

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**



**MODELO BASADO EN SISTEMA MULTI-AGENTE PARA  
DISTRIBUCIÓN DE AYUDA EN ESPECIE EN LOGÍSTICA  
HUMANITARIA**

**POR**

**JOSÉ ISIDRO HERNÁNDEZ VEGA**

**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTOR EN INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN  
TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN**

**ABRIL, 2019**

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



**MODELO BASADO EN SISTEMA MULTI-AGENTE PARA  
DISTRIBUCIÓN DE AYUDA EN ESPECIE EN LOGÍSTICA  
HUMANITARIA**

**POR**

**JOSÉ ISIDRO HERNÁNDEZ VEGA**

**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTOR EN INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN  
TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN**

**SAN NICOLÁS DE LOS GARZA NUEVO LEÓN, MÉXICO**

**ABRIL DE 2019**



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

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

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis "Modelo basado en Sistema Multi-Agente para distribución de ayuda en especie en Logística Humanitaria" realizada por el alumno(a) "José Isidro Hernández Vega", con número de matrícula 1831334, sea aceptada para su defensa como opción al grado de "Doctorado en Ingeniería con orientación en Tecnologías de la Información"

El Comité de Tesis

Dr. Romeo Sánchez Nigenda  
Director

Dr. José Fernando Camacho Vallejo  
Revisor

Dr. Alejandro Rosales Pérez  
Revisor

Dr. Luis Martín Torres Treviño  
Revisor

Dr. Francisco Torres Guerrero  
Revisor

Vo. Bo.

Dr. Simón Martínez Martínez  
Subdirector de Estudios de Posgrado



San Nicolás de los Garza, Nuevo León, 12 de Abril de 2019

*A Dios fortaleza de mi espíritu.*

*A mi esposa Blanca Estela por su apoyo y confianza.*

*A mi hija Velia por su tiempo para dedicarme a esta tesis.*

# ÍNDICE GENERAL

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>VIII</b>
<b>Resumen</b>	<b>IX</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación del problema . . . . .	2
1.2. Planteamiento del Problema . . . . .	7
1.2.1. Descripción del problema . . . . .	7
1.2.2. Modelo propuesto del problema . . . . .	8
1.3. Hipótesis . . . . .	12
1.4. Justificación . . . . .	12
1.5. Objetivos . . . . .	15
1.6. Estructura de la tesis . . . . .	16
<b>2. ANTECEDENTES</b>	<b>18</b>
2.1. Conceptos relacionados al problema . . . . .	19
2.1.1. Logística Humanitaria . . . . .	19

---

2.1.2.	Elementos involucrados en Logística Humanitaria . . . . .	20
2.1.3.	Características de Logística Humanitaria . . . . .	21
2.2.	Categorización del problema . . . . .	22
2.2.1.	Metodología para los antecedentes del estado del arte . . . . .	24
2.2.2.	Taxonomía de los problemas identificados en la distribución de ayuda en especie . . . . .	26
2.2.3.	Soluciones encontradas con las técnicas revisadas . . . . .	29
2.3.	Trabajos relacionados . . . . .	32
2.3.1.	Diferencia del SMA propuesto con respecto a la revisión de los trabajos relacionados . . . . .	43
<b>3.</b>	<b>METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN</b>	<b>48</b>
3.1.	Introducción a la metodología utilizada . . . . .	48
3.2.	Diseño de investigación . . . . .	49
3.3.	Variables . . . . .	50
3.4.	Muestra . . . . .	51
3.5.	Instrumento . . . . .	51
3.6.	Análisis del Sistema Multi-Agente propuesto y su solución . . . . .	52
3.6.1.	Propuesta de diagrama general del Modelado de Logística Hu- manitaria . . . . .	52
3.6.2.	Propiedades de los componentes del modelo . . . . .	53
3.6.3.	Política del algoritmo implementado . . . . .	57

---

3.6.4. Diagrama de objetivos del modelo . . . . .	59
<b>4. EVALUACIÓN EMPÍRICA Y ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>60</b>
4.1. Caso de estudio . . . . .	60
4.1.1. Mapeo para el caso de estudio . . . . .	63
4.1.2. Consideraciones generales para los experimentos realizados . .	64
4.2. Experimentos realizados . . . . .	66
4.2.1. Experimento A: Impacto de los agentes en la distribución de ayuda . . . . .	66
4.2.2. Ejecución del experimento A y análisis de resultados . . . . .	67
4.2.3. Experimento B: Impacto de la demanda en los agentes en la distribución de ayuda . . . . .	73
4.2.4. Ejecución del experimento B y análisis de resultados . . . . .	74
<b>5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO</b>	<b>80</b>
5.1. Trabajo futuro . . . . .	83

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

1.1. Representación gráfica del modelo . . . . .	9
2.1. Clasificación de problemas encontrados en la revisión de la literatura para la distribución de ayuda en especie en caso de desastre . . . . .	26
2.2. Soluciones encontradas en la revisión de la literatura para la distribución de ayuda en especie en caso de desastre. . . . .	30
3.1. Notación de la simbología utilizada. Fuente: Elaboración propia JIHV (2017). . . . .	53
3.2. Diagrama general propuesto para el modelo de distribución de ayuda en especie para logística humanitaria en situaciones post-desastres naturales. Fuente: Elaboración propia JIHV (2017). . . . .	54
3.3. Diagrama de objetivos del SMA. . . . .	59
4.1. Clasificación de zonas sísmicas de la Ciudad de México. Fuente de Protección Civil (2018). . . . .	61
4.2. Comparación en costo de la ruta, zona 1 . . . . .	69
4.3. Comparación de recargas en zona 1 . . . . .	69
4.4. Comparación del costo de la ruta en zona 2 . . . . .	71

---

4.5. Comparación de recargas en zona 2 . . . . .	72
4.6. Comparación del tiempo de ejecución en las dos zonas, en impacto de los agentes . . . . .	72
4.7. Comparación del costo de la ruta en satisfacción de la demanda, zona 1	75
4.8. Comparación del costo de la ruta en satisfacción de la demanda, zona 2	77
4.9. Comparación de recargas de agentes al centro de distribución para satisfacer demanda, zona 1 . . . . .	77
4.10. Comparación de recargas de agentes al centro de distribución para satisfacer demanda, zona 2 . . . . .	78
4.11. Comparación en zonas del tiempo de ejecución de los agentes para satisfacer demanda . . . . .	79

# ÍNDICE DE TABLAS

---

1.1. Inteligencia Artificial y trabajos encontrados . . . . .	14
1.2. Investigación de Operaciones y trabajos encontrados . . . . .	15
2.1. Problemas de análisis y su relación con los trabajos de investigación encontrados en Técnicas de Investigación de Operaciones . . . . .	34
2.2. Problemas de análisis y su relación con los trabajos de investigación encontrados en Técnicas de Inteligencia Artificial . . . . .	39
4.1. Clasificación de zonas para el caso de estudio . . . . .	62
4.2. Datos del caso de estudio por delegación de las zonas . . . . .	62
4.3. Cálculo del índice de riesgo para las zonas . . . . .	63
4.4. Colonias representadas en cada nodo para el modelado . . . . .	63
4.5. Población por nodo para el modelado . . . . .	64
4.6. Área del grid para el modelo . . . . .	64
4.7. Demanda de producto para el modelado . . . . .	64
4.8. Configuración para el Sistema Mono-Agente . . . . .	65
4.9. Configuración para el Sistema Multi-Agente . . . . .	66

---

4.10. Impacto de los agentes en la zona 1 (bajo riesgo) . . . . .	68
4.11. Impacto de los agentes en la zona 2 (alto riesgo) modelada . . . . .	70
4.12. Impacto de la demanda en agentes, zona 1 (bajo riesgo) . . . . .	74
4.13. Impacto de la demanda en agentes, zona 2 (alto riesgo). . . . .	76

# AGRADECIMIENTOS

---

Agradezco a Dios por permitirme estudiar este posgrado.

Agradezco al Dr. Romeo Sánchez Nigenda quien me dirigió durante el desarrollo de esta tesis de investigación, por su tiempo y sus conocimientos transmitidos.

A mi comité tutorial.

A todos los Doctores que me impartieron sus conocimientos en el Doctorado en Ingeniería con Orientación en Tecnologías de Información.

Al Tecnológico Nacional de México por su apoyo brindado para realizar estos estudios.

Al Instituto Tecnológico de Nuevo León, mi Centro de Trabajo a través de sus directivos, jefes de departamento, presidente de academia y personal administrativo por su apoyo en las gestiones académicas y administrativas que contribuyeron a que estudiara este posgrado.

A mis amigos Mario, Jonam, Pedro, Arturo por sus consejos y ánimos para terminar el posgrado.

# RESUMEN

---

José Isidro Hernández Vega.

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

Universidad Autónoma de Nuevo León.

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Título del estudio: MODELO BASADO EN SISTEMA MULTI-AGENTE PARA DISTRIBUCIÓN DE AYUDA EN ESPECIE EN LOGÍSTICA HUMANITARIA.

Número de páginas: 95.

**OBJETIVOS Y MÉTODO DE ESTUDIO:** En esta tesis se aborda el problema de ruteo de vehículos a través de un Sistema Multi-Agente para la distribución de ayuda en especie en las actividades de logística humanitaria.

El objetivo de la logística humanitaria es satisfacer las necesidades de las personas afectadas por un desastre lo más rápido posible. Esto incluye proveer de soporte, servicios, materiales, productos, y transporte a los involucrados en la asistencia a los damnificados. El objetivo general de la tesis consistió en desarrollar un modelo para el ruteo de vehículos con agentes para distribución de ayuda en logística humanitaria.

La metodología utilizada consistió en programar el modelo con Sistemas Multi-Agentes basado en la arquitectura BDI (Belief-Desire-Intention) implementado bajo

el lenguaje de programación Java en el entorno de programación eclipse y con la herramienta para Sistemas Multi-Agentes JASON.

El modelo desarrollado se aplicó a un caso de estudio para sismos que pudieran ocurrir en la Ciudad de México, donde se clasificaron dos zonas en caso de temblores, la primera de bajo riesgo y la segunda de alto de riesgo.

La selección de la muestra se generó de manera aleatoria con escenarios que simularon características reales del desastre en base al caso de estudio aplicado.

Se diseñaron dos experimentos, el primero del Sistema Multi-Agente y el segundo de un Sistema Mono-Agente para comparar las soluciones a los casos de evaluación propuestos: el impacto de los agentes en la distribución de ayuda humanitaria y la del impacto de la demanda en los agentes en la distribución de ayuda.

CONTRIBUCIONES Y CONCLUSIONES: Se propone un modelo implementado en un prototipo de simulación que permite evaluar escenarios de logística humanitaria dada una flotilla de vehículos, ubicados en un centro de distribución y con características homogéneas . El modelo está basado en agentes aumentados con algoritmos tradicionales de VRP (Vehicle Routing Problem) que representan el problema de logística humanitaria y obtienen soluciones al mismo. El modelo se evaluó considerando el costo de las soluciones, tomando en cuenta cantidad de agentes y demanda variable.

El estudio aporta un nuevo modelo basado en agentes para distribución de ayuda humanitaria. Dicho modelo planifica la ruta haciendo uso de agentes que distribuyen artículos de primera necesidad a través de un grafo. El modelo contribuye a la toma de decisiones en logística humanitaria y se comprobó que un Sistema Multi-Agente (SMA) resulta más eficiente que un Sistema Mono-Agente en el trabajo distribuido.

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

Dr. Romeo Sánchez Nigenda

## CAPÍTULO 1

# INTRODUCCIÓN

---

En este trabajo se estudia un problema de distribución de recursos en especie que surge en el contexto de las actividades en logística humanitaria. Así como la logística de la cadena de suministro es crítica para el área empresarial, la logística humanitaria lo es para el caso de desastres.

Los desastres naturales son eventos que el ser humano no está en posibilidades de controlar, no puede evitar su ocurrencia y su grado o magnitud, por lo que para hacerles frente es necesario diseñar sistemas, métodos y herramientas que contribuyan a los procesos de la logística humanitaria.

Estos procesos asociados a logística humanitaria son: planificar, implementar y controlar de manera eficiente, el flujo y almacenamiento de materiales y de información relacionada, desde el punto de origen al punto de consumo, con el propósito de satisfacer las necesidades de los beneficiarios y aliviar el sufrimiento de la población vulnerable. Su objetivo fundamental es satisfacer las necesidades de las personas afectadas por un desastre lo más rápido posible.

Esto incluye proveer de soporte, servicios, materiales y transporte a los involucrados. En la asistencia a los damnificados es importante atender necesidades básicas como albergue, alimentación, artículos de primera necesidad, atención pre-hospitalaria, medicamentos.

El problema que se aborda es el de distribución de recursos en especie y está asociado al problema de ruteo de vehículos (VRP), el cual trata sobre la distribución de bienes entre almacenes y clientes, para nuestro caso centros de distribución y zonas afectadas. De forma general el VRP consiste en: dado un conjunto de clientes, almacenes dispersos geográficamente, una flota de vehículos, se determina un conjunto de rutas de costo mínimo que comiencen y terminen en los almacenes, para que los vehículos visiten a los clientes para satisfacer sus necesidades de demanda de productos que requieran estos clientes.

A diferencia del VRP genérico en la logística humanitaria se busca optimizar el diseño de enrutamiento (proceso de distribución de productos en especie de primera necesidad desde los centros de distribución hacia las zonas afectadas) de tal manera que la demanda de productos este satisfecha, sin violar ninguna restricción específica del problema, como una ruta, una distancia máxima o restricciones relacionadas con el tiempo. En resumen el problema consiste en optimizar la entrega de ayuda desde los centros de distribución hasta las zonas afectadas.

En la revisión de la literatura se encontró que este problema de distribución de ayuda en especie se puede solucionar bajo dos técnicas principales: Técnicas de Investigación de Operaciones y Técnicas de Inteligencia Artificial. La contribución del trabajo presentado está orientado a Técnicas de Inteligencia Artificial mediante Sistemas Multi-Agentes.

## 1.1 MOTIVACIÓN DEL PROBLEMA

La ocurrencia de los desastres naturales en el mundo en años recientes ha aumentado, lo que implica un mayor riesgo para las poblaciones, como pérdidas humanas y materiales. La magnitud del desastre varía de acuerdo a las características físicas, geográficas, económicas y nivel de desarrollo del país afectado. Según Bohórquez y Enrique (2011), la población de los países subdesarrollados presenta

mayor vulnerabilidad ante los desastres naturales, esto debido a que presentan bajos niveles de ahorro, así como de inversión y crecimiento económico, también existen deficiencias en la planificación del desarrollo urbano. Existen poblaciones que no tienen acceso a suelo urbano y deben asentarse en lugares o zonas no adecuadas para ser habitadas, lo que los coloca en una situación de peligro y provoca el incremento de muertes, lesiones y pérdida de viviendas al ocurrir un desastre. Esta característica de subdesarrollo provoca mayor vulnerabilidad de la población ante la ocurrencia de un siniestro.

La población de los países subdesarrollados presenta mayor vulnerabilidad ante la ocurrencia de desastres naturales en comparación con los desarrollados. Dentro de los países subdesarrollados existen diferentes niveles de desarrollo, Guerrero Compéan *et al.* (2017), menciona que aquellos que tienen menores grados de desarrollo presentan efectos humanitarios más graves, como ejemplo se pueden mencionar los 222,570 fallecidos en el terremoto de Haití, ocurrido el 12 de enero de 2010.

En el año 2011, las catástrofes naturales tuvieron un impacto devastador en la humanidad. En todo el mundo, se reportaron desastres naturales, los cuales causaron la muerte de más de 30 770 personas, causaron 244 millones de damnificados y causaron un monto récord de \$ 366 mil millones de dólares en daños. Un total de 101 países fueron afectados por estos desastres. Los cinco países que más sufrieron fueron, Filipinas, Estados Unidos, China, India e Indonesia, representaron el 31 % de la ocurrencia total de desastres en 2011, Guha-Sapir *et al.* (2012).

En 2015, se registraron 376 desastres naturales, China, Estados Unidos, India, Filipinas e Indonesia constituyen los cinco principales países afectados por los desastres en ese periodo. La distribución de los desastres en todos los continentes en 2015 es la siguiente: Asia fue el más afectado (44,4%), seguido por las Américas (25,5%), África (16,5%), Europa (7,2%) y Oceanía (6,4%) de acuerdo con Guha-Sapir *et al.* (2015). El problema de los desastres naturales es de importancia mundial.

La Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), ha dado un seguimiento a los daños ocasionados por desastres en América Latina desde 1972 Bello *et al.* (2014). La CEPAL coordinó 88 reportes de estimaciones de impacto de desastres en 28 países de la región, el costo de los 88 desastres en el mencionado período fue de aproximadamente \$ 213 mil millones de dólares reales, causaron 309,742 fallecimientos y afectaron alrededor de 30 millones de personas. Con respecto al impacto económico, los daños fueron de aproximadamente 150 mil millones de dólares.

La fuerza de la naturaleza se manifiesta a través de fenómenos perturbadores tales como sismos, volcanes, ciclones tropicales, inundaciones, etc., que por la energía con que se desarrollan, el tamaño del área que afectan y la frecuencia con que ocurren, pueden afectar gravemente los asentamientos humanos.

En el caso de México, éste país se encuentra sujeto a una amplia variedad de fenómenos naturales con alto potencial destructivo, lo cual, combinado con altas concentraciones poblacionales, en las que se tienen elevados grados de vulnerabilidad física y social, propician un gran riesgo de desastre.

El riesgo de desastres en México de acuerdo a datos estadísticos sobre desastres naturales en América Latina que comprenden del año 1980 al 2014 Guha-Sapir *et al.* (2015), México presentó la mayor frecuencia anual promedio de desastres en América Latina la cual fue de 5.71, seguido de Colombia con 3.83, Perú con 3.74 y Haití con 2.54.

Cuando ocurre un desastre se presentan problemas de planeación, organización y control en sus tres etapas: antes, durante y después de la ocurrencia de la catástrofe. Antes del desastre se requiere generar capacidad suficiente para responder a una situación de desastre. Durante el desastre reducir su impacto, salvar vidas, prevenir y evitar mayor daño. Después del desastre se busca regresar a las condiciones normales antes de que ocurriera la catástrofe.

En los desastres la falta de integración y coordinación en la cadena de suminis-

tro puede provocar pérdidas humanas y costos elevados para el Estado, los Municipios y las familias. En la distribución de ayuda se cuenta con personas con diferentes roles y funciones, se tiene información dispersa, procesos complejos e inciertos, se opera bajo condiciones adversas. Además se tienen sistemas de distribución cambiantes debido a las características del siniestro y del lugar de ocurrencia, recursos dependientes del tipo de desastre, que resulta en incertidumbre de las fuentes de abasto.

La ayuda que llega a los centros de distribución está mal organizada y en la mayoría de los casos se tienen productos que son innecesarios, además insuficiencia de transporte para el reparto, problemas de carreteras dañadas, falta de combustibles, un desconocimiento de la situación en las zonas de desastre y falta de datos para operar en la etapa de respuesta.

Estas problemáticas motivan a encontrar soluciones en logística humanitaria para evitar donaciones de objetos, alimentos y medicinas que no serán usados o no podrán ser llevados al lugar requerido. Lo que se busca es asignar eficientemente recursos específicos y disponer de ellos de manera anticipada en zonas seguras y cercanas a las zonas de riesgo, disponer de mecanismos de comunicación acordes a las condiciones sociales, económicas, políticas y culturales de la región, estimar vulnerabilidad por zonas y tipos de desastre.

En la distribución de la ayuda para logística humanitaria se presentan problemas como el definir qué cantidad de productos se van a distribuir y bajo que medio de transporte, cuántos centros de acopio se tienen disponibles, cuántas zonas afectadas se van a atender y cómo las podemos clasificar, qué cantidad de personas han sido afectadas por el desastre, cómo se encuentran las redes de transporte, que tan seguro es realizar una distribución de un punto origen a un punto destino. Es relevante modelar estos problemas para diseñar soluciones que permitan optimizar objetivos específicos ante una situación real de un desastre.

Los modelos orientados a la distribución de ayuda en especie contribuyen a

realizar una mejor planificación, control eficiente de estos recursos, mejorar el flujo y almacenamiento de materiales y de información, ante una situación de un desastre natural en su etapa de respuesta.

Es importante desarrollar modelos que contribuyan a realizar esta distribución bajo consideraciones de daños en la red de distribución, condiciones para el manejo de restricciones en la entrega de productos, determinación de las zonas de distribución.

Con los modelos desarrollados se pueden desarrollar Sistemas de Información especializados que ayuden a la solución de los problemas de logística humanitaria, tales como sistemas avanzados de planeación para la toma de decisiones estratégicas, clasificación del desastre, diseño de operaciones de respuesta humanitaria en los primeros momentos tras la ocurrencia de un desastre. Se requieren Sistemas de Información de apoyo a la toma de decisiones para operaciones logísticas enfocado a los problemas de ruteo de transportes o sistemas muy específicos en el contexto de la distribución de ayuda humanitaria, se requiere un enfoque científico para la toma de decisiones.

Es importante buscar diseños y operaciones de sistemas bajo recursos escasos de distribución, utilizar modelos y técnicas cuantitativas para contar con un proceso de selección de alternativas para el problema de distribución en logística humanitaria.

La tesis buscó:

1. Generar un nuevo conocimiento en modelar propiedades prioritarias en la logística humanitaria en la distribución de ayuda mediante ruteo de vehículos.
2. Generar nuevos modelos teóricos basados en agentes.
3. Desarrollar un modelo implementado en un prototipo de simulación que permitió evaluar métricas y escenarios de logística humanitaria
4. Hacer uso de agentes aumentados con algoritmos tradicionales de VRP que representan el problema de logística humanitaria y obtienen soluciones al mismo.

5 Aportar un modelo de planificación basado en agentes que contribuya a la distribución de ayuda humanitaria en especie, ante una situación de un desastre natural en su etapa de respuesta.

## 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El problema se plantea de la siguiente manera: dado un conjunto de zonas afectadas por un desastre y centros de acopio, distribuidos geográficamente, se tienen una flota de vehículos terrestres, se desea encontrar un conjunto de rutas que lleven los productos en especie a los damnificados que se encuentran en las zonas de desastre, de tal manera que optimice el costo de la ruta del centro de distribución a las zonas de desastre con los productos en especie solicitados.

Se identifican tres características principales en el problema, que son: las zonas afectadas, los centros de distribución y la flota de vehículos terrestres. Las zonas afectadas son entidades que tienen una demanda de productos en especie. Estos productos en especie son enviados desde un centro de distribución, mediante el uso de una flotilla de vehículos. Cada vehículo tiene una capacidad definida. Cada vehículo tiene la restricción de iniciar y terminar su ruta en el centro de distribución con el objetivo de satisfacer la demanda de las zonas afectadas. El problema es que la demanda de productos no se conoce a priori, por lo que parte del problema consiste en descubrirla.

El problema se plantea sobre una red de caminos mediante un grafo. En el grafo los arcos representan los tramos de carretera y cuyos vértices corresponden a las uniones de caminos, a las locaciones del centro de distribución y de las zonas afectadas por el desastre. Cada arco tiene asociado un costo, el cual, por lo general,

representa su longitud.

