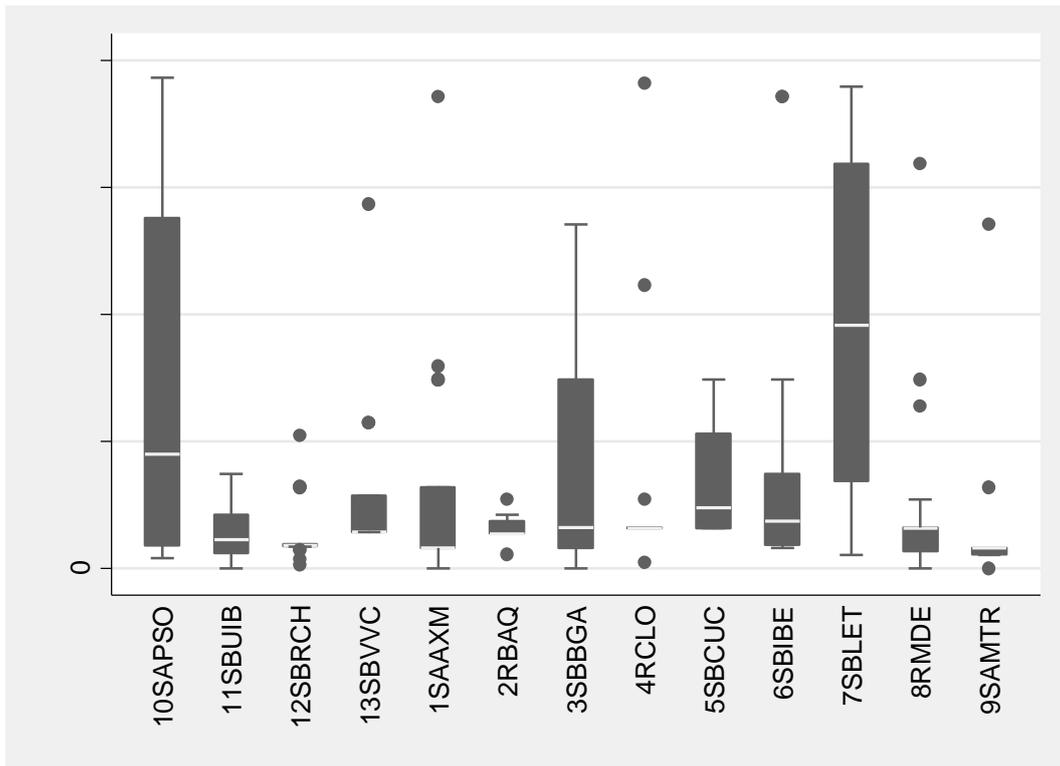
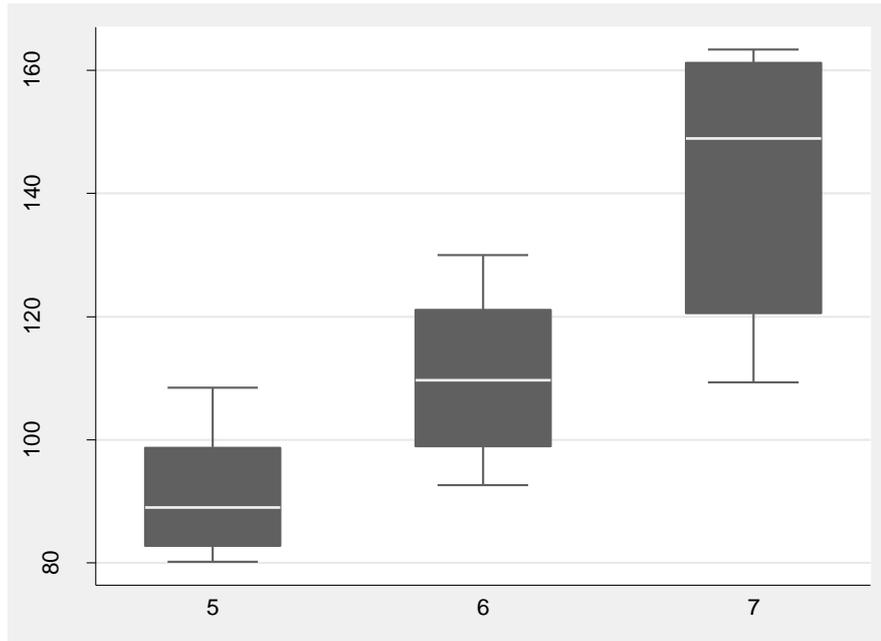


Figura 65 Diagrama de cajas comparativo que muestra las distribuciones de datos, por nodo, de la variable valor transportado. Creación propia del autor.

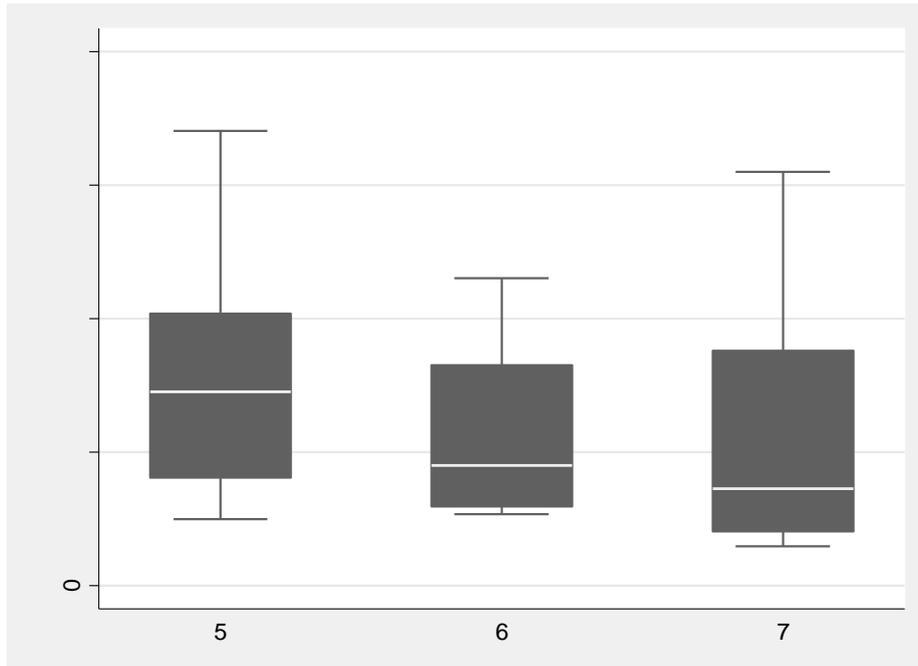
- *Costo de la operación versus número de sucursales visitadas:* Este análisis involucra a las distribuciones obtenidas para dos de las variables de resultados y que en teoría deben correlacionar positivamente, es decir a mayor número de visitas, mayor costo. La siguiente gráfica comparativa de cajas evidencia estos comportamientos conjuntos.



**Figura 66** Diagrama de cajas comparativo que muestra las distribuciones de datos, por número de visitas realizadas, de la variable costo de la operación. Creación propia del autor.

La correlación es evidente a simple vista.

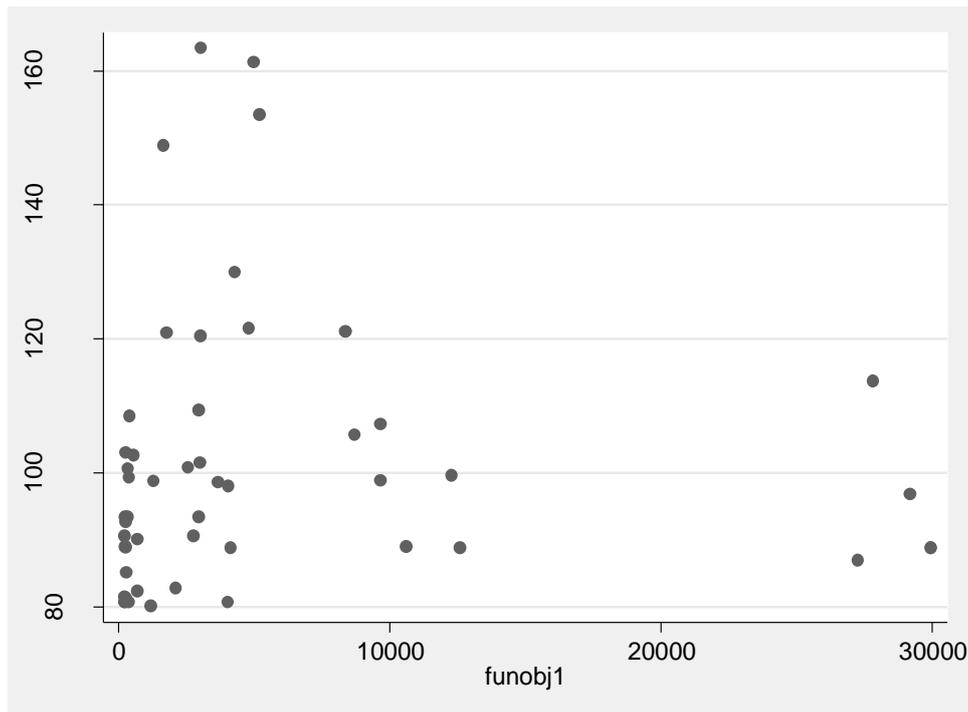
- *Valor transportado versus número de sucursales visitadas:* De forma similar que en el anterior análisis, este involucra a las distribuciones obtenidas para dos de las variables de resultados. La siguiente gráfica comparativa de cajas evidencia estos comportamientos conjuntos.



**Figura 67** Diagrama de cajas comparativo que muestra las distribuciones de datos, por número de visitas realizadas, de la variable valor transportado en una operación. Creación propia del autor.

Claramente, el hecho de que en una operación se visiten más oficinas no implica que se transporten más valores, en términos monetarios.

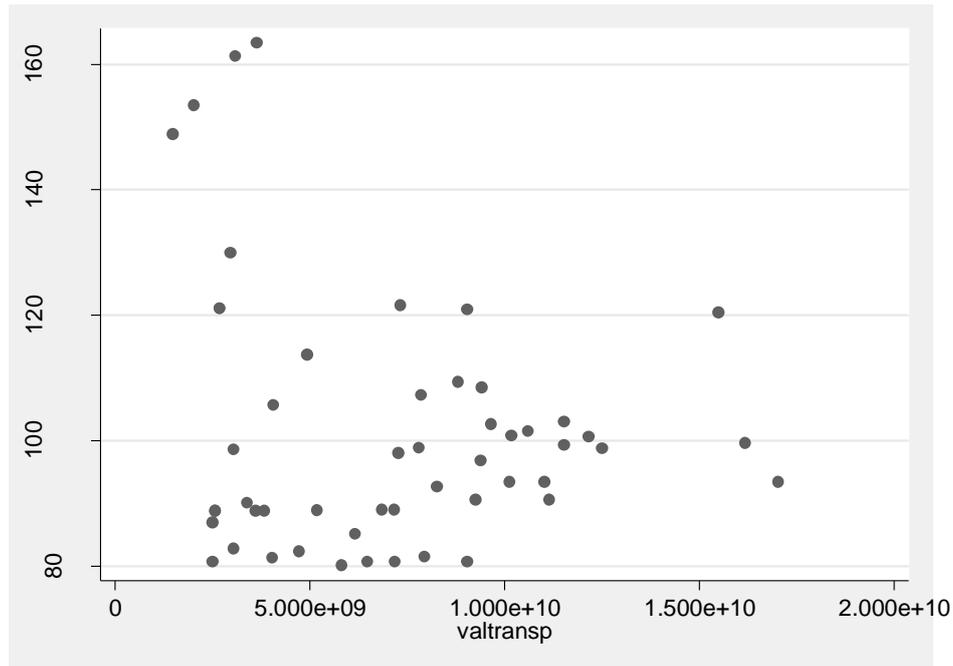
- *Valor de la función objetivo del modelo de ruteo versus el costo de transporte:* Como se recordará de la formulación del primer componente del modelo, es decir el modelo de ruteo, la función objetivo está definida por la sumatoria de dos funciones: una función que calcula el costo de transporte y una función que calcula un costo ficticio de penalización que incorpora una penalización por no visitar una oficina y a su vez pondera este costo por el valor de la demanda relativa dejada de atender.



**Figura 68** Diagrama de dispersión muestra la correlación de las variables costo de la operación y el valor de la función objetivo del modelo de ruteo. Creación propia del autor.

Esta distribución de datos no sigue un patrón determinado. No obstante, se destaca la ausencia de puntos altos simultáneos, es decir, no se encuentran valores altos en la función objetivo acompañados de valores altos en los costos. Lo anterior se puede interpretar como el hecho de que ambos objetivos se contraponen. En efecto, si el modelo intenta visitar el mayor número de sucursales no tendrá tantos costos de penalización, pero si altos costos de transporte y viceversa, si el modelo logra bajo costos de transporte muy probablemente dejó de visitar sucursales con demanda, por lo que debe haber causado altos costos de penalización.

- *Valor total transportado versus el costo de transporte:* Esta es la interacción resultar muy interesante de observar, pues por un lado la distribución del valor transportado se interpreta como el valor expuesto al riesgo catastrófico, mientras que el costo de transporte es la variable que interesa desde el punto de vista de optimización.



**Figura 69** Diagrama de dispersión muestra la correlación de las variables costo de la operación y el valor transportado en una operación. Creación propia del autor.

Claramente para esta distribución de datos no es posible observar un patrón determinado. En teoría el valor transportado, establecido por el modelo de carga no esta determinado directamente por la ruta establecida por el modelo de ruteo. No obstante, al igual que en el análisis precedente, se destaca la ausencia de puntos altos simultáneos, es decir, no se encuentran valores altos en la función objetivo acompañados de valores altos en los costos. Esta circunstancia resulta deseable, pues no resultaría apropiado que el modelo establezca frecuentemente soluciones optimas donde coincidan altos costos de transporte con altos valores expuestos.

- *Valor total transportado versus función objetivo2:* De manera similar a la función objetivo del modelo de optimización, en su primer componente, modelo de ruteo, la función objetivo del modelo de carga esta compuesta por dos componentes: un componente calcula el valor transportado en unidades monetarias transformadas y un segundo componente evita que se carguen denominaciones que no son representativas en su participación respecto de la demanda total.

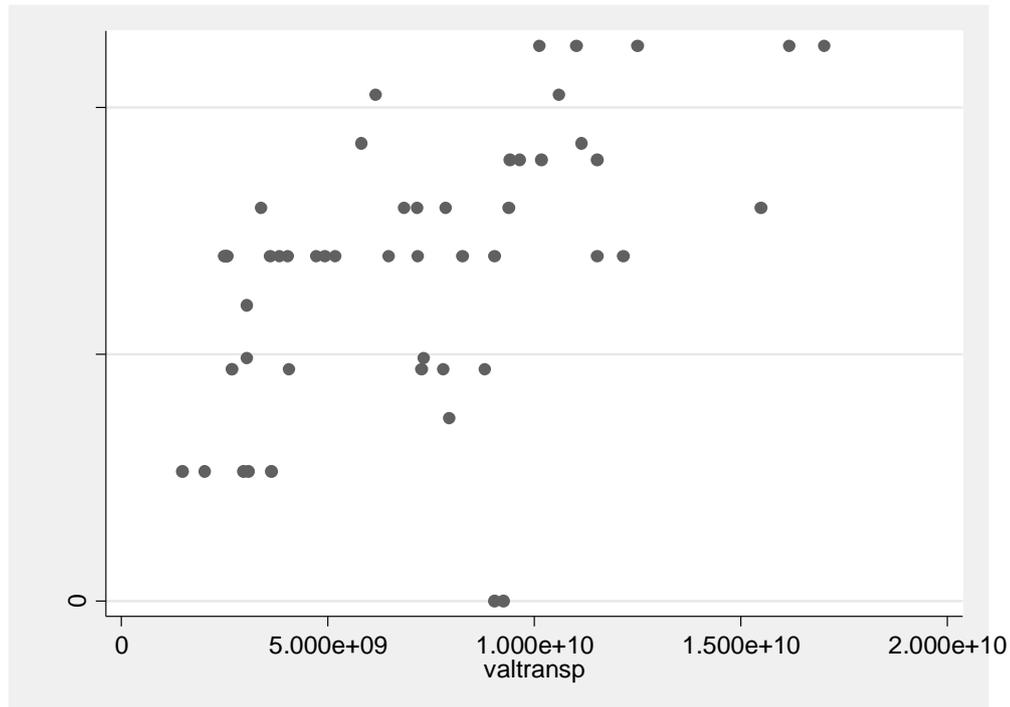


Figura 70 Diagrama de dispersión muestra la correlación de las variables costo de la operación y el valor de la función objetivo del modelo de carga. Creación propia del autor.

En este caso es evidente que existe una correlación positiva, es decir, entre mayor sea el valor transportado mayor será el valor de la función objetivo. La siguiente tabla muestra un reporte de STATA con el valor de la correlación, medida mediante el coeficiente de correlación de Pearson. Se puede corroborar una correlación significativa.

**TABLA 37** Coeficiente de correlación de Pearson para las variables función objetivo el modelo de carga y valor transportado. Creación propia del autor.

|           | funobj2 | valtra-p |
|-----------|---------|----------|
| funobj2   | 1.0000  |          |
| valtransp | 0.5112  | 1.0000   |

- *Valor de la función objetivo1 versus el valor de la función objetivo2:* Finalmente, dentro de los análisis bivariados resulta importante observar como se correlacionan las dos funciones objetivo del modelo de optimización de aplicación inmediata.

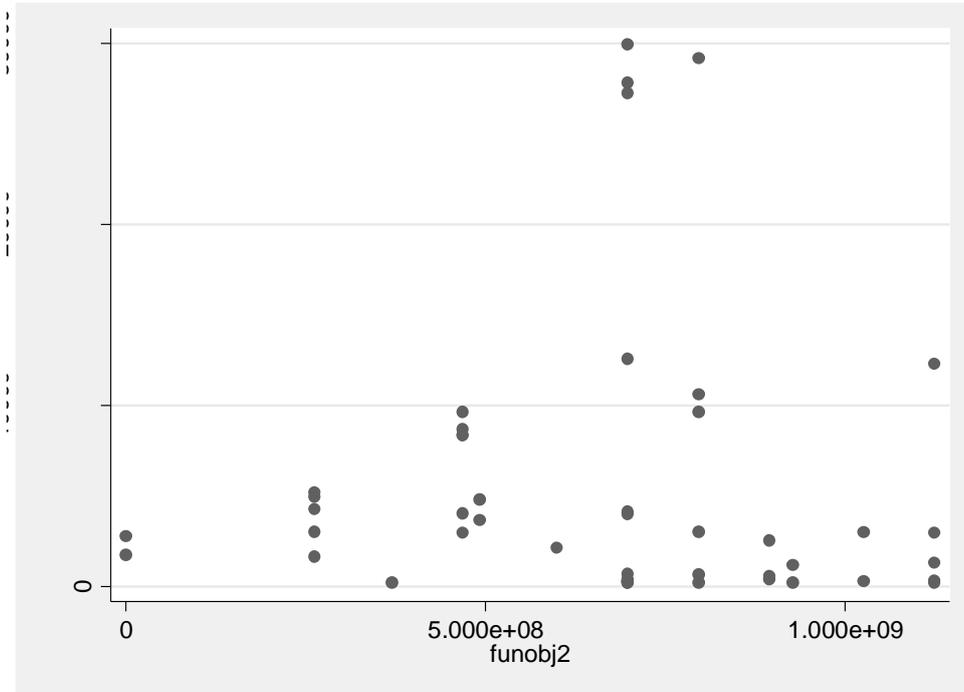


Figura 71 Diagrama de dispersión muestra la correlación de las variables valor de la función objetivo del modelo de ruteo y el valor de la función objetivo del modelo de carga. Creación propia del autor.

Se puede apreciar una leve correlación positiva. No obstante, lo anterior, la siguiente tabla muestra un reporte de STATA con el valor de la correlación, medida mediante el coeficiente de correlación de Pearson, con un resultado no significativo.

TABLA 38 Coeficiente de correlación de Pearson para las variables función objetivo el modelo de ruteo y función objetivo el modelo de carga.

|         | funobj1        | funobj2       |
|---------|----------------|---------------|
| funobj1 | <b>1.0000</b>  |               |
| funobj2 | <b>-0.0159</b> | <b>1.0000</b> |

En los planteamientos fundamentales del modelo es de esperarse que los resultados de las dos funciones objetivos involucradas no correlacionaran, pues obedecen a distintos, y en alguna medida, contradictorios. En efecto, la primer función objetivo busca la reducción de costos, en tanto que la segunda función objetivo busca reducir el valor expuesto en el transporte.

## CAPÍTULO 5

### MODELAMIENTO DEL RIESGO

En el tercer capítulo se caracterizaron los sistemas de distribución y del riesgo inherente. El cuarto capítulo se dedicó a la formulación y ejecución del modelo de optimización, en la versión de ejecución inmediata. En el presente capítulo se procederá con la formulación y de ejecución del modelo que determina el nivel de exposición a los eventos de riesgo definidos en el segundo capítulo.

En efecto, en el numeral 3.2 se presentó la metodología adoptada para el propósito de valorar el riesgo inherente a las operaciones de transporte de valores, adaptada de la propuesta de Castillo Hernández, 2006. De esta forma, partiendo de la red bayesiana graficada para los diferentes medios de transporte en el capítulo tercero y con base a los resultados obtenidos del ejercicio de simulación con el modelo de optimización de aplicación inmediata, se procederá con la implementación del modelo de riesgo, a través de la implementación de la red bayesiana, en una herramienta informática.

