



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Coordinación de la distribución de ayudas humanitarias con la restauración de interrupciones viales transitorias en zonas afectadas por desastres naturales súbitos con limitaciones de accesibilidad

Carlos Alberto Rojas Trejos

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería
Departamento de ingeniería de sistemas e industrial
Bogotá D.C, Colombia
2024

Coordinación de la distribución de ayudas humanitarias con la restauración de disrupciones viales transitorias en zonas afectadas por desastres naturales súbitos con limitaciones de accesibilidad

Carlos Alberto Rojas Trejos

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Doctor en Ingeniería-Industria y Organizaciones

Director:
José David Meisel Donoso, Ph.D.

Co-Director:
Wilson Adarme Jaimes, Ph.D.

Línea de Investigación:
Métodos y modelos de optimización y estadística en ingeniería industrial y administrativa
Grupo de Investigación:
Sociedad, Economía y Productividad - SEPRO

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería
Departamento de ingeniería de sistemas e industrial
Bogotá D.C, Colombia
2024

Dedicatoria

A Dios y a toda mi familia. Sin ellos no hubiera sido posible.

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

Carlos Alberto Rojas Trejos

Fecha 01/03/2024

Agradecimientos

Agradezco a mi familia y a todas las personas que, con sus aportes, ideas y tiempo, permitieron que este trabajo fuera posible.

También agradezco de manera especial a mis directores José David Meisel Donoso y Wilson Adarme Jaimes por sus valiosos aportes, observaciones y comentarios que contribuyeron al desarrollo de este trabajo.

A mis profesores y compañeros de estudio por sus comentarios oportunos en la culminación de este documento.

Resumen

Coordinación de la distribución de ayudas humanitarias con la restauración de interrupciones viales transitorias en zonas afectadas por desastres naturales súbitos con limitaciones de accesibilidad

A raíz de los desastres naturales súbitos presentados en el mundo, se ha demostrado que la tasa de supervivencia de la población se relaciona de forma directa con la entrega de suministros. Las 72 horas que siguen al evento disruptivo pueden considerarse el período después del cual la probabilidad de supervivencia de la población puede disminuir drásticamente, cuando el grado de dificultad que las personas o comunidades tienen para satisfacer sus necesidades sociales y económicas básicas tiende a aumentar por limitaciones de accesibilidad en la red de carreteras.

En la literatura se han identificado dos enfoques para abordar el problema de entrega de ayudas humanitarias en zonas con limitaciones de accesibilidad denominados distribución de ayuda y restauración del acceso. El primero consiste en encontrar caminos transitables para que los equipos de ayuda lleguen a la población, y el segundo genera un cronograma de reparación para mejorar el acceso a las áreas de refugiados o puntos de demanda. En la literatura se han abordado ambos problemas de forma aislada, a través del desarrollo de modelos de toma de decisiones que ignoran la interrelación que poseen ambos procesos y su impacto en medidas de desempeño en conflicto relacionadas con la eficiencia (minimización de costos operacionales), eficacia (minimización del tiempo de respuesta) y bienestar social (minimización del tiempo o costo de privación de la población afectada).

Esta investigación consideró el diseño de rutas para entrega de ayuda humanitaria en zonas con limitaciones de acceso, analizando el impacto que tiene la afectación de la malla vial en las decisiones de entregas de ayudas humanitarias y restauración de las vías. Posteriormente, se desarrolló una propuesta de coordinación entre ambos procesos soportada a través de la formulación de un modelo matemático multiobjetivo que facilitó el proceso de toma de decisiones logísticas.

Como conclusión general la investigación determinó que el proceso de distribución de la ayuda humanitaria puede tener en cuenta las limitaciones derivadas de la operación de reparación de la infraestructura vial, basándose en la representación de ventanas temporales en las que las carreteras están disponibles como consecuencia de la reparación temporal de las mismas, lo que demuestra que el avance en la reparación de las carreteras tiene un impacto directo en la configuración de las rutas y en el tiempo total de llegada de la ayuda humanitaria a los puntos de demanda. Por otra parte, los resultados obtenidos demostraron también que, en la programación de los recursos de reparación, es necesario considerar las condiciones de precedencia y simultaneidad en los tiempos de arribo y salida de recursos de reparación según las características de la interrupción vial, aspecto que se ha pasado por alto en la literatura.