Este problema es innovador porque considera las características de un Sistema Multi-Agente aplicado a la distribución de ayuda en especie en situaciones post-desastre, considerando el medio ambiente para su modelación, facilitando la toma de decisiones, la interacción de los agentes inteligentes con el ambiente, el auto-aprendizaje, la comunicación y coordinación en la solución del problema de distribución de ayuda.

El problema considerado está enfocado en la eficiente distribución de la ayuda en especie de los centros de distribución a las zonas afectadas, satisfaciendo la demanda de productos a los damnificados.

### 1.2.2 MODELO PROPUESTO DEL PROBLEMA

El problema de interés puede verse como sigue: dada una emergencia de ayuda humanitaria donde existen  $N$  puntos de desastre con necesidades para recibir ayuda  $\{k_1, k_2, k_3, \dots, N\}$  y existe un centro de distribución  $Q$  donde se almacenan los productos a distribuir, definimos el modelo bajo las siguientes consideraciones:

- **Grafo**

- El centro de distribución está conectado con las zonas de desastre mediante un Grafo  $G$  que está definido como un par  $(V, E)$ , donde  $V$  es el conjunto de nodos que representan las zonas de desastre  $\{k_1, k_2, k_3, \dots, N\}$  y  $E$  son los caminos o aristas las cuales es un conjunto de pares de la forma  $(u, v)$  tal que  $u, v \in V$ . Las aristas representan los caminos entre el centro de distribución y las zonas de desastre además de los caminos entre zonas afectadas. Gráficamente el modelo se puede representar mediante la Figura 1.1.
- Todos los caminos desde el centro de distribución hasta la zona de desastre

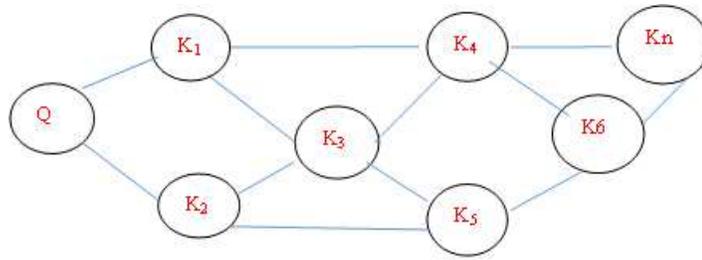


Figura 1.1: Representación gráfica del modelo

son posibles de recorrer.

- Para el problema se consideraron clústers para dividir la zona afectada. Los clústers son subgrafos del grafo  $G$ , donde los nodos y aristas son subconjunto del grafo  $G$ . Formalmente lo definimos como: sea  $G = (V, E)$  el grafo a modelar para el desastre. Un subgrafo de  $G$  es un par  $(V', E')$  donde  $V' \subseteq V$  y  $E' \subseteq E$ .
- Los medios de transporte se asignan a los clústers para realizar la distribución de ayuda.
- $E_{Qk}$  distancia entre el centro de distribución  $Q$  y la zona de desastre  $k$ .

#### ■ *Productos*

- Para el centro de distribución  $Q$ , existe un conjunto de productos  $P$ . Cada producto  $p \in P$  es un producto de primera necesidad a distribuir (e.j., agua potable, comida enlatada, medicamentos, papel, ropa, entre otros).
- $S_{pQ}$  Representa la cantidad de productos disponibles  $p$  en el centro de distribución  $Q$ .
- $C_{pmQk}$  Costo de enviar un cargamento de productos por el medio de transporte  $m$  desde el centro de distribución  $Q$  hacia la zona de desastre  $k$ .

#### ■ *Medio de Transporte*

- $M$  denota el conjunto de medios de transporte a utilizar para distribuir los productos.

- $A_m$  Capacidad del vehículo  $m$ .
  - Se consideran vehículos terrestres, mismo tipo y dimensiones.
  - Es una flota de vehículos limitada y homogénea.
  - Se asignan tareas de programación a cada vehículo y se da salida de ruta para su recorrido.
  - Un transporte puede realizar su entrega de ayuda a la zona de desastre de acuerdo a su clúster asignado.
  - Se considera que se atienden varias zonas a la vez.
- ***Ruta***
- Es el recorrido que realiza el medio de transporte a través de su clúster, visitando las zonas de desastre asignadas para satisfacer su demanda, volviendo al centro de distribución como punto de partida.
  - La ruta es recorrida en cada clúster por los medios de transporte a través del algoritmo del vecino más cercano para el Problema del Agente Viajero - TSP (Travelling Salesman Problem).
  - Cuando un medio de transporte se queda sin carga durante su ruta TSP, el medio de transporte tiene la capacidad de regresar al Centro de Distribución a través de la ruta más corta entre el nodo donde se quedó sin carga y el Centro de Distribución (algoritmo Dijkstra), con la finalidad de recargarse de producto. El TSP se vuelve dinámico
- ***Centro de Distribución***
- Un solo Centro de Distribución, varias zonas de afectación (de demanda).
  - La cantidad total de cada producto disponible en el centro de distribución es suficiente para cubrir la demanda de los puntos de desastre.
  - Cada vehículo puede ir a las zonas de desastre de su clúster asignado, partiendo del Centro de Distribución.

- La zona de origen es el Centro de Distribución. La zona de destino, es la zona afectada (punto de demanda).
- **Zonas afectadas**
    - $K$  denota el conjunto de zonas de desastre con necesidades de demanda para recibir ayuda, estas zonas afectadas representan los nodos en el grafo.
    - Se consideran  $N$  zonas de afectación.
    - Las zonas se generan de manera aleatoria en el grafo.
    - Un grupo de zonas afectadas están en un clúster formando un subgrafo del grafo  $G$ .
- **Demanda**
    - La demanda  $D_{pk}$  se define como la cantidad de productos  $p$  requeridos en la zona de afectación  $k$ .
    - Se atienden varias zona de demanda a la vez por el SMA.
    - La demanda se satisface como lo indica la zona de desastre.
    - La demanda se va descubriendo por los agentes en el modelo.
- **Tiempo**
    - Se considera el tiempo de ejecución para la entrega del producto.
    - Un solo periodo, se considera un viaje de ida y vuelta al Centro de Distribución.
- **Definición del ambiente**
    - **Ambiente:** Sistema Multi-Agente para distribución de ayuda en especie en logística humanitaria.
      - **Parcialmente observable:** Debido a que el entorno se encuentra fuera del alcance de los sensores.

- **Determinístico:** Debido a que la acción que realiza el agente tienen un único efecto en él, no tiene incertidumbre del estado que resultará una vez que ejecute una acción.
- **Secuencial:** Debido a la serie de decisiones que tiene que tomar el agente para ejecutar su tarea, debe de ir llevando una bitácora de la trayectoria que sigue.
- **Dinámico:** Debido a que pueden existir cambios en el entorno del desastre natural, cambios en las condiciones del agente o situaciones que cambian con el tiempo por la naturaleza de los daños provocados por desastre.
- **Continuo:** Debido a que existen diferentes estados continuos para los agentes que pueden cambiar sus planes de acción.

La función de optimización que se persigue es *Optimizar la suma total de los costos de las rutas de los vehículos para la satisfacción de la demanda de los clústers, desde el Centro de Distribución  $Q$  a la zona de desastre  $k$*

### 1.3 HIPÓTESIS

La aplicación de una estrategia para la distribución de ayuda humanitaria en especie basada en un Sistema Multi-Agente (SMA), permite optimizar el costo de la suma de las rutas para la satisfacción de la demanda de los centro de distribución a la zona de desastre de los productos de primera necesidad con respecto a un Sistema Mono Agente.

## 1.4 JUSTIFICACIÓN

El modelado de toma de decisiones en Logística Humanitaria se realiza generalmente mediante dos técnicas principales que son: Técnicas de Investigación de Operaciones (IO), que construyen soluciones mediante modelos matemáticos como la programación lineal entera, entera mixta, multiobjetivo y métodos estocásticos; y Técnicas de Inteligencia Artificial (IA), que construyen modelos mediante Sistemas Multi-Agentes (SMA), algoritmos genéticos, evolutivos y metaheurísticos.

De acuerdo a la información revisada de manera previa a la realización de este trabajo se encontró que existen gran cantidad de estudios relacionados con Técnicas de Investigación de Operaciones (IO), que son de carácter estático y en los que se pueden modelar problemas de pequeñas dimensiones, pocas variables y demasiadas restricciones, cantidad de vehículos, conocimiento de la demanda, que no representan características de un escenario real de desastre, en el que hay daños en la red, se desconoce la demanda, hay escases de información y los datos cambian constantemente.

El modelado de toma de decisiones de distribución de ayuda en especie en caso de desastres mediante técnicas de Inteligencia Artificial (TIA) incluye aspectos más dinámicos y se atienden características más apegadas a una situación real de desastre como los cambios en la demanda, daños a la red, atención a zonas de desastre en varios periodos y al mismo tiempo, cantidad de transporte limitada.

De acuerdo a la revisión del estado del arte que se realizó se encontraron una menor cantidad de estudios en técnicas de inteligencia artificial en el problema de logística humanitaria, un total de 27 artículos como se muestra en la Tabla 4.1.

Mientras en técnicas de investigación de operaciones se encontraron 36 artículos como se muestra en la Tabla 4.2.

Por esta razón se realizó este trabajo ya que se considera que un modelo de

Tabla 1.1: Inteligencia Artificial y trabajos encontrados

Técnicas de Inteligencia Artificial	Soluciones	Número de Artículos	Autores y años
Sistemas Multi-Agentes	Sistemas Multi-Agentes y VRP	6	Xanthopoulos y Koulouriotis (2013), Hernández-Vega <i>et al.</i> (2016), Zidi <i>et al.</i> (2013), Nadi y Edrisi (2017), Hooshangi y Alesheikh (2017), Das y Hanaoka (2014).
Algoritmos Genéticos, Evolutivos.	Algoritmos Genéticos	15	Mguis <i>et al.</i> (2014), Na y Zhi (2009), Chen y Gong (2016), Feihu <i>et al.</i> (2016), Li <i>et al.</i> (2011), Barzinpour <i>et al.</i> (2014), Zhang <i>et al.</i> (2014), Chou <i>et al.</i> (2014), Nasiri y ShisheGar (2014), Esmaeili y Barzinpour (2014), Sheng <i>et al.</i> (2015), Gan <i>et al.</i> (2016), Sheu (2007), Chang <i>et al.</i> (2014), Berkoune <i>et al.</i> (2012).
	Algoritmos Evolutivos	1	Zheng <i>et al.</i> (2015b)
Algoritmos Metaheurísticos	Algoritmos de enjambres	5	Ruan <i>et al.</i> (2014), Mohammadi <i>et al.</i> (2016), Zheng y Ling (2013), Rolland <i>et al.</i> (2010), Liu <i>et al.</i> (2017).

toma de decisiones mediante agentes inteligentes puede contribuir a satisfacer la demanda y optimizar el costo de la ruta en la distribución de ayuda en especie a los damnificados en una situación post-desastre, ofrece la ventaja de coordinación y comunicación en tiempo real debido a que los agentes inteligentes están en interacción con él ambiente, obtienen información de este y poseen la característica de auto-aprendizaje.

En situaciones posteriores a la ocurrencia de un desastre es fundamental que la ayuda humanitaria llegue lo más pronto posible a los damnificados para reducir los decesos por inanición o enfermedad y aliviar en parte el sufrimiento humano, por esto la importancia de este estudio, un modelo basado en un Sistema Multi-Agentes para resolver esta problemática puede aportar los beneficios de representar un ambiente

Tabla 1.2: Investigación de Operaciones y trabajos encontrados

Técnicas de Investigación de Operaciones	Número de Artículos	Autores y años
Programación lineal entera mixta de múltiples etapas	10	Van Wassenhove (2006), Bozorgi-Amiri <i>et al.</i> (2012), Anaya-Arenas <i>et al.</i> (2013), Yang <i>et al.</i> (2015), Singhtaun (2015), Celik <i>et al.</i> (2016), Goli y Alinaghian (2015), Alem <i>et al.</i> (2016), Moreno <i>et al.</i> (2016), Battini <i>et al.</i> (2014).  Abounacer <i>et al.</i> (2014), Salmerón y Apte (2010), Fang y Zhang (2016), Wei y Chang (2016), Huang <i>et al.</i> (2015), Bai (2016),
Programación multi-objetivo	14	Bozorgi-Amiri <i>et al.</i> (2013), Bozorgi-Amiri y Khorsi (2015), Rahafrooz y Alinaghian (2016). Zhou <i>et al.</i> (2017), Nolz <i>et al.</i> (2011), Vitoriano <i>et al.</i> (2011), Mohamadi y Yaghoubi (2017), Nolz <i>et al.</i> (2010).  Wang <i>et al.</i> (2015), Victoria <i>et al.</i> (2015), Opit y Nakade (2015), Rivera-Royero <i>et al.</i> (2016), Lu <i>et al.</i> (2016), Sahebjamnia <i>et al.</i> (2016), Wei <i>et al.</i> (2016), Zokaei <i>et al.</i> (2016), Pradhananga <i>et al.</i> (2016), Wang <i>et al.</i> (2016), Özdamar y Demir (2012), Özdamar (2011).
Programación lineal y algoritmos heurísticos	12	Wang <i>et al.</i> (2015), Victoria <i>et al.</i> (2015), Opit y Nakade (2015), Rivera-Royero <i>et al.</i> (2016), Lu <i>et al.</i> (2016), Sahebjamnia <i>et al.</i> (2016), Wei <i>et al.</i> (2016), Zokaei <i>et al.</i> (2016), Pradhananga <i>et al.</i> (2016), Wang <i>et al.</i> (2016), Özdamar y Demir (2012), Özdamar (2011).

dinámico que permite dar un escenario más real de un desastre natural, lo que puede beneficiar a cientos o miles de damnificados de diversos países al reducir pérdidas humanas en una situación post desastre natural.

Los resultados obtenidos podrán servir de base para generar futuros proyectos que impliquen modelos de solución que permitan mejorar la eficiencia en la distribución de ayuda en especie en Logística Humanitaria mediante el empleo de Inteligencia Artificial y en especial de Sistemas Multi-Agentes.

## 1.5 OBJETIVOS

Objetivo general

- Desarrollar un modelo para la satisfacción de la demanda de los productos de primera necesidad de las zona de desastre, productos que son enviados por un medio de transporte desde los centro de distribución hacia las zonas afectadas, modelo basado en agentes para la coordinación de tareas para la distribución de ayuda en especie en actividades de logística humanitaria post-desastres naturales.

Objetivos específicos

- Describir el ambiente que debe de afrontar el modelo basado en agentes para determinar las instancias de la situación de coordinación de tareas para la distribución de ayuda en especie.
- Identificar las acciones de los agentes en contexto con el medio ambiente a modelar
- Aplicar un algoritmo de planificación multi-agente que permita coordinar el modelo y sea coherente en la calidad de los resultados de planificación de tareas.
- Desarrollar una plataforma de simulación que permite evaluar escenarios de logística humanitaria que ayude a la toma de decisiones.

## 1.6 ESTRUCTURA DE LA TESIS

La tesis está formada por seis capítulos. El capítulo uno presenta una introducción al problema de investigación. En el capítulo dos se abordan los antecedentes

---

de Sistemas Multi-Agentes y la logística humanitaria en el contexto de los desastres, además encontrará los trabajos relacionados al problema de distribución de ayuda en especie en desastres naturales mediante el ruteo de vehículos, algunas variantes del problema y los diferentes métodos de solución encontrados en la revisión de la literatura. En el capítulo tres se describe la metodología propuesta para la solución del problema de ruteo de vehículos para la distribución de ayuda en especie mediante el modelo propuesto por sistemas Multi-Agentes, cuales son sus componentes y características. En el capítulo cuatro se presenta el caso de estudio trabajado para la investigación, los experimentos realizados y su evaluación para el modelo, sus escenarios y parámetros evaluados, se presenta el análisis de los resultados alcanzados en los experimentos realizado. Finalmente, en el capítulo cinco se muestran las conclusiones y trabajos futuros.

## CAPÍTULO 2

# ANTECEDENTES

---

La fuerza de la naturaleza se manifiesta a través de fenómenos perturbadores tales como sismos, volcanes, ciclones tropicales, inundaciones, etc., que por la energía con que se desarrollan, el tamaño del área en que influyen y la frecuencia con que ocurren, pueden afectar gravemente los asentamientos humanos.

La ocurrencia de los desastres naturales en el mundo cada vez aumenta implicando un mayor riesgo para las poblaciones. La magnitud del desastre varía de acuerdo a las características del país afectado.

El impacto de los desastres naturales afecta a los países en pérdidas humanas, materiales y económicas. En 2017 se presentaron 218 desastres en el mundo, con 9,503 muertes, afectando a 96 millones de personas y daños materiales de 314 billones de dólares. En 2017, el continente asiático experimentó la más alta ocurrencia de desastre 43% del total. China fue la más afectada por desastres. En términos de impacto humano, India fue el más afectado, con 2,300 muertes y 22.5 millones de personas afectadas. Sierra Leona fue golpeada por un alud, matando a 502 personas y dejando a 600 personas desaparecidas. La población en Cuba se vio afectada por el huracán Irma afectando a 87,073 habitantes, Pascaline (2018). En general, la alta mortalidad y el número de personas afectadas se correlacionaron con la población del país, así como las pérdidas económicas relacionadas con su Producto Interno

Bruto (PIB).

México se encuentra sujeto a una amplia variedad de fenómenos naturales con alto potencial destructivo, lo cual, combinado con altas concentraciones poblacionales, en las que se tienen elevados grados de vulnerabilidad física y social, propician un gran riesgo de desastre.

En México dos terceras partes de la superficie tienen un riesgo sísmico significativo. Entre los eventos más recientes de sismos en México están los sucedidos en Oaxaca y Ciudad de México en septiembre del 2017.

## 2.1 CONCEPTOS RELACIONADOS AL PROBLEMA

### 2.1.1 LOGÍSTICA HUMANITARIA

Thomas y Mizushima (2005) define la Logística Humanitaria como el proceso de planificar, implementar y controlar de manera eficiente, el flujo y almacenamiento de materiales y de información relacionada, desde el punto de origen al punto de consumo, con el propósito de satisfacer las necesidades de los beneficiarios y aliviar el sufrimiento de la población vulnerable. Su objetivo fundamental es satisfacer las necesidades de las personas afectadas por un desastre lo más rápido posible. Esto incluye proveer de soporte, servicios, materiales y transporte a los involucrados en la asistencia a los damnificados.

La diferencia entre la logística comercial y la humanitaria es que en la primera, es el proceso que planifica, implementa y controla los flujos de materiales e información dentro de una empresa, desde un punto de origen al lugar de consumo con el fin de satisfacer necesidades del cliente. La logística humanitaria: se refiere a la gestión de suministros de socorro de emergencia desde una fuente a los beneficiarios, de manera eficiente y eficaz.

### 2.1.2 ELEMENTOS INVOLUCRADOS EN LOGÍSTICA HUMANITARIA

La logística humanitaria y de desastres se enfoca en mejorar el flujo de materiales hacia zonas afectadas, con el propósito de minimizar el sufrimiento humano. Gallego y Viñas (2011a) identifican cuatro etapas básicas en el ciclo de gestión de la ayuda humanitaria de emergencia: mitigación, preparación, respuesta y rehabilitación. Cuando ocurre una crisis humanitaria, se implementa rápidamente una compleja red de suministro de la ayuda, en la que intervienen multitud de actores, organizaciones no gubernamentales, agencias de cooperación nacionales y de organismos multilaterales, proveedores, donantes, víctimas, etc. En esta cadena/red de suministro es posible identificar flujos de materiales, de información y financieros, como se hace habitualmente en las cadenas/redes comerciales.

Para Viera *et al.* (2012) en logística humanitaria podemos identificar las siguientes características: Planificación estratégica para contribuir a: decisiones a largo plazo, localización, presupuesto etc. Gestión de inventarios: planificación, coordinación y control de flujos. Planificación del transporte: vía de transporte, utilización de su capacidad, su secuenciamiento y mantenimiento. Planificación, gestión de recursos y gestión de la información: componente fundamental al momento de implementar un sistema logístico humanitario eficaz y eficiente.

Para Doerner *et al.* (2011) existen los siguientes problemas que resolver para la optimización del alivio en un desastre: la previsión de evaluación de las necesidades, posicionamiento previo en la zona de desastre, rehabilitación y reparación del trabajo en red, evacuación, inventario y asignación de recursos, pandemias. Todos estos problemas son los que hay que contemplar en una logística humanitaria.

### 2.1.3 CARACTERÍSTICAS DE LOGÍSTICA HUMANITARIA

La función primaria de la Logística Humanitaria es salvar vidas y aliviar el sufrimiento de las poblaciones afectadas. Viera *et al.* (2012) menciona que un indicador de gestión importante en logística humanitaria es la velocidad de respuesta y que esta sea adecuada (llegar a la persona correcta con el suministro correcto en el lugar correcto). Para Gallego y Viñas (2011a) en logística humanitaria es importante determinar el contexto de su aplicación, es importante identificar la cadena de suministros, el flujo de materiales, de información y financieros.

Se utiliza habitualmente el término de cadenas/redes de suministros en la cual se articulan diferentes organizaciones, normalmente empresas, que desempeñan funciones complementarias (proveedores, fabricantes, distribuidores) dentro de una misma red de valor y que actúan de forma coordinada buscando la satisfacción de unos objetivos comunes, habitualmente orientados a conseguir una mayor eficiencia operativa, definida a través de un conjunto de indicadores apropiados. Ante la ocurrencia de una emergencia humanitaria, se produce el desplazamiento hasta la zona afectada de una gran cantidad de artículos de muy diverso tipo, desde maquinaria pesada o vehículos, hasta alimentos o medicamentos. Es necesario desplazar a las zonas afectadas personal técnico especializado para colaborar en las fases de respuesta y reconstrucción, como parte de esta logística.

La información disponible tras la ocurrencia del desastre es muy limitada. En las etapas iniciales es crucial hacer una evaluación de los daños con el fin de establecer las potenciales necesidades en las distintas áreas afectadas (agua, alimentos, medicinas, cobijo) y definir los medios con los que se cuenta para hacer frente a esas necesidades (capacidad de almacenaje, infraestructuras de transporte y capacidad de los vehículos disponibles, telecomunicaciones). Con esta información, se diseña e implementa una cadena de suministro adecuada, en la que es muy necesaria la colaboración y coordinación de los distintos agentes que intervienen para evitar la duplicidad de esfuerzos y lograr una respuesta lo más efectiva y eficiente posible.

La principal fuente de recursos económicos de las organizaciones humanitarias son sus donantes (de carácter público o privado). Una característica relevante del flujo financiero en el contexto humanitario es la necesidad de conseguir rápidamente liquidez para hacer frente de forma inmediata a la fase de respuesta. Las donaciones que se realizan en el marco de un desastre humanitario pueden tardar días, meses o incluso años en llegar, mientras los agentes que intervienen en el terreno necesitan liquidez de forma urgente para iniciar sus operaciones o hacer frente a los pagos a sus proveedores. Estas variables interactúan en un ambiente muy dinámico definido por la naturaleza del desastre.

El ambiente dinámico genera incertidumbre tal como conocer el impacto del desastre, áreas dañadas, comunidades afectadas, infraestructura perjudicada, servicios públicos no disponibles. Este dinamismo impacta en la elaboración de planes efectivos de rescate y recuperación ante el desastre natural. Generar modelos que ayuden a tomar decisiones ante la incertidumbre y planeación efectiva de la distribución de recursos es parte de la propuesta de este proyecto de investigación desarrollado.