Se debe recordar que en el numeral 3.2.3, al construir la estructura de la red, estableciendo relaciones de causalidad entre las variables identificadas, se conformaron dos redes bayesianas, una para cada medio de transporte. De esta forma, en los siguientes apartes se dedica a la implementación de las redes bayesianas en la herramienta Hugin Expert Lite 8.1.

#### **5.1 Implementación de la red bayesiana para modelar el riesgo operativo en operaciones por medio de transporte terrestre.**

La implementación, en la herramienta Hugin Expert, de la red bayesiana, para la operación de transporte terrestre, que de manera esquemática se mostró en la figura 14, inicia con la representación gráfica de los nodos y sus relaciones, de la forma que se muestra en la siguiente gráfica:

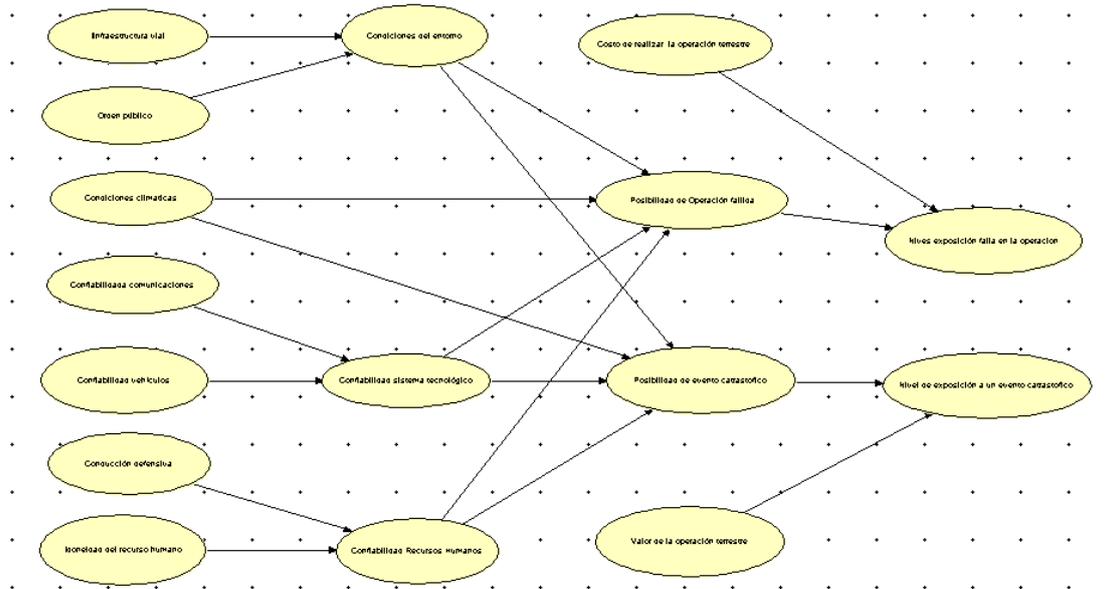


Figura 72 Diagrama elaborado en Hugin Expert de la red bayesiana para modelar el riesgo asociado a una operación de transporte realizada por medio de transporte terrestre.

Cada nodo de la red representa una variable aleatoria que tiene una distribución de datos que puede ser establecida por una instancia de expertos o establecerse de un análisis estadístico previo. En particular algunas de las distribuciones para las variables que conforman la red son obtenidas a partir del juicio de expertos y otras a partir del análisis estadístico de los resultados del ejercicio de simulación del modelo de optimización de aplicación inmediata. De esta forma, seguidamente se enunciará para cada nodo los estados posibles y su distribución esperada.

- **Destino visitado por la ruta terrestre.** Corresponde a primer Oficina que será visitada en la ruta terrestre. Resultado del ejercicio de simulación con el modelo de optimización se pudo establecer que la única ruta terrestre posible es a la ciudad de Villavicencio.
- **Condiciones del entorno.** Corresponde al estado de las condiciones del entorno. Se determinaron dos estados para esta variable: inadecuadas y adecuadas. El resultado de esta variable está condicionado por las variables infraestructura vial y orden público. Las distribuciones condicionales, para esta variable, son las que se muestran en la siguiente tabla:

**TABLA 39** Distribución de la variable condiciones del entorno dadas las distribuciones de las variables orden público e infraestructura.

|         |             | ORDEN PUBLICO |         |       | PACIFICO |         |       | ALTERADO |         |       | VIOLENTO |         |       |
|---------|-------------|---------------|---------|-------|----------|---------|-------|----------|---------|-------|----------|---------|-------|
|         |             | MALA          | REGULAR | BUENA | MALA     | REGULAR | BUENA | MALA     | REGULAR | BUENA | MALA     | REGULAR | BUENA |
| ENTORNO | INADECUADAS | 0.3           | 0.2     | 0.0   | 0.4      | 0.3     | 0.2   | 0.8      | 0.6     | 0.5   |          |         |       |
|         | ADECUADAS   | 0.7           | 0.8     | 1.0   | 0.6      | 0.7     | 0.8   | 0.2      | 0.4     | 0.5   |          |         |       |

- **Condiciones climáticas.** La siguiente tabla muestra las condiciones esperadas, según opinión de los expertos, para dos estados posibles: favorables o desfavorables:

**TABLA 40** Distribución de la variable condiciones climáticas.

|                        |               |     |
|------------------------|---------------|-----|
| CONDICIONES CLIMATICAS | FAVORABLES    | 0.4 |
|                        | DESFAVORABLES | 0.6 |

- **Confiabilidad tecnológica.** Corresponde al nivel de la confiabilidad en el sistema tecnológico, condicionado este, por los estados de los siguientes factores: la confiabilidad en las comunicaciones y la confiabilidad en los vehículos. Para esta variable se ha establecido tres posibles estados: Las distribuciones condicionales, para esta variable, son las que se muestran en la siguiente tabla:

**TABLA 41** Distribución de la variable confiabilidad tecnológica dadas las distribuciones de las variables confiabilidad de las comunicaciones y confiabilidad de los vehículos.

|                           |       | CONFIABILIDAD COMUNICACIONES |     |     | BAJA |       |      | MEDIA |       |      | ALTA |       |      |
|---------------------------|-------|------------------------------|-----|-----|------|-------|------|-------|-------|------|------|-------|------|
|                           |       | CONFIABILIDAD VEHÍCULOS      |     |     | BAJA | MEDIA | ALTA | BAJA  | MEDIA | ALTA | BAJA | MEDIA | ALTA |
| CONFIABILIDAD TECNOLÓGICA | BAJA  | 0.8                          | 0.7 | 0.6 | 0.3  | 0.1   | 0.3  | 0.1   | 0.0   | 0.0  |      |       |      |
|                           | MEDIA | 0.2                          | 0.3 | 0.3 | 0.4  | 0.8   | 0.4  | 0.3   | 0.3   | 0.2  |      |       |      |
|                           | ALTA  | 0.0                          | 0.0 | 0.1 | 0.3  | 0.1   | 0.3  | 0.6   | 0.7   | 0.8  |      |       |      |

- Confiabilidad en el recurso humano.** Se determinaron tres estados para esta variable: Baja, media y alta. El resultado de esta variable está condicionado por las variables idoneidad del recurso humano y nivel de conducción defensiva. Las distribuciones condicionales, para esta variable, son las que se muestran en la siguiente tabla:

**TABLA 42** Distribución de la variable confiabilidad en el recurso humano dadas las distribuciones de las variables idoneidad del recurso humano y nivel de conducción defensiva.

|                                    |       | IDONEIDAD DEL RECURSO HUMANO |     | COMPETENTE |         | INCOMPETENTE |         |
|------------------------------------|-------|------------------------------|-----|------------|---------|--------------|---------|
|                                    |       | CONDUCCIÓN DEFENSIVA         |     | PRESENTE   | AUSENTE | PRESENTE     | AUSENTE |
| CONFIABILIDAD EN EL RECURSO HUMANO | BAJA  | 0.0                          | 0.2 | 0.3        | 0.9     |              |         |
|                                    | MEDIA | 0.1                          | 0.5 | 0.5        | 0.1     |              |         |
|                                    | ALTA  | 0.9                          | 0.3 | 0.2        | 0.0     |              |         |

- Posibilidad de realización del evento de una operación fallida.** Este nodo resultado establece la posibilidad de una operación fallida dados los precedentes de confiabilidad en el recurso humano, confiabilidad en el sistema tecnológico, condiciones climáticas, condiciones del entorno. Seguidamente se muestran las tablas de las probabilidades condicionales para cada nivel del factor humano.

**TABLA 43** Distribución de la variable posibilidad de realización del evento de una operación fallida, en una operación terrestre, dadas las distribuciones de las variables que la condicionan (confiabilidad en el recurso humano, confiabilidad en el sistema tecnológico, condiciones climáticas y condiciones del entorno).

|                   | CONFIABILIDAD EN EL RECURSO HUMANO      | BAJA        |          |               |          |             |          |               |          |             |          |               |          |
|-------------------|---|-------------|----------|---------------|----------|-------------|----------|---------------|----------|-------------|----------|---------------|----------|
|                   |   | BAJA        |          |               |          | MEDIA       |          |               |          | ALTA        |          |               |          |
|                   | CONFIABILIDAD EN EL SISTEMA TECNOLÓGICO | FAVORABLES  |          | DESFAVORABLES |          | FAVORABLES  |          | DESFAVORABLES |          | FAVORABLES  |          | DESFAVORABLES |          |
|                   | CONDICIONES CLIMATICAS                  | INADECUADAS | AECUADAS | INADECUADAS   | AECUADAS | INADECUADAS | AECUADAS | INADECUADAS   | AECUADAS | INADECUADAS | AECUADAS | INADECUADAS   | AECUADAS |
|                   | CONDICIONES DEL ENTORNO                 | INADECUADAS | AECUADAS | INADECUADAS   | AECUADAS | INADECUADAS | AECUADAS | INADECUADAS   | AECUADAS | INADECUADAS | AECUADAS | INADECUADAS   | AECUADAS |
| OPERACIÓN FALLIDA | BAJA                                    | 0.0         | 0.2      | 0.0           | 0.0      | 0.1         | 0.3      | 0.0           | 0.1      | 0.2         | 0.4      | 0.1           | 0.2      |
|                   | MEDIA                                   | 0.2         | 0.6      | 0.0           | 0.2      | 0.3         | 0.7      | 0.2           | 0.3      | 0.4         | 0.6      | 0.3           | 0.4      |
|                   | ALTA                                    | 0.8         | 0.2      | 1.0           | 0.8      | 0.6         | 0.0      | 0.8           | 0.6      | 0.4         | 0.0      | 0.6           | 0.4      |

|                   | CONFIABILIDAD EN EL RECURSO HUMANO      | MEDIA       |          |               |          |             |          |               |          |             |          |               |          |
|-------------------|---|-------------|----------|---------------|----------|-------------|----------|---------------|----------|-------------|----------|---------------|----------|
|                   |   | BAJA        |          |               |          | MEDIA       |          |               |          | ALTA        |          |               |          |
|                   | CONFIABILIDAD EN EL SISTEMA TECNOLÓGICO | FAVORABLES  |          | DESFAVORABLES |          | FAVORABLES  |          | DESFAVORABLES |          | FAVORABLES  |          | DESFAVORABLES |          |
|                   | CONDICIONES CLIMATICAS                  | INADECUADAS | AECUADAS | INADECUADAS   | AECUADAS | INADECUADAS | AECUADAS | INADECUADAS   | AECUADAS | INADECUADAS | AECUADAS | INADECUADAS   | AECUADAS |
|                   | CONDICIONES DEL ENTORNO                 | INADECUADAS | AECUADAS | INADECUADAS   | AECUADAS | INADECUADAS | AECUADAS | INADECUADAS   | AECUADAS | INADECUADAS | AECUADAS | INADECUADAS   | AECUADAS |
| OPERACIÓN FALLIDA | BAJA                                    | 0.1         | 0.3      | 0.1           | 0.1      | 0.2         | 0.4      | 0.1           | 0.2      | 0.3         | 0.5      | 0.2           | 0.3      |
|                   | MEDIA                                   | 0.3         | 0.7      | 0.2           | 0.3      | 0.4         | 0.6      | 0.3           | 0.4      | 0.5         | 0.5      | 0.4           | 0.5      |
|                   | ALTA                                    | 0.6         | 0.0      | 0.7           | 0.6      | 0.4         | 0.0      | 0.6           | 0.4      | 0.2         | 0.0      | 0.4           | 0.2      |

|                   | CONFIABILIDAD EN EL RECURSO HUMANO      | ALTA        |          |               |          |             |          |               |          |             |          |               |          |
|-------------------|---|-------------|----------|---------------|----------|-------------|----------|---------------|----------|-------------|----------|---------------|----------|
|                   |   | BAJA        |          |               |          | MEDIA       |          |               |          | ALTA        |          |               |          |
|                   | CONFIABILIDAD EN EL SISTEMA TECNOLÓGICO | FAVORABLES  |          | DESFAVORABLES |          | FAVORABLES  |          | DESFAVORABLES |          | FAVORABLES  |          | DESFAVORABLES |          |
|                   | CONDICIONES CLIMATICAS                  | INADECUADAS | AECUADAS | INADECUADAS   | AECUADAS | INADECUADAS | AECUADAS | INADECUADAS   | AECUADAS | INADECUADAS | AECUADAS | INADECUADAS   | AECUADAS |
|                   | CONDICIONES DEL ENTORNO                 | INADECUADAS | AECUADAS | INADECUADAS   | AECUADAS | INADECUADAS | AECUADAS | INADECUADAS   | AECUADAS | INADECUADAS | AECUADAS | INADECUADAS   | AECUADAS |
| OPERACIÓN FALLIDA | BAJA                                    | 0.3         | 0.5      | 0.3           | 0.3      | 0.4         | 0.6      | 0.3           | 0.4      | 6.0         | 1.0      | 0.4           | 0.6      |
|                   | MEDIA                                   | 0.4         | 0.5      | 0.3           | 0.4      | 0.5         | 0.4      | 0.4           | 0.5      | 0.4         | 0.0      | 0.5           | 0.4      |
|                   | ALTA                                    | 0.3         | 0.0      | 0.4           | 0.3      | 0.1         | 0.0      | 0.3           | 0.1      | 0.0         | 0.0      | 0.1           | 0.0      |

- Posibilidad de realización de un evento catastrófico.** Este nodo resultado establece la posibilidad de un evento catastrófico dados los precedentes de confiabilidad en el recurso humano, confiabilidad en el sistema tecnológico, condiciones climáticas, condiciones del entorno. Seguidamente se muestran las tablas de las probabilidades condicionales para cada nivel del factor humano.

**TABLA 44** Distribución de la variable posibilidad de realización del evento catastrófico, en una operación terrestre, dadas las distribuciones de las variables que la condicionan (confiabilidad en el recurso humano, confiabilidad en el sistema tecnológico, condiciones climáticas y condiciones del entorno).

| CONFIABILIDAD EN EL RECURSO HUMANO      |       | BAJA        |           |               |           |             |           |               |           |             |           |               |           |
|---|-------|-------------|-----------|---------------|-----------|-------------|-----------|---------------|-----------|-------------|-----------|---------------|-----------|
| CONFIABILIDAD EN EL SISTEMA TECNOLÓGICO |       | BAJA        |           |               |           | MEDIA       |           |               |           | ALTA        |           |               |           |
| CONDICIONES CLIMÁTICAS                  |       | FAVORABLES  |           | DESFAVORABLES |           | FAVORABLES  |           | DESFAVORABLES |           | FAVORABLES  |           | DESFAVORABLES |           |
| CONDICIONES DEL ENTORNO                 |       | INADECUADAS | ADECUADAS | INADECUADAS   | ADECUADAS | INADECUADAS | ADECUADAS | INADECUADAS   | ADECUADAS | INADECUADAS | ADECUADAS | INADECUADAS   | ADECUADAS |
| EVENTO CATRASTOFICO                     | BAJA  | 0.3         | 0.6       | 0.2           | 0.3       | 0.4         | 0.6       | 0.3           | 0.4       | 0.6         | 0.7       | 0.4           | 0.6       |
|   | MEDIA | 0.5         | 0.4       | 0.3           | 0.4       | 0.5         | 0.4       | 0.4           | 0.5       | 0.4         | 0.3       | 0.5           | 0.4       |
|   | ALTA  | 0.2         | 0.0       | 0.5           | 0.3       | 0.1         | 0.0       | 0.3           | 0.1       | 0.0         | 0.0       | 0.1           | 0.0       |

| CONFIABILIDAD EN EL RECURSO HUMANO      |       | MEDIA       |           |               |           |             |           |               |           |             |           |               |           |
|---|-------|-------------|-----------|---------------|-----------|-------------|-----------|---------------|-----------|-------------|-----------|---------------|-----------|
| CONFIABILIDAD EN EL SISTEMA TECNOLÓGICO |       | BAJA        |           |               |           | MEDIA       |           |               |           | ALTA        |           |               |           |
| CONDICIONES CLIMÁTICAS                  |       | FAVORABLES  |           | DESFAVORABLES |           | FAVORABLES  |           | DESFAVORABLES |           | FAVORABLES  |           | DESFAVORABLES |           |
| CONDICIONES DEL ENTORNO                 |       | INADECUADAS | ADECUADAS | INADECUADAS   | ADECUADAS | INADECUADAS | ADECUADAS | INADECUADAS   | ADECUADAS | INADECUADAS | ADECUADAS | INADECUADAS   | ADECUADAS |
| EVENTO CATRASTOFICO                     | BAJA  | 0.7         | 0.7       | 0.5           | 0.6       | 0.7         | 0.7       | 0.6           | 0.6       | 0.7         | 0.8       | 0.7           | 0.7       |
|   | MEDIA | 0.3         | 0.3       | 0.4           | 0.4       | 0.3         | 0.3       | 0.4           | 0.4       | 0.3         | 0.2       | 0.3           | 0.3       |
|   | ALTA  | 0.0         | 0.0       | 0.1           | 0.0       | 0.0         | 0.0       | 0.0           | 0.0       | 0.0         | 0.0       | 0.0           | 0.0       |

| CONFIABILIDAD EN EL RECURSO HUMANO      |       | ALTA        |           |               |           |             |           |               |           |             |           |               |           |
|---|-------|-------------|-----------|---------------|-----------|-------------|-----------|---------------|-----------|-------------|-----------|---------------|-----------|
| CONFIABILIDAD EN EL SISTEMA TECNOLÓGICO |       | BAJA        |           |               |           | MEDIA       |           |               |           | ALTA        |           |               |           |
| CONDICIONES CLIMÁTICAS                  |       | FAVORABLES  |           | DESFAVORABLES |           | FAVORABLES  |           | DESFAVORABLES |           | FAVORABLES  |           | DESFAVORABLES |           |
| CONDICIONES DEL ENTORNO                 |       | INADECUADAS | ADECUADAS | INADECUADAS   | ADECUADAS | INADECUADAS | ADECUADAS | INADECUADAS   | ADECUADAS | INADECUADAS | ADECUADAS | INADECUADAS   | ADECUADAS |
| EVENTO CATRASTOFICO                     | BAJA  | 0.7         | 0.8       | 0.7           | 0.8       | 0.8         | 0.9       | 0.9           | 0.8       | 0.9         | 1.0       | 0.8           | 0.9       |
|   | MEDIA | 0.3         | 0.2       | 0.3           | 0.2       | 0.2         | 0.1       | 0.3           | 0.2       | 0.1         | 0.0       | 0.2           | 0.1       |
|   | ALTA  | 0.0         | 0.0       | 0.0           | 0.0       | 0.0         | 0.0       | 0.0           | 0.0       | 0.0         | 0.0       | 0.0           | 0.0       |

- Costo:** Este nodo está determinado por el modelo de optimización y establece el nivel del costo en el que se incurre al realizar la operación terrestre. Se pudo constatar que este costo estará en el nivel bajo en todos los casos en que se

realice una operación terrestre. En efecto, la siguiente tabla muestra la categorización realizada para esta variable, para este medio de transporte.

**TABLA 45** Distribución de la variable costo de realizar una operación terrestre.

| Nivel | Posición en la distribución | Distribución observada |
|-------|-----------------------------|------------------------|
| Bajo  | Inferior al Q1              | 100                    |
| Medio | Entre el Q1 y el Q3         | 0.0                    |
| Alto  | Superior al Q3              | 0.0                    |

- **Monto transportado:** Este nodo está determinado por el modelo de optimización y establece el monto en unidades monetarias transformadas a transportar en la operación. Partiendo de las estadísticas descriptivas del capítulo cuarto, se establece la siguiente categorización para esta variable y la frecuencia esperada acorde con la distribución observada, resultado del ejercicio de simulación:

**TABLA 46** Distribución de la variable monto transportado en una operación terrestre.

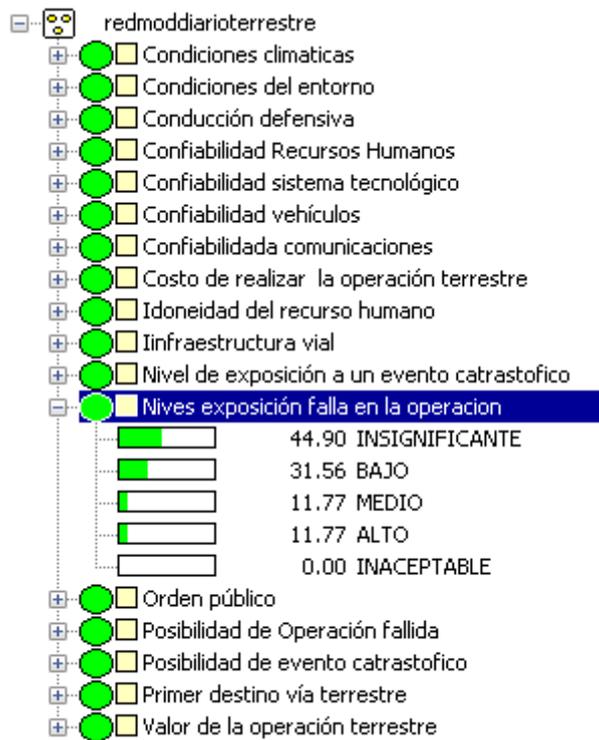
| Nivel | Posición en la distribución | Distribución observada |
|-------|-----------------------------|------------------------|
| Bajo  | Inferior al Q1              | 0.67                   |
| Medio | Entre el Q1 y el Q3         | 0.29                   |
| Alto  | Superior al Q3              | 0.04                   |

## 5.2 Ejecución del modelo de riesgo para el medio de transporte terrestre

Habiendo construido la red bayesiana que modela el riesgo de una operación de transporte respecto de los eventos operación fallida y evento catastrófico, y habiendo validado la consistencia del modelo, se procede, con la ayuda de un paquete computacional, en este caso HUGIN, a obtener los niveles de riesgo esperados para cada evento.