Como aporte general, la investigación diseñó una propuesta de coordinación entre la distribución de ayuda humanitaria y la restauración transitoria de las vías, basada en la decisión conjunta y colaborativa en el desarrollo de actividades enmarcadas a nivel operativo durante la fase de respuesta; considerando múltiples medidas de desempeño relacionadas con las dimensiones de eficiencia, eficacia y bienestar social bajo un enfoque multiobjetivo. Igualmente, como aporte adicional, se consideraron las relaciones de interdependencia de recursos limitados y el establecimiento de tiempos de llegada y salida de vehículos en los puntos de demanda, considerando tiempos de finalización de las operaciones de reparación, representando la relación entre recursos en los procesos distribución y reparación. Finalmente, se estableció la minimización de la tardanza máxima en la entrega de ayuda humanitaria como medida de desempeño equivalente con la minimización del tiempo de privación dentro de la dimensión de bienestar social.

Palabras clave: Logística humanitaria, Distribución de ayuda humanitaria, Restauración del acceso, Desastre natural súbito, Modelo matemático

Abstract

Coordination of the distribution of humanitarian aid with the restoration of transitory road disruptions in areas affected by sudden natural disasters with constraints of accessibility

In the wake of sudden-onset natural disasters around the world, it has been shown that the survival rate of the population is directly related to the delivery of supplies. The 72 hours following the disruptive event can be considered the period after which the probability of population survival can decrease drastically, when the degree of difficulty that individuals or communities have in meeting their basic social and economic needs tends to increase due to accessibility limitations in the road network.

Two approaches have been identified in the literature to address the problem of delivering humanitarian aid in areas with accessibility constraints: aid distribution and access restoration. The first involves finding passable roads aid teams to reach the population, and the second generates a repair schedule to improve access to refugee areas or demand points. The literature has addressed both problems in isolation, developing decision-making models that ignore the interrelationship of the two processes and their impact on conflicting performance measures related to efficiency (minimization of operational costs), effectiveness (minimization of response time) and social welfare (minimization of the time or cost of deprivation of the affected population).

This research considered the design of routes for the delivery of humanitarian aid in areas with access limitations, analyzing the impact of the road network on the decisions of humanitarian aid delivery and road restoration. Subsequently, a coordination proposal was developed between both processes supported through the formulation of a multi-objective mathematical model that facilitated the logistical decision-making process.

As a general conclusion, the research determined that the humanitarian aid distribution process can take into account the limitations derived from the road infrastructure repair operation, based on the representation of temporary windows in which roads are available as a consequence of temporary road repair, which shows that the progress in road repair has a direct impact on the configuration of the routes and on the total time of arrival of humanitarian aid to the points of demand. On the other hand, the results obtained also showed that, in the programming of repair resources, it is necessary to consider the conditions of precedence and simultaneity in the arrival and departure times of repair resources according to the characteristics of the road disruption, an aspect that has been overlooked in the literature.

As a general contribution, the research designed a coordination proposal between the distribution of humanitarian aid and the temporary restoration of roads, based on joint and collaborative decisions in the development of activities framed at the operational level during the response phase; considering multiple performance measures related to the dimensions of efficiency, efficacy, and social welfare under a multi-objective approach. Likewise, as an additional contribution, the interdependence relationships of limited resources and the establishment of arrival and departure times of vehicles at the demand points were considered, considering completion times of repair operations, representing the relationship between resources in the distribution and repair processes. Finally, the minimization of the maximum delay in the delivery of humanitarian aid was established as a performance measure equivalent to the minimization of deprivation time within the social welfare dimension.

Keywords: Humanitarian logistics, Humanitarian aid distribution, Access restoration, Sudden natural disaster, Mathematical model

Esta tesis de doctorado se sustentó el 01 de 03 de 2024 a las 03:00 p.m, y fue evaluada por los siguientes jurados:

Carlos Julio Vidal Holguín (Phd.)
Profesor
Universidad del Valle, Cali, Colombia

Esther Segura Pérez (Phd.)
Profesora
Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México

Diana María Cárdenas Aguirre (Phd.)
Profesora
Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