## 2.2 CATEGORIZACIÓN DEL PROBLEMA

En logística humanitaria la atención inmediata a los damnificados es fundamental para evitar más pérdidas humanas. La procuración de ayuda directa o indirecta a la población afectada forman una cadena de suministros de ayuda humanitaria. Los procesos logísticos en esta cadena requieren planeación, organización y control, antes, durante y después de la ocurrencia de un desastre.

Las principales propuestas de solución que se han dado para la distribución de ayuda en especie cuando ocurre un desastre se encontraron bajo *Técnicas de Investigación de Operaciones y Técnicas de Inteligencia Artificial*.

Las *Técnicas de Investigación de Operaciones* permiten el análisis de la toma

de decisiones teniendo en cuenta la escasez de recursos, para determinar cómo se puede optimizar un objetivo definido, como la maximización de los beneficios o la minimización de costos. Las técnicas están diseñadas para optimizar un criterio, objetivo específico sujeto a un conjunto de restricciones, (Taha, 2012).

Las *Técnicas de Inteligencia Artificial* se aplican cuando una máquina imita las funciones cognitivas que los humanos asocian con mentes humanas, como por ejemplo: aprender y resolver problemas. Se clasifica la Inteligencia Artificial en cuatro categorías: sistemas que piensan como humanos, sistemas que actúan como humanos, sistemas que piensan racionalmente, sistemas que actúan racionalmente (Cruz, 2011). Una de las técnicas de la Inteligencia Artificial son los modelos basados en soluciones mediante Sistemas Multi-Agentes en el cual se estudia el comportamiento de agentes inteligentes que resuelven problemas de forma cooperativa. Otra de las técnicas son los algoritmos evolutivos compuestos por modelos de evolución basados en poblaciones cuyos elementos representan soluciones a problemas. Son útiles cuando nos encontramos con problemas difíciles o altamente irresolubles, como lo son aquellos caracterizados por una alta dimensionalidad, multimodalidad, fuerte no linealidad, no diferenciabilidad, presencia de ruido y cuando se trata con funciones dependientes del tiempo.

Una subclasificación de los algoritmos evolutivos son los algoritmos genéticos los cuales modelan el proceso de evolución como una sucesión de frecuentes cambios en los genes, con soluciones análogas a cromosomas. Trabajan con una población de cadenas binarias para la representación del problema.

De acuerdo con Zheng *et al.* (2015a) podemos clasificar las Meta-heurísticas utilizadas en ayuda humanitaria en las siguientes: Algoritmos Evolutivos, Algoritmos Genéticos, Optimización de Enjambre de Partículas, Optimización de Colonia de Hormigas, Colonia de Abejas Artificial. Cabe hacer mención que los Sistemas Multi-Agentes no son tan comúnmente usados en resolver problemas de logística humanitaria, las meta heurísticas arriba mencionadas son estrategias de solución más

tradicionales en esta problemática.

En la siguiente sección se explicará la metodología que se utilizó para analizar estas técnicas de Investigación de Operaciones e Inteligencia Artificial en la búsqueda de antecedentes del estado del arte de la presente tesis.

### 2.2.1 METODOLOGÍA PARA LOS ANTECEDENTES DEL ESTADO DEL ARTE

El espacio de búsqueda se realizó en artículos de investigación publicados en las siguientes bases de datos en línea:

- Science Direct/Elsevier/Scopus.
- IEEE/IEE Library.
- ACMPortal.
- Springer Publisher.
- Wiley online Library.
- Emerald Library.

Además de las bases de datos en línea, se realizó una búsqueda a través de Google Scholar (Google Académico) para buscar las citas de los artículos encontrados y verificar quien cita los artículos.

Los descriptores de búsqueda y palabras claves utilizadas en la recolección de artículos fueron: “VRP”, “VRPTW”, “ant colony”, “heuristic”, “metaheuristics”, “linear programming”, “integer programming”, “mixed programming”, “intelligent agents”, “SMA”, “multiagents”, “logistics”, “disaster”, “management”, “humanitarian aid”, “distribution logistic”, “risk management”, “coordination and distribution”, “emergency logistics”.

El intervalo del periodo de tiempo para las búsquedas fue de la fecha actual a 15 años atrás. El criterio de inclusión para la selección de los artículos, fueron las propuestas de solución señalados en la Figura 2.1.

Los criterios de exclusión para la selección de información fueron: No se incluyeron tesis, documentos gubernamentales, estudios de caso, informes de organizaciones. Los temas excluidos fueron: preparación y mitigación de desastres, sistemas de evacuación, adquisición de suministros, compra de suministros, problemas de tráfico y congestión en la distribución de productos, stock de productos, logística comercial, manejo de centros de distribución, personal especializado en emergencias, búsqueda y rescate, traslado de víctimas a hospitales o lugar de atención médica, ubicación de albergues, actividades de limpieza y saneamiento, ataques terroristas, hambrunas y sequías.

Se realizó una clasificación de los problemas más comunes encontrados en la distribución de ayuda en especie, partiendo del problema general definido en el Capítulo I de la tesis. Se agruparon los problemas más comunes en cinco grupos los cuales pueden observarse en la Figura 2.1. En la figura podemos observar los problemas de medios de transporte, espacios en centros de distribución, tiempo, demanda y dinamismo del ambiente,

La demanda está afectada por el dinamismo del ambiente y el tiempo, debido a que existen decesos, el desplazamiento de heridos a otras zonas para recibir atención médica, por evacuación ante el riesgo en la zona de desastre, por el desplazamiento de damnificados para buscar los recursos básicos para su subsistencia, por réplicas del fenómeno de desastre. La demanda se puede modelar de manera conocida o desconocida los métodos basados en Investigación de Operaciones así la establecen, mientras que los de Inteligencia Artificial buscan representar la realidad del ambiente de un desastre de manera dinámica. La demanda se vuelve dinámica para representar la situación del desastre apegada a una realidad, por lo que la distribución se vuelve compleja ante la capacidad de los centros de distribución, la rapidez con que deben

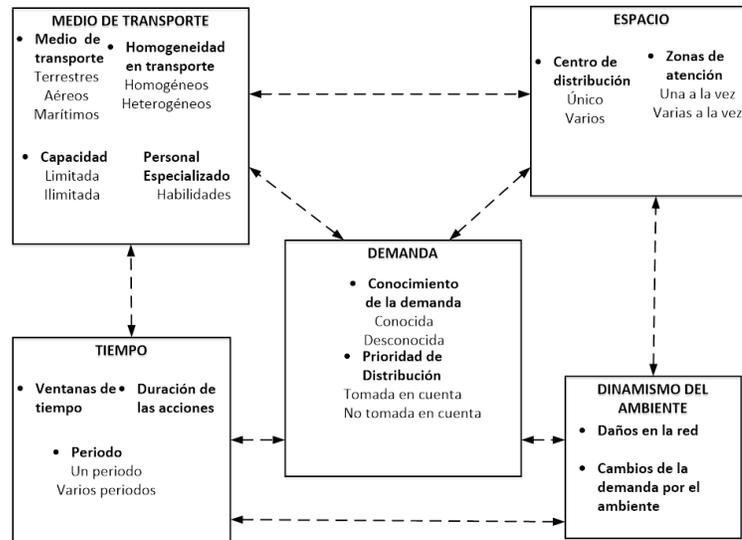


Figura 2.1: Clasificación de problemas encontrados en la revisión de la literatura para la distribución de ayuda en especie en caso de desastre

de entregar los productos y la disponibilidad de los recursos de transporte.

## 2.2.2 TAXONOMÍA DE LOS PROBLEMAS IDENTIFICADOS EN LA DISTRIBUCIÓN DE AYUDA EN ESPECIE

### Problema 1: Medio de transporte

Se puede entender como los recursos necesarios para la entrega de asistencia de manera pronta y segura en la zona de desastre. De acuerdo con Caceres-Cruz *et al.* (2015) el medio de transporte contribuye a optimizar el proceso de distribución de productos, de tal manera que la demanda de los bienes de los clientes está satisfecha sin violar ninguna restricción específica del problema a resolver. Sus atributos identificados son:

- *Medio de transporte* se define como el medio utilizado para enviar o distribuir los productos (Caceres-Cruz *et al.*, 2015) para nuestro caso son vehículos

terrestres.

- *Homogeneidad del tipo de transporte* se define como el mismo tipo de transporte, con las mismas dimensiones y por lo tanto la misma capacidad (Xanthopoulos y Koulouriotis, 2013). *Heterogéneo del tipo de transporte* se define como diferentes tipos de transporte, con diferentes dimensiones y diferente capacidad. Diferentes tipos de vehículos con diferentes características, diferentes capacidades, restricciones con respecto al peso y al volumen de carga (Abounacer *et al.*, 2014).
- *Cantidad de transporte* se define como la disposición de transportes que se tienen al momento de la ocurrencia del desastre, si consideran una cantidad limitada o ilimitada, en el caso de la primera hay una cantidad determinada, en el caso de la segunda se considera que no hay límite respecto a la cantidad, se supone el tamaño de la flota como infinito. (Xanthopoulos y Koulouriotis, 2013).

### **Problema 2: Espacio**

Se refiere al número de almacenes o centros de distribución para la ayuda en especie en caso de desastre y a la atención de las zonas damnificadas que demandan productos (zonas de demanda). Sus atributos identificados son:

- *Centro de distribución* se define como el lugar en el que se almacenan los suministros de ayuda a ser distribuidos a las zonas afectadas por un desastre (Rawls y Turnquist, 2011).
- *Zona de atención* la cual involucra la demanda a atender, se define como la región dañada por un desastre a atender, así como la forma, si se satisfecerá una sola a la vez (ida y vuelta por única vez) o varias a la vez mediante el establecimiento de una ruta. (Wang *et al.*, 2015). Para nuestro caso del modelo propuesto mediante el SMA desarrollado no se conoce la demanda, por lo que

las rutas a la zona de desastre son múltiples y podrían involucrar varias vueltas al centro de distribución.

### **Problema 3: Métrica de Costo**

Se puede entender como el costo asociado con el movimiento de un vehículo de un punto a otro para la entrega de productos, se asocia con el tiempo de viaje en horas, minutos, segundos y además con los costos representados en distancias, vehículos utilizados o una combinación de otros factores (Caceres-Cruz *et al.*, 2015). Sus atributos identificados son:

- *Duración de las acciones* se define como la estimación del tiempo requerido para realizar las acciones de distribución de la ayuda en especie del centro de distribución a las zonas afectadas por el desastre, principalmente realizado por métodos probabilísticos (Wang *et al.*, 2015).
- *Periodo* se define como la forma de satisfacción de la demanda de productos, ya sea en un solo periodo o en varios periodos, es decir varias vueltas a las zonas afectadas (puntos de demanda) (Fang y Zhang, 2016).

### **Problema 4: Demanda**

Se puede entender como la región dañada por un desastre que podría requerir ayuda humanitaria, la cual incluye varios puntos de demanda de productos (Abou-nacer *et al.*, 2014). Sus atributos identificados son:

- *Conocimiento de la demanda* se define la estimación de la cantidad de productos demandados por las zonas afectadas por el desastre y sus puntos de demanda, la cual se puede considerar como conocida o desconocida, la primera es cuando se determina de manera previa a la resolución del problema (Abou-nacer *et al.*, 2014), la segunda cuando no se determina con anterioridad (Mguis *et al.*, 2014).

- *Prioridad de distribución* se define como la necesidad de establecer un orden en la satisfacción de la demanda de las poblaciones afectadas, con base en el mayor grado de afectación por el desastre (se atenderán del mayor al menor grado, en ese orden), mediante una clasificación previa de la gravedad (Salmerón y Apte, 2010),(Na y Zhi, 2009).

### **Problema 5: Dinamismo del ambiente**

Un ambiente dinámico es aquél en el que existen otros procesos operando en el medio ambiente del desastre, existen cambios fuera del control de las personas y organismos que apoyan en la logística humanitaria. Los ambientes dinámicos pueden cambiar mientras que las personas se encuentra deliberando. Estos cambios ocurren en tiempo real del desastre y se debe actuar para contrarestarlos. Se incluyen cambios en los estados de los arcos de la red de distribución y en la demanda de ayuda humanitaria, en relación a la ubicación y al tiempo. Los atributos identificados son:

- *Daños en la red* se define la destrucción de los canales de transporte, para la distribución de ayuda humanitaria, lo que provoca que la ayuda no pueda ser transportada por el arco o que existan demoras (Habiba y Akhter, 2012),(Wang *et al.*, 2015).
- *Cambios en la demanda por el ambiente* se entiende como la evolución de la demanda de alivio, debida a la movilidad de las personas afectadas por el desastre las cuales se desplazan fuera de la zona afectada para buscar ayuda; otra razón es porque son evacuadas y llevados a una zona de menor riesgo. Este tipo de cambios en la demanda se da porque es completamente observable, en otras ocasiones la demanda es necesario descubrirla, es decir se debe de sentir el cambio de la demanda en el medio ambiente por alguien (Chen y Gong, 2016).

### 2.2.3 SOLUCIONES ENCONTRADAS CON LAS TÉCNICAS REVISADAS

La Figura 2.2 muestra las soluciones más comunes encontrados en la revisión de la literatura en la distribución de ayuda en especie, clasificadas en técnicas de Investigación de Operaciones y técnicas basadas en Inteligencia artificial, ya descritas en la categorización del problema.

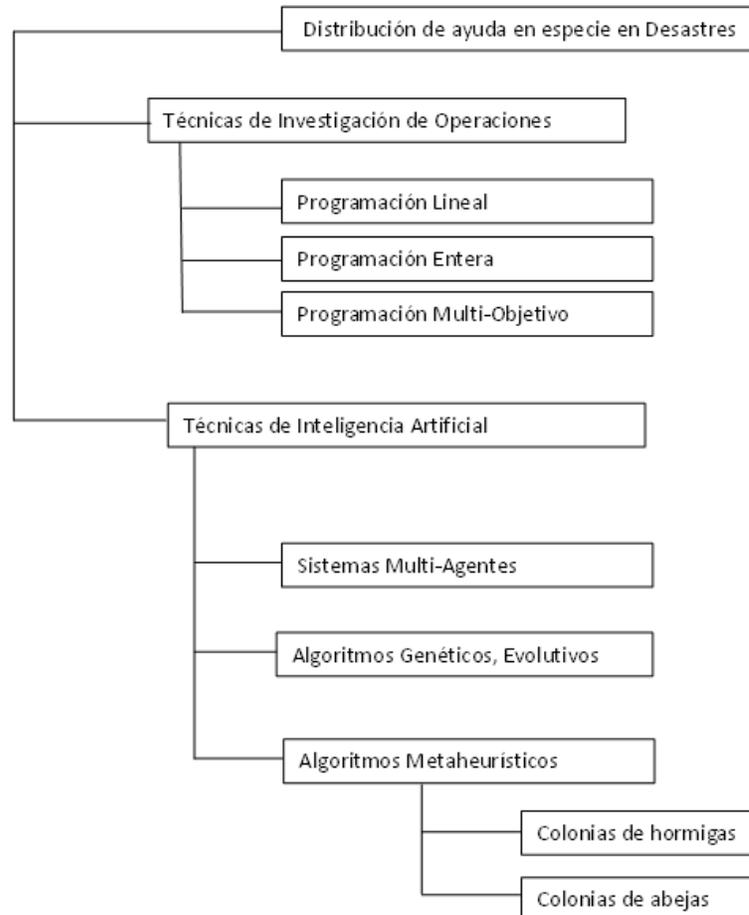


Figura 2.2: Soluciones encontradas en la revisión de la literatura para la distribución de ayuda en especie en caso de desastre.

A continuación se definen cada una de las técnicas estudiadas, de acuerdo a la clasificación realizada en la Figura 2.2.

1. Programación Lineal: Diseñada para modelos con funciones objetivo y restricciones lineales. Es una de las técnicas de modelación dentro de la investigación

de operaciones, especialmente utilizada para la planeación óptima y para la toma de decisiones. En la programación lineal se quiere optimizar un objetivo sujeto a una serie de restricciones, todas estas condiciones se deben poder expresar linealmente, (Taha, 2012).

2. Programación Entera: Las variables de decisión asumen valores enteros.

3. Programación Multi-Objetivo: Usada para resolver modelos con varias funciones objetivo. La idea principal consiste en convertir las diversas funciones objetivos originales en una sola meta o función objetivo. El modelo resultante produce lo que se suele llamar solución eficiente, porque podrá no ser óptima con respecto a todas las funciones objetivos que presente el problema. Esta solución tratara de satisfacer en lo posible con todas las funciones objetivos presentes.

4. Algoritmos Metaheurísticos: Los algoritmos metaheurísticos son algoritmos aproximados de optimización y búsqueda de propósito general. Son procedimientos iterativos que guían una heurística subordinada combinando de forma inteligente distintos conceptos para explorar y explotar adecuadamente el espacio de búsqueda. Los algoritmos metaheurísticos también los podemos encontrar en Investigación de Operaciones.

5. Sistemas Multi-Agentes (SMA) Es un sistema distribuido compuesto por agentes software, donde la acción combinada de cada uno de ellos persigue la consecución de un objetivo común, o bien cada uno de ellos persigue su propio objetivo individual. Se puede comparar un SMA como un conjunto de personas, con diferentes dominios de conocimiento, tratando de resolver un problema común.

6. Algoritmos Evolutivos: Los algoritmos evolutivos trabajan con una población de individuos, que representan soluciones candidatas a un problema. Esta población se somete a ciertas transformaciones y después a un proceso de selección, que favorece a los mejores. Cada ciclo de transformación y selección constituye una generación, de forma que después de cierto número de generaciones se espera que el mejor individuo de la población esté cerca de la solución buscada. Los algoritmos evolutivos

combinan la búsqueda aleatoria, dada por las transformaciones de la población, con una búsqueda dirigida dada por la selección.

7. Algoritmos Genéticos: Modelan el proceso de evolución como una sucesión de frecuentes cambios en los genes, con soluciones análogas a cromosomas. Trabajan con una población de cadenas binarias para la representación del problema, y el espacio de soluciones posibles es explorado aplicando transformaciones a éstas soluciones candidatas tal y como se observa en los organismos vivientes

## 2.3 TRABAJOS RELACIONADOS

Se identificaron las investigaciones realizadas con técnicas de investigación de operaciones e inteligencia artificial, basada esta agrupación en la clasificación realizada de la Figura 2.2, una vez realizada esta clasificación se buscaron los atributos de cada problema identificados y propuestos en la Figura 2.1.

De acuerdo a la clasificación de los problemas identificados en la Figura 2.1 se listan cada uno de los problemas y sus atributos para un mejor entendimiento y análisis en la tabla de los trabajos de investigación encontrados, se dan las siglas con los cuáles serán identificados en las siguientes secciones.

Soluciones por técnicas de Investigación de Operaciones (**IO**).

Soluciones por técnicas de Inteligencia Artificial (**IA**).

**Problema 1: Medio de transporte.** *Atributos analizados:*

- Flota Homogéna de Vehículos (**A1**)
- Flota Heterogéna de Vehículos (**A2**)
- Capacidad del vehículo limitada (**A3**)
- Capacidad del vehículo ilimitada (**A4**)

**Problema 2: Espacio.** *Atributos analizados:*

- Un solo centro de distribución (**A5**)
- Varios centro de distribución (**A6**)
- Una zona de atención (**A7**)
- Varias zonas de atención (**A8**)

**Problema 3: Tiempo.** *Atributos analizados:*

- Duración de las acciones (**A9**)
- Maneja un periodo (**A10**)
- Maneja varios periodos (**A11**)

**Problema 4: Demanda.** *Atributos analizados:*

- Demanda Conocida (**A12**)
- Demanda Desconocida (**A13**)
- Manejo de prioridad de distribución (**A14**)

**Problema 5: Dinámismo del ambiente.** *Atributos analizados:*

- Manejo de dinamismo en la red (**A15**)
- Cambios en la demanda por el ambiente (**A16**)

Las soluciones encontradas para *Técnicas de Investigación de Operaciones* se clasificaron de la siguiente manera:

**Técnicas de Investigación de Operaciones encontradas.**

- Programación Entera Mixta (**PEM**)
- Programación Multi-Objetivo (**PMO**)
- Programación Lineal Entera (**PL**)

En la siguiente Tabla 4.3 se muestra un análisis de los problemas y atributos encontrados en la revisión de la literatura en cuanto a técnicas de Investigación de Operaciones.

Una "X" significa que maneja el atributo el trabajo de investigación.

Tabla 2.1: Problemas de análisis y su relación con los trabajos de investigación encontrados en Técnicas de Investigación de Operaciones

Trabajos y años publicados	Soluc.	Problemas															
		Medio de Transporte				Espacio				Tiempo				Demanda		Dinámismo	
		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14	A15	A16
Van Wassenhove (2006)	PEM	X				X			X	X		X	X				
Bozorgi-Amiri <i>et al.</i> (2012)	PEM						X		X	X		X	X				
Anaya-Arenas <i>et al.</i> (2013)	PEM	X		X			X		X	X		X		X	X		X
Yang <i>et al.</i> (2015)	PEM		X	X			X		X	X		X	X				
Celik <i>et al.</i> (2016)	PEM						X		X	X		X					X
Goli y Alinaghian (2015)	PEM		X	X					X					X			X
Singhtaun (2015)	PEM		X	X			X		X	X		X	X				
Alem <i>et al.</i> (2016)	PEM		X	X			X		X	X		X	X			X	
Moreno <i>et al.</i> (2016)	PEM		X	X			X		X	X		X	X			X	
Battini <i>et al.</i> (2014)	PEM		X	X			X		X	X		X	X				
Abounacer <i>et al.</i> (2014)	PMO		X	X			X	X	X	X		X	X			X	
Salmerón y Apte (2010)	PMO	X		X			X		X	X		X	X		X	X	
Fang y Zhang (2016)	PMO		X	X		X			X			X	X				
Wei y Chang (2016)	PMO	X			X		X		X	X		X	X				
Bozorgi-Amiri <i>et al.</i> (2013)	PMO		X	X			X		X	X				X		X	X
Huang <i>et al.</i> (2015)	PMO			X			X		X	X		X	X		X	X	X
Bai (2016)	PMO		X	X			X		X	X		X		X	X	X	X
Bozorgi-Amiri y Khorsi (2015)	PMO		X		X		X		X	X		X		X	X	X	X
Rahafrooz y Alinaghian (2016),	PMO				X		X	X	X	X	X			X		X	X
Zhou <i>et al.</i> (2017)	PMO	X			X		X	X	X			X	X			X	
Nolz <i>et al.</i> (2011)	PMO	X		X			X	X	X			X	X			X	
Vitoriano <i>et al.</i> (2011)	PMO		X	X			X	X		X		X	X		X		
Mohamadi y Yaghoubi (2017)	PMO	X					X		X	X		X	X		X		
Nolz <i>et al.</i> (2010)	PMO		X	X			X		X	X		X	X			X	
Wang <i>et al.</i> (2015)	PL		X	X			X		X	X		X	X			X	
Victoria <i>et al.</i> (2015)	PL		X	X									X				
Opit y Nakade (2015)	PL		X	X			X		X	X		X	X				
Rivera-Royero <i>et al.</i> (2016)	PL		X	X			X		X	X			X	X			X
Lu <i>et al.</i> (2016)	PL		X	X			X		X				X	X			X
Sahebjamnia <i>et al.</i> (2016)	PL		X	X			X		X	X		X	X				
Wei <i>et al.</i> (2016)	PL		X	X			X		X	X		X		X			
Zokaei <i>et al.</i> (2016)	PL	X			X		X		X	X		X					
Pradhananga <i>et al.</i> (2016)	PL						X		X	X		X					
Wang <i>et al.</i> (2016)	PL				X		X	X	X			X	X				
Özdamar y Demir (2012)	PL		X	X			X	X	X			X	X				
Ozdamar (2011)	PL	X			X		X	X	X	X	X						

De acuerdo a los resultados encontrados por Técnicas de Investigación de Operaciones, en la mayoría de los estudios se emplea exclusivamente el modo de transporte terrestre, principalmente camiones.