### 5.2.1 Nivel de exposición al riesgo de una operación fallida.

Los resultados obtenidos para el nivel de exposición al riesgo de una operación fallida, son los que se observan en el siguiente diagrama de probabilidad:

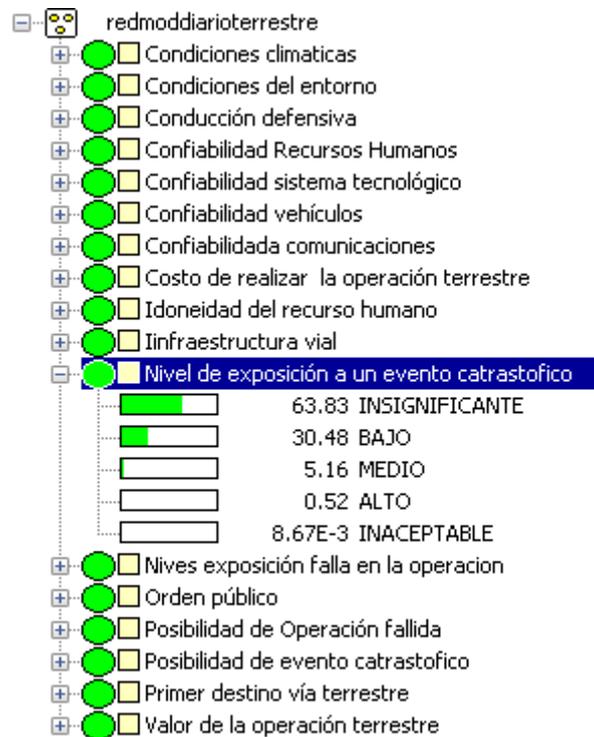


**Figura 73** Diagrama con el reporte del resultado del nivel de exposición al riesgo de una operación fallida, elaborado en Hugin Expert, asociado a una operación de transporte realizada por medio de transporte terrestre.

De acuerdo con los resultados obtenidos se pueda afirmar que el Banco se encuentra en un nivel insignificante con una probabilidad de 44.9 %, mientras que esta en nivel bajo con una probabilidad de 31.56 %, en el nivel medio y alto se encuentra con una probabilidad de 11.7%, respectivamente. No se registra valor de probabilidad para el nivel inaceptable.

### 5.2.2 Nivel de exposición al riesgo de un evento catastrófico.

Los resultados obtenidos para el nivel de exposición al riesgo de ocurrencia de un evento catastrófico, son los que se observan en el siguiente diagrama de probabilidad:



**Figura 74** Diagrama con el reporte del resultado del nivel de exposición al riesgo de un evento catastrófico, elaborado en Hugin Expert, asociado a una operación de transporte realizada por medio de transporte terrestre.

Para este evento de riesgo operativo se pueda afirmar que el Banco se encuentra en un nivel insignificante con una probabilidad de 63.83 %, mientras que esta en nivel bajo con una probabilidad de 30.48 %, en el nivel medio se registra una probabilidad de 5.17% y en el nivel alto se encuentra con una probabilidad de 0.52%, respectivamente. En el nivel inaceptable el riesgo es cero.

### 5.3 Implementación de la red bayesiana para modelar el riesgo operativo en operaciones por medio de transporte aéreo

En capítulo tercero se esquematizó la red bayesiana que modela el riesgo operativo asociado a una operación de transporte de valores aéreo, como en efecto se ilustró en la figura 15. Se

debe hacer mención que por limitaciones propias del aplicativo Hugin Expert fue necesario elaborar un modelo para cada evento riesgo.

### 5.3.1 Red bayesiana para modelar el riesgo operativo de falla en operaciones por medio de transporte aéreo.

La siguiente grafica muestra la red bayesiana establecida para determinar el nivel de riesgo de falla.

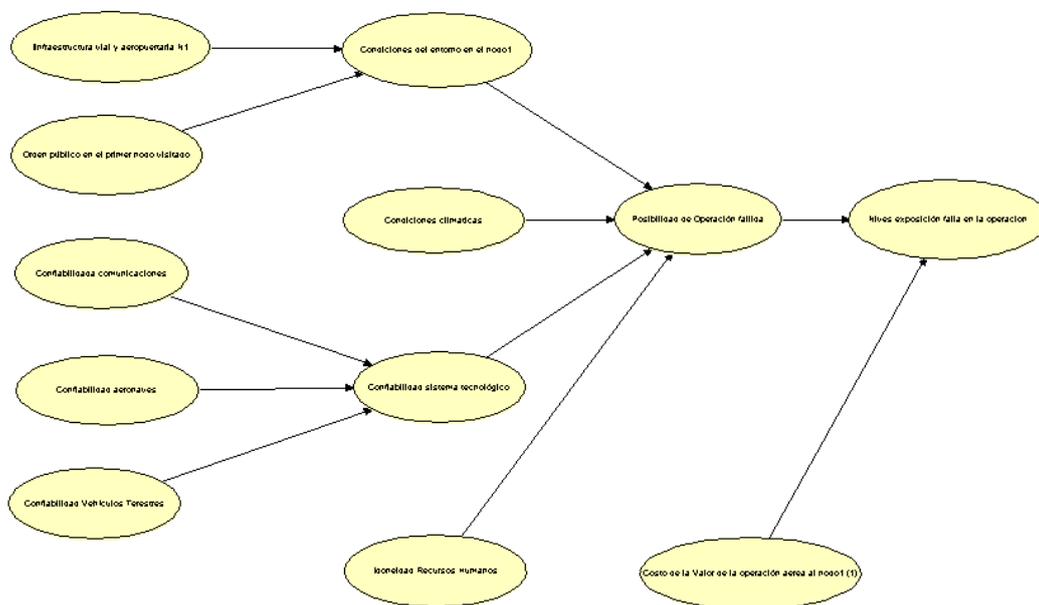


Figura 75 Diagrama elaborado en Hugin Expert de la red bayesiana para modelar el riesgo de falla asociado a una operación de transporte realizada por vía aérea.

De igual forma que en el caso de las operaciones terrestres, para el caso de las operaciones aéreas, cada nodo de la red representa una variable aleatoria que tiene una distribución de datos que puede ser establecida por una instancia de expertos o establecerse de un análisis estadístico previo. En particular algunas de las distribuciones para las variables que conforman la red son obtenidas a partir del juicio de expertos y otras a partir del análisis estadístico de los resultados del ejercicio de simulación del modelo de optimización de aplicación inmediata. De esta forma, seguidamente se enunciará para cada nodo los estados posibles y su distribución esperada.

- **Nodo visitado.** Corresponde a la Oficina que será visitada en la ruta optima establecida por el sistema de optimización. Resultado del ejercicio de simulación con el modelo de optimización se pudo establecer la siguiente distribución de frecuencias.

**TABLA 47** Distribución de la variable nodo visitado en una operación aérea.

| NOMBRE   | COD     | %     |
|----------|---------|-------|
| ARMENIA  | 1SAAXM  | 13,2% |
| BARRANQ  | 2RBAQ   | 6,9%  |
| BUCARAM  | 3SBBGA  | 4,4%  |
| CALI     | 4RCLO   | 6,2%  |
| CUCUTA   | 5SBCUC  | 2,8%  |
| IBAGUE   | 6SBIBE  | 14,5% |
| LETICIA  | 7SBLET  | 5,6%  |
| MEDELLIN | 8RMDE   | 12,5% |
| MONTERIA | 9SAMTR  | 3,4%  |
| PASTO    | 10SAPSO | 10,8% |
| QUIBDO   | 11SBUIB | 11,0% |
| RIOHACHA | 12SBRCH | 8,7%  |

- **Infraestructura vial.** Corresponde al estado de las vías que son utilizadas en los trayectos desde las oficinas a los aeropuertos. Las distribuciones condicionales, para esta variable, son las que se muestran en la siguiente tabla:

**TABLA 48** Distribución de la variable estado de la infraestructura vial

| NOMBRE   | COD     | Mala | Regular | Buena |
|----------|---------|------|---------|-------|
| ARMENIA  | 1SAAXM  | 10%  | 30%     | 60%   |
| BARRANQ  | 2RBAQ   | 10%  | 30%     | 60%   |
| BUCARAM  | 3SBBGA  | 10%  | 30%     | 60%   |
| CALI     | 4RCLO   | 10%  | 40%     | 50%   |
| CUCUTA   | 5SBCUC  | 10%  | 40%     | 50%   |
| IBAGUE   | 6SBIBE  | 10%  | 40%     | 50%   |
| LETICIA  | 7SBLET  | 20%  | 30%     | 40%   |
| MEDELLIN | 8RMDE   | 20%  | 30%     | 50%   |
| MONTERIA | 9SAMTR  | 10%  | 40%     | 50%   |
| PASTO    | 10SAPSO | 50%  | 30%     | 20%   |

Rafael Iván Bermúdez Acosta

|                 |         |     |     |     |
|-----------------|---------|-----|-----|-----|
| <b>QUIBDO</b>   | 11SBUIB | 60% | 30% | 10% |
| <b>RIOHACHA</b> | 12SBRCH | 50% | 30% | 20% |

- **Orden público.** Corresponde al estado del orden público y que se relaciona directamente con la presencia de grupos armados ilegales, bandas criminales o manifestaciones de inconformidad de la población civil. Las distribuciones condicionales, para esta variable, son las que se muestran en la siguiente tabla:

**TABLA 49** Distribución de la variable estado del Orden Público

| <b>NOMBRE</b>   | <b>COD</b> | <b>Pacifico</b> | <b>Alterado</b> | <b>Violento</b> |
|-----------------|------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| <b>ARMENIA</b>  | 1SAAXM     | 70%             | 30%             | 0%              |
| <b>BARRANQ</b>  | 2RBAQ      | 60%             | 30%             | 10%             |
| <b>BUCARAM</b>  | 3SBBGA     | 60%             | 30%             | 10%             |
| <b>CALI</b>     | 4RCLO      | 60%             | 30%             | 10%             |
| <b>CUCUTA</b>   | 5SBCUC     | 50%             | 30%             | 20%             |
| <b>IBAGUE</b>   | 6SBIBE     | 60%             | 30%             | 10%             |
| <b>LETICIA</b>  | 7SBLET     | 70%             | 30%             | 0%              |
| <b>MEDELLIN</b> | 8RMDE      | 60%             | 30%             | 10%             |
| <b>MONTERIA</b> | 9SAMTR     | 60%             | 30%             | 10%             |
| <b>PASTO</b>    | 10SAPSO    | 60%             | 30%             | 10%             |
| <b>QUIBDO</b>   | 11SBUIB    | 30%             | 40%             | 30%             |
| <b>RIOHACHA</b> | 12SBRCH    | 30%             | 50%             | 20%             |

- **Condiciones del entorno.** Corresponde al estado de las condiciones del entorno. Se determinaron dos estados para esta variable: inadecuadas y adecuadas. El resultado de esta variable está condicionado por las variables infraestructura vial y orden público. Las distribuciones condicionales, para esta variable, son las que se muestran en la siguiente tabla:

**TABLA 50** Distribución de la variable condiciones del entorno dadas las distribuciones de las variables estado de la infraestructura vial y estado del orden público.

|         |             | ORDEN PUBLICO   |         |       | PACIFICO |         |       | ALTERADO |         |       | VIOLENTO |  |  |
|---------|-------------|-----------------|---------|-------|----------|---------|-------|----------|---------|-------|----------|--|--|
|         |             | INFRAESTRUCTURA |         |       |          |         |       |          |         |       |          |  |  |
|         |             | MALA            | REGULAR | BUENA | MALA     | REGULAR | BUENA | MALA     | REGULAR | BUENA |          |  |  |
| ENTORNO | INADECUADAS | 0.3             | 0.2     | 0.0   | 0.4      | 0.3     | 0.2   | 0.8      | 0.6     | 0.5   |          |  |  |
|         | ADECUADAS   | 0.7             | 0.8     | 1.0   | 0.6      | 0.7     | 0.8   | 0.2      | 0.4     | 0.5   |          |  |  |

- **Condiciones climáticas.** La siguiente tabla muestra las condiciones esperadas, para cada oficina, según opinión de los expertos, para dos estados posibles: favorables o desfavorables:

**TABLA 51** Distribución de la variable condiciones climáticas.

| NOMBRE   | COD     | Favorables | Desfavorables |
|----------|---------|------------|---------------|
| ARMENIA  | 1SAAXM  | 70%        | 30%           |
| BARRANQ  | 2RBAQ   | 60%        | 40%           |
| BUCARAM  | 3SBBGA  | 70%        | 30%           |
| CALI     | 4RCLO   | 70%        | 30%           |
| CUCUTA   | 5SBCUC  | 70%        | 30%           |
| IBAGUE   | 6SBIBE  | 60%        | 40%           |
| LETICIA  | 7SBLET  | 50%        | 50%           |
| MEDELLIN | 8RMDE   | 70%        | 30%           |
| MONTERIA | 9SAMTR  | 70%        | 30%           |
| PASTO    | 10SAPSO | 40%        | 60%           |
| QUIBDO   | 11SBUIB | 30%        | 70%           |
| RIOHACHA | 12SBRCH | 50%        | 50%           |

- **Confiabilidad en las comunicaciones.** En las operaciones de valores la confiabilidad en las comunicaciones resulta fundamental para garantizar adecuados niveles de seguridad y eficiencia. La siguiente tabla muestra las condiciones esperadas, para cada oficina, según opinión de los expertos, para dos estados posibles de esta variable: Baja, media o alta:

**TABLA 52** Distribución de la variable confiabilidad en las comunicaciones.

| NOMBRE   | COD     | Baja | Media | Alta |
|----------|---------|------|-------|------|
| ARMENIA  | 1SAAXM  | 10%  | 30%   | 60%  |
| BARRANQ  | 2RBAQ   | 0%   | 30%   | 70%  |
| BUCARAM  | 3SBBGA  | 10%  | 30%   | 60%  |
| CALI     | 4RCLO   | 0%   | 30%   | 70%  |
| CENTRAL  | 5SBCUC  | 10%  | 30%   | 60%  |
| IBAGUE   | 6SBIBE  | 20%  | 30%   | 50%  |
| LETICIA  | 7SBLET  | 30%  | 50%   | 20%  |
| MEDELLIN | 8RMDE   | 0%   | 30%   | 70%  |
| MONTERIA | 9SAMTR  | 10%  | 30%   | 60%  |
| PASTO    | 10SAPSO | 30%  | 50%   | 20%  |
| QUIBDO   | 11SBUIB | 40%  | 40%   | 20%  |
| RIOHACHA | 12SBRCH | 30%  | 50%   | 20%  |

- **Confiabilidad en la operación aérea.** Para este caso, dependiendo de la sucursal se podrá contar con determinado tipo de vehículos, así como con una infraestructura aeroportuaria que, de manera conjugada, pueden propiciar confiabilidad tecnológica. La siguiente tabla muestra las condiciones esperadas, para cada oficina, según opinión de los expertos, para dos estados posibles de esta variable: Baja, media o alta:

**TABLA 53** Distribución de la variable confiabilidad en la operación aérea.

| NOMBRE   | COD     | Baja | Media | Alta |
|----------|---------|------|-------|------|
| ARMENIA  | 1SAAXM  | 10%  | 30%   | 60%  |
| BARRANQ  | 2RBAQ   | 0%   | 30%   | 70%  |
| BUCARAM  | 3SBBGA  | 10%  | 30%   | 60%  |
| CALI     | 4RCLO   | 0%   | 30%   | 70%  |
| CENTRAL  | 5SBCUC  | 10%  | 30%   | 60%  |
| IBAGUE   | 6SBIBE  | 20%  | 30%   | 50%  |
| LETICIA  | 7SBLET  | 30%  | 50%   | 20%  |
| MEDELLIN | 8RMDE   | 0%   | 30%   | 70%  |
| MONTERIA | 9SAMTR  | 10%  | 30%   | 60%  |
| PASTO    | 10SAPSO | 30%  | 50%   | 20%  |
| QUIBDO   | 11SBUIB | 40%  | 40%   | 20%  |

|                 |         |     |     |     |
|-----------------|---------|-----|-----|-----|
| <b>RIOHACHA</b> | 12SBRCH | 30% | 50% | 20% |
|-----------------|---------|-----|-----|-----|

- **Confiabilidad en los vehículos terrestres.** Si bien es cierto, en las operaciones aéreas el trayecto terrestre, del aeropuerto a la oficina destino, es usualmente corto y seguro, se deben considerar los furgones blindados pues, dependiendo de su condición de confiabilidad, pueden incrementar el nivel de riesgo para que una operación resulte fallida o catastrófica. La siguiente tabla muestra las condiciones esperadas, para cada oficina, según opinión de los expertos, para dos estados posibles de esta variable: Baja, media o alta:

**TABLA 54** Distribución de la variable confiabilidad en los vehículos terrestres.

| <b>NOMBRE</b>   | <b>COD</b> | <b>Baja</b> | <b>Media</b> | <b>Alta</b> |
|-----------------|------------|-------------|--------------|-------------|
| <b>ARMENIA</b>  | 1SAAXM     | 10%         | 30%          | 60%         |
| <b>BARRANQ</b>  | 2RBAQ      | 10%         | 20%          | 70%         |
| <b>BUCARAM</b>  | 3SBBGA     | 10%         | 30%          | 60%         |
| <b>CALI</b>     | 4RCLO      | 10%         | 20%          | 70%         |
| <b>CENTRAL</b>  | 5SBCUC     | 10%         | 30%          | 60%         |
| <b>IBAGUE</b>   | 6SBIBE     | 10%         | 30%          | 60%         |
| <b>LETICIA</b>  | 7SBLET     | 30%         | 40%          | 30%         |
| <b>MEDELLIN</b> | 8RMDE      | 10%         | 20%          | 70%         |
| <b>MONTERIA</b> | 9SAMTR     | 10%         | 30%          | 60%         |
| <b>PASTO</b>    | 10SAPSO    | 20%         | 30%          | 50%         |
| <b>QUIBDO</b>   | 11SBUIB    | 30%         | 40%          | 30%         |
| <b>RIOHACHA</b> | 12SBRCH    | 20%         | 30%          | 50%         |

- **Confiabilidad tecnológica.** Corresponde al nivel de la confiabilidad en el sistema tecnológico, condicionado este, por los estados de los siguientes factores: la confiabilidad en las comunicaciones, la confiabilidad en la operación aérea y las condiciones de los vehículos. Para esta variable se ha establecido tres posibles estados: Las distribuciones condicionales, para esta variable, son las que se muestran en la siguiente tabla:

**TABLA 55** Distribución de la variable confiabilidad tecnológica dadas las distribuciones de las variables confiabilidad en los vehículos terrestres, en las operaciones aéreas y en las comunicaciones.

|  | CONFIABILIDAD EN LOS VEHICULOS TERRESTRES | BAJA |       |      |       |       |      |      |       |      |
|--|---|------|-------|------|-------|-------|------|------|-------|------|
|  | CONFIABILIDAD EN LAS OPERACIONES AEREAS   | BAJA |       |      | MEDIA |       |      | ALTA |       |      |
|  | CONFIABILIDAD EN LAS COMUNICACIONES       | BAJA | MEDIA | ALTA | BAJA  | MEDIA | ALTA | BAJA | MEDIA | ALTA |
| CONFIABILIDAD EN EL SISTEMA TECNOLÓGICO COMUNICACIONES | BAJA                                      | 100% | 80%   | 70%  | 80%   | 40%   | 30%  | 70%  | 30%   | 20%  |
|  | MEDIA                                     | 0%   | 20%   | 20%  | 20%   | 60%   | 40%  | 20%  | 40%   | 30%  |
|  | ALTA                                      | 0%   | 0%    | 10%  | 0%    | 0%    | 30%  | 10%  | 30%   | 50%  |

|  | CONFIABILIDAD EN LOS VEHICULOS TERRESTRES | MEDIA |       |      |       |       |      |      |       |      |
|--|---|-------|-------|------|-------|-------|------|------|-------|------|
|  | CONFIABILIDAD EN LAS OPERACIONES AEREAS   | BAJA  |       |      | MEDIA |       |      | ALTA |       |      |
|  | CONFIABILIDAD EN LAS COMUNICACIONES       | BAJA  | MEDIA | ALTA | BAJA  | MEDIA | ALTA | BAJA | MEDIA | ALTA |
| CONFIABILIDAD EN EL SISTEMA TECNOLÓGICO COMUNICACIONES | BAJA                                      | 80%   | 40%   | 30%  | 40%   | 0%    | 0%   | 30%  | 0%    | 0%   |
|  | MEDIA                                     | 20%   | 60%   | 40%  | 60%   | 100%  | 70%  | 40%  | 70%   | 30%  |
|  | ALTA                                      | 0%    | 0%    | 30%  | 0%    | 0%    | 30%  | 30%  | 30%   | 70%  |

|  | CONFIABILIDAD EN LOS VEHICULOS TERRESTRES | ALTA |       |      |       |       |      |      |       |      |
|--|---|------|-------|------|-------|-------|------|------|-------|------|
|  | CONFIABILIDAD EN LAS OPERACIONES AEREAS   | BAJA |       |      | MEDIA |       |      | ALTA |       |      |
|  | CONFIABILIDAD EN LAS COMUNICACIONES       | BAJA | MEDIA | ALTA | BAJA  | MEDIA | ALTA | BAJA | MEDIA | ALTA |
| CONFIABILIDAD EN EL SISTEMA TECNOLÓGICO COMUNICACIONES | BAJA                                      | 60%  | 30%   | 10%  | 30%   | 0%    | 0%   | 10%  | 0%    | 0%   |
|  | MEDIA                                     | 40%  | 40%   | 30%  | 40%   | 70%   | 30%  | 30%  | 30%   | 0%   |
|  | ALTA                                      | 0%   | 30%   | 60%  | 30%   | 30%   | 70%  | 60%  | 70%   | 100% |

- Confiabilidad en el recurso humano.** Se determinaron tres estados para esta variable: Baja, media y alta. El resultado de esta variable está condicionado por las variables idoneidad del recurso humano. Las distribuciones para esta variable, para cada sucursal son las que se muestran en la siguiente tabla:

**TABLA 56** Distribución de la variable confiabilidad en el recurso humano.

| NOMBRE   | COD     | COMPETENTE | INCOMPETENTE |
|----------|---------|------------|--------------|
| ARMENIA  | 1SAAXM  | 80%        | 20%          |
| BARRANQ  | 2RBAQ   | 90%        | 10%          |
| BUCARAM  | 3SBBGA  | 90%        | 10%          |
| CALI     | 4RCLO   | 90%        | 10%          |
| CENTRAL  | 5SBCUC  | 90%        | 10%          |
| IBAGUE   | 6SBIBE  | 80%        | 20%          |
| LETICIA  | 7SBLET  | 70%        | 30%          |
| MEDELLIN | 8RMDE   | 90%        | 10%          |
| MONTERIA | 9SAMTR  | 90%        | 10%          |
| PASTO    | 10SAPSO | 80%        | 20%          |
| QUIBDO   | 11SBUIB | 50%        | 50%          |
| RIOHACHA | 12SBRCH | 50%        | 50%          |

- Posibilidad de realización del evento de una operación fallida.** Este nodo resultado establece la posibilidad de una operación fallida dados los precedentes de confiabilidad en el recurso humano, confiabilidad en el sistema tecnológico, condiciones climáticas y condiciones del entorno. Seguidamente se muestran las tablas de las probabilidades condicionales para cada nivel del factor humano.