Contenido

Abstract	7
Lista de Tablas	12
Lista de Figuras	14
Introducción	17
1. Antecedentes de la investigación	19
1.1. Contexto y situación problemática.....	19
1.2. Marco teórico	23
1.2.1. Logística y cadena de suministro humanitaria	23
1.2.2. Proceso de distribución de ayuda humanitaria.....	26
1.2.3. Proceso de restauración del acceso vial para la ayuda humanitaria	27
1.2.4. Coordinación en la cadena de suministro humanitaria.....	29
1.3. Estado del Arte.....	31
1.3.1. Propósito	32
1.3.2. Características de los modelos empleados.	33
1.3.3. Tipos de resultados y conocimientos generados	36
1.3.4. Desafíos y oportunidades de trabajo	37
1.4. Definición del problema de investigación	38
1.4.1. Declaración del vacío del conocimiento	39
1.4.2. Formulación del problema de investigación	40
1.5. Hipótesis general de la investigación.....	40
1.6. Objetivos	41
2. Diseño metodológico de la investigación	42
2.1. Selección tipo o enfoque de investigación.....	42
2.2. Selección del diseño de investigación.....	42
2.3. Metodología de la investigación	43
3. Caracterización del sistema de distribución de ayuda humanitaria en zonas con limitaciones de accesibilidad.	47
3.1. Características del sistema de distribución de ayuda humanitaria.	47
3.2. Decisiones y actividades en el sistema de distribución de ayuda humanitaria en zonas con limitaciones de accesibilidad.	49
3.2.1. Descripción e interrelación de decisiones y actividades.	49
3.2.2. Planificación y configuración de rutas de distribución de ayuda considerando limitaciones de accesibilidad.....	52

3.3.	Actores en el sistema de distribución de ayuda humanitaria en zonas con limitaciones de accesibilidad.....	53
3.4.	Recursos principales en el proceso de distribución de ayuda humanitaria con limitaciones de accesibilidad.....	62
3.5.	Representación del proceso de distribución de ayuda humanitaria con limitaciones de accesibilidad.....	64
3.5.1.	Descripción del contexto geográfico particular.	67
3.5.2.	Resultados modelo de distribución de ayuda humanitaria	73
3.5.3.	Análisis de escenarios	75
4.	Caracterización del proceso de restauración de disrupciones viales transitorias	81
4.1.	Características del proceso de restauración del acceso vial.	81
4.2.	Decisiones y actividades relacionadas con el proceso de restauración de disrupciones viales transitorias.....	82
4.3.	Actores del proceso de restauración de disrupciones viales transitorias.....	84
4.4.	Recursos empleados en el proceso de restauración del acceso objeto de estudio	89
4.5.	Representación del proceso de restauración del acceso	89
4.5.1.	Descripción del contexto geográfico particular.	94
4.5.2.	Resultados del modelo matemático.....	96
4.5.3.	Programación de recursos de reparación.....	96
4.5.4.	Análisis de escenarios	99
5.	Coordinación de la distribución de la ayuda humanitaria y la restauración del acceso	105
5.1.	Descripción de una propuesta de coordinación de los procesos de distribución de la ayuda humanitaria y la restauración del acceso vial.....	106
5.2.	Representación de una propuesta de coordinación	107
5.3.	Modelo para la coordinación de los procesos de distribución de la ayuda humanitaria y la restauración del acceso	109
5.4.	Resultados del modelo matemático.....	114
5.5.	Análisis comparativo de las decisiones secuenciales vs. las decisiones conjuntas	119
5.6.	Análisis de la coordinación de los procesos de distribución de ayuda y restauración del acceso considerando múltiples medidas de desempeño	121
5.6.1.	Selección de objetivos o medidas de desempeño.....	121
5.6.2.	Modelo matemático multiobjetivo coordinación - decisiones conjuntas y procesos distribución de ayuda y restauración del acceso	125
5.6.3.	Descripción contexto geográfico particular.	127

5.6.4.	Resultados modelo matemático multiobjetivo	128
5.7.	Comparación Decisiones secuenciales vs. Decisiones conjuntas bajo un enfoque multiobjetivo	130
5.7.1.	Decisiones secuenciales bajo un enfoque multiobjetivo	130
5.7.2.	Comparaciones de las fronteras de Pareto para las decisiones conjuntas vs. Decisiones secuenciales.....	132
6.	Discusión, conclusiones y recomendaciones.	143
6.1.	Discusión de los resultados	143
6.2.	Conclusiones	148
6.3.	Contribuciones de la investigación	151
6.4.	Recomendaciones de trabajo futuro	152
6.5.	Productos de investigación durante el periodo de estudios doctorales	154
7.	Bibliografía	156