La mayoría considera transportes heterogéneos, los cuales son de diferentes tipos, dimensiones y capacidades dentro de un mismo modo de transporte. Wohlge-muth *et al.* (2012), Fang y Zhang (2016) y Wei y Chang (2016), establecen transportes homogéneos del mismo tipo y capacidad. De la cantidad de transporte, se puede señalar que la mayoría considera que hay una cantidad limitada de transportes disponibles al momento de la ocurrencia del desastre. Wei y Chang (2016), Zokae *et al.* (2016), Bozorgi-Amiri y Khorsi (2015) y Rahafrooz y Alinaghian (2016) consideran que se dispone de una cantidad ilimitada en cuanto al número de transportes disponibles para enviar la ayuda.

Cuando ocurre un desastre uno de los puntos importantes a considerar es la ubicación y creación de Centros de Distribución a donde llegará la ayuda humanitaria. Dependiendo de la naturaleza e intensidad del fenómeno natural, se ve la necesidad de crear estos centros. Ante la ocurrencia de la emergencia humanitaria se produce el desplazamiento de una cantidad de artículos diversos que hay que distribuir a las zonas afectadas (Gallego y Viñas, 2011b). Los espacios o locaciones se consideran óptimos cuando las zonas en la que están ubicados dichas instalaciones, permiten el suministro de bienes y servicios, como por ejemplo: acceso a agua potable, combustible para cocinar, iluminación, eliminación de desechos y evacuación de aguas residuales, además de la protección contra el frío, la humedad, el calor, la lluvia, el viento, y otros riesgos presentes en la situación; estos son requisitos mínimos establecidos por las organizaciones de ayuda humanitaria (Esfera, 2004). Es necesario una planeación para atender la emergencia y en el caso de los Centros de distribución debe de considerar su ubicación, definición de inventarios, así como rutas para el transporte de suministros (Van Wassenhove, 2006).

Para la apertura de un centro de distribución se determina de acuerdo a la

población afectada, cobertura, cercanía con la población. Su localización tiene un impacto importante en el riesgo, velocidad de respuesta y el costo social propio de la situación post-desastre.

Se identificó el problema Espacio como las locaciones para los centros de distribución en la atención de las zonas damnificadas. Estos centros de distribución pueden manejarse como un almacén central o como varios almacenes en la zona afectada. Estas zonas afectadas son identificadas como zonas de atención, identificando que la distribución de productos se puede hacer en un recorrido único del centro de distribución a la zona afectada en una ruta. Otra alternativa de distribución es que se realice varias a la vez, es decir que un medio de transporte pueda hacer su reparto de productos en varias zonas de distribución.

De este atributo se encontró que la mayoría consideran varios centros de almacenamiento para suministros de ayuda y en Wohlgemuth *et al.* (2012), Fang y Zhang (2016) solo se tiene en cuenta un único centro.

De las zonas de desastre, la mayoría de los autores establecen la distribución de ayuda a varias zonas afectadas a la vez mediante el establecimiento de una ruta, en Abounacer *et al.* (2014), Fang y Zhang (2016) se distribuye la ayuda a una sola zona a la vez, ida a la zona afectada y regreso al centro de distribución. Esta característica fue considerada en el modelo.

Del atributo duración de las acciones, en la mayoría se estima de manera previa la cantidad de tiempo requerido para realizar las acciones de distribución, lo cual se realiza mediante métodos probabilísticos, solo Lu *et al.* (2016) no las considera.

De los periodos de atención, la mayoría establece la forma de satisfacción de la demanda mediante varias vueltas a la zona afectada, es decir en varios periodos, lo que se realiza debido a que en una sola vuelta es muy difícil cubrir toda la demanda, solo Rahafrooz y Alinaghian (2016) considera la atención en un único periodo, la satisfacción de la demanda en una sola visita.

En el atributo demanda la mayoría de los autores trabaja bajo el criterio de que se tiene un conocimiento previo de la cantidad de suministros demandados por las zonas afectadas por el desastre, solo Victoria *et al.* (2015), Anaya-Arenas *et al.* (2013) describen la demanda como desconocida, es decir que no se conoce al momento de suceder el desastre.

Del criterio de distribución, la mayoría no considera un orden en la distribución de la ayuda, y de los que sí lo hacen, unos toman en cuenta la prioridad y otros la equidad, siendo el criterio más empleado el segundo.

En la prioridad distribución de suministros de ayuda y tomando en cuenta las necesidades de la población afectada, los siguientes autores la consideran Rivera-Royero *et al.* (2016), Wei *et al.* (2016) y Salmerón y Apte (2010) establece un orden de la siguiente manera, en primer lugar atender a la población en estado crítico, que requiere atención médica para salvar la vida, en segundo lugar a personas que requieren ser evacuadas, en tercer lugar a personas que requieren suministros para satisfacer sus necesidades básicas.

En equidad los autores: Huang *et al.* (2015) , Bai (2016) , Lu *et al.* (2016) , Bozorgi-Amiri y Khorsi (2015) y Anaya-Arenas *et al.* (2013) describen la necesidad de distribuir la ayuda en forma equitativa, debido a que la cantidad de suministros siempre será menor que la cantidad de demanda de las zonas afectadas, que la distribución sea justa para que todos puedan tener cierto nivel de alivio y reducir la migración de los damnificados que realizan para ir en busca de la satisfacción de sus necesidades básicas.

El dinamismo del ambiente genera daños en la red que provocan dificultades y demoras en la distribución. Sin embargo, la mayoría de los trabajos revisados no consideran ningún tipo de impacto a la red de transporte a causa del desastre. Una excepción son los trabajos de Abounacer *et al.* (2014), Salmerón y Apte (2010) y Wang *et al.* (2015). El primero clasifica los daños en los arcos como intactos, dañados y rotos; el segundo estima los daños en los diferentes arcos y define escenarios a los

que asigna diferentes porcentajes de acuerdo al posible daño; el tercero presenta que el daño en los arcos dificulta el transporte de la ayuda, así como limitaciones en la capacidad del mismo. La mayoría de los trabajos hace referencia a una demanda completamente observable, de carácter estático, la cual no se modifica con los cambios en el ambiente.

Las soluciones encontradas para *Técnicas de Inteligencia Artificial* se clasificaron de la siguiente manera:

### **Técnicas de Inteligencia Artificial.**

- Algoritmos Genéticos (**AG**)
- Algoritmos Evolutivos (**AE**)
- Algoritmos de Enjambres (**AEJ**)
- Sistemas Multi-Agentes (**SMA**)

En la siguiente Tabla 4.4 se muestra un análisis de los problemas y atributos encontrados en la revisión de la literatura en cuanto a Técnicas de Inteligencia Artificial. Una "X" significa que maneja el atributo el trabajo de investigación.

Tabla 2.2: Problemas de análisis y su relación con los trabajos de investigación encontrados en Técnicas de Inteligencia Artificial

Trabajos y años publicados	Soluc.	Problemas															
		Medio de Transporte			Espacio				Tiempo			Demanda			Dinámismo		
		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14	A15	A16
Mguis <i>et al.</i> (2014)	AG								X		X		X			X	
Na y Zhi (2009)	AG		X	X		X			X	X			X	X	X	X	
Chen y Gong (2016)	AG	X					X		X	X		X	X			X	
Chou <i>et al.</i> (2014)	AG		X	X		X		X		X			X	X		X	
Li <i>et al.</i> (2011)	AG		X	X		X			X	X			X				
Feihu <i>et al.</i> (2016)	AG		X	X		X			X				X				
Barzinpour <i>et al.</i> (2014)	AG					X			X	X		X	X		X		
Nasiri y ShisheGar (2014)	AG		X	X		X		X		X		X	X		X		
Zheng y Ling (2013)	AG		X		X							X					
Esmaeili y Barzinpour (2014)	AG					X							X				
Sheng <i>et al.</i> (2015)	AG	X			X		X	X		X		X		X			
Gan <i>et al.</i> (2016)	AG	X		X		X			X	X		X					
Sheu (2007)	AG	X		X		X			X	X		X	X		X		
Chang <i>et al.</i> (2014)	AG		X	X		X			X	X		X	X		X		
Berkoune <i>et al.</i> (2012)	AG		X	X		X		X		X		X		X		X	
Zheng <i>et al.</i> (2015b)	AE		X	X		X			X	X			X				
Ruan <i>et al.</i> (2014)	AEJ	X		X		X		X		X		X	X				
Mohammadi <i>et al.</i> (2016)	AEJ					X			X	X		X		X		X	
Zhang <i>et al.</i> (2014)	AEJ					X			X				X			X	
Rolland <i>et al.</i> (2010)	AEJ			X		X		X		X		X	X			X	
Liu <i>et al.</i> (2017)	AEJ		X	X			X		X	X		X	X			X	
Xanthopoulos y Koulouriotis (2013)	SMA	X			X		X		X	X		X	X			X	
Zidi <i>et al.</i> (2013)	SMA		X	X		X			X	X		X	X		X	X	
Nadi y Edrisi (2017)	SMA	X				X			X	X		X	X			X	
Hooshangi y Alesheikh (2017)	SMA									X		X			X		
Das y Hanaoka (2014)	SMA	X		X		X			X	X		X	X			X	
Hernández-Vega <i>et al.</i> (2016)	SMA						X	X			X		X	X	X	X	

Al considerar el medio de transporte, todos los autores establecen el empleo de un modo terrestre, vehículos, camiones de carga, como en Xanthopoulos y Koulouriotis (2013), Mguis *et al.* (2014), Feihu *et al.* (2016).

Con respecto al atributo homogeneidad, la mayoría considera transportes heterogéneos de diferentes tipos, dimensiones y capacidades dentro de un mismo modo de transporte. Una minoría de los trabajos revisados consideran transportes homogéneos del mismo tipo y capacidades (Xanthopoulos y Koulouriotis, 2013) y (Chen y Gong, 2016).

Xanthopoulos y Koulouriotis (2013) propone una estrategia de solución de VRP y SMA. Busco presentar un escenario no complejo de la situación de desastre, incorporo agentes inteligentes y dentro de sus trabajos futuros considera modelar vehículos heterogéneos.

De la cantidad de transporte, se puede señalar que la mitad considera una capacidad limitada Na y Zhi (2009), Zheng *et al.* (2015b) y Feihu *et al.* (2016). Con respecto a la cantidad de transportes disponibles al momento de la ocurrencia del desastre, menos de la mitad no describe cual es la cantidad de transportes y uno de ellos Xanthopoulos y Koulouriotis (2013) la considera ilimitada, lo que indica que existe una cantidad infinita de vehículos para distribuir la ayuda.

En el atributo espacio se encontró que la mitad considera el establecimiento de varios centros de distribución para el almacenamiento de suministros de ayuda, menos de la mitad considera un único centro (Xanthopoulos y Koulouriotis, 2013) y (Chen y Gong, 2016). De las zonas de desastre, la mayoría de los autores establecen la distribución de ayuda a varias zonas afectadas a la vez mediante el establecimiento de una ruta.

En cuanto al factor tiempo, la mayoría estima de manera previa la cantidad de tiempo requerido para las acciones de distribución. Una minoría estima la duración de las acciones, (Feihu *et al.*, 2016), (Zheng y Ling, 2013) y (Esmaeili y Barzinpour, 2014).

De los periodos de atención, la mayoría establece la forma de satisfacción de la demanda mediante varias vueltas a la zona afectada, es decir en varios periodos, lo que se realiza debido a que en una sola vuelta es muy difícil cubrir toda la demanda, menos de la mitad no considera este atributo y ninguno considera un único periodo de atención.

En la mayoría de los estudios se establece que la demanda es conocida, es decir se conoce la cantidad de suministros que se requieren en las zonas afectadas (puntos de demanda). La mitad de los autores Chen y Gong (2016), Zheng *et al.* (2015b) y Feihu *et al.* (2016) presentan el criterio de que se tiene un conocimiento previo de la cantidad de suministros demandados por las zonas afectadas por el desastre y la otra mitad desconoce la demanda Xanthopoulos y Koulouriotis (2013), Mguis *et al.* (2014), y Na y Zhi (2009).

De la prioridad de distribución, la mayoría no describe un criterio para la distribución de la ayuda humanitaria, de los que sí lo hacen, unos establecen un criterio de prioridad y otros uno de equidad. La prioridad está relacionada con el orden en la distribución de la ayuda basada en las necesidades de la población damnificada, ya sea por el grado de afectación del desastre o el tamaño de la población afectada como lo realiza Na y Zhi (2009) en su trabajo. En Chou *et al.* (2014), se clasifican los puntos de demanda en prioridad alta y baja, de acuerdo al grado de afectación del desastre. En Sheng *et al.* (2015) se realiza una distribución de ayuda con base en la alta urgencia, primero se distribuye la ayuda a aquellos puntos de demanda en los que sea más urgente hacerlo.

El criterio de equidad se emplea en los estudios de Barzinpour *et al.* (2014) y Mohammadi *et al.* (2016). En el primero la distribución se realiza de manera justa, se relaciona la cantidad de suministros que hay en los Centros de distribución y la cantidad de zonas afectadas y se distribuye de manera equitativa. En el segundo, se entrega la misma cantidad de suministros a las diversas zonas afectadas. La equidad en la distribución permite mayor rapidez en la toma de decisiones acerca de la

cantidad de suministros a enviar a los puntos de demanda, sobre todo cuando no se dispone de información o esta no es confiable en una situación post-desastre, reduciendo la migración de las personas damnificadas y los actos vandálicos como los saqueos.

Del atributo dinamismo del ambiente los daños en la red, en la mayoría de los trabajos no se consideran los posibles daños que pueden sufrir los arcos en la red de transporte a causa del desastre, situación que se presenta en un escenario real y que provoca dificultades y demoras en la distribución. Los estudios que sí lo consideran son (Na y Zhi, 2009), Hernández-Vega *et al.* (2016), Nasiri y ShisheGar (2014) y Zidi *et al.* (2013).

La mayoría de los trabajos establecen a la demanda como sensible, la cual se debe descubrir. Xanthopoulos y Koulouriotis (2013), Mguis *et al.* (2014), Na y Zhi (2009), consideran que la demanda cambia de acuerdo con el ambiente y es necesario estimarla, no se puede conocer de manera previa, debido a la movilización de los damnificados. Chen y Gong (2016), Zheng *et al.* (2015b) y Feihu *et al.* (2016) la consideran como completamente observable, una demanda que no cambia con el ambiente, con lo que ocurre durante y después del desastre.

Los estudios relacionados con SMA y distribución de ayuda en especie en Logística Humanitaria en una situación post-desastre se trabajan los problemas de análisis y sus atributos de la siguiente forma: con respecto al problema Medio de transporte se encontró que la mayoría emplea un tipo de transporte terrestre, de capacidad limitada y la mitad de los trabajos considera flotas homogéneas de vehículos. Del problema Espacio, la mayoría presenta un sólo centro y la atención de varias zonas a la vez. Del problema Tiempo, la mayoría trabaja el tiempo de duración de las acciones en varios periodos de atención. Con respecto al problema Demanda, la mayoría considera que es desconocida y no maneja un criterio de prioridad en la distribución. Del problema Dinamismo del ambiente, la mitad maneja dinamismo en la red y la mayoría establece cambios en la demanda por el ambiente.

Para el modelo propuesto para esta tesis es importante mencionar que a diferencia de los trabajos descritos anteriormente se utiliza la característica de los agentes de realizar un trabajo distribuido y paralelo en la distribución de ayuda humanitaria, en la propuesta de dividir la zona de desastre mediante clústers se aproveche esta ventaja de los agentes de un trabajo colaborativo en la distribución de ayuda humanitaria. De los estudios relacionados se coincide en el uso de medio de transporte terrestre, de capacidad limitada, con una flota homogénea de vehículos.

En la tesis se modela la incertidumbre de la demanda mediante los agentes, puesto que esta característica se va descubriendo por los agentes en cada clúster asignado. En los trabajos relacionados no se trabaja esta característica como tal, además con la división del trabajo distribuido se atiende varias zonas de demanda a la vez por el SMA propuesto. En el trabajo de Xanthopoulos y Koulouriotis (2013) se distribuye un solo tipo de productos en su modelado por agentes, en la tesis propuesta se manejan hasta cinco productos de primera necesidad. La demanda en las zonas de desastre es atendida hasta satisfacerla y los vehículos visitan varias veces estas zonas.

### 2.3.1 DIFERENCIA DEL SMA PROPUESTO CON RESPECTO A LA REVISIÓN DE LOS TRABAJOS RELACIONADOS

El modelo propuesto está basado en agentes ante la problemáticas de la distribución de ayuda en especie en logística humanitaria. Se establecen agentes en un medio ambiente post-desastre natural, se establecen acciones para los agentes y los objetivos de cada agente. El modelo contribuye a las soluciones de coordinación en Sistemas Multi-Agente.

Los beneficios de usar modelos con Sistemas Multi-Agente es tomar en cuenta la dinámica del ambiente, a diferencia de soluciones basadas en técnicas de Investigación de Operaciones donde se cuenta con una dinámica estática.

Con el Sistema Multi-Agente propuesto en esta tesis se contribuye a contar un prototipo de simulación que permite evaluar escenarios de logística humanitaria que no habían sido modelados en los trabajos relacionados encontrados, como el tamaño de área de la zona de desastre, cantidad de localidades de zonas de desastre (nodos), división del área afectada mediante clúster, trabajo de agentes modelados mediante vehículos terrestres y centro de distribución de ayuda, aleatoriedad de los nodos, descubrimiento de la demanda por los agentes, manejo de más de un producto prioritario para distribuir.

El modelado propuesto está basado en agentes aumentados con algoritmos tradicionales de VRP, donde los agentes terrestres conocen su plan de ruta otorgado por la información del agente centro de distribución, contando con la capacidad de hacer dinámica su ruta al momento de quedarse sin carga de producto, el agente terrestre cuenta con la capacidad de llevar un control de lo que entrega en la zonas de desastre.

En los trabajos relacionados no se encontró una evaluación empírica que considerara el costo de las soluciones tomando en cuenta cantidad de agentes y demanda variable. Por lo que este trabajo de tesis aporta estas características de evaluación del impacto de los agentes en la problemática de distribución de ayuda en Logística Humanitaria,

A continuación se explica en que consiste la teoría de los Sistemas Multi-Agente.

La inteligencia artificial distribuida (IAD) para Avouris y Gasser (1992) se ha definido como un subcampo de la Inteligencia Artificial (IA) que se centra en los comportamientos inteligentes colectivos que son producto de la cooperación de diversas entidades denominadas agentes.

Un agente software es una entidad capaz de percibir su entorno, procesar tales percepciones y responder o actuar en su entorno de manera racional y correcta, tendiendo a maximizar un resultado esperado. Una de las características más atrac-

tivas de los agentes software es su carácter autónomo, es decir, la capacidad para realizar las tareas que le permitan alcanzar un objetivo sin supervisión humana. Para Wooldridge (2009) un agente es un sistema computarizado que está situado en un ambiente (entorno), y que es capaz de realizar acciones autónomamente en el ambiente para satisfacer sus objetivos.

La autonomía se define como la capacidad de decidir cómo operar independientemente para satisfacer un conjunto de objetivos, es un espectro y con los agentes se deben delegar objetivos de alto nivel, en vez de planes completos y elaborados. Además de autonomía, los agentes tienen las siguientes propiedades:

- Proactividad: Capacidad de exhibir comportamiento orientado a objetivos; es decir, tomar la iniciativa para satisfacerlos.
- Reactividad: Capacidad de percibir su medio ambiente, y de responder de manera oportuna a cambios en el mismo para así satisfacer sus objetivos.
- Habilidad Social: Capacidad de interactuar y cooperar con otros agentes (y humanos) sus conocimientos para satisfacer sus objetivos.
- Aprendizaje: Capacidad de aprender de sus observaciones y de experiencias pasadas para mejorar su desempeño.

Un Sistema Multi-Agente (SMA) o Multi Agent Systems (MAS) es un sistema distribuido compuesto por agentes software, donde la acción combinada de cada uno de ellos persigue la consecución de un objetivo común, o bien cada uno de ellos persigue su propio objetivo individual. Se puede comparar un SMA como un conjunto de personas, con diferentes dominios de conocimiento, tratando de resolver un problema común.

De acuerdo con Russell y Norvig (2010), los SMA tienen como unidad funcional el agente, el cual es una entidad física o abstracta que puede percibir su ambiente mediante sensores, es capaz de evaluar tales percepciones y tomar decisiones por

medio de mecanismos de razonamiento simples o complejos, comunicarse con otros agentes para obtener información y actuar sobre el medio en el que se desenvuelven a través de ejecutores. A partir de esto se espera que un agente actúe de manera racional, intencional y autónoma en el momento preciso. La integración de un conjunto de agentes de diversos tipos para constituir un SMA necesita de tres conceptos importantes: comunicación, cooperación y coordinación.

Un SMA cuentan con las siguientes propiedades:

1. Medida de desempeño: Es el parámetro utilizado para el agente para medir su rendimiento. ¿Qué se pretende maximizar, optimizar, satisfacer?.
2. Ambiente: Es el entorno donde interactúa el agente. ¿Qué conforma el ambiente?.
3. Actuador: Salidas del agente, acciones, actividades, medio para ejecutar la acción, método que se invoca en un objeto. ¿Mecanismos disponibles para ejecutar acciones?.
4. Sensor: Entradas del agente, Observaciones. ¿Cómo capturo la información del ambiente?.

La propuesta trabaja con problemas de enrutamiento de vehículos para las operaciones de distribución de ayuda humanitaria en un ambiente de desastre, ofrece la ventaja de tomar decisiones autónomas como la capacidad de los vehículos de ir descubriendo la demanda de forma dinámica, de solicitar nuevas tareas y de comprometerse con las tareas realizadas anteriormente para aprovechar el flujo continuo de la información entrante.

Se identifican una serie de casos de simulación para evaluar el comportamiento del sistema en cuanto a los agentes involucrados en encontrar la solución, ofrece soluciones haciendo uso de algoritmos óptimos como el de TSP y Dijkstra. Para el SMA propuesto se define una división de la zona afectada mediante clústers permitiendo

realizar una distribución del trabajo en los agentes, en cada clúster existe un sub-grafo donde se planifica una ruta mediante el algoritmo TSP vecino más próximo, a cada agente vehículo terrestre se le asigna un clúster con su ruta para satisfacer la demanda. Cuando el agente terrestre se queda sin carga en el trayecto de su ruta manda llamar el algoritmo Dijkstra para determinar el camino más corto entre el vértices donde se quedó sin carga (nodo origen) y el centro de distribución (nodo destino). Esta situación resulta razonable debido a que no tiene sentido que el agente terrestre siga su recorrido sin carga o regrese por la misma ruta, con el Dijkstra se optimiza el costo de recorrido al centro de distribución para que el agente se recarga de productos, la combinación de TSP y Dijkstra no se encontró en los trabajos relacionados del uso de agentes en los problemas de distribución de ayuda en logística humanitaria.