**TABLA 57** Distribución de la variable posibilidad de realización del evento operación fallida, en una operación aérea, dadas las distribuciones de las variables que la condicionan (confiabilidad en el recurso humano, confiabilidad en el sistema tecnológico, condiciones climáticas y condiciones del entorno).

|                       | IDONEIDAD DEL RECURSO HUMANO            | COMPETENTE  |               |            |               |             |               |            |               |             |               |            |               |
|-----------------------|---|-------------|---------------|------------|---------------|-------------|---------------|------------|---------------|-------------|---------------|------------|---------------|
|                       | CONFIABILIDAD EN EL SISTEMA TECNOLÓGICO | BAJA        |               |            |               | MEDIA       |               |            |               | ALTA        |               |            |               |
|                       | CONDICIONES DEL ENTORNO                 | INADECUADAS |               | ADECUADAS  |               | INADECUADAS |               | ADECUADAS  |               | INADECUADAS |               | ADECUADAS  |               |
|                       | CONDICIONES CLIMATICAS                  | FAVORABLES  | DESFAVORABLES | FAVORABLES | DESFAVORABLES | FAVORABLES  | DESFAVORABLES | FAVORABLES | DESFAVORABLES | FAVORABLES  | DESFAVORABLES | FAVORABLES | DESFAVORABLES |
| PROBABILIDAD DE FALLA | BAJA                                    | 40%         | 40%           | 40%        | 40%           | 50%         | 10%           | 70%        | 60%           | 60%         | 30%           | 100%       | 60%           |
|                       | MEDIA                                   | 60%         | 40%           | 40%        | 60%           | 30%         | 50%           | 30%        | 30%           | 30%         | 50%           | 0%         | 30%           |
|                       | ALTA                                    | 0%          | 20%           | 20%        | 0%            | 20%         | 40%           | 0%         | 10%           | 10%         | 20%           | 0%         | 10%           |

|                       | IDONEIDAD DEL RECURSO HUMANO            | INCOMPETENTE |               |            |               |             |               |            |               |             |               |            |               |
|-----------------------|---|--------------|---------------|------------|---------------|-------------|---------------|------------|---------------|-------------|---------------|------------|---------------|
|                       | CONFIABILIDAD EN EL SISTEMA TECNOLÓGICO | BAJA         |               |            |               | MEDIA       |               |            |               | ALTA        |               |            |               |
|                       | CONDICIONES DEL ENTORNO                 | INADECUADAS  |               | ADECUADAS  |               | INADECUADAS |               | ADECUADAS  |               | INADECUADAS |               | ADECUADAS  |               |
|                       | CONDICIONES CLIMATICAS                  | FAVORABLES   | DESFAVORABLES | FAVORABLES | DESFAVORABLES | FAVORABLES  | DESFAVORABLES | FAVORABLES | DESFAVORABLES | FAVORABLES  | DESFAVORABLES | FAVORABLES | DESFAVORABLES |
| PROBABILIDAD DE FALLA | BAJA                                    | 30%          | 0%            | 30%        | 10%           | 40%         | 0%            | 40%        | 40%           | 20%         | 30%           | 40%        | 20%           |
|                       | MEDIA                                   | 30%          | 0%            | 50%        | 30%           | 30%         | 30%           | 50%        | 30%           | 60%         | 40%           | 20%        | 60%           |
|                       | ALTA                                    | 40%          | 100%          | 20%        | 60%           | 30%         | 70%           | 10%        | 30%           | 20%         | 30%           | 20%        | 20%           |

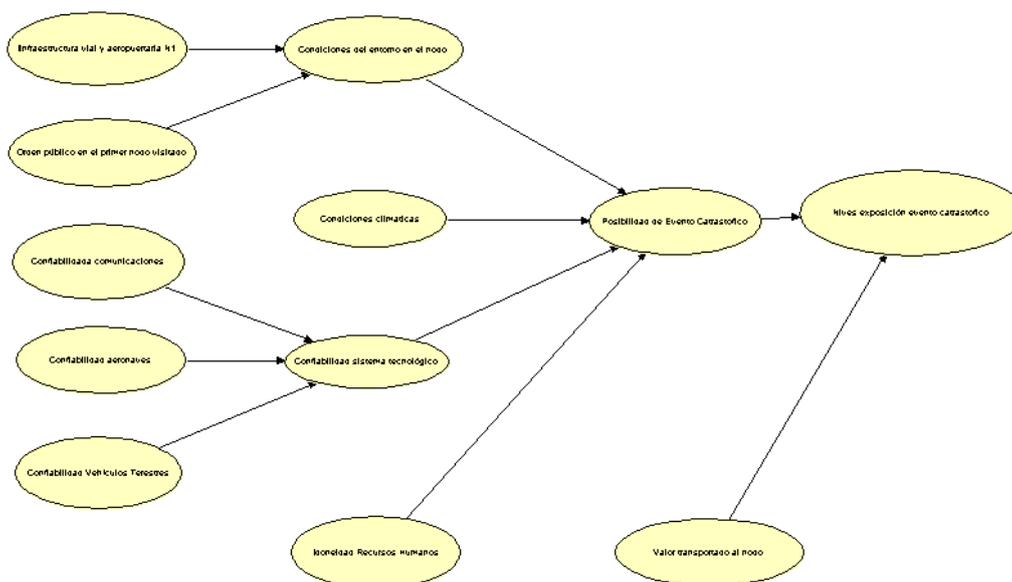
- Costo:** Este nodo está determinado por el modelo de optimización y establece el nivel del costo en el que se incurre al realizar la operación aérea a cada nodo. La distribución de esta variable es determinada por el ejercicio de simulación con el modelo de optimización. En efecto, la siguiente tabla muestra la categorización realizada para esta variable, para cada nodo.

**TABLA 58** Distribución de la variable costo de visitar un nodo en una operación aérea.

| NOMBRE   | COD     | Bajo | Promedio | Alto |
|----------|---------|------|----------|------|
| ARMENIA  | 1SAAXM  | 23%  | 55%      | 22%  |
| BARRANQ  | 2RBAQ   | 32%  | 37%      | 32%  |
| BUCARAM  | 3SBBGA  | 45%  | 35%      | 19%  |
| CALI     | 4RCLO   | 35%  | 43%      | 22%  |
| CENTRAL  | 5SBCUC  | 67%  | 33%      | 0%   |
| IBAGUE   | 6SBIBE  | 18%  | 47%      | 35%  |
| LETICIA  | 7SBLET  | 48%  | 22%      | 48%  |
| MEDELLIN | 8RMDE   | 10%  | 55%      | 34%  |
| MONTERIA | 9SAMTR  | 33%  | 67%      | 0%   |
| PASTO    | 10SAPSO | 36%  | 45%      | 18%  |
| QUIBDO   | 11SBUIB | 25%  | 46%      | 29%  |
| RIOHACHA | 12SBRCH | 24%  | 54%      | 22%  |

### 5.3.2 Red bayesiana para modelar el riesgo operativo de un evento catastrófico en operaciones por medio de transporte aéreo.

La siguiente grafica muestra la red bayesiana establecida para determinar el nivel de riesgo de un evento catastrófico en una operación aérea.





- **Valor transportado:** Este nodo está determinado por el modelo de optimización y establece el monto en unidades monetarias transformadas que se transportan a un nodo. La siguiente tabla muestra las frecuencias observadas para cada nodo.

**TABLA 60** Distribución de la variable valor transportado a un nodo en una operación aérea.

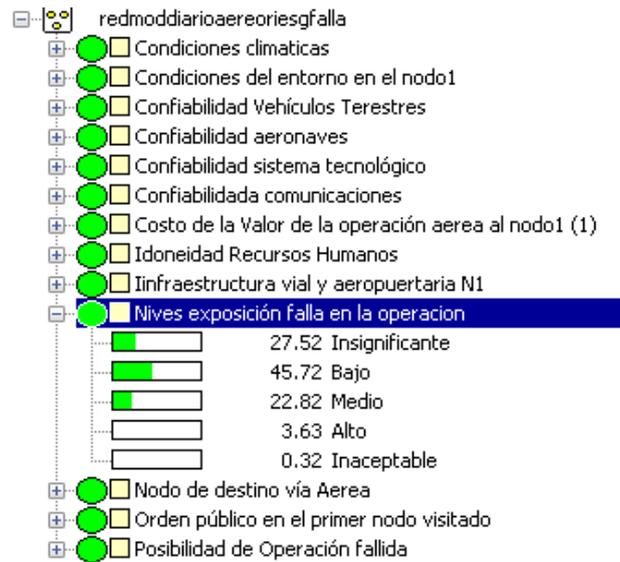
| NOMBRE   | COD     | Bajo | Promedio | Alto |
|----------|---------|------|----------|------|
| ARMENIA  | 1SAAXM  | 66%  | 20%      | 14%  |
| BARRANQ  | 2RBAQ   | 6%   | 94%      | 0%   |
| BUCARAM  | 3SBBGA  | 31%  | 23%      | 46%  |
| CALI     | 4RCLO   | 8%   | 77%      | 15%  |
| CENTRAL  | 5SBCUC  | 0%   | 75%      | 25%  |
| IBAGUE   | 6SBIBE  | 25%  | 42%      | 33%  |
| LETICIA  | 7SBLET  | 21%  | 0%       | 79%  |
| MEDELLIN | 8RMDE   | 29%  | 61%      | 11%  |
| MONTERIA | 9SAMTR  | 67%  | 22%      | 11%  |
| PASTO    | 10SAPSO | 23%  | 15%      | 62%  |
| QUIBDO   | 11SBUIB | 30%  | 65%      | 4%   |
| RIOHACHA | 12SBRCH | 19%  | 67%      | 14%  |

## 5.4 Ejecución del modelo de riesgo para el medio de transporte aéreo

Habiendo construido la red bayesiana que modela el riesgo de una operación de transporte respecto de los eventos operación fallida y evento catastrófico, y habiendo validado la consistencia del modelo, se procede, con la ayuda de un paquete computacional, en este caso HUGIN, a obtener los niveles de riesgo esperados para cada evento.

### 5.4.1 Nivel de exposición al riesgo de una operación fallida.

Los resultados obtenidos para el nivel de exposición al riesgo de una operación fallida, son los que se observan en el siguiente diagrama de probabilidad:



**Figura 77** Diagrama con el reporte del resultado del nivel de exposición al riesgo de una falla en la operación, elaborado en Hugin Expert, asociado a una operación de transporte realizada por medio de transporte aéreo.

De acuerdo con los resultados obtenidos se pueda afirmar que el Banco se encuentra en un nivel insignificante con una probabilidad de 27.52 %, mientras que en el nivel bajo se registra una probabilidad de 45.72 %, por otra parte, en el nivel medio se observa una probabilidad de 22.82%, por otra parte, en el nivel alto se observa una probabilidad 3.63% y, finalmente, en el nivel inaceptable se registra un valor de probabilidad de apenas el 0,32%.

#### 5.4.2 Nivel de exposición al riesgo de un evento catastrófico.

Los resultados obtenidos para el nivel de exposición al riesgo de ocurrencia de un evento catastrófico, son los que se observan en el siguiente diagrama de probabilidad:

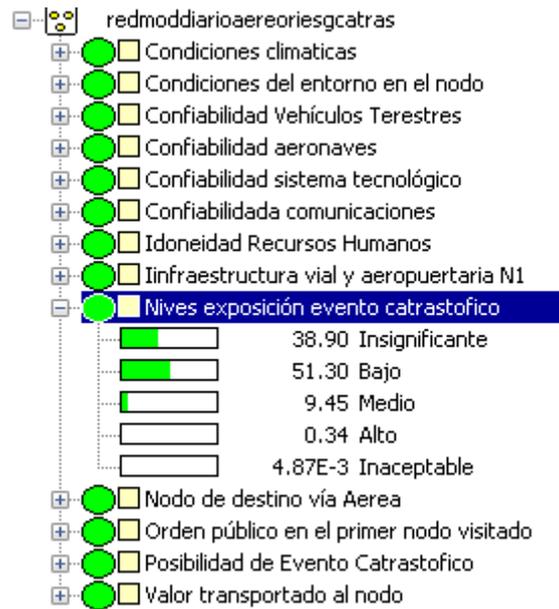


Figura 78 Diagrama con el reporte del resultado del nivel de exposición al riesgo de un evento catastrófico, elaborado en Hugin Expert, asociado a una operación de transporte realizada por medio de transporte aéreo.

Para este evento de riesgo operativo se pueda afirmar que el Banco se encuentra en un nivel insignificante con una probabilidad de 38.90 %, en el nivel bajo se registra una probabilidad de 51.30 %, por su parte, en el nivel medio se calculó una probabilidad de 9.45% y en el nivel alto se encuentra con una probabilidad de 0.34%, respectivamente. En el nivel inaceptable el nivel de riesgo de un evento catastrófico es cero.

### 5.4.3 Perfiles de riesgo por nodo.

Como quiera que, a diferencia de las operaciones terrestres, en el caso de las operaciones aéreas, se vistan más de un nodo, de hecho, se vistan la gran mayoría, resulta de trascendental importancia observar de forma comparativa los niveles de riesgo para cada uno de los dos eventos modelados por cada uno de los nodos visitados.

- Perfiles de riesgo para el evento operación fallida, por nodo.

Los perfiles de riesgo para el evento operación fallida, por nodo se muestran en la siguiente tabla:

**TABLA 61** Perfiles de riesgo para el evento operación fallida, por nodo.

| NODO             | Insignificante | Bajo   | Medio  | Alto  | Inaceptable |
|------------------|----------------|--------|--------|-------|-------------|
| <b>OPERACIÓN</b> | 27,52%         | 45,72% | 22,82% | 3,63% | 0,31%       |
| <b>10SAPSO</b>   | 32,09%         | 44,44% | 20,33% | 2,88% | 0,26%       |
| <b>11SBUIB</b>   | 20,24%         | 46,19% | 27,93% | 4,95% | 0,69%       |
| <b>12SBRCH</b>   | 21,92%         | 48,17% | 25,52% | 3,96% | 0,43%       |
| <b>13SBVVC</b>   | NA             | NA     | NA     | NA    | NA          |
| <b>1SAAXM</b>    | 27,26%         | 48,29% | 21,27% | 3,00% | 0,18%       |
| <b>2RBAQ</b>     | 31,88%         | 42,15% | 21,90% | 3,81% | 0,26%       |
| <b>3SBBGA</b>    | 43,58%         | 37,98% | 15,89% | 2,40% | 0,15%       |
| <b>4RCLO</b>     | 36,34%         | 42,35% | 18,38% | 2,77% | 0,16%       |
| <b>5SBCUC</b>    | 60,29%         | 32,19% | 7,18%  | 0,34% | 0,00%       |
| <b>6SBIBE</b>    | 20,76%         | 47,73% | 26,64% | 4,50% | 0,37%       |
| <b>7SBLET</b>    | 32,05%         | 37,69% | 24,68% | 4,98% | 0,60%       |
| <b>8RMDE</b>     | 17,33%         | 52,03% | 26,16% | 4,22% | 0,26%       |
| <b>9SAMTR</b>    | 37,92%         | 48,03% | 13,40% | 0,65% | 0,00%       |

- Perfiles de riesgo para el evento catastrófico, por nodo.

Los perfiles de riesgo para el evento catastrófico, por nodo se muestran en la siguiente tabla:

**TABLA 62** Perfiles de riesgo para un evento catastrófico, por nodo.

| NODO             | INSIGNIFICANTE | BAJO   | MEDIO  | ALTO  | INACEPTABLE |
|------------------|----------------|--------|--------|-------|-------------|
| <b>OPERACIÓN</b> | 38,90%         | 51,30% | 9,45%  | 0,34% | 0,01%       |
| <b>10SAPSO</b>   | 24,32%         | 58,05% | 16,75% | 0,86% | 0,02%       |
| <b>11SBUIB</b>   | 43,43%         | 50,40% | 6,11%  | 0,06% | 0,00%       |
| <b>12SBRCH</b>   | 34,59%         | 56,87% | 8,35%  | 0,19% | 0,00%       |
| <b>13SBVVC</b>   | NA             | NA     | NA     | NA    | NA          |
| <b>1SAAXM</b>    | 67,79%         | 27,26% | 4,77%  | 0,18% | 0,00%       |
| <b>2RBAQ</b>     | 29,81%         | 63,47% | 6,72%  | 0,00% | 0,00%       |
| <b>3SBBGA</b>    | 35,12%         | 51,49% | 12,76% | 0,63% | 0,00%       |
| <b>4RCLO</b>     | 27,49%         | 63,25% | 9,05%  | 0,21% | 0,00%       |

|        |        |        |        |       |       |
|--------|--------|--------|--------|-------|-------|
| 5SBCUC | 19,16% | 69,01% | 11,48% | 0,34% | 0,01% |
| 6SBIBE | 34,08% | 54,39% | 11,08% | 0,45% | 0,00% |
| 7SBLET | 19,18% | 60,11% | 19,60% | 1,09% | 0,02% |
| 8RMDE  | 42,78% | 50,17% | 6,89%  | 0,15% | 0,01% |
| 9SAMTR | 68,69% | 26,92% | 4,24%  | 0,15% | 0,00% |

### 5.5 Perfil de riesgo integral

En los apartes anteriores se han establecido los niveles de riesgo para cada evento de manera independiente. Resulta pertinente contar con la posibilidad de observar de manera integral el perfil de riesgo de cada nodo. La siguiente gráfica, tipo radar, permiten observar el perfil del riesgo de forma integral, para la operación en conjunto.

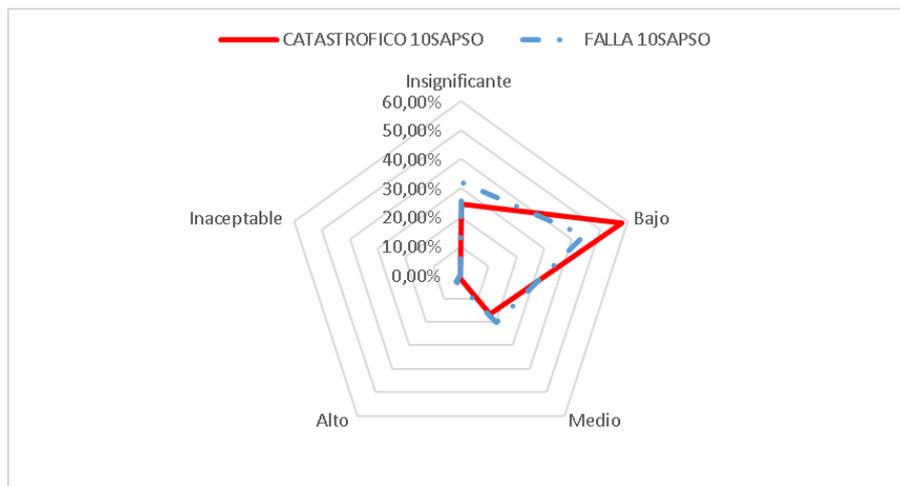


Figura 79 Diagrama tipo radar con el perfil del riesgo integral para la operación de transporte de valores.

### 5.6 Análisis correlacional

Este aparte del trabajo constituye uno de los elementos culminantes de mayor relevancia, pues permite observar, de manera conjunta, los resultados del análisis del riesgo y las variables resultado de los modelos de optimación.

#### 5.6.1 Correlación entre los dos eventos de riesgo.

Resulta interesante observar, de manera conjunta el comportamiento de las variables que modelan el riesgo para cada uno de los eventos. Como quiera que es intereses analizar los

casos donde el riesgo es significativo, se presenta una gráfica de dispersión para los niveles de riesgo: medio, alto e inaceptable.

- Análisis conjunto del riesgo, para el nivel medio.

El posicionamiento de cada nodo, respecto de la valoración del riesgo, para el nivel medio, se muestra en la siguiente gráfica:

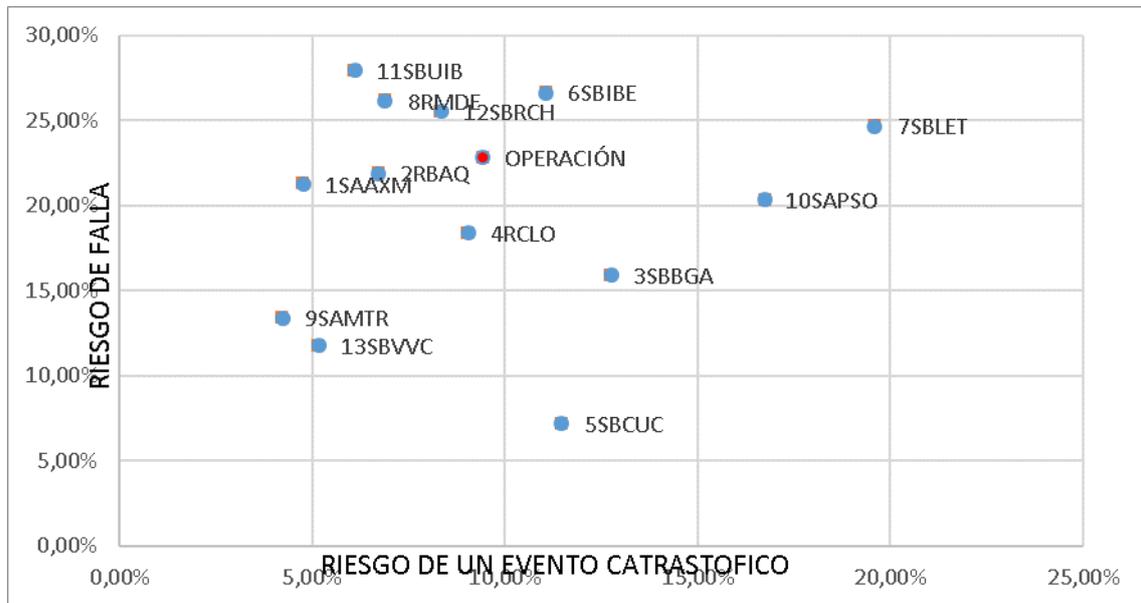


Figura 80 Diagrama con la distribución conjunta de los niveles medios de riesgo de falla y catastrófico por nodo.

Se puede observar una correlación positiva, destacándose las sucursales de Leticia y Pasto con altos valores de riesgo para ambos eventos.

- Análisis conjunto del riesgo, para el nivel alto.

El posicionamiento de cada nodo, respecto de la valoración del riesgo, para el nivel alto, se muestra en la siguiente gráfica:

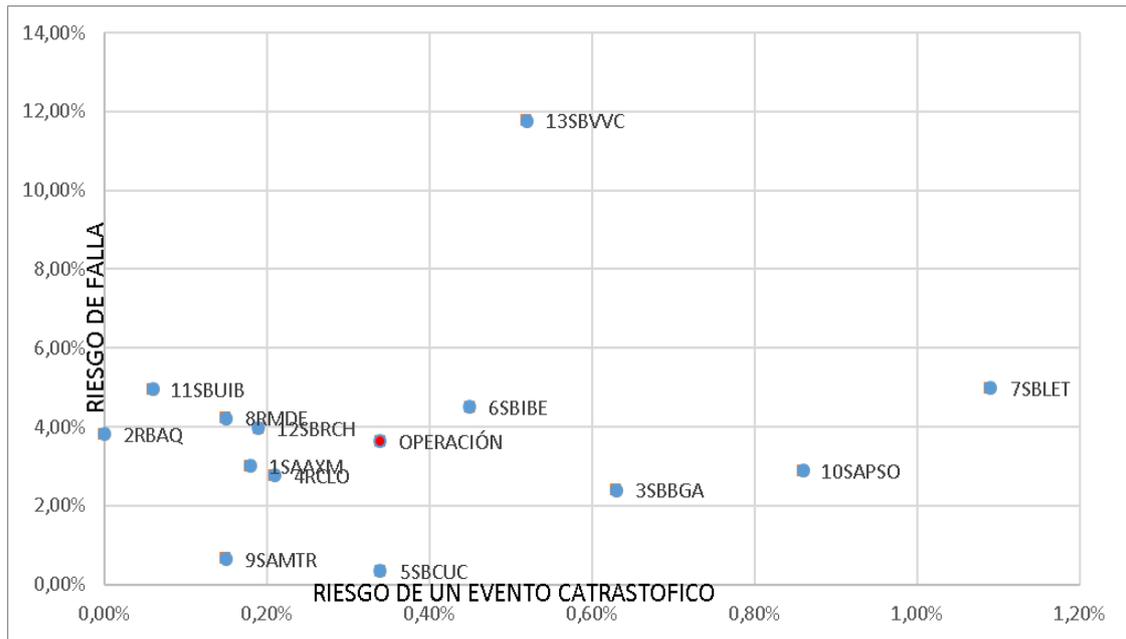


Figura 81 Diagrama con la distribución conjunta de los niveles altos de riesgo de falla y catastrófico por nodo.

A diferencia del nivel de riesgo medio, no se observa una clara correlación entre las valoraciones para los dos eventos de riesgo. Se destacan nuevamente las sucursales de Leticia y Pasto, al registrar altos valores del riesgo en lo concerniente a un evento catastrófico. Por otra parte, se destaca la sucursal de Villavicencio con altos valores de riesgo en el evento falla de la operación.

- Análisis conjunto del riesgo, para el nivel inaceptable.

El posicionamiento de cada nodo, respecto de la valoración del riesgo, para el nivel inaceptable, se muestra en la siguiente gráfica:

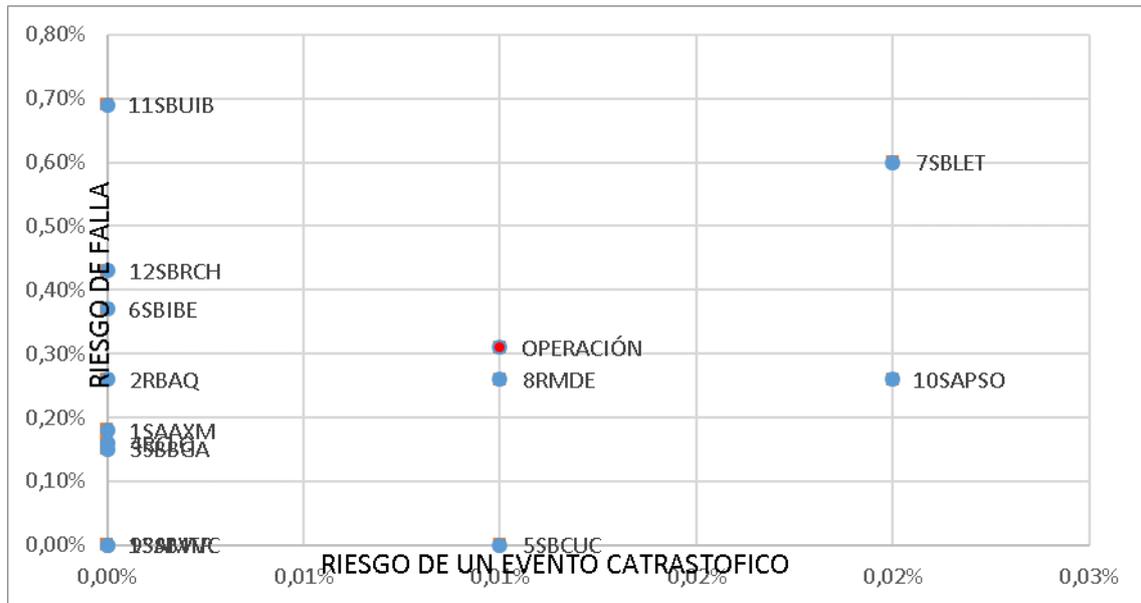


Figura 82 Diagrama con la distribución conjunta de los niveles inaceptables de riesgo de falla y catastrófico por nodo.

Si bien los valores obtenidos en este nivel de riesgo, en general no son importantes, nuevamente se destacan las sucursales de Leticia y Pasto, con altos valores de riesgo en relación al resto de las sucursales.

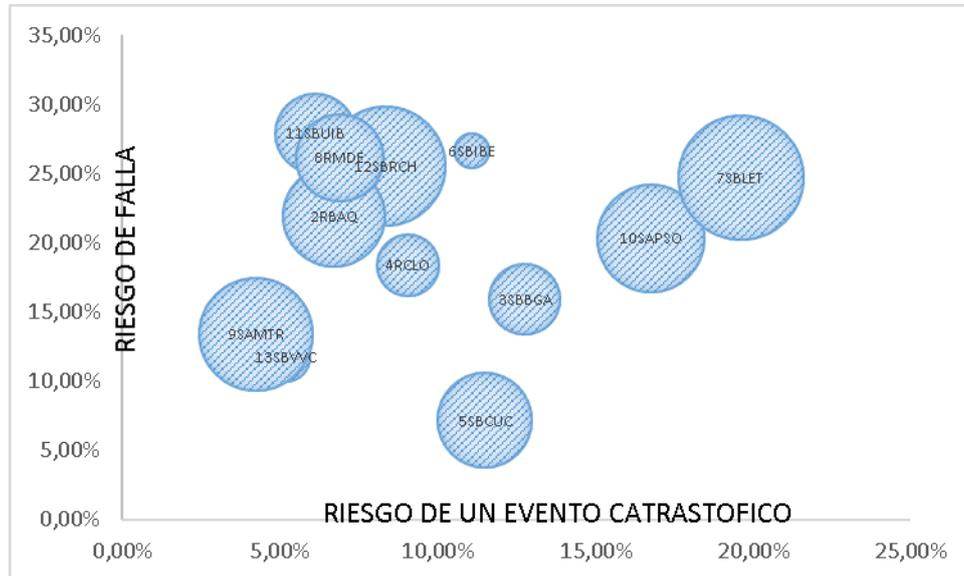
### 5.6.2 Correlación entre el evento de riesgo falla y costo de la operación.

Resulta interesante observar, de manera conjunta el comportamiento de las variables que modelan el riesgo para cada uno de los eventos, conjuntamente con la variable costo de visitar el nodo. Como quiera que es intereses analizar los casos donde el riesgo es significativo, se presenta una gráfica de dispersión para los niveles de riesgo: medio, alto e inaceptable.

Es importante mencionar que, con el propósito de hacer más visible, gráficamente, los comportamientos, la variable costos se transformó en términos de su posicionamiento dentro de la distribución de datos, es decir, en términos de percentiles.

- Análisis conjunto de los riesgos y costos, para el nivel medio.

El posicionamiento de cada nodo, respecto de la valoración del riesgo, para el nivel medio, se muestra en la siguiente gráfica:

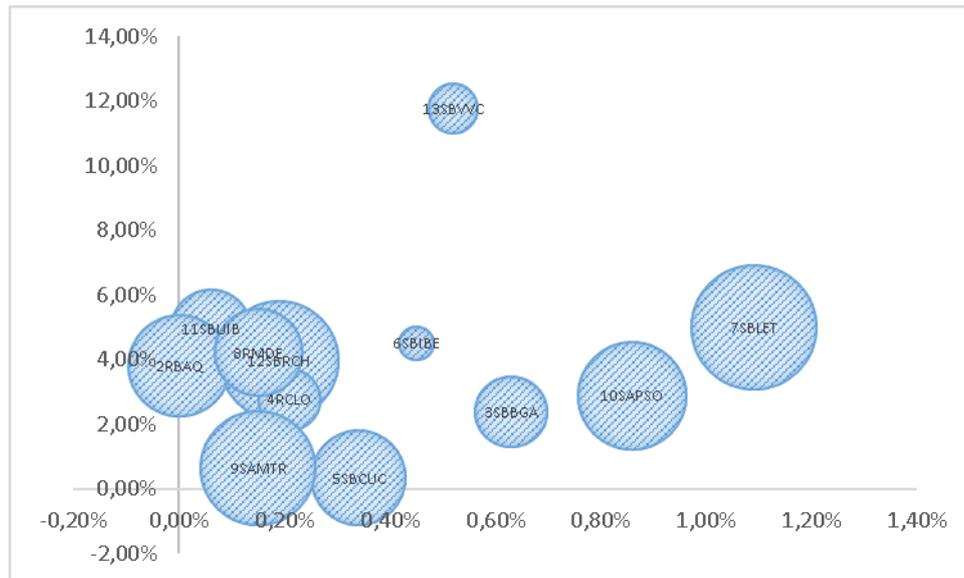


**Figura 83** Diagrama con la distribución conjunta de los niveles medios de riesgo de falla, riesgo de un evento catastrófico y costo; por nodo. La variable costos está representada por el tamaño de la burbuja.

Leticia y Pasto, además de registrar altos valores del riesgo en lo concerniente a los eventos de riesgo, se destacan por sus altos costos de operación.

- Análisis conjunto de los riesgos y costos, para el nivel alto.

El posicionamiento de cada nodo, respecto de la valoración del riesgo y los costos de operación, para el nivel alto, se muestra en la siguiente gráfica:



**Figura 84** Diagrama con la distribución conjunta de los niveles altos de riesgo de falla, riesgo de un evento catastrófico y costo; por nodo. La variable costos está representada por el tamaño de la burbuja.

Leticia y Pasto, registran altos valores del riesgo en lo concerniente a un evento catastrófico mientras que Villavicencio registra altos valores en el riesgo de falla, pero con poco valor en el costo de la operación.

- Análisis conjunto de los riesgos y costos, para el nivel inaceptable.

El posicionamiento de cada nodo, respecto de la valoración del riesgo y de manera conjunta con los costos, para el nivel inaceptable, se muestra en la siguiente gráfica:

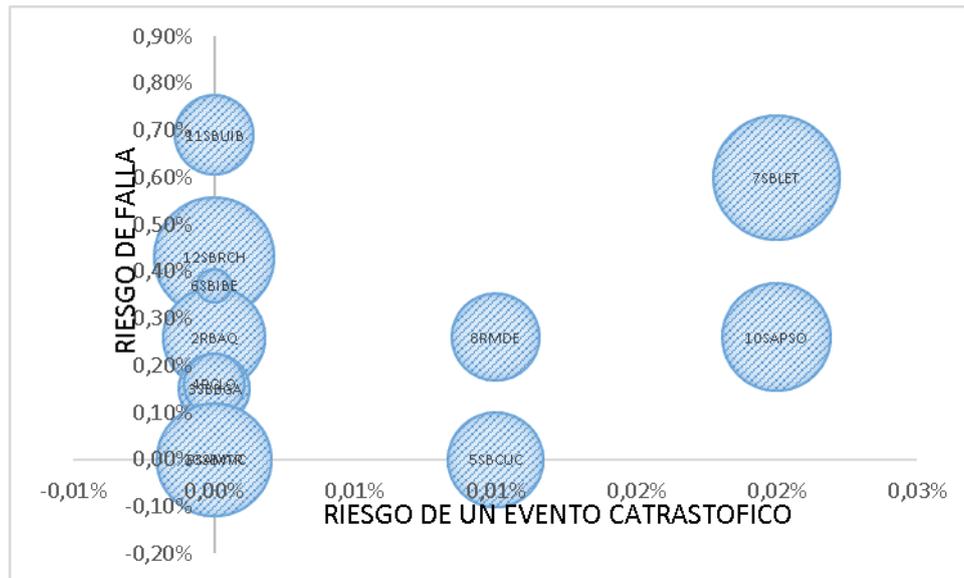


Figura 85 Diagrama con la distribución conjunta de los niveles inaceptables de riesgo de falla, riesgo de un evento catastrófico y costo; por nodo. La variable costos está representada por el tamaño de la burbuja.

Si bien los valores obtenidos en este nivel de riesgo, en general no son importantes, nuevamente se destacan las sucursales de Leticia y Pasto, con altos valores de riesgo en lo concerniente al evento de riesgo catastrófico, en relación al resto de las sucursales. Como se ha mencionado, con anterioridad, estas sucursales registran altos valores de costo.

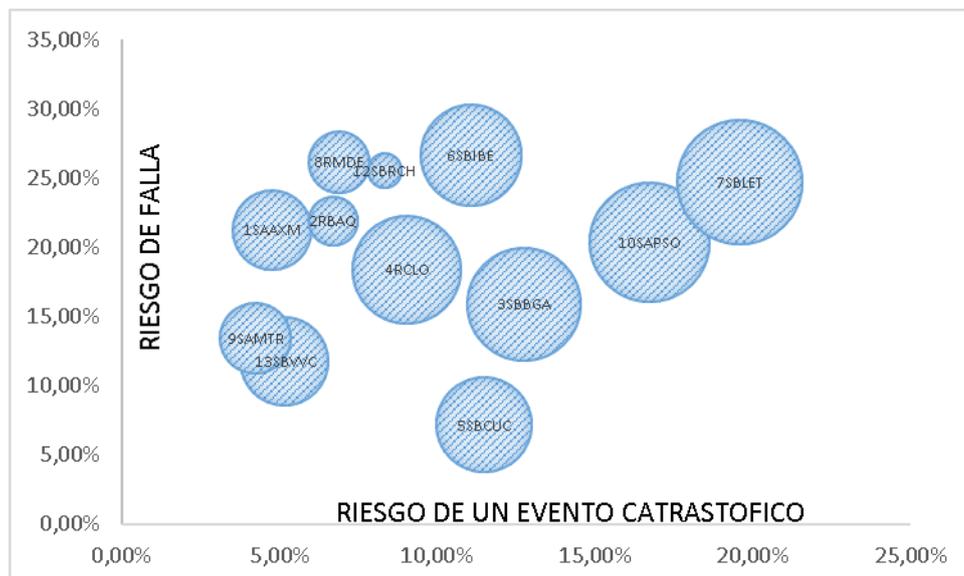
### 5.6.3 Correlación entre el evento de riesgo falla en la operación y los valores transportados a cada nodo.

Resulta de gran importancia para los propósitos de este trabajo observar, de manera conjunta el comportamiento de las variables que modelan el riesgo para cada uno de los eventos, conjuntamente con los valores transportados a cada. Como quiera que es intereses analizar los casos donde el riesgo es significativo, se presenta una gráfica de dispersión para los niveles de riesgo: medio, alto e inaceptable.

Es importante mencionar que, con el propósito de hacer más visible, gráficamente, los comportamientos, la variable valores transportados se transformó en términos de su posicionamiento dentro de la distribución de datos, es decir, en términos de percentiles.

- Análisis conjunto de los riesgos y valores transportados, para el nivel medio.

El posicionamiento de cada nodo, respecto de la valoración del riesgo y los valores promedio transportados a cada, para el nivel medio, se muestra en la siguiente gráfica:



**Figura 86** Diagrama con la distribución conjunta de los niveles medios de riesgo de falla, riesgo de un evento catastrófico y valores transportados; por nodo. La variable valores transportados está representada por el tamaño de la burbuja.

Leticia y Pasto, además de registrar altos valores del riesgo en lo concerniente a los eventos de riesgo, se destacan por sus altos promedio de valores transportados.

- Análisis conjunto de los riesgos y valores transportados, para el nivel alto.

El posicionamiento de cada nodo, respecto de la valoración del riesgo y los valores promedio transportados a cada, para el nivel alto, se muestra en la siguiente gráfica:

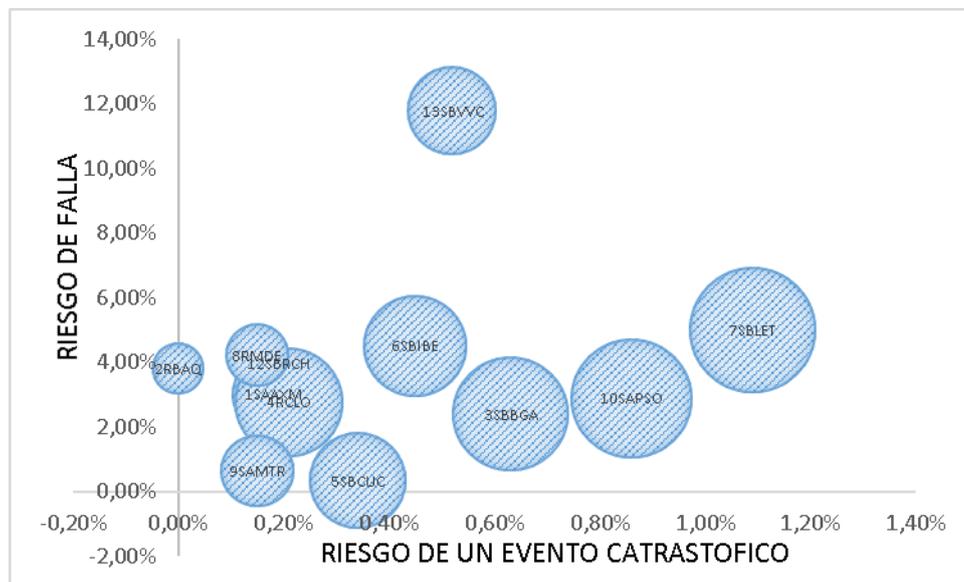
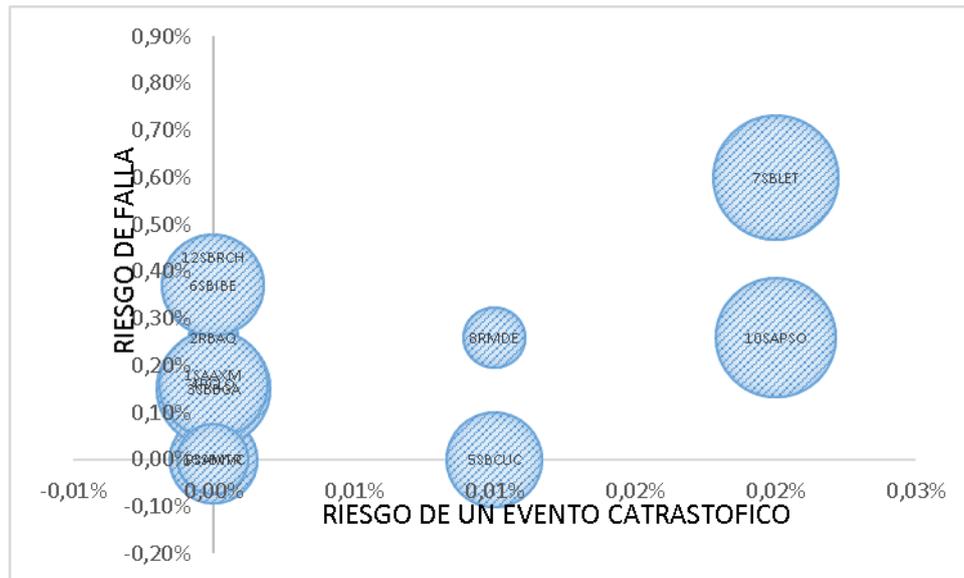


Figura 87 Diagrama con la distribución conjunta de los niveles altos de riesgo de falla, riesgo de un evento catastrófico y valores transportados; por nodo. La variable valores transportados está representada por el tamaño de la burbuja.