En la tesis se trabajarán los atributos de acuerdo al análisis de lo encontrado en el estado del arte, con respecto al problema de transporte se emplean transportes terrestres, de capacidad limitada. Los centros de distribución en nuestros modelos que corresponden al atributo espacio, dan la atención de varias zonas a la vez y con división de la zona afectada mediante clústers. Con respecto al tiempo, nuestros modelos consideran acciones durativas y múltiples periodos de atención. Con respecto al problema demanda, se considera que es sensible con el ambiente debido a que los agentes van descubriendo la demanda conforme realizan su recorrido y visitan las zonas de desastre de su clúster asignado. Del problema Dinamismo del ambiente, existe dinamismo en la red, debido a que las zonas de desastre se generan de manera aleatoria en el modelo.

# METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN

---

### 3.1 INTRODUCCIÓN A LA METODOLOGÍA UTILIZADA

En esta sección definimos aspectos de la metodología de investigación aplicada al proyecto de tesis. El desarrollo de la tesis cuenta con un enfoque de proyecto de investigación aplicada. Implementa algoritmos en agentes aplicados a un ambiente en el caso de los desastres naturales. La tesis verifica una hipótesis en relación a un modelo Multi-Agente y su eficacia en la distribución de ayuda humanitaria.

Mediante el modelo propuesto se contribuye a mejorar las tareas relacionadas a la logística humanitaria en la distribución de ayuda en especie. Este modelo proporciona optimizar las tareas de distribución de ayuda bajo la variable de salida costo de la ruta. La evaluación del modelo fue en función de sus propiedades que se simularon y que se enlistan a continuación:

- Costo de la ruta: Sumatoria de los desplazamientos en distancia que hace un agente para satisfacer la demanda de los nodos.
- Número total de vueltas para satisfacer demanda: Número de recargas que realizó el agente terrestre transporte al centro de distribución para satisfacer la demanda de los nodos.

El SMA se modela en un ambiente de desastres naturales bajo terremotos, debido a que hoy en día en México y en el mundo están ocurriendo estos tipos de desastres con mayor frecuencia.

El capítulo está formada por las siguientes secciones: Diseño de la investigación, aborda el tipo de estudio realizado, su diseño y el periodo de la investigación. En la sección de variables se describe conceptual y operacionalmente las identificadas en la investigación. En la sección de muestra se describe como fue tomada la muestra para la investigación. En la sección de instrumento se puntualiza en el tipo de instrumento utilizado y como se aplicó en la investigación. En la sección análisis del Sistema Multi-Agente propuesto y su solución, se describe a detalle el modelo Multi-Agente desarrollado para la distribución de ayuda en especie en Logística Humanitaria.

## 3.2 DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

Se realizó un estudio cuantitativo bajo un diseño experimental. La investigación cuenta con un enfoque cuantitativo debido a la intención de optimizar el costo de la distribución de la ayuda en términos de los costos de las rutas ejecutadas por los agentes. En el modelo se realizó un diseño de experimentos por escenarios restringidos. En estos experimentos se buscó poner a prueba el modelo realizado, mediante acciones de planificación de las rutas de menor costo para los agentes, cubrir la demanda de las zonas de desastre en productos en especie transportados por los agentes terrestres y evaluar el impacto de la demanda en los agentes y el impacto de la cantidad de agentes en la distribución de ayuda.

El escenario experimental se realizó en base a una logística humanitaria para desastres naturales provocados por terremotos, el ambiente de este tipo de escenarios es dinámico por la misma naturaleza del evento. Un ambiente dinámico es aquél en el que existen otros procesos operando, por lo que pueden existir cambios fuera del control del agente o de las actividades que se desean modelar, este ambiente dinámico

en los escenarios de logística humanitaria es el que ha resultado complejo de modelar bajo otras técnicas.

El periodo de análisis de la investigación comprende del año 2011 a 2017, periodo a través del cual se han realizado modelados de logística humanitaria post-desastre natural en diferentes países afectados y en una fase de respuesta ante este acontecimiento.

### 3.3 VARIABLES

La estrategia de solución esta basada en un Sistema Multi-Agente (SMA).

- ***Definición Conceptual:*** Es un sistema que consiste en un grupo de agentes que interaccionan entre ellos mismos, típicamente intercambiando información a través de una, red con el fin de satisfacer sus objetivos, (Wooldridge, 2009).
- ***Definición Operacional:*** Capacidad de seleccionar una acción de manera oportuna que maximice su medida de desempeño, dada la evidencia provista en sus observaciones y su conocimiento previo, operar independientemente para satisfacer la función objetivo, (Wooldridge, 2009).

La variable dependiente es el costo de la ruta.

- ***Definición Conceptual:*** Son los costos asociados con el movimiento de un vehículo de un nodo a otro, (Caceres-Cruz *et al.*, 2015).
- ***Definición Operacional:*** Estos costos por lo general representan distancias, tiempos de viaje, número de vehículos utilizados, o una combinación de estos factores,(Caceres-Cruz *et al.*, 2015).

### 3.4 MUESTRA

Unidad de análisis: Modelos de distribución de ayuda en especie para logística humanitaria después de haber ocurrido un desastre natural.

Población: Modelos que representen una simulación de coordinación de tareas en logística humanitaria para enviar, recibir y distribuir ayuda en especie después de haber ocurrido un desastre natural.

Muestra Probabilística: La selección de la muestra se generó de manera aleatoria con escenarios que simulen características reales del desastre y asociados a un caso de estudio. Se generaron escenarios sobre el ambiente para la verificación de la demanda, puntos de distribución, número de medios de transporte.

### 3.5 INSTRUMENTO

Tipo de instrumento empleado: Sistema Multiagente para distribución de ayuda en especie en Logística Humanitaria. Sistema multi-agente basado en la arquitectura BDI implementado bajo Java en el entorno de programación eclipse y con la herramienta para sistemas multi-agentes JASON.

Descripción del instrumento aplicado: Es un sistema basado en la inteligencia artificial distribuida basado en la teoría de agentes y diseño de sociedades.

Cómo se aplicó el instrumento:

- Se realizaron experimentos con escenarios que simulen características reales de desastres y con datos tomados del caso de estudio.
- Se generaron escenarios sobre el ambiente
- Se verificó las capacidades de los agentes en el modelo

## 3.6 ANÁLISIS DEL SISTEMA MULTI-AGENTE PROPUESTO Y SU SOLUCIÓN

La especificación del modelo se inicia con un diagrama de visión general resultado de un análisis del problema, este diagrama muestra las interacciones que se producen entre el sistema y el entorno.

### 3.6.1 PROPUESTA DE DIAGRAMA GENERAL DEL MODELADO DE LOGÍSTICA HUMANITARIA

En la **sección definición del problema** se han identificado los elementos que forman parte de nuestro modelo. El modelo capta los aspectos importantes del problema y expresa un medio adecuado para trabajar con las variables involucradas que fueron identificadas como las más relevantes en nuestra revisión de la literatura.

El modelo cuenta con una notación y se describe a continuación en la siguiente Figura 3.1. En la figura se observa la simbología utilizada para representar el diagrama general del sistema.

En la Figura 3.2 se presenta un diagrama general que plantea el problema de la distribución de ayuda en logística humanitaria. Este diagrama permitió identificar agentes y sus roles, definir escenarios, estados, acciones y restricciones de los agentes, recursos que demandan, medidas de desempeño para el logro de un objetivo, sensores y actuadores de los agentes, ambiente donde se desenvuelven.

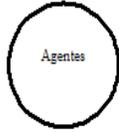
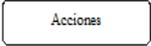
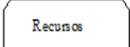
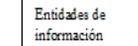
Símbolo	Significado
	Entidades capaces de realizar operaciones independientemente en nombre de su propietario. Averigua por sí mismo lo que tiene que hacer para satisfacer sus objetivos. Percibe y actúa en un medio
	Acciones: Que se necesita hacer para que se cumpla las tareas.
Restricción 	Restricciones: Que impide o que limita una actividad.
Medida de desempeño 	Medida de desempeño: Medición de la calidad del logro de un objetivo (actividades o servicios).
Vinculación 	Vinculación con un agente
Comunicación 	Comunicación entre agentes
Flujo 	Flujo de información en el modelo
	Recursos: Que se requiere para hacer una actividad o servicio.
	Entidades de fuente o destino de información : Fuente o destino de datos que pueden ser programas, personas, organizaciones u otra entidad que interactúe con el modelo

Figura 3.1: Notación de la simbología utilizada. Fuente: Elaboración propia JIHV (2017).

### 3.6.2 PROPIEDADES DE LOS COMPONENTES DEL MODELO

A continuación se explica el modelo SMA generado para el problema de Logística Humanitaria. La representación esquemática del mismo puede observarse en la Figura 3.2

- *Agente Centro de Distribución*

- **Rol:** El agente que modela al Centro de Distribución juega un rol activo en la síntesis de soluciones. No solamente tiene control del inventario y tipo de productos que se distribuirán, sino también es el encargado de planificar las actividades de registro de productos, cargas, envío y rutas de los agentes de transporte. Coordina a los agentes de transporte, conoce la división del área de desastre mediante los clúster, planifica la ruta de los agentes de transporte y se las comunica asignándoles el objetivo de re-

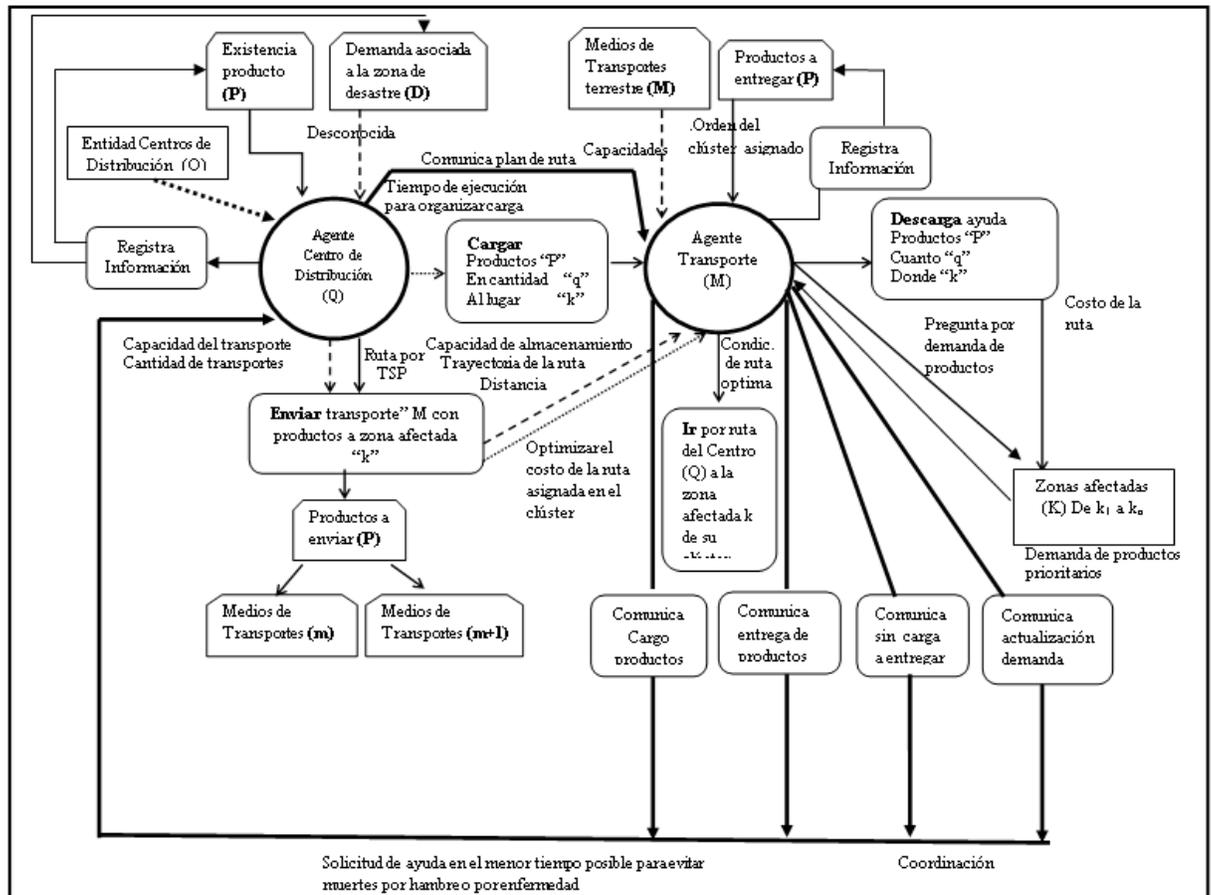


Figura 3.2: Diagrama general propuesto para el modelo de distribución de ayuda en especie para logística humanitaria en situaciones post-desastres naturales. Fuente: Elaboración propia JIHV (2017).

correrla. Recibe información del Agente transporte acerca del seguimiento de los productos a entregar y de la demanda en las zonas afectadas. Recibe de los Agentes de Transporte información acerca de las zonas atendidas en las que se ha satisfecho la demanda.

- **Medida de desempeño:** Costo óptimo de la ruta que entregará a los agentes terrestres.
- **Ambiente:**
  - Vehículos terrestres (Medios de transporte (M))
  - Zonas afectadas o localidades (K)
  - Productos que se encuentran en el centro de distribución (P).

- Cantidad de productos a entregar ( $q$ ).
- Almacén donde están los recursos, centro de distribución ( $Q$ ).
- Demanda asociada a la zona de desastre ( $D$ ).
- **Sensores:**
  - Sensado de producto.
  - Cantidad de productos.
  - Sensado de disponibilidad transporte.
  - Número de transportes.
  - Sensado de localización de transporte.
  - Sensado de la demanda.
- **Acciones:**
  - Cargar una cantidad “ $q$ ” de productos “ $P$ ” en el medio de transporte “ $M$ ” del centro de distribución “ $Q$ ”.
  - Enviar un transporte “ $M$ ” con una cantidad “ $q$ ” de productos “ $P$ ” del centro de acopio “ $Q$ ” a la zona afectada “ $K$ ”.
  - Registrar Entrega de productos “ $P$ ” por el transporte “ $M$ ” en la zona afectada “ $K$ ”.
  - El centro de distribución actualiza la demanda de las zonas afectadas.
- **Agente de transporte**
  - **Rol:** Cumple el objetivo de transportar los productos en especie del Centro de Distribución a la zona afectada. Recibe información del Agente Centro de Distribución acerca de las zonas afectadas a las cuales debe llevar los productos, realizando el recorrido mediante el plan asignado de la ruta TSP. Lleva control de su carga asignada para entregar y monitorea cuando se queda sin carga para regresar al Centro de Distribución a recargarse de más producto, determinando la ruta más corta al Centro de Distribución, va descubriendo la demanda en las zonas afectadas con-

forme avance en su recorrido, comunica la demanda faltante al Centro de Distribución.

- **Medida de desempeño:** Minimizar el costo de la ruta en la distribución de productos en las zonas de desastre. Desplazamiento desde el centro de distribución “Q” hacia la zona afectada “k” de su ruta asignada.
- **Ambiente:**
  - Ruta a recorrer
  - Zona de afectación (localidades) donde se mueve el agente (K).
  - Vehículos terrestres (Medios de transporte=M).
  - Centro de distribución (Q).
- **Sensores:**
  - Sensado de ruta.
  - Sensado de carga.
  - Sensado de la demanda.
- **Acciones:**
  - Ir el medio de transporte “M” por una ruta desde el centro de acopio “Q” hasta la zona afectada “k”.
  - Descargar una cantidad “q” de productos “P” del medio de transporte “M” en la zona afectada “k”.
  - Comunicar entrega de productos (P) al centro de distribución “Q” en la zona afectada “k”.
  - Comunicar necesidades de la demanda al centro de distribución Q de cada uno de las zonas afectadas de su clúster.
- **Entidad zonas afectadas**
  - **Rol:** Es la zona de desastre con necesidades de demanda para recibir ayuda, esta zona pertenece a un clúster el cual atiende un agente para distribuir la ayuda. Es lo que observan los agentes en su recorrido.

- Esta entidad interactúa con los agentes intercambiando información de cuantos productos necesita para satisfacer sus necesidades de la demanda. El agente transporte recopila la demanda de la zona afectada y se la comunica al centro de distribución cada vez que termina de recorrer la ruta TSP.
- Esta entidad no es un agente, es un componente que da información al modelo.

### 3.6.3 POLÍTICA DEL ALGORITMO IMPLEMENTADO

1. Se inicializa un Grid de  $N \times M$  que represente el tamaño de la zona afectada
2. Se definen los agentes terrestres  $m \in M$  los cuales denota el medio de transporte terrestre utilizado para enviar o distribuir los productos.
3. Se define un agente administrador  $Q$  que representa el centro de distribución donde están almacenados los productos en especie que se van a entregar.
4. Se define de manera aleatoria  $k \in K$  las locaciones de desastre con necesidades para recibir ayuda, zonas afectadas a modelar.
5. Se define una división de la zona afectada mediante clústers.
6. De manera aleatoria se coloca  $X, Y$  coordenadas, para cada locación.
7. Se establece conectividad de las locaciones (nodos) en el grafo colocando métricas de costo en distancia, mediante  $\text{distanceManhattan}$ , que es la distancia entre dos puntos medidos a lo largo de los ejes en ángulos rectos. En un plano  $p_1$  en  $(x_1, y_1)$  y  $p_2$  en  $(x_2, y_2)$ , es  $|x_1 - x_2| + |y_1 - y_2|$
8. La demanda de los nodos se inicializa de manera aleatoria por el modelo para cada una de las ciudades, tomando en cuenta la demanda total por producto

en cada locación. La demanda se va descubriendo por los agentes conforme se visitan los nodos.

9. El agente centro de distribución le comunica a los terrestres el plan de ruta de su clúster asignado, la ruta óptima para el agente a partir del algoritmo TSP vecino más próximo con los valores de las submatrices de cada uno de los clusters.
10. Los terrestres se cargan de productos de acuerdo a su capacidad homogénea y van teniendo control en la ruta de su stock local
11. Cuando un agente llega a un nodo de la ruta asignada, pregunta por la demanda del nodo y le reparte los productos de acuerdo a su stock, va sensando el ambiente. Este actividad se repite mientras el agente cuente con productos por entregar.
12. Cuando el agente terrestre se queda sin carga en el trayecto de su ruta manda llamar el algormot Dijkstra para determinar el camino más corto entre el vértice donde se quedó sin carga (nodo origen) y el centro de distribución (nodo destino), dado el grafo construido por el modelo desarrollado, obteniendo el costo mínimo entre esos dos puntos.
13. Cuando el agente terrestre termina el recorrido de su ruta le comunica al agente administrador que es el centro de distribución, la creencia de la demanda de su cluster que fue descubriendo.
14. En base a a la actualización de creencias el agente admin carga al agente terrestre tomando en cuenta la demanda que falta por satisfacer en el clúster y la capacidad del agente terrestre.
15. El agente terrestre vuelve a su ruta y repite los pasos del 11 al 14 hasta que la demanda del cluster quede satisfecha.

## 3.6.4 DIAGRAMA DE OBJETIVOS DEL MODELO

En la Figura 3.3 se presenta el diagrama de objetivos que siguen los agentes.

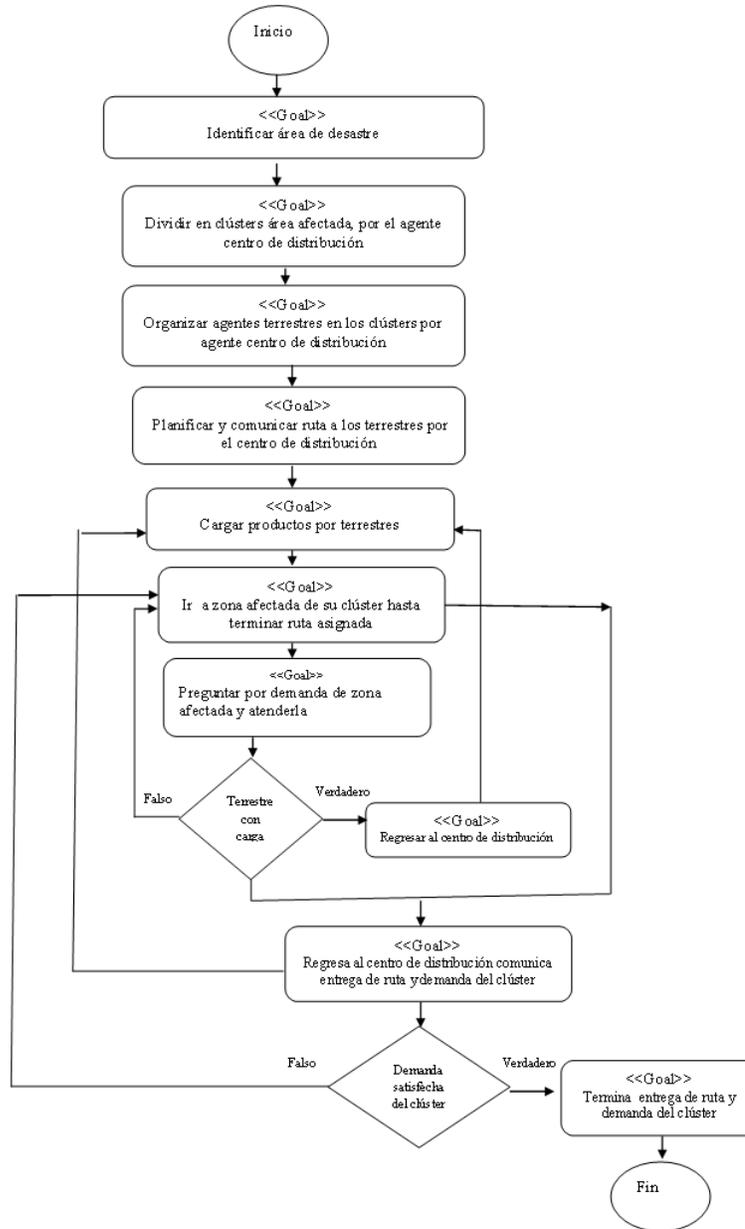


Figura 3.3: Diagrama de objetivos del SMA.

## CAPÍTULO 4

# EVALUACIÓN EMPÍRICA Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

---

### 4.1 CASO DE ESTUDIO

Se tomó como caso de estudio un modelado de desastre sísmico para la Ciudad de México, tomando en cuenta sus zonas de riesgo tomadas del atlas de riesgo para sismos de protección civil de la ciudad de México (de Protección Civil, 2018)

Las zonas sísmicas de la Ciudad de México están clasificadas de acuerdo al riesgo para resistir un sismo. Se elaboró un mapa geológico por Protección Civil de la Ciudad de México para identificar la intensidad del movimiento, tomando en cuenta el tipo de suelo: firme, blando y de transición. En la zona I, la clasificó como firme o de lomas: localizada en las partes más altas de la cuenca del valle, está formada por suelos de alta resistencia y poco compresibles. En la zona II o de transición el suelo presenta características intermedias entre la zonas I y III. En la zona III o de lago: localizada en las regiones donde antiguamente se encontraban lagos (lago de Texcoco, Lago de Xochimilco). El tipo de suelo consiste en depósitos lacustres muy blandos y compresibles con altos contenidos de agua, lo que favorece la amplificación de las ondas sísmicas. En la figura 4.1 podemos observar la clasificación de las zonas

hechas por por Protección Civil de la Ciudad de México.