Leticia, Pasto y Bucaramanga, registran altos valores del riesgo en lo concerniente a un evento catastrófico y altos valores promedio de valores transportados. Lo anterior, es consistente con el modelo de riesgo, pues el nivel del riesgo está directamente asociado con el valor transportado.

- Análisis conjunto de los riesgos y costos, para el nivel inaceptable.

El posicionamiento de cada nodo, respecto de la valoración del riesgo y de manera conjunta con los costos, para el nivel inaceptable, se muestra en la siguiente gráfica:



**Figura 88** Diagrama con la distribución conjunta de los niveles inaceptable de riesgo de falla, riesgo de un evento catastrófico y valores transportados; por nodo. La variable valores transportados está representada por el tamaño de la burbuja.

Si bien los valores obtenidos en este nivel de riesgo, en general no son importantes, nuevamente se destacan las sucursales de Leticia y Pasto, con altos valores de riesgo en lo concerniente al evento de riesgo catastrófico, en relación al resto de las sucursales. Como se ha mencionado, con anterioridad, estas sucursales registran altos valores promedio transportados.

#### 5.6.4 Conclusiones y recomendaciones de la ejecución del modelo de aplicación inmediata.

El propósito de haber desarrollado los capítulos precedentes es el de ejecutar, de manera independiente, los modelos, inicialmente planteados de forma teórica, de optimización de rutas y medición del riesgo, de tal forma que se obtengan elementos concretos para incorporarlos en un único modelo integral de planeación para un periodo de tiempo. De esta forma, seguidamente se presentan las conclusiones y recomendaciones generales obtenidas hasta este aparte:

- Claramente la ejecución de un modelo de aplicación inmediata privilegia algunas oficinas seccionales, dejando desatendida a otras. De esta forma el modelo integral de planeación debe garantizar la visita de todas las sucursales.
- Los resultados del modelo de aplicación inmediata mostraron que no utilizaba toda la capacidad de los vehículos. En este sentido el modelo integral de planeación debe garantizar el uso de toda la capacidad de los vehículos.
- Con el fin de facilitar la operatividad del modelo y la interpretación de los resultados, se recomienda elegir únicamente uno de los eventos de riesgo en el modelo. Definitivamente, el impacto de la ocurrencia de un evento de riesgo de connotaciones catastróficas, es significativamente, de mayor interés que un evento de falla de la operación. Por otra parte, los factores de riesgo son esencialmente los mismos, por lo que ambos niveles de riesgo correlacionan positivamente. De lo anterior resulta que al controlar el riesgo de un evento catastrófico, se controla, por defecto, el riesgo de una falla. Así las cosas, el modelo integral incorporará los parámetros de los niveles de riesgo asociados a un evento catastrófico.
- Uno de los factores de riesgo que se valoró y que se incorporó en la red bayesiana fue el de las condiciones climáticas. Luego de varias consideraciones, en particular del hecho de que en los actuales sistemas de pronósticos climáticos aportan información confiable, se sugiere incorporar como un parámetro determinístico el pronóstico del clima para cada ciudad en el horizonte de planeación determinado. Particularmente, el parámetro que moldea las condiciones climáticas debe actuar en la fase de optimización de la ruta.
- Respecto de las rutas terrestres se encontró que la distancia por recorrer es en si misma in factor importante en la determinación del nivel de riesgo. En vista de lo anterior, se sugiere incorporar al modelo integral de planeación la distancia como un parámetro que pondere el riesgo en los trayectos terrestres.
- Un elemento que se debe resaltar respecto de la medición del nivel del riesgo que se realizó hasta este aparte, tiene que ver con la definición del riesgo operativo que se enuncio en el numeral 2.3.6 y que establece al impacto o nivel de perdida como un elemento fundamental. En este sentido, el valor del impacto o perdida esperaba se

había incorporado al modelo de medición del riesgo, representado en la red bayesiana, como una distribución de probabilidad resultante de la simulación efectuada con el modelo de optimización. Por lo que se refiere al modelo integral de planeación en cada ejecución el modelo determina el valor exacto a transportar, es decir, el nivel del impacto, por lo que se debe excluir del cálculo del nivel de riesgo. En conclusión, el impacto, para nuestro caso, el valor a transportar, es precisamente una variable de decisión que es establecida por el proceso de optimización que incorpora la medición del riesgo.

## CAPÍTULO 6

### OPTIMIZACIÓN Y RIESGO DE MANERA CONJUNTA

Como se mencionó en el planteamiento de la investigación el objetivo general de este trabajo es el de diseñar y evaluar un modelo de optimización de un sistema de distribución de valores que considere la relación entre la eficiencia operativa y el nivel riesgo operativo. En procura del anterior objetivo en los capítulos precedentes se han desarrollado de manera independiente, un conjunto de componentes relacionados con la optimización del sistema de distribución y la valoración del riesgo inherente a la operación. De esta forma, en este capítulo, se integran todos los elementos en un modelo que de manera integral considere la eficiencia y el riesgo de la forma propuesta en el objetivo principal de investigación. Al anterior modelo se le ha denominado modelo integral de planeación.

De la manera que se ha comentado con anterioridad el trabajo se estructuró con el propósito de que el desarrollo de los primeros capítulos aporte los elementos necesarios para la construcción del modelo integral. Por lo anterior, en este capítulo se desarrolla el modelo integral realizando los mismos pasos de la modelación matemática e implementación computacional del modelo de aplicación inmediata, evitando ser redundantes en los aspectos comunes, es decir, enfatizando en los aspectos nuevos que son necesarios para el funcionamiento del modelo integral de planeación.

Es importante resaltar que el modelo integral de planeación se construye acorde con las conclusiones y sugerencia del capítulo anterior, en resumen, se estructura un modelo de optimización que además de lo tratado incorpora un periodo de planeación de varios días que garantice la visita de todas las oficinas, el mejor aprovechamiento de las capacidades de los vehículos y que, considere de forma integral, el riesgo inherente asociado.

## 6.1 Modelación matemática del modelo integral de planeación

La conceptualización matemática del modelo integral de planeación es la misma que se enunció en el aparte 4.1 y que básicamente consiste corresponde a la que sustenta un modelo de ruteo, complementado con un modelo de asignación de carga. Las políticas definidas para el sistema son, en términos generales, las mismas adicionando las que corresponde a un modelo de planeación de varios días y, en concordancia con el objetivo de este trabajo de grado, las políticas necesarias para la administración del riesgo. De esta forma, las políticas que enmarcan el sistema, son las siguientes:

- Todos los clientes, con demandas positivas, son atendidos no más de una vez por una cualquiera de las rutas.
- Cada ruta inicia y termina en el depósito.
- El sistema debe planear las operaciones de transporte de valores para un periodo de diez (10) días.
- Cada ruta no debe exceder el máximo tiempo permitido para la operación de un vehículo en un día.
- Las sumas de las cantidades transportadas no excedan las capacidades de los vehículos.
- Las sumas de las cantidades transferidas en un nodo no excedan la capacidad de operación del nodo.
- No se transporten valores por encima de los valores cubiertos por la póliza global bancaria.
- El sistema debe minimizar el nivel de exposición al riesgo inherente a las operación de transporte de valores.

### 6.1.1 Determinación de los conjuntos del modelo integral de planeación

Los conjuntos son los mismos que se definieron para el modelo de aplicación inmediata. Se debe adicionar un conjunto para modelar el periodo de planeación

- Periodo de planeación

$t$  es el conjunto de todos los días que conforman el periodo de planeación de origen,

en total diez (10).  $t \in \{0,1,2,\dots,10\}$

### 6.1.2 Parámetros del modelo integral de planeación

En general los parámetros que enmarcan el modelo integral de planeación son los mismos que los del modelo aplicación inmediata. En procura del objetivo de este trabajo se incorporan los parámetros que definen el componente de riesgo, según los resultados obtenidos en el anterior capítulo. En este punto se debe mencionar que resultado del análisis de riesgo se encontró que las condiciones climáticas son factores determinantes en el nivel riesgo, para ambos eventos de riesgo, por lo que se involucraron en los cálculos correspondientes, mediante el empleo de redes bayesianas. No obstante, lo anterior, se estableció que, dado que en la actualidad es posible obtener pronósticos del clima con un importante nivel de certeza, se ha decidido incorporar esta variable como un parámetro conocido, restándole incertidumbre al modelo.

- Factor de distancia:

$FACTDIS_{j,k}$ : establece el valor de un factor que incrementa el costo en las

vía terrestre de manera proporcional de la distancia en kilómetros del nodo  $j$  al depósito. Este factor toma el valor de uno (1) para los vehículos aéreos.

- Nivel de riesgo insignificante asociado a un nodo

$riesgnodinsig_j$ : Es el nivel de riesgo, categorizado como insignificante

asociado al nodo  $j$ .

- Nivel de riesgo insignificante asociado a un nodo

$riesgnodbajo_j$ : Es el nivel de riesgo, categorizado como bajo asociado al

nodo  $j$ .

- Condiciones climáticas en el nodo  $j$  en el día  $t$ .

$W_j$ : Es la condición climática pronosticada para el nodo  $j$  en el día  $t$ .

- Condiciones climáticas en el nodo  $j$  en el día  $t$ .

$S_j$ : Es la distancia del nodo  $j$  al deposito.

### 6.1.3 Definición de las variables

Se puede hacer una clara distinción entre variables principales de resultado, de decisión y variables auxiliares. Las primeras determinan el valor óptimo obtenido por el modelo, las segundas constituyen el valor que deben adoptar las decisiones para lograr el resultado óptimo y finalmente las variables auxiliares establecen valores intermedios, necesarios para los cálculos del modelo de optimización.

- Costo total

$Z$  Esta es una variable de resultado calcula la sumatoria de los costos de la operación de transporte adicionados a los costos de penalización por dejar de visitar nodos.

- Valor total transportado

$ZY$  Esta es una variable de resultado calcula el valor total en unidades monetarias transformadas que se transporta durante la operación.

- Trayecto

$X_{(ijk)}$  Es la primera variable de decisión binaria que toma el valor uno (1) si el trayecto  $(i,j)$  es recorrido por el vehículo  $k$  en la solución óptima; toma el valor cero (0), de lo contrario.  $X \in \{0,1\}$

- Tiempo total de viaje.

$TTV_{(k)}$  : Calcula el tiempo total de viaje empleado por el vehículo  $\mathcal{K}$  en la solución óptima.

- Variable de precedencia.

$U_{(ik)}$  : Es una variable entera positiva que se utiliza para calcular la precedencia de las visitas, de los nodos  $\acute{i}$ , para cada vehículo  $\mathcal{K}$ .

- Valor en unidades monetarias de la cantidad entregada por denominación.

$VYEM_{(j,k,m)}$  Es LA segunda variable de decisión, se trata de la cantidad entregada, en valor de unidades monetarias transformadas, de la denominación  $\mathcal{M}$ , por el vehículo  $\mathcal{K}$ , en el nodo  $\acute{j}$ .

#### 6.1.4 Formulación

Con base en las definiciones de los numerales anteriores, la formulación matemática de modelo de programación lineal, tanto en su componente de ruteo, como en su componente de asignación.

- Función objetivo (ruteo)

①

$$\min Z = \sum_{t \in T} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} \{ C_{i,j,k} \text{ factdis}_{j,k} X_{t,i,j,k} + (\text{faccilm}) W_{j,t} C_{i,j,k} \text{ factdis}_{j,k} X_{t,i,j,k} \}$$

- Restricciones

①

$$\sum_{t \in T} \sum_{i \in V} \sum_{k \in K} X_{t,i,j,k} \leq 1; \quad \forall j \in V', i \neq j, j > 1$$

②

$$\sum_{t \in T} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} X_{t,i,j,k} = 1; \quad \forall i \in V', i \neq j, i > 1$$

③

$$\sum_{t \in T} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} X_{t,i,j,k} \geq NV_{k+1}; \quad \forall k \in K, i \neq j$$

④

$$\sum_{i=0} \sum_{j \in V} X_{t,i,j,k} = 1; \quad \forall k \in K$$

⑤

$$\sum_{i \in V} \sum_{j=0} X_{t,i,j,k} = 0; \quad \forall k \in K, t \in T, i = j$$

⑥

$$\sum_{i \in V} X_{t,i,p,k} - \sum_{j \in V} X_{t,p,j,k} = 0; \quad \forall t \in T, k \in K, p \in V'$$

⑦

$$U_i - U_j + [\text{card}(i) - 1] X_{t,i,j,k} \leq [\text{card}(i) - 2];$$

$$\forall i, j \in V', \forall t \in T, k \in K, p \in V'$$

⑧

$$TTV_{k,t} = \sum_{i,j \in V} X_{t,i,j,k} TV_{i,j,k}; \forall t \in T, k \in K$$

⑨

$$TTV_{k,t} \leq MAXTTV_k; \forall t \in T, k \in K$$

**0 Función objetivo principal (modelo HVRPD).** Calcula el valor mínimo de la variable objeto del proceso de optimización en la fase de ruteo y que es función del costo ponderado por un factor de distancia para las rutas terrestres y de un factor del clima. En resumen, la función objetivo, pretende mínima el costo de las rutas, evitando largos trayectos terrestres y asignado los destinos acordes con el pronóstico del clima.

**R1 Destino único.** Todos los nodos (oficinas sucursales) deben ser visitadas como máximo una sola vez por un vehículo.

**R2 Origen único.** Todos los nodos (oficinas sucursales) deben ser punto de partida como máximo una sola vez por un vehículo.

**R3 Número mínimo de visitas.** Cada vehículo, dependiendo del tipo, debe realizar como mínimo un determinado número de visitas, por día en que se programa ruta. Se adiciona uno para no considerar el retorno al depósito como una visita.

**R4 Inicio desde el depósito.** Cada vehículo debe iniciar el recorrido en el depósito.

**R5 Retorno al Depósito.** Cada vehículo debe retornar al depósito.

**R6 Flujo.** El mismo vehículo que ingresa a una sucursal debe abandonarla.

**R7 Subciclos.** Evita subciclos

**R8 Tiempo de viaje.** Calcula, para cada vehículo, el tiempo de viaje empleado en cada ruta.

**R9 Limita el tiempo de viaje.** Impide que cada vehículo emplee más tiempo del máximo establecido en la política.

Sobre la solución establecida por el modelo de ruteo, se ejecuta, en una segunda fase, el componente del modelo de asignación de carga, de la siguiente forma:

- Función secundaria a optimizar (modelo CARGA)

⑩

$$\begin{aligned} \max ZY = & \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} VYEM_{t,k,i,j,m} riesgnodinsig_j \\ & + \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} VYEM_{t,k,i,j,m} riesgnodbaja_j \end{aligned}$$

①

$$VYEM_{t,k,i,j,m} \leq D_{j,m} N_m X'_{t,i,j,k}; \forall t \in T, k \in K, i \in V, j \in V$$

②

+

$$\frac{\sum_{t \in T} \sum_{i \in V'} \sum_{m \in M} \sum_{k \in K} [X'_{t,i,j,k} VYEM_{t,k,i,j,m}]}{[[N_m](1000)]} \leq CO_j; \forall j \in V'$$

③

$$\frac{\sum_{t \in T} \sum_{i \in V'} \sum_{j \in V'} \sum_{m \in M} [X'_{t,i,j,k} VYEM_{t,k,i,j,m}]}{[[N_m](1000)]} \leq CK_k; \forall k \in K$$

④

$$\sum_{i \in V'} \sum_{j \in V'} \sum_{m \in M} [X'_{t,i,j,k} VYEM_{t,k,i,j,m}] \leq TOPOL; \forall t \in T, k \in K$$

- Restricciones (modelo CARGA)

**0 Función objetivo (modelo CARGA).** Calcula el valor máximo de la variable objeto del proceso de optimización, en la fase de carga, establecida como una función del valor a transportar en la ruta optima ponderada por los niveles de riesgo: insignificante y bajo. En resumen, la función objetivo del modelo de carga, pretende maximizar el valor transportado en la ruta optima, establecida en la fase de ruteo, considerando el riesgo, es decir transportando los valores altos a los nodos que presentan menor riesgo.

**R1 Limita la cantidad entregada a demanda.** Restringe la cantidad de pagas total entregadas, por denominación, desde el depósito a cada oficina, como máximo, a la demanda total para cada denominación.

**R2 Limita la cantidad entregada a la capacidad operativa.** Restringe la cantidad de pagas total entregadas desde el depósito a cada oficina, como máximo, a la capacidad operativa en esa oficina.

**R3 Limita la cantidad máxima cargada a la capacidad de carga del vehículo.** Restringe la cantidad de pagas total entregadas desde el depósito a cada oficina, para cada vehículo, como máximo, a la capacidad de cada vehículo.

**R4 Limita el valor máximo cargado al asegurado por la póliza global.** Restringe, para cada vehículo, el valor cargado en unidades monetarias transformadas al valor máximo asegurado en la póliza global bancaria.

## 6.2 Implementación y ejecución del modelo integral de planeación

Seguidamente se procede con la implementación computacional del modelo y la determinación del escenario base.

### 6.2.1 Implementación computacional

El modelo fue implementado utilizando el software comercial GAMS empleando el solver CPLEX. El Anexo 1 contiene el código del programa. La ejecución de este desarrollo se realizó en un equipo computacional con las siguientes características: Computador portátil de la marca ASUS, modelo K45VD, con procesador Intel Core i5 y seis (6) GB de memoria RAM.

### 6.2.2 Escenario base para el modelo integral de planeación

El escenario base para la ejecución del modelo de aplicación inmediata es el que corresponde a la caracterización del modelo expuesto en el numeral 3.1. En ese sentido y como se deduce de la lectura de ese aparte, de los elementos que conforman la caracterización del sistema

existen dos que deben ser determinados, de forma particular, estos son: Las políticas y la demanda.

- Determinación de las políticas

En relación a las políticas para el sistema de distribución modelado se establecen las siguientes:

- *Nivel mínimo de existencias* ( $LI_{(jm)}$ ): Establece el nivel mínimo de inventario de una oficina con tesorería, tal que, valores inferiores implican que existe una demanda. Los valores sobre los niveles mínimos de existencia se establecieron resultado de un análisis descriptivo de los datos históricos. Como es de esperarse las sucursales con mayores volúmenes exigen niveles mínimos más altos. La siguiente tabla muestra el valor de este parámetro, para cada sucursal y para cada denominación, en número de pacas.

**TABLA 63** Nivel mínimo de existencia, en número de pacas, por oficina y por denominación, para ejecución del modelo integral de planeación. Creación propia del autor.

| <b>LIMITE INFERIOR PACAS <math>LI_{(jm)}</math></b> |            |            |            |            |            |            |
|---|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>NODO</b>   | <b>SAT</b> | <b>VEN</b> | <b>JUP</b> | <b>PLU</b> | <b>URA</b> | <b>MER</b> |
| <b>OCE</b>  | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| <b>1SA_AXM</b>                                      | 20         | 20         | 400        | 100        | 200        | 200        |
| <b>2R_BAQ</b>                                       | 20         | 20         | 600        | 100        | 100        | 100        |
| <b>3SB_BGA</b>                                      | 20         | 20         | 20         | 100        | 100        | 200        |
| <b>4R_CLO</b>                                       | 20         | 20         | 300        | 20         | 100        | 100        |
| <b>5SB_CUC</b>                                      | 20         | 20         | 300        | 600        | 600        | 100        |
| <b>6SB_IBE</b>                                      | 20         | 20         | 200        | 300        | 200        | 200        |
| <b>7SB_LET</b>                                      | 20         | 20         | 20         | 20         | 20         | 20         |
| <b>8R_MDE</b>                                       | 20         | 20         | 400        | 100        | 200        | 200        |
| <b>9SA_MTR</b>                                      | 20         | 20         | 200        | 100        | 200        | 200        |
| <b>10SA_PSO</b>                                     | 20         | 20         | 100        | 200        | 200        | 300        |
| <b>11SB_UIB</b>                                     | 20         | 20         | 20         | 20         | 20         | 20         |
| <b>12SB_RCH</b>                                     | 20         | 20         | 100        | 100        | 100        | 100        |
| <b>13SB_VVC</b>                                     | 20         | 20         | 100        | 20         | 100        | 100        |

- *Número mínimo de visitas por un vehículo en una ruta*  $NV_{(k)}$ : Establece la cantidad mínima de oficinas visitadas por un vehículo en una ruta. Por debajo de este número, no resulta favorable realizar el recorrido.