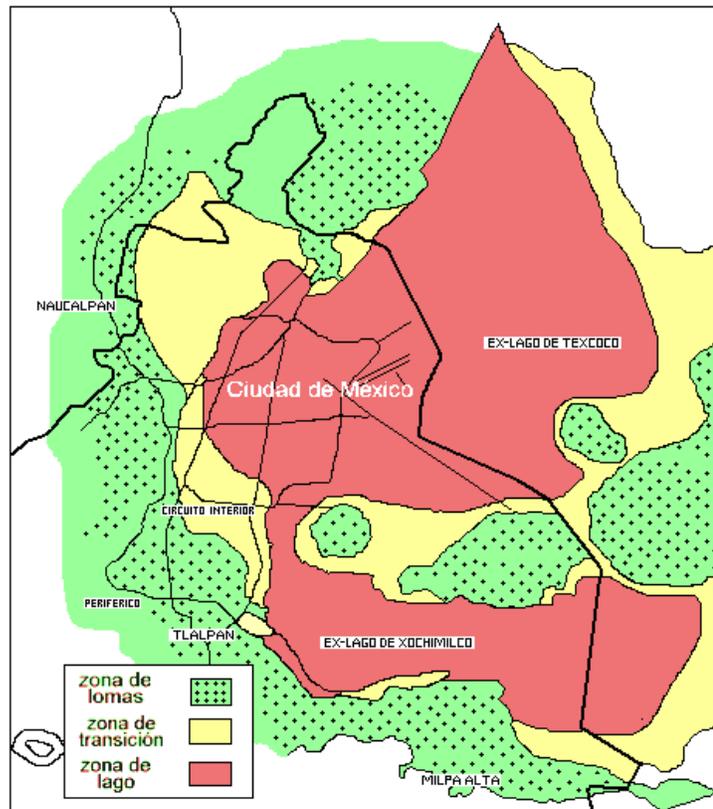


Figura 4.1: Clasificación de zonas sísmicas de la Ciudad de México. Fuente de Protección Civil (2018).

Para el caso de estudio se propusieron dos zonas una de bajo riesgo y otra de alto riesgo, quedando clasificadas como sigue:

**Zona 1 (bajo riesgo):** Iztapalapa, Cuajimalpa de Morelos, Álvaro Obregón, La Magdalena Contreras, Milpa Alta, Tlalpan, Miguel Hidalgo.

**Zona 2 (alto riesgo):** Azcapotzalco, Benito Juárez, Coyoacán, Gustavo A. Madero, Cuauhtémoc, Venustiano Carranza, Iztacalco, Tláhuac, Xochimilco.

De acuerdo a las zonas se clasifico la información de la siguiente manera

Tabla 4.1: Clasificación de zonas para el caso de estudio

Zona	Características	Extensión territorial por zona ( $km^2$ )	Población por zonas	Número de colonias por zona	Viviendas habitadas por zona	Índice de riesgo
Zona 1 (bajo riesgo)	Suelos de alta resistencia y poco compresibles, la amplificación de las ondas sísmicas es reducida y los movimientos son de poca duración. Localizada en las partes más altas de la Cuenca del Valle de México	990	4,200,430	927	1,097,929	Bajo 0.76
Zona 2 (alto riesgo)	Depósitos lacustres muy blandos y compresibles, con altos contenidos de agua, que favorecen la amplificación de las ondas sísmicas. Regiones donde antiguamente se encontraban los lagos de Xochimilco y Texcoco	513	4,700,659	901	1,355,841	Alto 2.77

Tabla 4.2: Datos del caso de estudio por delegación de las zonas

Zona 1 de bajo riesgo					
Totales	7	990	4,153,939	927	1,097,929
zona 1	Delegaciones	Extensión territorial, (km2)	Población	Número de colonias	Viviendas habitadas
	Álvaro Obregón	97	732700	271	197926
	Cuajimalpa de Morelos	71	192098	51	47897
	Iztapalapa,,	113	1801846	235	460747
	La Magdalena Contreras	64	242117	51	63267
	Miguel Hidalgo	46	380280	94	120186
	Milpa Alta	288	136869	33	31820
	Tlalpan,	311	668029	192	176086
Zona 2 de alto riesgo					
Totales	9	513	4,700,659	901	1,355,841
zona 2	Delegaciones	Extensión territorial, (km2)	Población	Número de colonias	Viviendas habitadas
	Cuauhtémoc,	32	533670	34	173907
	Gustavo A. Madero	88	1170991	243	320756
	Iztacalco,	23	376306	38	104406
	Tláhuac,	101	365710	88	91254
	Venustiano Carranza	34	420047	70	123327
	Xochimilco	119	417121	114	102778
	Azcapotzalco,	33	406450	116	117264
	Benito Juárez	27	397476	57	141203
	Coyoacán,	56	612888	141	180946

### 4.1.1 MAPEO PARA EL CASO DE ESTUDIO

En las siguientes tablas se muestra el mapeo realizado para el caso de estudio, En la tabla 4.3 se presenta como se calculó el índice de riesgo para las zonas.

Tabla 4.3: Cálculo del índice de riesgo para las zonas

Para el índice de Riesgo	(Población Total de la zona/ Viveindas habitadas)* Porcentaje de daño según Whitman <i>et al.</i> (1997). El porcentaje de riesgo para las zonas se considera: Moderado (.20) y Muy grave (.80)
zona 1	0.76
zona 2	2.77

En la asignación de nodos se considera lo siguiente:

- Los nodos se generan de manera aleatoria en todo el grid, de acuerdo al número de nodos a modelar.
- Los nodos son asignados y distribuidos en cada clúster de manera aleatoria
- Para cada clúster se asigna un agente. Dependiendo del número de clústers habrá tantos agentes

Las colonias representadas en cada nodo para el modelado, se calculó tomando en cuenta los  $Nodos\ por\ clúster = \frac{Numero\ de\ colonias\ de\ la\ zona}{delegaciones\ de\ la\ zona}$ . De los nodos por clúster se tomó una proporción de nodos que para el modelado fue de cinco, quedando el cálculo de  $Proporción\ colonias\ por\ clúster = \frac{Nodos\ por\ clúster}{proporción} (5)$ . Así se obtuvo las colonias representadas en cada nodo, multiplicando a este número obtenido el índice de riesgo de cada zona e incrementándolo a las colonias representadas.

Tabla 4.4: Colonias representadas en cada nodo para el modelado

Zonas	Nodos por cluster	Proporcion colonias por clúster	Colonias representadas en cada nodo	Índice de riesgo	Incremento por índice de riesgo	Colonias representadas en cada nodo + incremento de riesgo
Zona 1	132.43	26.49	26	0.76	19.76	<b>46</b>
Zona 2	100.11	20.02	20	2.77	55.4	<b>75</b>

La población por nodo para el modelado se calculó tomando en cuenta la  $Población\ por\ delegación = Población\ zona / delegaciones$  y así se obtuvo  $Población\ por\ nodo = Población\ por\ delegación / proporción\ nodos$  (5).

Tabla 4.5: Población por nodo para el modelado

Zonas	Población por delegación	Población por nodo
Zona 1	593420	118 684
Zona 2	522295	261 148

El área del Grid para el modelado se calculó bajo las siguientes consideraciones:

$Área\ del\ Grid = Extensión\ territorial\ de\ la\ zona / factor\ de\ escala.$

Tabla 4.6: Área del grid para el modelo

Zonas	Área del Grid	Factor de escala	Tamaño del grid
Zona 1	99	Escala 1:10; 1 km <sup>2</sup> equivale a 10 km <sup>2</sup> en el modelo	99 x 99
Zona 2	51	Escala 1:10; 1 km <sup>2</sup> equivale a 10 km <sup>2</sup> en el modelo	51 x 51

La demanda de productos para el modelado se calculó tomando en cuenta la  $Población\ por\ delegación = Población\ total\ de\ la\ zona / delegaciones$ , multiplicando a este resultado índice de riesgo y obteniendo  $Demanda\ de\ la\ zona = Población + el\ incremento\ del\ índice\ de\ riesgo.$

Tabla 4.7: Demanda de producto para el modelado

Zonas	Población por delegación	Índice de riesgo de la zona	Incremento del índice de riesgo	Demanda de la zona
Zona 1	593420	0.76	450999	1044419
Zona 2	522295	2.77	1446758	1969053
			Demanda Total	3013472

#### 4.1.2 CONSIDERACIONES GENERALES PARA LOS EXPERIMENTOS REALIZADOS

**Costo de la ruta es:** La sumatoria de los desplazamientos en distancia que hace un agente para satisfacer la demanda de los nodos.

**Tiempo de ejecución del agente:** Es el tiempo total del agentes, el cual es el tiempo máximo que tarda el agente en satisfacer la demanda mediante los algoritmos implementados en el modelo.

En los experimentos se cuenta con los siguientes valores controlables:

- Medida del área del ambiente, mediante un grafo que se construya para las zonas de bajo y alto riesgo.
- Se cuenta con agente terrestre de transporte que modela el sistema mono-agente y un agente administrador que modela el centro de distribución. En el Sistema Multi-Agente se describen en su configuración.
- El número de las zonas afectadas a visitar que demandan ayuda denominados nodos.

La estrategia para evaluar la solución en los experimentos con el Sistema Mono-Agente y Sistema Multi-Agente se muestra en la tablas 4.8 y 4.9.

Tabla 4.8: Configuración para el Sistema Mono-Agente

Zona	Área	Iteraciones	Agentes	Nodos Variables	Demanda
1 Bajo riesgo de acuerdo al caso de estudio	Grid de 99X99	1 a 10 corridas	Un agente terrestres	10-50 nodos	Variable y desconocida
2 Alto riesgo	Grid de 51X51	1 a 10 corridas	Un agente terrestres	60-100 nodos	Variable y desconocid

El modelo presenta un escenario de configuración centralizada, con demanda desconocida la cual va descubriendo el agente.

Los clústers son divisiones de la zona de desastre (grid del modelo), considerando: se divide el grid en el número de agentes terrestres dados para el modelado. Para cada clúster se asigna un agente. Los clúster se forman en rectángulos del área

Tabla 4.9: Configuración para el Sistema Multi-Agente

Zona	Área	Iteraciones	Agentes	Nodos Variables	Demanda
1 Bajo riesgo de acuerdo al caso de estudio	Grid de 99X99	1 a 10 corridas	10 a 30 agentes terrestres	10-30 nodos	Variable y desconocida
2 Alto riesgo de acuerdo al caso de estudio	Grid de 51X51	1 a 10 corridas	10 a 30 agentes terrestres	60-100 nodos	Variable y desconocid

general afectada. Al menos cada clúster tiene una zona afectada en el modelo. El centro de distribución toma del ambiente del modelo la división de los clústers.

Para las corridas (escenarios) de los experimentos se considera:

- Se realizaron por cada corrida 10 iteraciones, obteniendo los promedios por corrida.
- La ubicación de las zonas afectadas (nodos) y demanda generados aleatoriamente.
- El centro de distribución se encuentra localizado en el origen.
- La capacidad de los vehículos es de  $30m^3$ . Camión de redilas.

## 4.2 EXPERIMENTOS REALIZADOS

### 4.2.1 EXPERIMENTO A: IMPACTO DE LOS AGENTES EN LA DISTRIBUCIÓN DE AYUDA

Este experimento se propuso para evaluar el costo de la ruta para distribuir productos en función de la cantidad de agentes involucrados. Se realizó primero la

evaluación con un Sistema Mono-Agente y posteriormente se escaló a otro escenario de un Sistema Multi-Agente para compararlas. Se consideraron las zonas de alto bajo y alto riesgo para cada caso de acuerdo al caso de estudio que se plantea en el punto 4.1.

La contribución del experimento permito ser el comparativo para evaluar un Sistema Mono-Agente contra un Multi-Agente para la satisfacción de la demanda de los centros de distribución a la zona de desastre de los productos de primera necesidad en caso de desastre, haciendo uso de una planificación de la ruta óptima, a través del algoritmo TSP (Travel Salesman Problem) y del algoritmo Dijkstra para la determinar el camino más corto entre dos zonas geográficas dado el grafo construido por el modelo desarrollado. El algoritmo TSP presenta soluciones óptimas.

Las consideraciones particulares para este experimento realizado fueron:

- Se utilizan de 10 a 30 clúster en el Multi-Agente .
- Se toman de 10-50 zonas afectadas (nodos) para la zona de bajo riesgo y de 60-100 para la zona de alto riesgo.
- Demanda total por producto para la zona de bajo riesgo hasta 35 toneladas y para la de alto riesgo de 65 toneladas.

#### 4.2.2 EJECUCIÓN DEL EXPERIMENTO A Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la tabla 4.10 se muestra la evaluación final del impacto de los agentes en la distribución de ayuda para la **zona 1 bajo riesgo**. Los gráficos obtenidos de las corridas del experimento, demuestran como un Sistema Multi-Agente tienen un mejor desempeño sobre el mono-agente en la distribución de la demanda. Se analiza en las zonas: el costo por recorrer la ruta por desplazarse del centro de distribución a las zonas afectadas (nodos), número de recargas realizadas al centro de distribución.

Tabla 4.10: Impacto de los agentes en la zona 1 (bajo riesgo)

SISTEMA MONO AGENTE ZONA 1							
AREA	Iteracion	Agentes	Clusters	Nodos variables	Costo de la ruta	Tiempo total de ejecución del agentes (seg)	Número total de recargas
99x99	corrida 1	2	1	10	5013	802	26
	corrida 2	2	1	20	9450	1760	39
	corrida 3	2	1	30	21338	5536	78
	corrida 4	2	1	40	50218	12710	153
	corrida 5	2	1	50	70298	16738	186
<b>Promedios</b>					<b>31263.16</b>	<b>7508.98</b>	<b>96.22</b>
SMA. ZONA 1							
AREA	Iteracion	Agentes	Clusters	Nodos variables	Costo de la ruta	Tiempo total de ejecución de los agentes (seg)	Número total de recargas
99x99	corrida 1	11	10	10	2050	2358	21
	corrida 2	16	15	20	3976	5826	35
	corrida 3	21	20	30	5952	10895	49
	corrida 4	26	25	40	8360	16889	65
	corrida 5	31	30	50	9562	26141	78
<b>Promedios</b>					<b>5980.02</b>	<b>12421.60</b>	<b>49.50</b>

Adicionalmente se analiza el tiempo de ejecución de los agentes para desarrollar la solución en cada experimento.

En la figura 4.2 se presenta la comparación en costo de recorrer la ruta por el sistema mono agente y el SMA . Se presentan los costos promedios de cada una de las corridas realizadas. Para el mono-agente el valor máximo obtenido en el experimento fue de 70,298 m. El valor mínimo fue de 5,013 m, el valor medio fue de 21,338 m. Se observa como la ruta óptima para el SMA, resulto de menor costo con un valor máximo de 9,562 m y un mínimo de recorrido de 2,050 m por todos los agentes, en comparación con el mono-agente se estaría en el primer cuartil de optimización de la ruta del mono agente.

En la figura 4.3 podemos observar como el costo de la ruta es optimizado por el número de vueltas que hacen los agentes en el SMA hacia el centro de distribución, Teniendo un valor máximo para el Mono-Agente de 186.00 vueltas, como minimo 26 vueltas, mientras que para el SMA es de 78.00 y 21.00 respectivamente El valor

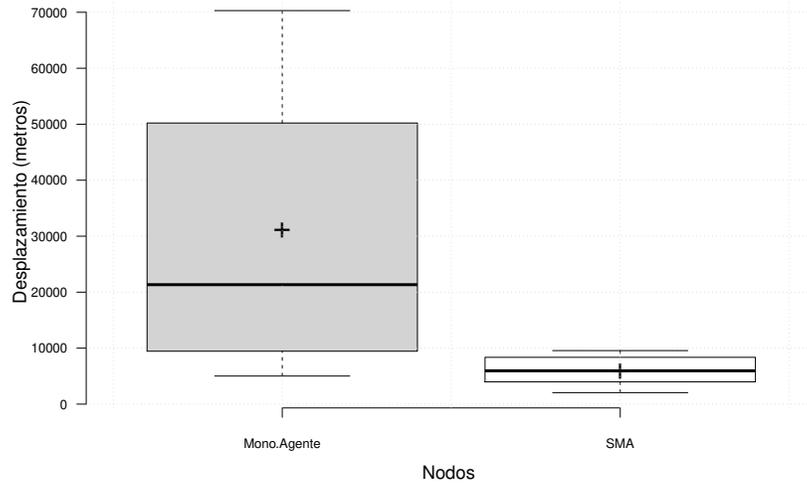


Figura 4.2: Comparación en costo de la ruta, zona 1

medio del mono agente equivale al valor máximo del SMA con 78 vueltas, mientras que el valor medio del SMA es de 39 vueltas, se encuentra en el primer cuartil del mono agente. El valor promedio para el Mono agente fue de 96.40 y para el SMA fue de 49.60.

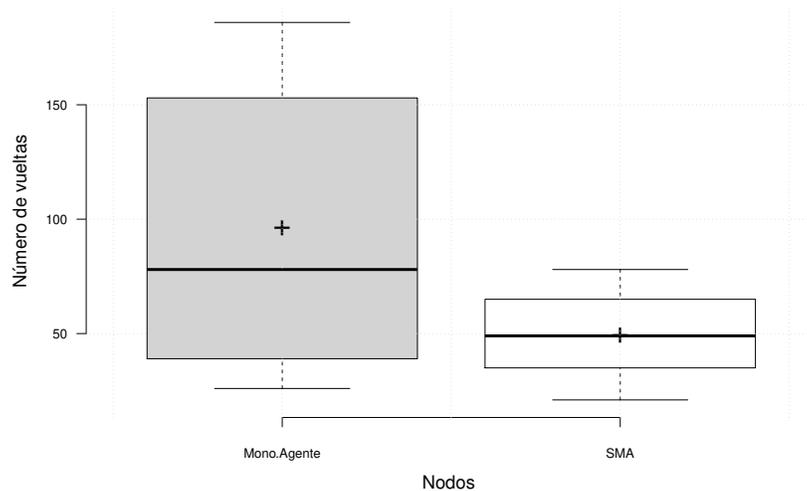


Figura 4.3: Comparación de recargas en zona 1

Se puede observar en la figura 4.2 y 4.3 como el Sistema- Mono agente es muy superior en costo de la ruta y recargas al centro de distribución para satisfacer la

demanda, El trabajo realizado y repartido en el SMA a través de clústers contribuye a atender un caso de desastre de manera más rápida y eficiente.

En la tabla 4.11 se muestra la configuración final del impacto de los agentes para la **zona 2 (alto riesgo)**.

Tabla 4.11: Impacto de los agentes en la zona 2 (alto riesgo) modelada

SISTEMA							
MONO AGENTE.							
ZONA 2							
AREA	Iteracion	Agentes	Clusters	Nodos variables	Costo de la ruta (km)	Tiempo total de ejecución del agentes (seg)	Número total de recargas (vueltas)
99x99	corrida 1	2	1	60	103344	18539	476
	corrida 2	2	1	70	111391	20096	501
	corrida 3	2	1	80	124674	21662	528
	corrida 4	2	1	90	129687	23610	533
	corrida 5	2	1	100	152170	30566	540
<b>Promedios</b>					<b>124253.06</b>	<b>22894.58</b>	<b>515.88</b>
SMA. ZONA 2							
AREA	Iteracion	Agentes	Clusters	Nodos variables	Costo de la ruta (km)	Tiempo total de ejecución de los agentes (seg)	Número total de recargas (vueltas)
99x99	corrida 1	11	10	60	26157	20942	263
	corrida 2	16	15	70	26360	22917	242
	corrida 3	21	20	80	37674	29240	320
	corrida 4	26	25	90	21857	38321	245
	corrida 5	31	30	100	59865	22079	391
<b>Promedios</b>					<b>34382.50</b>	<b>26699.90</b>	<b>292.02</b>

En la zona de alto riesgo se dan resultados similares a los obtenidos en la zona de bajo riesgo. En la figura 4.4 se presenta la comparación en costo de recorrer la ruta por el sistema mono agente y el SMA en la zona 2 de alto riesgo. Los costos de la ruta se amplían en el sistema mono agente a mayor número de nodos por satisfacer la demanda.

Existe una diferencia significativa en la dispersión de los datos entre los dos sistemas, en la variable de salida costo de la ruta, la media del mono agente fue de 124,253.06 m, mientras que el del SMA fue de 34,382.50 m.

Para el mono-agente el valor máximo obtenido en el experimento fue de 152,169.80 m. El valor mínimo fue de 103,343.50 m. El valor medio fue de 124,674.20 m. Se observa como la ruta óptima para el SMA, resultado de menor costo con un valor máximo de 37,673.70 m y un mínimo de recorrido de 21,856.70 m.

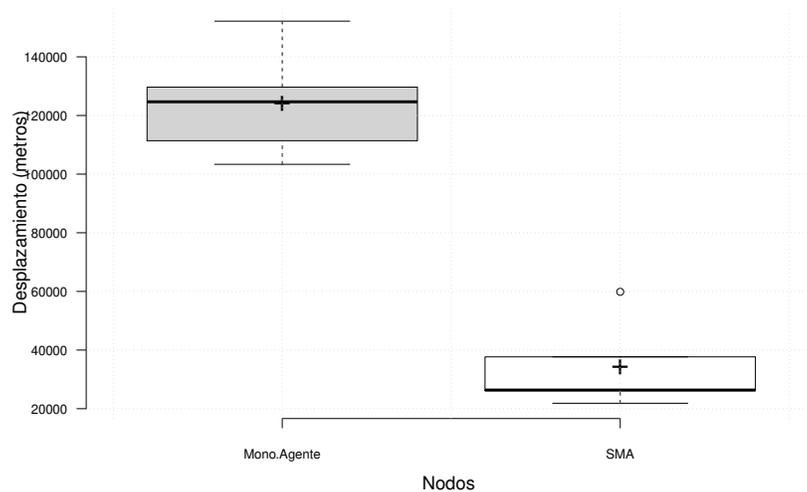


Figura 4.4: Comparación del costo de la ruta en zona 2

En la figura 4.5 se muestra la ganancia del SMA en el número de recargas en la zona de alto riesgo donde se encuentra modelo mayor número de nodos y demanda. El gráfico ayuda a comprobar como el SMA es mejor en su desempeño para la distribución de la demanda.

En el sistema mono agente la carga de trabajo se da completamente para el agente terrestre, ese escenario modela recorridos óptimos de ruta a través del algoritmo TSP vecino más próximo, a pesar de ser un algoritmo óptimo, la distribución de trabajo en el sistema mono agente resulta costosa, como se mostraron en las gráficas de las figuras 4.4 y 4.5, resultando oportuno combinar este algoritmo con el SMA y así optimizar el costo de la ruta para la distribución de la demanda.

En la figura 4.6 se hace un comparativo de la dos zonas con respecto a la variable tiempo de ejecución del sistema en encontrar una solución.

De este caso de evaluación realizado en el impacto de los agentes, se concluye

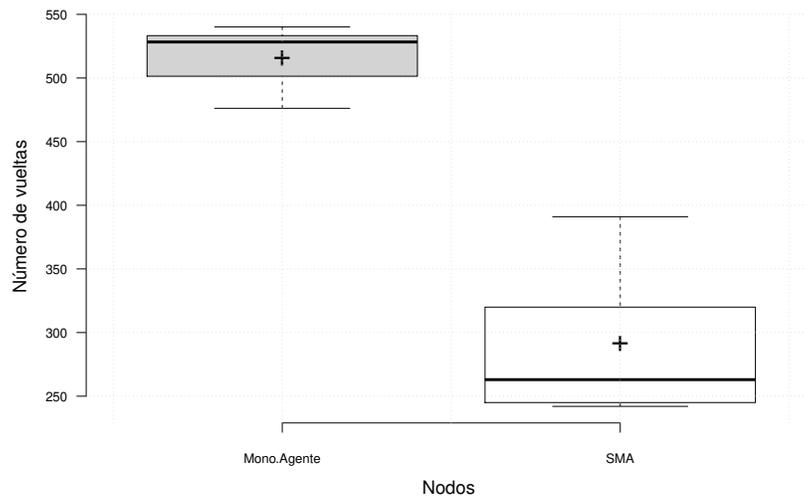


Figura 4.5: Comparación de recargas en zona 2

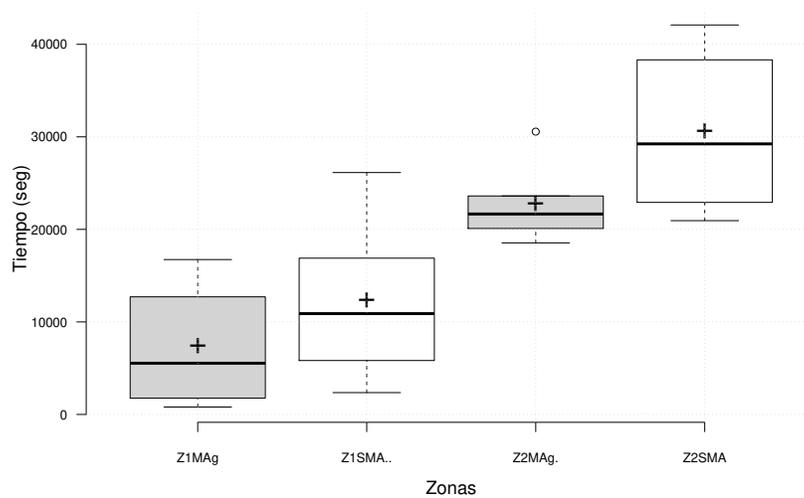


Figura 4.6: Comparación del tiempo de ejecución en las dos zonas, en impacto de los agentes

que el SMA es más rápido en realizar la distribución de ayuda en ambas zonas por la distribución del trabajo, las rutas resultaron óptimas con respecto al sistema mono agente.

El costo de desplazar la ayuda del centro de distribución a las zonas afectadas, resultó siempre mayor en el mono-agente, por lo que existe un impacto directo en

dar mayor número de recargas y recorridos hacia los nodos.

### 4.2.3 EXPERIMENTO B: IMPACTO DE LA DEMANDA EN LOS AGENTES EN LA DISTRIBUCIÓN DE AYUDA

Este experimento se concentró en medir el impacto de la demanda en el Sistema Mono-Agente y el Multi-Agente, bajo las instancias de bajo y alto riesgo. Para este escenario se agregó la variación de la demanda total por producto en los nodos.

El experimento permite evaluar nuestra contribución de los modelos Multi-Agente para la distribución de ayuda en especie en la logística humanitaria. Evaluando si el costo total de la ruta se minimiza con respecto al sistema Mono-Agente. Para el experimento se tomó como segundo escenario el impacto de la demanda en el Sistema Multi-Agente variando la demanda total por producto en los nodos.

La contribución del experimento permitió comparar y evaluar una estrategia Mono Agente contra una Multi-Agente para la distribución de ayuda humanitaria en especie, tomando en cuenta el impacto de la variación de la demanda en los agentes del modelo desarrollado.

Las consideraciones particulares para este experimento realizado fueron:

- Se utilizan 25 clúster en el Multi-Agente, no se varían y permanecen fijos en cada corrida.
- Se modelan 50 zonas afectadas (nodos) para cada corrida del modelo, no se varían.
- Se realizan 5 corridas variando la demanda total por producto, para la zona de bajo riesgo en el rango de 7,14,21,28,35 toneladas respectivamente y para la zona de alto riesgo en el rango de 48,61,74,87,100 toneladas.

Tabla 4.12: Impacto de la demanda en agentes, zona 1 (bajo riesgo)

SISTEMA MONO AGENTE. ZONA 1								
Área	Iteracion	Agentes Fijos	Clusters Fijos	Nodos Fijos	Demanda por producto	Costo de la ruta (km)	Tiempo total de ejecución del agente (seg)	Número total de recargas (vueltas)
99x99	corrida 1	2	1	50	7	3370.00	436.50	10.40
	corrida 2	2	1	50	14	10077.10	1372.20	30.70
	corrida 3	2	1	50	21	25894.80	3183.40	72.20
	corrida 4	2	1	50	28	45141.40	5304.60	124.10
	corrida 5	2	1	50	35	65340.90	8117.70	191.80
<b>Promedios</b>						<b>29964.84</b>	<b>3682.88</b>	<b>85.84</b>
SMA. ZONA 1								
Área	Iteracion	Agentes Fijos	Clusters Fijos	Nodos Fijos	Demanda por producto	Costo de la ruta (km)	Tiempo total de ejecución del agente (seg)	Número total de recargas (vueltas)
99x99	corrida 1	26	25	50	7	5406	7332	43
	corrida 2	26	25	50	14	6531	9391	49
	corrida 3	26	25	50	21	7342	9949	56
	corrida 4	26	25	50	28	8701	11171	64
	corrida 5	26	25	50	35	10352	11959	75
<b>Promedios</b>						<b>7666.28</b>	<b>9960.50</b>	<b>57.28</b>

#### 4.2.4 EJECUCIÓN DEL EXPERIMENTO B Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la tabla 4.12 se muestra la configuración final del caso de evaluación para el impacto de la demanda en zona 1 bajo riesgo

La hipótesis de investigación planteada: La aplicación de una estrategia para la distribución de ayuda humanitaria en especie basada en un Sistema Multi-Agente (SMA), permite optimizar el costo de la ruta para la satisfacción de la demanda de los centro de distribución a la zona de desastre de los producto de primera necesidad. Se analiza en este punto en función de la demanda por satisfacer en cada uno de los clústers.

La figura 4.7 hace un comparativo de la satisfacción de la demanda en el sistema mono agente y SMA con 50 nodos.

Se presenta la comparación en costo de recorrer la ruta por los agentes. Se presentan los costos de cada una de las corridas realizadas para 10 iteraciones. En un principio el mono agente en una demanda de 7 toneladas resultó con un valor máximo menor de 3,845 m, mientras que el SMA fue de 5850 m. Conforme se aumenta la demanda el mono agente aumenta su costo de la ruta hasta un valor máximo de 72,373 m. El valor promedio del SMA crece de manera proporcional a la demanda, hasta alcanzar un promedio de 10351.5 m con 35 toneladas de demanda. Mientras que el mono agente se va alejando hasta lograr un valor promedio de 65340.9 m con 35 toneladas de demanda.

Se comprueba que la aplicación de una estrategia para la distribución de ayuda humanitaria en especie basada en un Sistema Multi-Agente (SMA), permite optimizar el costo de la ruta para la satisfacción de la demanda de los centro de distribución a la zona de desastre de los productos de primera necesidad.

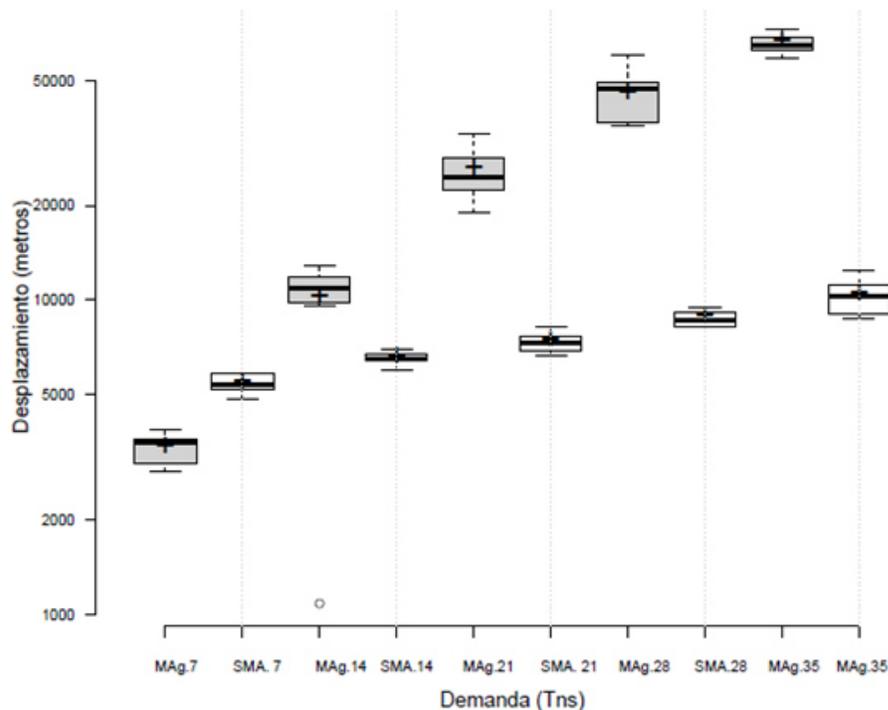


Figura 4.7: Comparación del costo de la ruta en satisfacción de la demanda, zona 1

En la tabla 4.13 se muestra la configuración final para la **zona 2 (alto riesgo)** en el impacto de la demanda.

Tabla 4.13: Impacto de la demanda en agentes, zona 2 (alto riesgo).

SISTEMA MONO AGENTE. ZONA 2								
Área	Iteracion	Agentes Fijos	Clusters Fijos	Nodos Fijos	Demanda por producto	Costo de la ruta (km)	Tiempo total de ejecución del agente (seg)	Número total de recargas (vueltas)
51x51	corrida 1	2	1	50	48	56454.30	8914.00	309.60
	corrida 2	2	1	50	61	74102.50	11551.80	392.90
	corrida 3	2	1	50	74	91089.40	14959.20	504.40
	corrida 4	2	1	50	87	114130.60	18976.90	607.80
	corrida 5	2	1	50	100	168417.10	22518.20	696.00
<b>Promedios</b>						<b>100838.78</b>	<b>15384.02</b>	<b>502.14</b>
SMA. ZONA 2								
Área	Iteracion	Agentes Fijos	Clusters Fijos	Nodos Fijos	Demanda por producto	Costo de la ruta (km)	Tiempo total de ejecución del agente (seg)	Número total de recargas (vueltas)
51x51	corrida 1	26	25	50	48	5920	8579	88
	corrida 2	26	25	50	61	7651	10924	109
	corrida 3	26	25	50	74	9888	12113	138
	corrida 4	26	25	50	87	11708	14399	160
	corrida 5	26	25	50	100	13373	14567	182
<b>Promedios</b>						<b>9707.72</b>	<b>12116.56</b>	<b>135.26</b>

En la zona de alto riesgo se presentan resultados similares en el costo de la ruta. La figura 4.8 hace un comparativo de la satisfacción de la demanda, manteniendo los 50 nodos e incrementando la demanda para la zona. En este caso el costo de la ruta en el mono agente resultó en todos los casos con valores superiores en su media con respecto al del SMA.

La figura 4.9 hace un comparativo de las recargas que hacen los agentes en la zona 1 para satisfacer la demanda, comprobándose que el costo de la ruta es más óptimo en el SMA,

Se tiene un valor máximo para el Mono-Agente de 204 vueltas, como mínimo 9 vueltas en el caso de evaluación, mientras que para el SMA es de 81 y 38 vueltas respectivamente. Cuando se cubre la demanda con 7 toneladas el SMA es el único caso donde resulta mayor el número de vueltas con 38 , para los siguientes casos el SMA se estabiliza en incrementos menores en vueltas hasta llegar a un promedio máximo de 74 vueltas, mientras que el mono-agente crece hasta llegar a un promedio

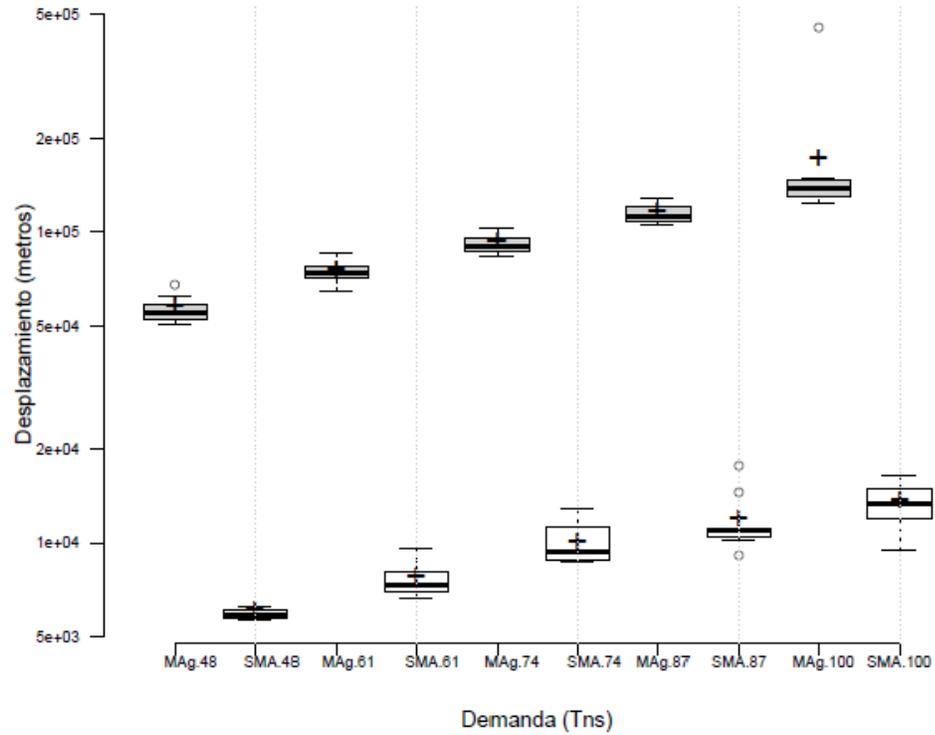


Figura 4.8: Comparación del costo de la ruta en satisfacción de la demanda, zona 2 de 191 vueltas.

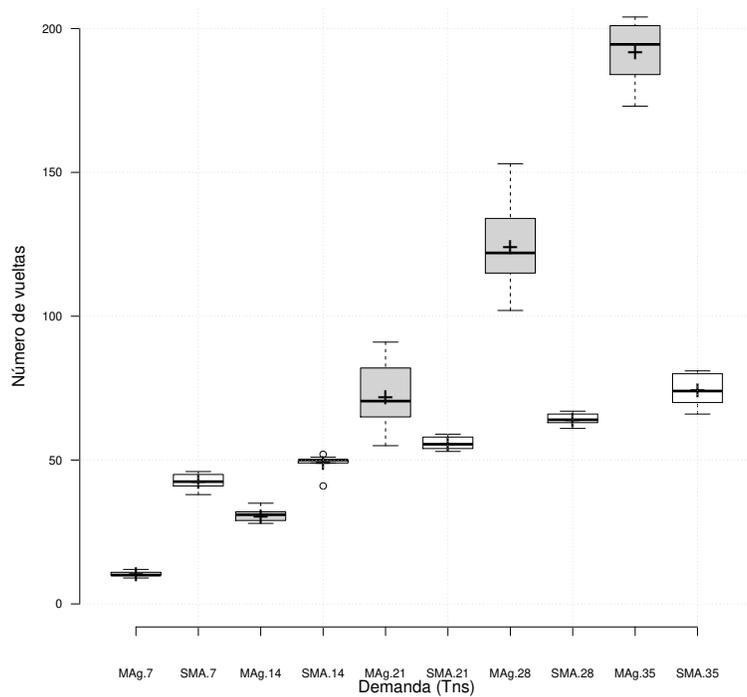


Figura 4.9: Comparación de recargas de agentes al centro de distribución para satisfacer demanda, zona 1

La figura 4.10 hace un comparativo de las recargas que hacen los agentes en la zona 2 para satisfacer la demanda.

Para el mono-agente el valor máximo obtenido en el experimento fue de 751 vueltas y el valor mínimo fue de 278 vueltas, el valor medio máximo obtenido fue de 688 vueltas. Se observa como las recargas para el SMA, resultó de menor costo con un valor máximo de 213 vueltas y un mínimo de 82 vueltas en esta zona de alto riesgo. La diferencia de ahorro en el valor promedio máximo en ahorro de vueltas para el SMA fue de 513 vueltas.

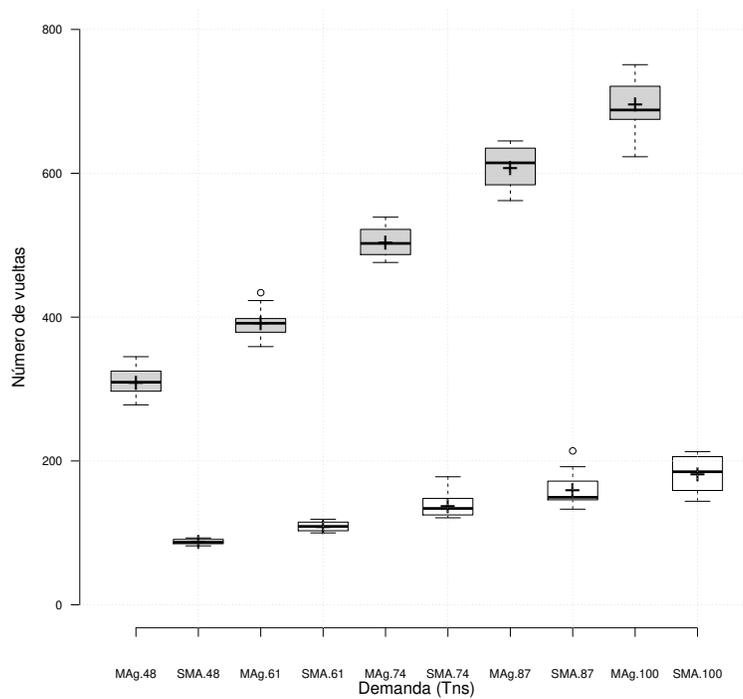


Figura 4.10: Comparación de recargas de agentes al centro de distribución para satisfacer demanda, zona 2

La figura 4.11 hace un comparativo del tiempo promedio de ejecución del sistema desarrollado para encontrar la solución de ambas zonas, tanto en el sistema mono agente como el SMA. Se muestra el tiempo promedio de cada una de las corridas realizadas, se observa que existe una influencia en la modelación de la demanda y el tiempo de ejecución de la solución. En el rango de 49 a 100 toneladas, el SMA respondió mejor en encontrar la solución.

Existe una diferencia entre los dos sistemas, la tendencia es que el SMA incrementará el tiempo de ejecución, en el caso de la comparación de la zona dos, el SMA disminuyó su tiempo de ejecución, su valor máximo fue de 14,567 seg. y un mínimo de 8578.7, mientras que el de el mono agente fue de 22518.2 seg. y 8,914. existe una diferencia del tiempo promedio de 3267.46 que optimiza el SMA, debido al ahorro en el número de vueltas que hacen los agentes terrestres de transporte al centro de distribución, optimizándose ciclos de procesamiento y razonamiento en estos agentes, impactando directament en el tiempo de ejecución de la solución.

El SMA, permite reducir el tiempo de ejecución para encontrar una solución para la satisfacción de la demanda de los centro de distribución a la zona de desastre.

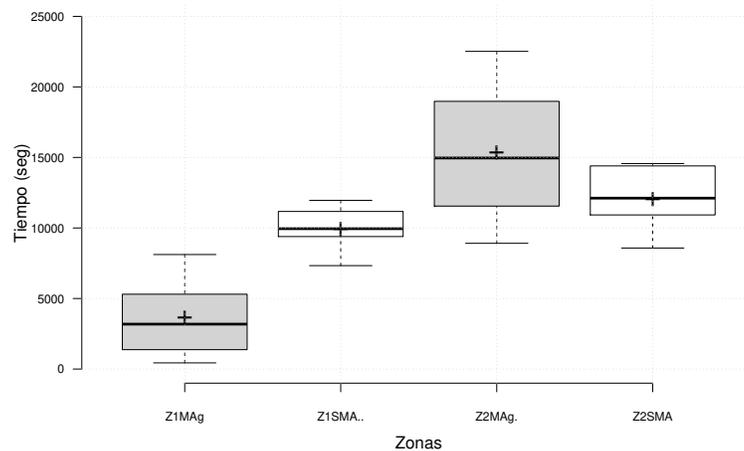


Figura 4.11: Comparación en zonas del tiempo de ejecución de los agentes para satisfacer demanda

# CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

---

En este trabajo se propuso un problema de ruteo de vehículos a través de un Sistema Multi-Agente para la distribución de ayuda en especie en las actividades de logística humanitaria.

Se optimizó el diseño de enrutamiento (proceso de distribución de los centros de distribución a las zonas afectadas), de tal manera que la demanda de los productos en especie de primera necesidad, este satisfecha.

Estos problemas son de importancia modelarlos para diseñar soluciones que permitan optimizar objetivos específicos ante una situación real de un desastre.

La propuesta de solución realizada se basó en un modelado de la distribución de ayuda en logística humanitaria basada en un Sistema Multi-Agente.

Para modelar el problema se tomó en cuenta: un Grid de  $N \times M$  del tamaño de la zona afectada, un centro de distribución,  $K$  zonas de desastre, conexión mediante grafo,  $P$  productos a entregar,  $M$  medios de transportes terrestres con capacidades limitadas, los productos están en el centro de distribución, la demanda la van descubriendo los agentes terrestres y la división de la zona afectada se realiza mediante

clústers.

El modelo se aplicó a un caso de estudio para sismos que pudieran ocurrir en la Ciudad de México, donde se clasificaron dos zonas en caso de sismos, la primera de bajo riesgo y la segunda de alto de riesgo. Las zonas se clasificaron en base a características de suelo, extensión territorial, población, índice de riesgo.

Se generaron con el modelo desarrollado escenarios que simularon características reales del desastre en base al caso de estudio aplicado, realizando dos experimentos para comparar las soluciones a los casos de evaluación propuestos: el impacto de los agentes en la distribución de ayuda humanitaria y la del impacto de la demanda en los agente, bajo la métrica del costo mínimo de la ruta entre el Centro de distribución y las localidades afectadas.

Se logra el objetivo de desarrollar un modelo para el ruteo de vehículos con agentes para distribución de ayuda en logística humanitaria.

En el trabajo de investigación realizado se logró: desarrollar una plataforma de simulación que permite evaluar el costo de la ruta en los agentes para la distribución de ayuda en logística humanitaria, mediante la propuesta de los modelos Mono-Agente y Multi-Agente. Se propone el uso de agentes aumentados con algoritmos tradicionales de VRP que representan el problema de logística humanitaria y obtienen soluciones al mismo. Se realizó una evaluación de los modelos con un diseño de experimentos, considerando el costo de la ruta, tomando en cuenta el impacto de los agentes en la distribución de ayuda con demanda variable y desconocida y la evaluación del impacto de la demanda en los agentes para la distribución de ayuda.