**TABLA 64** Número mínimo de visitas por un vehículo en una ruta, para ejecución del modelo de planeación. Creación propia del autor.

| VEHICULO                         | COD     | $NV_{(k)}$ |
|----------------------------------|---------|------------|
| <b>CAMION INTERNACIONAL 4000</b> | TFBINT  | 1          |
| <b>AEREO1</b>                    | AANT32  | 2          |
| <b>AEREO2</b>                    | ABOE100 | 2          |

- *Tiempo máximo de permanencia de un vehículo en una ruta*  $MAXTV_{(k)}$ : limita el tiempo que un vehículo puede permanecer en una ruta. Esta es una política de seguridad que busca el menor tiempo de exposición de la carga fuera de las bóvedas de las tesorerías.

**TABLA 65** Tiempo máximo de permanencia de un vehículo en una ruta. Creación propia del autor.

| VEHICULO                         | COD     | $MAXTV_{(k)}$ |
|----------------------------------|---------|---------------|
| <b>CAMION INTERNACIONAL 4000</b> | TFBINT  | 420,00        |
| <b>AEREO1</b>                    | AANT32  | 420,00        |
| <b>AEREO2</b>                    | ABOE100 | 480,00        |

- *Capacidad operativa máxima de una tesorería*  $CO_{(j)}$ : limita, para cada tesorería, la cantidad de carga que puede ser recibida en una operación.

**TABLA 66** Capacidad de operación, en número de pacas, para cada nodo, para ejecución del modelo de planeación. Creación propia del autor.

| NODO       | $CO_{(j)}$ |
|------------|------------|
| <b>OCE</b> | 18.500     |

|                 |        |
|-----------------|--------|
| <b>1SA_AXM</b>  | 5.000  |
| <b>2R_BAQ</b>   | 8.500  |
| <b>3SB_BGA</b>  | 5.000  |
| <b>4R_CLO</b>   | 10.000 |
| <b>5SB_CUC</b>  | 5.000  |
| <b>6SB_IBE</b>  | 5.000  |
| <b>7SB_LET</b>  | 3.500  |
| <b>8R_MDE</b>   | 10.000 |
| <b>9SA_MTR</b>  | 5.000  |
| <b>10SA_PSO</b> | 3.500  |
| <b>11SB_UIB</b> | 3.500  |
| <b>12SB_RCH</b> | 5.000  |
| <b>13SB_VVC</b> | 5.000  |

- *Capacidad operativa máxima de un vehículo*  $CK_{(k)}$  : limita, para cada vehículo, la cantidad de carga, en número de pacas, que puede transportar.

**TABLA 67** Capacidad de operación, en número de pacas, para cada vehículo, para ejecución del modelo de planeación. Creación propia del autor.

| VEHICULO                         | COD      | $CK_{(k)}$ |
|----------------------------------|----------|------------|
| <b>CAMION INTERNACIONAL 4000</b> | TFBINT   | 18.500     |
| <b>AEREO1</b>                    | AANT32   | 15.000     |
| <b>AEREO2</b>                    | ABOEI100 | 10.000     |

- *Valor máximo transportado por un vehículo en una ruta* **TOPOL** : limita, para cada vehículo, el valor transportado a las sumas aseguradas por la póliza global bancaria. El tope en unidades monetarias transformadas es 7.652.689.675.
- *Valor máximo transportado por un vehículo en una ruta* **TOPOL** : limita, para cada vehículo, el valor transportado a las sumas aseguradas por la póliza global bancaria. El tope en unidades monetarias transformadas es 7.652.689.675.

- **Condiciones climáticas en el nodo  $j$  en el día  $t$ .  $W_{j,t}$ :** De la forma que concluyó, al analizar los resultados de la ejecución del modelo de aplicación inmediata y del análisis del riesgo, resulta oportuno incluir el factor de riesgo, condiciones climáticas, como un parámetro del modelo de optimización, en su fase de ruteo, de tal forma que el modelo asigne la ruta considerando el pronóstico del para cada una de las oficinas a visitar.

Este sentido, y teniendo en cuenta que las condiciones climáticas son, a su vez, el resultado de un diverso número de variables: velocidad del viento, humedad relativa, posibilidad de precipitaciones, temperatura, etc.; para efectos de este trabajo, se ha elegido la probabilidad de precipitaciones como la variable que define el valor del parámetro condiciones climáticas. Acorde con lo anterior, seguidamente se muestra la tabla con los valores de este parámetro, para cada sucursal y para el periodo de planeación. No sobra mencionar que estos valores han sido tomados de una de las páginas WEB de pronóstico del clima, para un periodo de diez (10).

**TABLA 68** Condiciones climáticas pronosticadas para cada nodo durante el periodo de planeación. Creación propia del autor.

| $W_{j,t}$      | $t$ |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                | $j$ | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
| <b>1SAAXM</b>  |     | 0,55 | 0,56 | 0,54 | 0,56 | 0,8  | 0,45 | 0,66 | 0,55 | 0,71 | 0,7  |
| <b>2RBAQ</b>   |     | 0,6  | 0,75 | 0,25 | 0,25 | 0,43 | 0,41 | 0,4  | 0,5  | 0,4  | 0,62 |
| <b>3SBBGA</b>  |     | 0,42 | 0,6  | 0,47 | 0,41 | 0,42 | 0,44 | 0,6  | 0,73 | 0,4  | 0,42 |
| <b>4RCLO</b>   |     | 0,57 | 0,54 | 0,5  | 0,57 | 0,54 | 0,75 | 0,8  | 0,52 | 0,62 | 0,65 |
| <b>5SBCUC</b>  |     | 0,56 | 0,4  | 0,65 | 0,52 | 0,55 | 0,55 | 0,69 | 0,54 | 0,58 | 0,43 |
| <b>6SBIBE</b>  |     | 0,35 | 0,4  | 0,5  | 0,25 | 0,5  | 0,4  | 0,5  | 0,5  | 0,5  | 0,4  |
| <b>7SBLET</b>  |     | 0,21 | 0,5  | 0,6  | 0,54 | 0,25 | 0,4  | 0,45 | 0,55 | 0,6  | 0,45 |
| <b>8RMDE</b>   |     | 0,62 | 0,51 | 0,25 | 0,49 | 0,6  | 0,49 | 0,5  | 0,64 | 0,66 | 0,63 |
| <b>9SAMTR</b>  |     | 0,42 | 0,6  | 0,43 | 0,25 | 0,46 | 0,45 | 0,54 | 0,54 | 0,41 | 0,51 |
| <b>10SAPSO</b> |     | 0,66 | 0,54 | 0,55 | 0,55 | 0,55 | 0,56 | 0,4  | 0,4  | 0,63 | 0,56 |
| <b>11SBUIB</b> |     | 0,75 | 0,4  | 0,54 | 0,46 | 0,62 | 0,64 | 0,8  | 0,65 | 0,82 | 0,7  |
| <b>12SBRCH</b> |     | 0,5  | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,41 | 0,04 | 0,4  | 0,5  | 0,77 |
| <b>13SBVVC</b> |     | 0,47 | 0,7  | 0,65 | 0,4  | 0,4  | 0,65 | 0,67 | 0,54 | 0,75 | 0,7  |

- La distancia del nodo al depósito  $S_j$ : es un elemento que constituye un factor

determinante en el nivel de riesgo en las rutas que se establecen por vía terrestre. Si bien es cierto que la distancia es considerada al momento de calcular los costos, resultado de la ejecución del modelo, se encontró que conviene ajustar el modelo de tal forma que evite la exposición de la carga en largos trayectos por vía terrestre, pues es donde existe mayor exposición a eventos catastróficos. De esta forma, basados en

las distancias de construye una variable transitoria  $FACTDIS_j$  que

pueda utilizarse para ponderar el riesgo, cuando se transita por vía terrestre, incrementando el costo de manera cuadrática, no lineal, respecto de la distancia que se recorre. Para lo anterior se ha confeccionado la siguiente formula, que se ha incorporado en el modelo de ruteo.

$$FACTDIS_j = (1 + (S_j - 100))^2 / 100$$

La siguiente tabla muestra las distancias recorridas  $S_j$  desde cada nodo, así como el

valor obtenido por el factor  $FACTDIS_j$  de ponderación, en las rutas

terrestres.

**TABLA 69** Factor de distancia calculado para cada nodo, a partir de la distancia de la vía terrestre desde el depósito. Creación propia del autor.

| CIUDAD  | $S_j$    | $FACTDIS_j$ |
|---------|----------|-------------|
| 1SAAXM  | 281      | 199,78      |
| 2RBAQ   | 1002     | 6217,80     |
| 3SBBGA  | 398      | 606,45      |
| 4RCLO   | 461      | 916,87      |
| 5SBCUC  | 555      | 1499,07     |
| 6SBIBE  | 201      | 48,81       |
| 7SBLET  | 5000 (*) | 191737,90   |
| 8RMDE   | 418      | 698,06      |
| 9SAMTR  | 789      | 3567,33     |
| 10SAPSO | 841      | 4146,87     |

|                |      |         |
|----------------|------|---------|
| <b>11SBUIB</b> | 567  | 1583,65 |
| <b>12SBRCH</b> | 1010 | 6331,61 |
| <b>13SBVVC</b> | 124  | 1       |

(\*). Leticia no tiene conectividad terrestre por lo que se ha colocado un valor ficticio.

La siguiente grafica muestra la relación entre distancias recorridas  $S_j$  desde cada nodo y el valor obtenido por la variable transitoria  $FACTDIS_j$ .

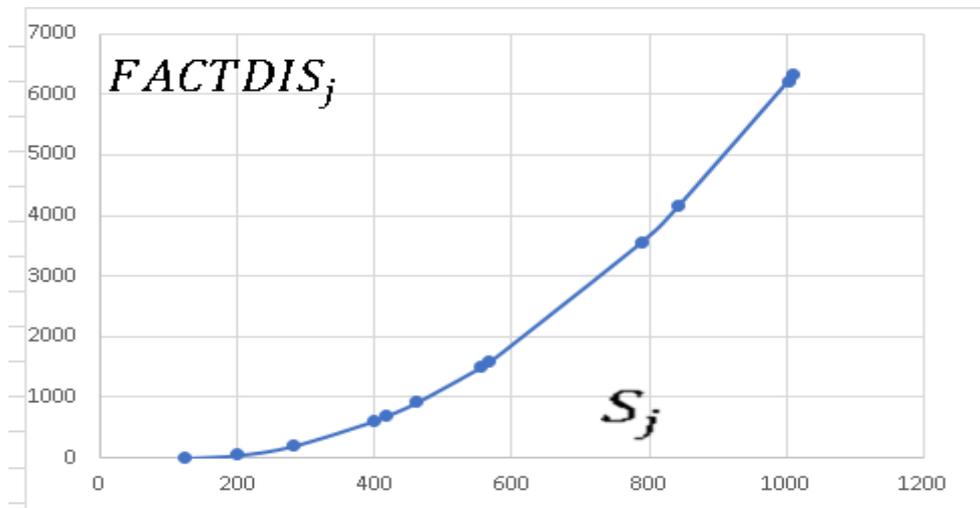


Figura 89 Diagrama con la curva que relaciona las variables distancias recorrida en un trayecto terrestre  $S_j$  y  $FACTDIS_j$ .

### 6.2.3 Nivel de riesgo asociado a un nodo

Si bien el nivel de riesgo asociado a un nodo  $r_j$  es básicamente un parámetro que se incorpora al modelo de optimización, por su importancia para el propósito de este trabajo, se hace necesario dedicar un aparte a la determinación a los valores que toma. Hay que mencionar, además, que resultado de las conclusiones obtenidas del modelo de aplicación inmediata se debe replantear la red bayesiana que establece el nivel de riesgo. En efecto, se excluirá a las condiciones climáticas de la red bayesiana que estable el nivel del riesgo. La siguiente grafica muestra la red bayesiana que se restructuró e implemento en el software

Hugin Lite, para ser integrada al modelo de integral de planeación. Lo anterior, en concordancia con las conclusiones obtenidas de modelo de aplicación inmediata.

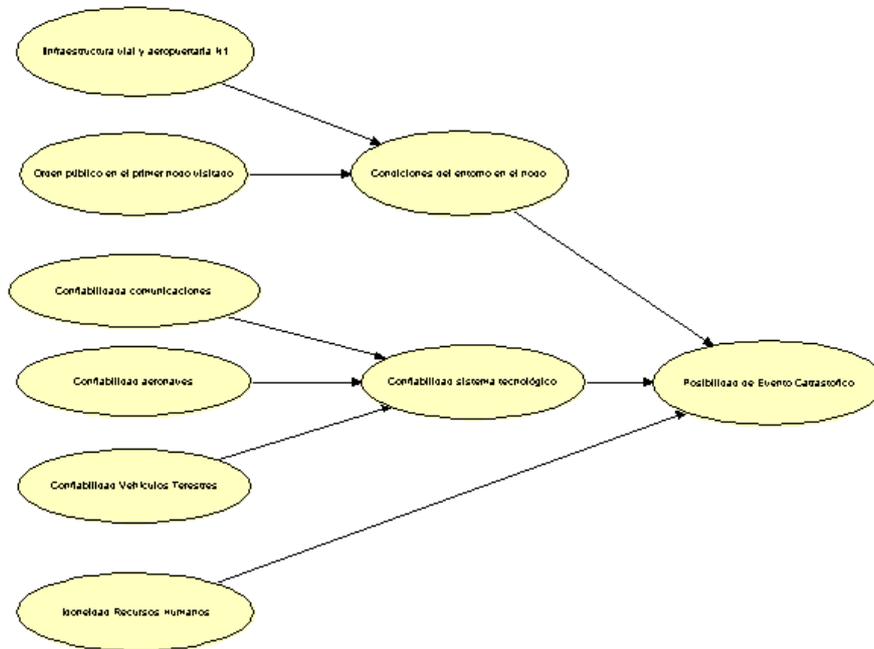


Figura 90 Diagrama elaborado en Hugin Expert de la red bayesiana para modelar el riesgo de un evento catastrófico.

En términos generales las distribuciones de probabilidades condicionales se mantienen exactamente igual a las definidas en el numeral 5.1, implementación de la red bayesiana, no obstante, al excluirse el nodo de condiciones climáticas, se hace necesario establecer una nueva tabla de distribuciones condicionales para el evento de riesgo catastrófico, que adicionalmente, se ha definido en cinco niveles, como se observa en la siguiente tabla. Seguidamente, se presentan los resultados obtenidos de un análisis de datos de tipo descriptivo con el conjunto de datos obtenidos de SIGMA para la existencia, en número de pacas. Se presenta, también, los resultados del análisis por oficina y denominación.

**TABLA 70** Distribución de la variable posibilidad de realización del evento catastrófico, en una operación, dadas las distribuciones de las variables que la condicionan (confiabilidad en el recurso humano, confiabilidad en el sistema tecnológico y condiciones del entorno), para ejecución del modelo de planeación. Creación propia del autor.

| Idoneidad del Recurso Humano            |                | Competente  |           |             |           |             |           | Incompetente |           |             |           |             |           |
|---|----------------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|--------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|
| Confiabilidad en el sistema tecnologico |                | Baja        |           | Media       |           | Alta        |           | Baja         |           | Media       |           | Alta        |           |
| Condiciones del entorno                 |                | Inadecuadas | Adecuadas | Inadecuadas | Adecuadas | Inadecuadas | Adecuadas | Inadecuadas  | Adecuadas | Inadecuadas | Adecuadas | Inadecuadas | Adecuadas |
| PROBABILIDAD DEL EVENTO DE RIESGO       | Insignificante | 2,5%        | 60,0%     | 1,0%        | 70,0%     | 50,0%       | 80,0%     | 0,0%         | 0,0%      | 0,0%        | 1,0%      | 4,0%        | 2,5%      |
|   | Baja           | 20,0%       | 30,0%     | 30,0%       | 20,0%     | 30,0%       | 15,0%     | 0,0%         | 5,0%      | 1,0%        | 23,0%     | 25,0%       | 20,0%     |
|   | Media          | 55,0%       | 8,0%      | 45,0%       | 9,0%      | 15,0%       | 5,0%      | 5,0%         | 15,0%     | 9,0%        | 45,0%     | 50,0%       | 55,0%     |
|   | Alta           | 20,0%       | 2,0%      | 23,0%       | 1,0%      | 5,0%        | 0,0%      | 15,0%        | 30,0%     | 20,0%       | 30,0%     | 15,0%       | 20,0%     |
|   | Inaceptable    | 2,5%        | 0,0%      | 1,0%        | 0,0%      | 0,0%        | 0,0%      | 80,0%        | 50,0%     | 70,0%       | 1,0%      | 6,0%        | 2,5%      |

De esta forma, con la nueva red bayesiana y con las nuevas distribuciones condicionales de probabilidad se tiene un nuevo perfil de riesgo para cada uno de los nodos, de la forma que se observa a en la siguiente tabla:

**TABLA 71** Perfiles de riesgo para un evento catastrófico, por nodo, para ejecución del modelo de planeación. Creación propia del autor.

| SUCURSAL   | Insignificante | baja   | media  | alta   | Inaceptable |
|------------|----------------|--------|--------|--------|-------------|
| ARMENIA    | 0,57           | 0,1893 | 0,1674 | 0,0583 | 0,015       |
| BARRANQ    | 0,6341         | 0,1901 | 0,1303 | 0,0384 | 0,0071      |
| BUCARAM    | 0,6211         | 0,1935 | 0,1346 | 0,0418 | 0,009       |
| CALI       | 0,6278         | 0,1922 | 0,1328 | 0,0397 | 0,0075      |
| CUCUTA     | 0,5965         | 0,2008 | 0,1448 | 0,0473 | 0,0106      |
| IBAGUE     | 0,5413         | 0,197  | 0,1761 | 0,0647 | 0,0209      |
| LETICIA    | 0,4459         | 0,2005 | 0,2057 | 0,0969 | 0,0511      |
| MEDELLIN   | 0,6268         | 0,1926 | 0,1332 | 0,0399 | 0,0075      |
| MONTERIA   | 0,6144         | 0,1955 | 0,1374 | 0,0433 | 0,0094      |
| PASTO      | 0,4904         | 0,2065 | 0,1904 | 0,0784 | 0,0342      |
| QUIBDO     | 0,2839         | 0,1916 | 0,2675 | 0,1418 | 0,1152      |
| RIOHACHA   | 0,3019         | 0,1956 | 0,2767 | 0,1355 | 0,0902      |
| VILLAVICEN | 0,3144         | 0,1946 | 0,2748 | 0,1343 | 0,0818      |

Así las cosas, los valores obtenidos para el parámetro nivel de riesgo asociado a un nodo  $r_j$  son incluidos al modelo integral de planeación, de la forma que se mostró en la formulación.

#### 6.2.4 Demanda simulada

En el capítulo cuarto, se adelantó un análisis estadístico, descriptivo que permitió establecer un conjunto de escenarios probables de la demanda, que sirvieron de insumo inicial para ejecutar el modelo de aplicación inmediata y analizar los resultados obtenidos en un amplio espectro. En este sentido, y con el propósito de garantizar consistencia en el análisis, algunos de estos escenarios son utilizados para ejecutar el modelo integral de planeación y obtener un conjunto de resultados sobre los que se puedan obtener conclusiones importantes.

#### 6.2.5 Esquema operativo para la ejecución del modelo

La ejecución del modelo de optimización integral de planeación se ejecuta utilizando sobre los cincuenta escenarios simulados utilizando el mismo esquema operativo del modelo de aplicación inmediata y que fue expuesto ampliamente en el numeral 4.2.3.

#### 6.2.6 Análisis de los resultados de la ejecución del modelo integral de planeación sobre la demanda simulada

La ejecución del modelo de optimización integral de planeación, con consideración del riesgo, se muestra en las siguientes tablas, en las que se muestre la variación de las variables de resultado, al modificar algunas de las variables de entrada .

- *Resultados con modificación de la demanda:*

| No. de EJECUCIÓN | variable controlada | DEMANDA   | NIVEL DE RIESGO | Costo   | Valor transportado |
|------------------|---------------------|-----------|-----------------|---------|--------------------|
| 1                | DEM                 | 808.702   | 111.868.890     | 213.558 | 364.858.690        |
| 2                | DEM                 | 526.078   | 113.924.870     | 211.014 | 378.753.457        |
| 3                | DEM                 | 540.941   | 115.988.502     | 211.118 | 388.830.057        |
| 4                | DEM                 | 1.013.429 | 106.562.924     | 211.320 | 353.748.327        |
| 5                | DEM                 | 879.728   | 109.783.248     | 211.128 | 36.466.5721        |
| 6                | DEM                 | 1.342.582 | 101.467.590     | 213.558 | 314.118.028        |

*Rafael Iván Bermúdez Acosta*

---

|           |     |           |             |         |             |
|-----------|-----|-----------|-------------|---------|-------------|
| <b>7</b>  | DEM | 1.127.690 | 109.231.356 | 213.558 | 349.802.488 |
| <b>8</b>  | DEM | 405.258   | 114.609.069 | 211.320 | 386.481.375 |
| <b>9</b>  | DEM | 1.252.829 | 107.009.342 | 213.558 | 342.851.164 |
| <b>10</b> | DEM | 861.683   | 110.686.534 | 211.320 | 364.416.025 |

---

**TABLA 72** Resultados de la ejecución del modelo integral de planeación.

## CAPÍTULO 7

### CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS DE INVESTIGACIÓN

#### 7.1 Conclusiones

La provisión de las especies monetarias dentro del territorio geográfico de un País constituye una función fundamental para la economía y para el bienestar de la población que usualmente es adelantada por los bancos centrales de cada estado. En Colombia, esta labor es adelantada por el Banco de la República, mediante un complejo sistema de distribución que puede calificarse como un sistema de abastecimiento de alto valor, por lo que, su operación conlleva altos niveles de riesgo.