La hipótesis de investigación planteada: La aplicación de una estrategia para la distribución de ayuda humanitaria en especie basada en un Sistema Multi-Agente (SMA), permite optimizar el costo de la ruta para la satisfacción de la demanda de los centro de distribución a la zona de desastre de los producto de primera necesidad con respecto a un sistema mono agente. Se comprueba con los resultados presentados.

Con esta propuesta de tesis se genera conocimiento en modelar propiedades prioritarias en la logística humanitaria como la distribución de ayuda, proponiendo un nuevo modelo.

Se ayuda a planificar la ruta óptima haciendo uso de agentes que distribuyen artículos de primera necesidad a través de un grafo, en las dos zonas propuestas. En la de bajo riesgo se mejora en el costo de la ruta con una diferencia en el valor promedio de 68 %, que son optimizados por el SMA en el número de vueltas al centro de distribución de 46 vueltas.

Un Sistema Multi-Agente (SMA) resulta más eficiente que un Sistema Mono-Agente en el trabajo distribuido. Las cargas de trabajo para recorrer el grafo en el mono agente son mayores en el recorrido del costo de la ruta, mientras que en el SMA el trabajo se reduce en el costo de la ruta y el número de vueltas que hace el agente al Centro de Distribución para realizar sus recargas.

El tiempo de ejecución para encontrar la solución en el SMA resulto mayor bajo el comparativo de impacto de los agentes, debido a que se realizan más ciclos de razonamiento de los agentes con respecto al Mono-Agente.

El modelo propuesto presenta una configuración centralizada a través del agente centro de distribución, que es el administrador general, la planificación de las rutas es otorgada por este agente. Los agentes terrestres dependen de esta planificación para su recorrido, no toman decisiones con respecto a cambio de recorrido de la ruta y solo comparten información con el agente centro de distribución, resultando esta característica como un área de oportunidad del modelo para representar una configuración descentralizada.

## 5.1 TRABAJO FUTURO

Se mencionan puntos sobre los que se puede trabajar en este problema en investigaciones futuras.

Dada el área de oportunidad que presenta el modelo de ser una configuración de comunicación entre los agentes centralizada, el modelo puede escalarse a realizar una comunicación descentralizada, donde los agentes se comuniquen entre ellos, puedan tomar decisiones, compartir información con otros agentes, replantear su ruta y priorizan actividades con respecto a los objetivos que le fueron entregados.

Dada la característica descrita en el punto anterior, los agentes pueden ser más autónomos para tomar sus decisiones con respecto al centro de distribución, mejorarían su comunicación entre ellos y se coadyuvarían a distribuir su carga en las zonas afectadas mejorando el trabajo distribuido.

Con la implementación del problema de logística humanitaria mediante agentes bajo una comunicación centralizada, como trabajo futuro pudiera ser comparado con una implementación de comunicación descentralizada, ser evaluado con otros paradigmas implementados bajo técnicas de investigación de operaciones o inteligencia artificial presentadas en los antecedentes de esta tesis.

Las líneas de investigación más importantes consideradas como trabajo futuro producto de esta tesis sería: Inteligencia Artificial Distribuida mediante Sistemas Multi-Agentes aplicados a problemas de Logística Humanitaria como: modelos de vulnerabilidad por tipo de desastre y por zona, modelos de rescate de personas ante un desastre, operación de centros de distribución, modelos de manejo de inventarios en logística humanitaria, modelos de asignación de recursos para recuperar infraestructura ante un desastre. Aplicación de algoritmos de comunicación en SMA.

Investigaciones donde se combinen técnicas metaheurísticas, algoritmos evolutivos y sistemas multi-agentes para el problema de logística humanitaria y modelar

---

escenarios de mayor incertidumbre como daños en la red, asignación de recursos en los centros de distribución, tamaño de la población damnificada o situaciones que nos pueden ayudar a estimar la ruta de distribución en el menor tiempo o el menor costo.

Aplicación de Sistemas Multi-Agentes a variantes de VRP donde la incertidumbre y dinamismo del ambiente resulta compleja de modelar bajo una técnica de investigación de operaciones

Aplicación de Sistemas Multi-Agentes para navegación autónoma de robots en problemas de logística humanitaria para el rescate de personas.

# BIBLIOGRAFÍA

---

- ABOUNACER, R., M. REKIK y J. RENAUD (2014), «An exact solution approach for multi-objective location–transportation problem for disaster response», *Computers & Operations Research*, **41**, págs. 83–93.
- ALEM, D., A. CLARK y A. MORENO (2016), «Stochastic network models for logistics planning in disaster relief», *European Journal of Operational Research*.
- ANAYA-ARENAS, A. M., A. RUIZ y J. RENAUD (2013), «Models for a fair relief distribution: A network design problem», en *Industrial Engineering and Systems Management (IESM), Proceedings of 2013 International Conference on*, IEEE, págs. 1–8.
- AVOURIS, N. M. y L. GASSER (1992), *Distributed artificial intelligence: Theory and praxis*, tomo 5, Springer Science & Business Media.
- BAI, X. (2016), «Two-Stage Multiobjective Optimization for Emergency Supplies Allocation Problem under Integrated Uncertainty», *Mathematical Problems in Engineering*, **2016**.
- BARZINPOUR, F., M. SAFFARIAN, A. MAKOUY y E. TEIMOURY (2014), «Metaheuristic algorithm for solving biobjective possibility planning model of location-allocation in disaster relief logistics», *Journal of Applied Mathematics*, **2014**.
- BATTINI, D., U. PERETTI, A. PERSONA y F. SGARBOSSA (2014), «Application

- of humanitarian last mile distribution model», *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*, **4**(1), págs. 131–148.
- BELLO, O., L. M. ORTIZ MALAVASSI y J. SAMANIEGO (2014), «La estimación de los efectos de los desastres en América Latina, 1972-2010», .
- BERKOUNE, D., J. RENAUD, M. REKIK y A. RUIZ (2012), «Transportation in disaster response operations», *Socio-Economic Planning Sciences*, **46**(1), págs. 23–32.
- BOHÓRQUEZ, T. y J. ENRIQUE (2011), «Desarrollo y gestión social del riesgo:¿ una contradicción histórica?», *Revista de Geografía Norte Grande*, (48), págs. 133–157.
- BOZORGI-AMIRI, A., M. JABALAMELI y S. M. AL-E HASHEM (2013), «A multi-objective robust stochastic programming model for disaster relief logistics under uncertainty», *OR spectrum*, **35**(4), págs. 905–933.
- BOZORGI-AMIRI, A., M. S. JABALAMELI, M. ALINAGHIAN y M. HEYDARI (2012), «A modified particle swarm optimization for disaster relief logistics under uncertain environment», *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **60**(1-4), págs. 357–371.
- BOZORGI-AMIRI, A. y M. KHORSI (2015), «A dynamic multi-objective location–routing model for relief logistic planning under uncertainty on demand, travel time, and cost parameters», *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, págs. 1–16.
- CACERES-CRUZ, J., P. ARIAS, D. GUIMARANS, D. RIERA y A. A. JUAN (2015), «Rich vehicle routing problem: Survey», *ACM Computing Surveys (CSUR)*, **47**(2), pág. 32.
- CELIK, E., N. AYDIN y A. T. GUMUS (2016), «A stochastic location and allocation model for critical items to response large-scale emergencies: A case of Turkey», *An International Journal of Optimization and Control: Theories & Applications (IJOCTA)*, **7**(1), págs. 1–15.

- CHANG, F.-S., J.-S. WU, C.-N. LEE y H.-C. SHEN (2014), «Greedy-search-based multi-objective genetic algorithm for emergency logistics scheduling», *Expert Systems with Applications*, **41**(6), págs. 2947–2956.
- CHEN, D. y H. GONG (2016), «Schedule on the relief supplies with transportation models in emergency logistics», en *Control Conference (CCC), 2016 35th Chinese, TCCT*, págs. 2902–2906.
- CHOU, J.-S., C.-F. TSAI, Z.-Y. CHEN y M.-H. SUN (2014), «Biological-based genetic algorithms for optimized disaster response resource allocation», *Computers & Industrial Engineering*, **74**, págs. 52–67.
- CRUZ, P. P. (2011), *Inteligencia artificial con aplicaciones a la ingeniería*, Alfaomega.
- DAS, R. y S. HANAOKA (2014), «An agent-based model for resource allocation during relief distribution», *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*, **4**(2), págs. 265–285.
- DE PROTECCIÓN CIVIL, S. (2018), «Atlas de peligros y riesgos de la Ciudad de México», URL [http://www.atlas.cdmx.gob.mx/evento\\_190917.html](http://www.atlas.cdmx.gob.mx/evento_190917.html).
- DOERNER, K. F., W. J. GUTJAHR y L. VAN WASSENHOVE (2011), «Special issue on optimization in disaster relief», *OR spectrum*, **33**(3), págs. 445–449.
- ESFERA, P. (2004), «Carta Humanitaria y Normas mínimas de respuesta humanitaria en casos de desastre», .
- ESMAEILI, V. y F. BARZINPOUR (2014), «Integrated decision making model for urban disaster management: A multi-objective genetic algorithm approach», *International Journal of Industrial Engineering Computations*, **5**(1), págs. 55–70.
- FANG, Y. y J. ZHANG (2016), *Based on Fairness Criterion for Multi-objective Emergency Logistics Distribution Path Selection*, Atlantis Press, Paris, págs. 713–720.

- FEIHU, H., W. YULONG, C. JINJIN y Z. MUHUA (2016), «Material Combinatorial Transportation Research in Emergency Supply Based on Genetic Algorithm», en *Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), 2016 Eighth International Conference on*, IEEE, págs. 383–385.
- GALLEGO, R. C. y J. B. VIÑAS (2011a), «Logística y Tecnología en la Acción Humanitaria», *Tecnologías para el desarrollo humano de las comunidades rurales aisladas. Espanha: Real Academia de Ingeniería*, págs. 427–447.
- GALLEGO, R. C. y J. B. VIÑAS (2011b), *Tecnologías para el Desarrollo Humano de las Comunidades Rurales Aisladas*, capítulo Logística y Tecnología en la Acción Humanitaria, Real Academia de Ingeniería.
- GAN, X., J. LIU y X. HAO (2016), «Emergency logistics scheduling in disaster relief based on a multi-agent genetic algorithm», en *Evolutionary Computation (CEC), 2016 IEEE Congress on*, IEEE, págs. 785–792.
- GOLI, A. y M. ALINAGHIAN (2015), «Location and multi-depot vehicle routing for emergency vehicles using tour coverage and random sampling», *Decision Science Letters*, 4(4), págs. 579–592.
- GUERRERO COMPÉAN, R., L. SALAZAR y S. LACAMBRA AYUSO (2017), «Gestionando el riesgo: Efectos de la gobernabilidad en las pérdidas humanas por desastres en América Latina y el Caribe», *Informe técnico*, Inter-American Development Bank.
- GUHA-SAPIR, D., P. HOYOIS y R. BELOW (2015), «Annual disaster statistical review 2015: the numbers and trends», *Informe técnico*, Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED).
- GUHA-SAPIR, D., F. VOS, R. BELOW y S. PONSERRE (2012), «Annual disaster statistical review 2011: the numbers and trends», *Informe técnico*, Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED).

- HABIBA, M. y S. AKHTER (2012), «MAS workflow model and scheduling algorithm for disaster management system», en *Cloud Computing Technologies, Applications and Management (ICCCTAM), 2012 International Conference on*, IEEE, págs. 164–173.
- HERNÁNDEZ-VEGA, J. I., R. SANCHEZ-NIGENDA y L. A. NEIRA-TOVAR (2016), «Sistemas MultiAgentes: Un Panorama de aplicación de distribución de ayuda en especie para logística humanitaria en situaciones post-desastres naturales.», *Revista Daena (International Journal of Good Conscience)*, **11**(1).
- HOOSHANGI, N. y A. A. ALESHEIKH (2017), «Agent-Based Task Allocation under Uncertainties in Disaster Environments: an Approach to Interval Uncertainty», *International Journal of Disaster Risk Reduction*.
- HUANG, K., Y. JIANG, Y. YUAN y L. ZHAO (2015), «Modeling multiple humanitarian objectives in emergency response to large-scale disasters», *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **75**, págs. 1–17.
- LI, S.-L., Z.-J. MA, B. ZHENG y Y. DAI (2011), «Multiobjective location-transportation problem in post-earthquake delivery of relief materials», en *Industrial Engineering and Engineering Management (IE&EM), 2011 IEEE 18Th International Conference on*, IEEE, págs. 1468–1472.
- LIU, J., J. LIU, K. XIE y K. XIE (2017), «Emergency materials transportation model in disasters based on dynamic programming and ant colony optimization», *Kybernetes*, **46**(4), págs. 656–671.
- LU, C.-C., K.-C. YING y H.-J. CHEN (2016), «Real-time relief distribution in the aftermath of disasters—A rolling horizon approach», *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **93**, págs. 1–20.
- MGUIS, F., K. ZIDI, K. GHEDIRA y P. BORNE (2014), «Distributed and Guided Genetic Algorithm for Humanitarian Relief Planning in Disaster Case», en

- Distributed Computing and Artificial Intelligence, 11th International Conference*, Springer, págs. 149–156.
- MOHAMADI, A. y S. YAGHOUBI (2017), «A bi-objective stochastic model for emergency medical services network design with backup services for disasters under disruptions: An earthquake case study», *International Journal of Disaster Risk Reduction*, **23**, págs. 204–217.
- MOHAMMADI, R., S. F. GHOMI y F. JOLAI (2016), «Prepositioning emergency earthquake response supplies: A new multi-objective particle swarm optimization algorithm», *Applied Mathematical Modelling*, **40**(9), págs. 5183–5199.
- MORENO, A., D. ALEM y D. FERREIRA (2016), «Heuristic approaches for the multiperiod location-transportation problem with reuse of vehicles in emergency logistics», *Computers & Operations Research*, **69**, págs. 79–96.
- NA, L. y L. ZHI (2009), «Emergency relief goods multi-mode transportation based on genetic algorithm», en *Intelligent Computation Technology and Automation, 2009. ICICTA '09. Second International Conference on*, tomo 1, IEEE, págs. 181–184.
- NADI, A. y A. EDRISI (2017), «Adaptive Multi-agent Relief Assessment and Emergency Response», *International Journal of Disaster Risk Reduction*.
- NASIRI, M. y S. SHISHEGAR (2014), «Disaster relief routing by considering heterogeneous vehicles and reliability of routes using an MADM approach», *Uncertain Supply Chain Management*, **2**(3), págs. 137–150.
- NOLZ, P. C., K. F. DOERNER y R. F. HARTL (2010), «Water distribution in disaster relief», *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, **40**(8/9), págs. 693–708.
- NOLZ, P. C., F. SEMET y K. F. DOERNER (2011), «Risk approaches for delivering disaster relief supplies», *OR spectrum*, **33**(3), págs. 543–569.

- OPIT, P. y K. NAKADE (2015), «Emergency response model of stock-prepositioning with transportation constraints», en *Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 2015 IEEE International Conference on*, IEEE, págs. 239–243.
- OZDAMAR, L. (2011), «Planning helicopter logistics in disaster relief», *OR spectrum*, **33**(3), págs. 655–672.
- ÖZDAMAR, L. y O. DEMIR (2012), «A hierarchical clustering and routing procedure for large scale disaster relief logistics planning», *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **48**(3), págs. 591–602.
- PASCALINE, W. (2018), «Cred Crunch 50: Natural disasters in 2017 - Lower mortality, higher cost», *Informe técnico*, Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED).
- PRADHANANGA, R., F. MUTLU, S. POKHAREL, J. HOLGUÍN-VERAS y D. SETH (2016), «An integrated resource allocation and distribution model for pre-disaster planning», *Computers & Industrial Engineering*, **91**, págs. 229–238.
- RAHAFROOZ, M. y M. ALINAGHIAN (2016), «A novel robust chance constrained possibilistic programming model for disaster relief logistics under uncertainty», *International Journal of Industrial Engineering Computations*, **7**(4), págs. 649–670.
- RAWLS, C. G. y M. A. TURNQUIST (2011), «Pre-positioning planning for emergency response with service quality constraints», *OR Spectrum*, **33**(3), págs. 481–498, URL <http://dx.doi.org/10.1007/s00291-011-0248-1>.
- RIVERA-ROYERO, D., G. GALINDO y R. YIE-PINEDO (2016), «A dynamic model for disaster response considering prioritized demand points», *Socio-Economic Planning Sciences*, **55**, págs. 59–75.
- ROLLAND, E., R. A. PATTERSON, K. WARD y B. DODIN (2010), «Decision support for disaster management», *Operations Management Research*, **3**(1-2), págs. 68–79.

- RUAN, J., X. WANG y Y. SHI (2014), «A two-stage approach for medical supplies intermodal transportation in large-scale disaster responses», *International journal of environmental research and public health*, **11**(11), págs. 11 081–11 109.
- RUSSELL, S. y P. NORVIG (2010), *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, Prentice Hall.
- SAHEBJAMNIA, N., S. A. TORABI y S. A. MANSOURI (2016), «A hybrid decision support system for managing humanitarian relief chains», *Decision Support Systems*.
- SALMERÓN, J. y A. APTE (2010), «Stochastic optimization for natural disaster asset prepositioning», *Production and Operations Management*, **19**(5), págs. 561–574.
- SHENG, L., T. W. JING, Y. G. DONG y L. FEI (2015), «An emergency dispatch model considering the urgency of the requirement for reliefs in different disaster areas», *Journal of Industrial Engineering and Management*, **8**(5), págs. 1576–1601.
- SHEU, J.-B. (2007), «An emergency logistics distribution approach for quick response to urgent relief demand in disasters», *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **43**(6), págs. 687–709.
- SINGHTAUN, C. (2015), «An Exact Algorithm for Location–Transportation Problems in Humanitarian Relief», *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Social, Behavioral, Educational, Economic, Business and Industrial Engineering*, **9**(3), págs. 815–819.
- TAHA, H. (2012), *Investigación de Operaciones*, Pearson Educación.
- THOMAS, A. y M. MIZUSHIMA (2005), «Logistics training: necessity or luxury», *Forced Migration Review*, **22**(22), págs. 60–61.
- VAN WASSENHOVE, L. N. (2006), «Humanitarian aid logistics: supply chain management in high gear», *Journal of the Operational research Society*, **57**(5), págs. 475–489.

- VICTORIA, J. F., H. M. AFSAR y C. PRINS (2015), «Vehicle Routing Problem with Time-Dependent Demand in humanitarian logistics», en *Industrial Engineering and Systems Management (IESM), 2015 International Conference on*, IEEE, págs. 686–694.
- VIERA, O., S. MOSCATELLI y L. TANSINI (2012), «LOGÍSTICA HUMANITARIA Y SU APLICACIÓN EN URUGUAY», *REVISTA GTI*, **11**(30), págs. 47–56.
- VITORIANO, B., M. T. ORTUÑO, G. TIRADO y J. MONTERO (2011), «A multi-criteria optimization model for humanitarian aid distribution», *Journal of Global Optimization*, **51**(2), págs. 189–208.
- WANG, L., J. SONG y L. SHI (2015), «Dynamic emergency logistics planning: models and heuristic algorithm», *Optimization Letters*, **9**(8), págs. 1533–1552, URL <http://dx.doi.org/10.1007/s11590-015-0853-z>.
- WANG, X., T.-M. CHOI, H. LIU y X. YUE (2016), «A Novel Hybrid Ant Colony Optimization Algorithm for Emergency Transportation Problems During Post-Disaster Scenarios», *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*.
- WEI, F., J. CHANG, W. CHANG y J. LUO (2016), «Deterministic heuristics in railway disaster relief planning», en *Control Conference (CCC), 2016 35th Chinese*, IEEE, págs. 9224–9229.
- WEI, X. y X.-Q. CHANG (2016), «The Optimization Design of Emergency Logistics Distribution Path Based on Ant Colony Algorithm», en *Proceedings of the 6th International Asia Conference on Industrial Engineering and Management Innovation*, Springer, págs. 23–31.
- WHITMAN, R. V., T. ANAGNOS, C. A. KIRCHER, H. J. LAGORIO, R. S. LAWSON y P. SCHNEIDER (1997), «Development of a national earthquake loss estimation methodology», *Earthquake Spectra*, **13**(4), págs. 643–661.

- WOHLGEMUTH, S., R. OLORUNTOBA y U. CLAUSEN (2012), «Dynamic vehicle routing with anticipation in disaster relief», *Socio-Economic Planning Sciences*, **46**(4), págs. 261–271.
- WOOLDRIDGE, M. (2009), *An introduction to multiagent systems*, John Wiley & Sons.
- XANTHOPOULOS, S. A. y E. D. KOULOURIOTIS (2013), *A Multi-agent Based Framework for Vehicle Routing in Relief Delivery Systems*, Springer New York, New York, NY, págs. 167–182.
- YANG, X., Y. JIANG, Y. ZHANG y Z. LIU (2015), «Vehicle type and route selection for emergency logistic management under road damage», en *Service Operations And Logistics, And Informatics (SOLI), 2015 IEEE International Conference on*, IEEE, págs. 100–105.
- ZHANG, M.-X., B. ZHANG y Y.-J. ZHENG (2014), «Bio-Inspired Meta-Heuristics for Emergency Transportation Problems», *Algorithms*.
- ZHENG, Y.-J., S.-Y. CHEN y H.-F. LING (2015a), «Evolutionary optimization for disaster relief operations: A survey», *Applied Soft Computing*, **27**, págs. 553 – 566.
- ZHENG, Y.-J. y H.-F. LING (2013), «Emergency transportation planning in disaster relief supply chain management: a cooperative fuzzy optimization approach», *Soft Computing*, **17**(7), págs. 1301–1314.
- ZHENG, Y.-J., M.-X. ZHANG, H.-F. LING y S.-Y. CHEN (2015b), «Emergency Railway Transportation Planning Using a Hyper-Heuristic Approach», *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, **16**(1), págs. 321–329.
- ZHOU, Y., J. LIU, Y. ZHANG y X. GAN (2017), «A multi-objective evolutionary algorithm for multi-period dynamic emergency resource scheduling problems», *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **99**, págs. 77–95.

---

ZIDI, K., F. MGUI, P. BORNE y K. GHEDIRA (2013), «Distributed genetic algorithm for disaster relief planning», *International Journal of Computers Communications & Control*, **8**(5), págs. 769–783.

ZOKAEE, S., A. BOZORGI-AMIRI y S. J. SADJADI (2016), «A Robust Optimization Model for Humanitarian Relief Chain Design under Uncertainty», *Applied Mathematical Modelling*.

# Resumen Autobiográfico

---

José Isidro Hernández Vega

Candidato para obtener el grado de  
Doctor en Ingeniería con  
Orientación en Tecnologías de la Información

Universidad Autónoma de Nuevo León  
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Tesis

MODELO BASADO EN SISTEMA MULTI-AGENTE PARA  
DISTRIBUCIÓN DE AYUDA EN ESPECIE EN LOGÍSTICA  
HUMANITARIA

Nacido en la ciudad de San Luis Potosí, San Luis Potosí el 15 de mayo de 1975, mis padres José Ascencion Hernández Ramírez y Josefina Vega Mares. Me gradué como Ingeniero en Sistemas Computacionales en el Instituto Tecnológico de San Luis Potosí y en la misma institución obtuve el grado de Maestro en Ciencias en Ciencias de la Computación. Mi experiencia profesional ha sido en áreas de Sistemas de Información, Ingeniería de Software, Sistemas para la adquisición y procesamiento de datos, docencia y apoyo a la investigación.