Si bien el sistema de distribución de especies monetarias es un sistema único, su conformación es fundamentalmente la misma que la de la mayoría de los sistemas de distribución, por lo que puede ser objeto de estudio, en procura de obtener un sistema mejorado, con las mismas herramientas de optimización que se han venido desarrollando en las últimas décadas. Lo anterior, resaltando, que el análisis del riesgo inherente a la operación debe incorporarse en el estudio como un elemento central.

En este punto final del trabajo se puede concluir que la optimización de un sistema de distribución conlleva la resolución de dos problemas centrales: Encontrar las mejores rutas y por otro lado hacer el mejor uso de los vehículos que transitan por las rutas óptimas. A lo anterior, y que resulta el elemento diferenciador de este trabajo, se le debe adicionar el problema de que el sistema debe propender porque la operación se adelante con menor nivel de exposición al riesgo posible.

Luego de haber resuelto una primera versión de un modelo de optimización pensado para una única operación de distribución, denominado el modelo de aplicación inmediata, se obtuvieron los elementos que permitieron proponer un modelo de planeación integral que, realiza la optimización del sistema considerando el riesgo, a través de dos fases, de la siguiente forma:

- Una primera fase de optimización diseñada para un sistema de distribución con clientes, demandas, capacidades de los vehículos y costos variables. Esta fase se resuelve, de acuerdo con la revisión de la bibliografía adelantada, utilizando un

modelo exacto de Flota Heterogénea (VRPHF). Es importante mencionar que esta primera fase incorpora como parámetros de decisión, además de los usuales para los modelos de ruteo, las condiciones climáticas esperadas.

- La segunda fase incorpora, a manera de parámetros, los resultados de la variable de decisión obtenidos en la primera fase y adelanta un segundo proceso de optimización enfocado en la carga que se debe asignar a cada vehículo, teniendo en cuenta la demanda de cada sucursal, el tipo de vehículo y el nivel de riesgo asociado a cada trayecto. De igual forma que la primera fase, esta se adelanta sobre un modelo de asignación de carga basado en un algoritmo exacto.

Habiendo hecho un conjunto de ejecuciones del modelo, se pudo establecer que este modela adecuadamente el sistema real y que, adicionalmente, cumple con el objetivo propuesto de optimizar la operación considerando, además de los costos, en nivel de exposición al riesgo.

Se puede concluir que el modelo propuesto constituye una nueva herramienta que permitirá al decisor contar con elementos adicionales que como resultado final permitirán el desarrollo de operaciones de transporte de valores menos costosas y más seguras, con el consecuente beneficio para la economía del país.

## 7.2 Perspectivas de investigación

El modelo propuesto, basado en modelos de programación exacta, aborda un número importante de variables relacionadas con el proceso de optimización y con la administración del riesgo por lo que se considera un problema NPduro. En efecto, para resolver el modelo propuesto, se hizo necesario plantear el conjunto de variables incorporadas en el análisis de riesgo como un parámetro del modelo de ruteo. Lo anterior, sugiere que un modelo más dinámico debe incorporar el comportamiento de las variables del análisis de riesgo, de manera inmediata, por lo que debe extenderse el desarrollo de este trabajo al campo de los modelos heurísticos.

Otro enfoque que convendría explorar tiene que ver con la incorporación de una función de utilidad al modelo de optimización, de tal forma que se pueda ajustar el modelo según el grado de aversión al riesgo del decisor.

## Referencias

- Arango Arango, C., & Misas Arango, M. A. (2004). La Demanda de Especies Monetarias en Colombia. *Borradores de economía*.
- Castillo Hernández, M. (2006). *Toma de decisiones en las empresas: Entre el arte y la técnica*. Bogotá D. C.: Universidad de los Andes.
- Castillo, M., & Mendoza, Á. (2004). DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA IDENTIFICACIÓN Y LA MEDICIÓN DEL RIESGO OPERATIVO EN INSTITUCIONES FINANCIERAS. *Revista de Ingeniería*, 45-52.
- Dantzin, A., & Ramser, J. (1959). The Truck Dispatching Problem. *Management Science* 6, 80-91.
- Laporte, G. (1992). The Vehicle Routing Problem: An overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research* 59, 345-358 .
- Martínez Sánchez, J. F., & Venegas Martínez, F. (2011). *Riesgo operacional en el proceso de pago del Procampo Un enfoque bayesiano*. Ciudad de México (México): Escuela Superior de Economía, Instituto Politécnico Nacional.
- Medina, L. R., La Rota, G. G., & Castro, E. O. (2011). Una revisión al estado del arte del problema de ruteo de vehículos: Evolución histórica y métodos de solución. *Ingeniería (Universidad Distrital FJC)*, 35-55.
- Olivera, A. (2004). Heurísticas para Problemas de Ruteo de Vehículos.
- Subgerencia de Gestión de Riesgo Operativo. (2013). *SISTEMA DE GESTIÓN DE RIESGO OPERATIVO - MANUAL*. Bogotá D.C.: Banco de la República.
- Taha, H. A. (2012). *Investigación de Operaciones*. Naucalpan de Juárez, Estado de México: Pearson Educación de México, S.A. de C.V.

ANEXO 1. CODIGO DEL PROGRAMA, EN LENGUAJE GAMS

\$Title Sistema de distribución de efectivo en el Banco Central de Colombia

\$onsymlist

\$onuellist

\$Ontext

Este modelo de optimización busca una solución eficiente al problema de distribución de valores en Colombia. Este modelo ha sido desarrollado como soporte al trabajo de grado "Optimización de un sistema de distribución de valores con un enfoque de administración del riesgo. Caso: banco central de Colombia"

Magíster en Gerencia de Operaciones (Modalidad de profundización)

Elaborado por:

Rafael Iván Bermúdez Acosta

Director:

Edgar Alfonso Lizarazo Ph.D.

Universidad de La Sabana

Escuela Internacional de Ciencias Económicas y Administrativas

Chía, Colombia 2017

ADVERTENCIA: ESTE MODELO SE EJECUTA CON DATOS TRANSFORMADOS, PUES POR RAZONES DE SEGURIDAD LOS DATOS REALES NO PUEDEN SER EXPUESTOS

\$onsymlist

\$onsymxref

\$onuelxref

\$Offtext

set i Nodos corresponden a la oficina principal (CENTRAL DE EFECTIVO) y a trece oficinas regionales

/

\$call =xls2gms r=NODOS!e40:e54 i=HVRPD.xls o=seti.inc

\$include seti.inc

/

ALIAS (i,j,p)

set m Denominaciones de las especies monetarias transportadas \$1000 \$2000 \$5000 \$100000  
\$20000 \$50000 /

\$call =xls2gms r=DENOM!c5:c9 s="," i=HVRPD.xls o=setm.inc

\$include setm.inc

/;

set e etapas / 1\*14 /

set t dias / 1\*10 /

set k Tipo de vehiculo Aereo1 Aereo2 Terrestre /

\$call =xls2gms r=VEHICULOS!c3:c5 s="," i=HVRPD.xls o=setk.inc

\$include setk.inc

/;

table ii(j,m) Inventario inicial en pacas de la especie monetaria de la denominación m en el  
nodo j en el tiempo t = 1

\$call =xls2gms r=INVENTARIO!c48:G62 i=HVRPD.xls o=invin.inc

\$include invin.inc

;

Table li (j,m) Tope inferior a partir en pacas del cual se considera que hay demanda de la  
especie monetaria de la denominación m en el nodo j

\$call =xls2gms r=INVENTARIO!c26:g40 i=HVRPD.xls o=liminf.inc

\$include liminf.inc

;

Table W (j,t) Condición climatica pronosticada para el nodo j en el periodo t

\$call =xls2gms r=RIESGO!c6:m19 i=HVRPD.xls o=conclim.inc

\$include conclim.inc

;

Table s (j,k) Distancia terrestre recorrida por el vehiculo K del deposito al nodo j

\$call =xls2gms r=RIESGO!p6:s19 i=HVRPD.xls o=dister.inc

\$include dister.inc

;

Parameter  $d(j,m)$  demanda de la especie monetaria  $m$  en en nodo  $j$  ;

$$d(j,m) = li(j,m) - ii(j,m);$$

$$d(j,m) \$(d(j,m) < 0) = 1;$$

Parameter  $da(j)$  demanda agregada en numero de pacas en en nodo  $j$  ;

$$da(j) = \text{SUM}(m, d(j,m));$$

Parameter  $exta(j)$  existencias agregadas en numero de pacas en en nodo  $j$  ;

$$exta(j) = \text{SUM}(m, ii(j,m));$$

Parameter  $pst(j)$  porcentaje de stop sobre existencias NO APLICA EN MODELO MULTIPERIODO ;

$$pst(j) = (da(j)/exta(j));$$

Parameter  $pstdem(j,m)$  porcentaje de stop sobre existencias NO APLICA EN MODELO MULTIPERIODO;

$$pstdem(j,m) = (d(j,m)/(da(j)+1));$$

Parameter  $cdem(j,m)$  excluye cargas con denominaciones menores al 20% de la demanda total de un nodo NO APLICA EN MODELO MULTIPERIODO ;

$$cdem(j,m) = 1000000000;$$

$$cdem(j,m) \$(pstdem(j,m) > 0.20) = 1;$$

\$onecho > tiempos.txt

I=HVRPD.xls

R=VEHICULOS!b17:g214

O=tiempos.inc

\$offecho

\$call =xls2gms @tiempos.txt

Table tv(i,j,k)

\$include tiempos.inc

;

Table  $ls(i,m)$  tope superior en pacas a partir del cual se considera que hay oferta de la especie monetaria de la denominación  $m$  en el nodo  $i$

\$call =xls2gms r=INVENTARIO!k26:o40 i=HVRPD.xls o=limsup.inc

\$include limsup.inc

;

Parameter  $o(i,m)$  oferta de la especie monetaria  $m$  en en nodo  $j$  ;

$$o(i,m) = ii(i,m) - ls(i,m);$$

$$o(i,m) = 0 \$(o(i,m) < 0) + o(i,m) \$(o(i,m) \ge 0);$$

Parameter  $oa(i)$  oferta agregada en numero de pacas en en nodo  $i$  ;

$$oa(i) = \text{SUM}(m, o(i,m));$$

\$onecho > param.txt

par=n rng=DENOM!c6 Rdim=1

par=co rng=CAPAC!b4 Rdim=1

par=riesnodinsig rng=RIESGO!j26 Rdim=1

par=riesnodbaja rng=RIESGO!m26 Rdim=1

par=ck rng=VEHICULOS!c3 Rdim=1

par=cmk rng=VEHICULOS!h3 Rdim=1

par=maxtv rng=VEHICULOS!k3 Rdim=1

par=nv rng=VEHICULOS!n3 Rdim=1

par=cpna rng=COSTOS!d54 Rdim=1

\$offecho

\$call gdxrw.exe HVRPD.xls @param.txt trace=0

\$gdxin HVRPD.gdx

Parameters

$n(m)$  Valor nominal en unidades monetarias transformadas

$co(j)$  Maxima capacidad para operar en una remesa en numero de pacas

$riesnodinsig(j)$  Riesgo Nodo en nivel insignificante

$riesnodbaja(j)$  Riesgo Nodo en nivel baja

$ck(k)$  Maxima capacidad de carga de los vehiculos

---

|          |  |
|----------|--|
| cmk(k)   | precio por minuto de viaje                               |
| maxtv(k) | Maximo tiempo de viaje en minutos por dia                |
| nv(k)    | Numero minimo de visitas                                 |
| cpna(j)  | costo en millones de pesos por no sagtisfacer la demanda |

\$load n co riesnodinsig riesnodbaja ck cmk maxtv nv cpna

\$gdxin

Parameter  $c(i,j,k)$  costo en millones de pesos de realizar un traslado desde el nodo origen al nodo destino;

$$c(i,j,k) = cmk(k) * tv(i,j,k) / 1000000;$$

Parameter  $et(e)$  Etapa de visita;

$$et(e) = 0 + ord(e);$$

Parameter  $factdis(j,k)$  establece el valor de un factor que incrementa el costo en las via terrestre de manera adicional a la proporción de la distancia en kilometros;

$$factdis(j,k) = \text{sqr}((1 + (s(j,k)-124)/124)-1) ;$$

scalar  $topol$  valor tope de la poliza en unidades moetarias transformadas / 7652689675 /;

scalar  $facclim$  valor tope de la poliza en unidades moetarias transformadas / 0.5 /;

Variables

Z total costo de la operación de transporte mas el costo de penalizacion por no haber atendido una oficina en millones de pesos variable a minimizar en la función objetivo;

Variables

ZY variable a minimizar en la función objetivo2;

Binary Variables

X (t,i,j,k) indica se si viaja de la ciudad i a la ciudad j en el vehiculo k el dia t;

Positive variable

CTOTAL calcula costo total por no atender toda la demanada

Y (t,i,j,k,m) es la cantidad de pacas de la ciudad i a la ciudad j en el vehiculo k el dia t

U(i,k,t) Etapa en la que se visita cierta ciudad

TTV(k,t) Tiempo total de vuelo

DIA (j) demanda inicial atendida considerando TPS

DNA(j) demanda no atendida

$YEM(t,k,i,j,m)$  valor entregado de la denominación  $m$  en el nodo  $j$  por el vehículo  $k$  variable de decisión en el modelo carga

$QT(j,k,e)$  Carga transportada en vehículo  $k$  en el nodo  $j$  en la etapa  $e$

$Y1(j,m)$  Variable transitoria para el cálculo de la cantidad entregada en el nodo  $J$  por el vehículo  $K$

$YE(k,i,j,m)$  cantidad entregada en el nodo  $J$  por el vehículo  $K$

$EVR(t,i,j,k)$  determina la secuencia de visitas en una ruta

;

Equations

$E\_FUNOBJ$  HVRPD 0) Función principal a optimizar (modelo HVRPD).

$E\_DESTINO(j)$  HVRPD 1) Destino único. Todos los nodos (oficinas sucursales) deben ser visitadas una sola vez por un vehículo.

$E\_ORIGEN(i)$  HVRPD 2) Origen único. Todos los nodos (oficinas sucursales) deben ser punto de partida una sola vez por un vehículo.

$E\_NUM\_MIN\_V(k)$  HVRPD 3) Número mínimo de visitas. Cada vehículo dependiendo del tipo debe realizar como mínimo un determinado número de visitas. Se adiciona uno para no considerar el retorno al depósito como una visita.

$R\_NO\_IGUALES(k,t)$  HVRPD 4a) Evita bucles

$E\_DEP\_UNIC(k,t)$  HVRPD 4) Inicio desde el Depósito. Cada vehículo debe iniciar la ruta en el depósito.

$E\_RETORNO(k,t)$  HVRPD 5) Retorno al Depósito. Cada vehículo debe retornar al depósito.

$E\_FLUJO(t,k,p)$  HVRPD 6) Flujo. El mismo vehículo que ingresa a una sucursal debe abandonarla.

$E\_SUBSICLOS(t,i,j,k)$  HVRPD 7) Para eliminar subciclos

$E\_TIEMPV(k,t)$  HVRPD 8) Calcula para cada vehículo el tiempo de viaje empleado en cada ruta.

$E\_LIMTVDIA(k,t)$  HVRPD 10) Limita el tiempo de viaje. Impide que cada vehículo emplee más tiempo del máximo establecido en la política.

$E\_FUNOBJY$  CARGA 0) Función Objetivo

$R\_VALOR\_DEM(t,k,i,j,m)$  Restringe el valor mínimo a transportar en una operación a la demanda

$E\_REST\_CAP\_OPE(j)$  RESULTADO DE HVRPD 3) Limita la cantidad de pacas entregadas en un nodo (oficina) como máximo a la capacidad operativa en esa oficina.

$E\_REST\_CAP\_VEHI(k)$  RESULTADO DE HVRPD 4) Limita la cantidad de pacas que se carga en vehículo.

R\_VALOR\_POL (t,k) Restringe el valor maximo a transportar en una operacion al valor cubierto por la poliza

E\_CALCULA\_SE (t,i,j,k) Calcula secuencia de visitas por cada vehículo.

E\_CALCULA\_COST\_T Calcula el costo total

;

E\_FUNOBJ.. Z =E= SUM((t,i,j,k), (C(i,j,k)\*factdis(j,k)\* X (t,i,j,k)+(facclim)\*(W(j,t))\*(C(i,j,k)\*factdis(j,k)\* X (t,i,j,k))));

E\_DESTINO (j) \$(ORD(j) > 1) .. SUM[(t,i,k) \$(NOT SAMEAS(i,j) ), X (t,i,j,k)] =E= 1;

E\_ORIGEN (i)\$(ORD(i) > 1) .. SUM[(t,j,k) \$(NOT SAMEAS(i,j)), X (t,i,j,k)] =E= 1;

E\_NUM\_MIN\_V (k)..SUM[(t,i,j) \$(NOT SAMEAS(i,j)), X (t,i,j,k)] =g= nv(k)+1;

R\_NO\_IGUALES(k,t) .. SUM[(i,j)\$(ORD(i) = ORD(j)), X(t,i,j,k)] =E= 0;

E\_DEP\_UNIC (k,t) .. SUM[(i,j)\$(ORD(i) = 1 ), X (t,i,j,k)] =E= 1;

E\_RETORNO (k,t) .. SUM[(i,j)\$(ORD(j) = 1 ), X (t,i,j,k)] =E= 1;

E\_FLUJO (t,k,p) .. SUM[(i) , X(t,i,p,k)] - SUM[(j) , X(t,p,j,k)] =E= 0;

E\_SUBSICLOS(t,i,j,k) \$(ORD(i) > 1 AND ORD(j) > 1 AND NOT SAMEAS(i,j)).. U(i,k,t) - U(j,k,t) + [CARD(i) - 1]\*X (t,i,j,k) =L= CARD(i)-2;

E\_TIEMPV (k,t).. SUM[(i,j),tv(i,j,k)\*X(t,i,j,k)] =E= TTV(k,t);

E\_LIMTVDIA (k,t).. TTV(k,t) =l= maxtv(k);

E\_FUNOBJY.. ZY =E= SUM((i,j,k,m,t),VYEM(t,k,i,j,m)\* riesnodinsig(j)) + SUM((i,j,k,m,t),VYEM(t,k,i,j,m)\* riesnodbaja(j));

R\_VALOR\_DEM (t,k,i,j,m).. VYEM(t,k,i,j,m)=l= d(j,m)\*n(m)\*X.L(t,i,j,k);

E\_REST\_CAP\_OPE(j) .. SUM[(t,i,m,k)\$(ORD(j)> 1) , X.L(t,i,j,k)\* VYEM(t,k,i,j,m)/(n(m)\*1000)] =l= co(j);

E\_REST\_CAP\_VEHI (k).. SUM[(t,i,j,m) \$(ORD(j) > 1) , X.L(t,i,j,k)\* VYEM(t,k,i,j,m)/(n(m)\*1000)] =l=ck(k);

R\_VALOR\_POL (t,k).. SUM((i,j,m), VYEM(t,k,i,j,m)\*X.L(t,i,j,k))=l= topol ;

E\_CALCULA\_SE (t,i,j,k).. EVR(t,i,j,k) =E= X.l(t,i,j,k)\$(ORD(i) = 1) + (U.l(i,k,t)+2)\*X.l(t,i,j,k)\$(ORD(i) > 1 );

E\_CALCULA\_COST\_T.. CTOTAL =E= SUM[(t,i,j,K) \$(NOT SAMEAS(i,j)), X.L (t,i,j,k)\*C(i,j,k)]

;

Rafael Iván Bermúdez Acosta

---

Model HVRPD / E\_FUNOBJ, E\_DESTINO, E\_ORIGEN, E\_DEP\_UNIC, E\_RETORNO, E\_FLUJO,  
E\_SUBSICLOS, E\_NUM\_MIN\_V, E\_TIEMPV, E\_LIMTVDIA/

Solve HVRPD USING MIP MINMIZING Z

Display i, j, m, e, k, t, tv, nv, n, co, ck, cmk, maxtv, et, ii, li, w, facclim, d, da, exta, ls, o, c,  
cpna, s, factdis, pst, topol, Z.L, x.l, ttv.l;

Model CARGA / E\_FUNOBJY, R\_VALOR\_DEM, E\_REST\_CAP\_OPE, E\_REST\_CAP\_VEHI,  
R\_VALOR\_POL, E\_CALCULA\_SE, E\_CALCULA\_COST\_T /

Solve CARGA USING MIP MAXIMIZIG ZY

Display riesnodinsig, riesnodbaja, zy.l, VYEM.l, EVR.l, CTOTAL.l ;

execute\_unload "costohvrpd.gdx" Z.L

execute 'gdxxrw.exe costohvrpd.gdx var=Z.L'

execute\_unload "results.gdx" x.L

execute 'gdxxrw.exe results.gdx var=x.L'

execute\_unload "secuen.gdx" evr.l

execute 'gdxxrw.exe secuen.gdx var=evr.l'

execute\_unload "vyem.gdx" VYEM.l

execute 'gdxxrw.exe vyem.gdx var=VYEM.l'

execute\_unload "clima.gdx" W

execute 'gdxxrw.exe clima.gdx var=W'

execute\_unload 'valent.gdx',vyem.l;

execute '=gdx2xls valent.gdx';

execute '=ShellExecute valent.xlsx';

;