Lista de Tablas

Tabla 1.	Indicadores Red bipartita actores y actividades sistema de distribución objeto de estudio.	58
Tabla 2.	Grado y comunidad de los actores.....	59
Tabla 3.	Grado y comunidad de las actividades.....	60
Tabla 4.	Configuración vehículos de carga.....	63
Tabla 5.	Modelo matemático de distribución de ayuda humanitaria.....	65
Tabla 6.	Familias afectadas por zona de atención.....	69
Tabla 7.	Punto de distribución y puntos de atención de ayuda humanitaria municipio de Roldanillo.	70
Tabla 8.	Tiempo de suministro por zona de atención.....	71
Tabla 9.	Matriz de distancias entre nodos.....	71
Tabla 10.	Información tiempo esperado culminación de reparación vías afectadas y estimación puntos de reparación.....	73
Tabla 11.	Descripción de las rutas de distribución de la ayuda humanitaria.....	74
Tabla 12.	Descripción rutas de distribución de ayuda humanitaria sin disrupciones viales transitorias.	76
Tabla 13.	Descripción de las rutas de distribución de la ayuda humanitaria.....	80
Tabla 14.	Indicadores red bipartita actores y actividades proceso de restauración de disrupciones viales transitorias.....	86
Tabla 15.	Grado y comunidad de los actores.....	87
Tabla 16.	Grado y comunidad de las actividades.....	88
Tabla 17.	Modelo matemático programación de operaciones de reparación de vías.	91
Tabla 18.	Tipo de maquinaria requerida para restauración de la malla vial.....	95
Tabla 19.	Matriz de distancias entre disrupciones viales (puntos de reparación).....	95
Tabla 20.	Información del tiempo esperado para la culminación de la reparación de las vías afectadas y estimación de los tiempos promedio de reparación y operación.....	96
Tabla 21.	Descripción de la secuencia de reparación de las cuadrillas.....	98
Tabla 22.	Descripción de la secuencia según tipo de máquina.....	99
Tabla 23.	Análisis de la cantidad de cuadrillas disponibles.....	100
Tabla 24.	Análisis del número de máquinas disponibles según su tipo (escenario 2).	101
Tabla 25.	Análisis de las secuencias de reparación según la variación de tiempos de reparación de las cuadrillas.....	102
Tabla 26.	Modelo matemático para la coordinación de la distribución de ayuda y la restauración del acceso.....	109

Tabla 27.	Descripción de las rutas de distribución de ayuda humanitaria.	116
Tabla 28.	Descripción de la secuencia de reparación de las cuadrillas.	119
Tabla 29.	Descripción de la secuencia de reparación según tipo de máquina.	119
Tabla 30.	Comparación resultados - Decisiones secuenciales vs. Decisiones conjuntas según valor tiempo total de llegada mínimo o FO.	120
Tabla 31.	Costos incurridos tipos de máquina en proceso de restauración de la malla vial. 128	
Tabla 32.	Resultados de comparación fronteras de Pareto para esquemas de decisión conjunta y secuencial.	138
Tabla 33.	Resultados comparación fronteras de Pareto para esquemas decisión conjunta y secuencial. 140	
Tabla 34.	Resultados comparación decisión conjunta y secuencial.	141

Lista de Figuras

Figura 1. Tipos de Desastres naturales presentados en el mundo durante el horizonte 1900 - 2020.	20
Figura 2. Desastres naturales presentados en Colombia horizonte 1906 - 2019.	20
Figura 3. Cantidad vías afectadas por año y personas afectadas por desastres naturales súbitos 1998 - 2019.	22
Figura 4. Declaración del vacío del conocimiento.	39
Figura 5. Estrategia metodológica.	46
Figura 6. Sistema general de distribución de ayuda humanitaria.	48
Figura 7. Interrelación de decisiones y actividades enmarcadas en la logística de distribución de ayuda humanitaria en zonas con limitaciones de accesibilidad.	51
Figura 8. Planificación y configuración de rutas de distribución.	52
Figura 9. Actores sistema de distribución de ayuda humanitaria en zonas con limitaciones de accesibilidad.	54
Figura 10. Red bipartita no dirigida interrelación actores y decisiones en el sistema de distribución de ayuda humanitaria considerando zonas con limitaciones de accesibilidad.	57
Figura 11. Grafo interrelación actores sistema de distribución de ayuda humanitaria en zonas con limitaciones de accesibilidad. El tamaño de cada nodo representa el grado de los actores.	59
Figura 12. Grafo valorado interrelación actividades sistema de distribución de ayuda humanitaria en zonas con limitaciones de accesibilidad. El tamaño de cada nodo representa el grado de las actividades.	61
Figura 13. Representación general del proceso de distribución de ayuda con restricciones de accesibilidad.	64
Figura 14. Ocurrencia desastres naturales súbitos en el municipio de Roldanillo (2000 - 2021).	68
Figura 15. Zonificación de áreas de afectación de inundación Roldanillo.	69
Figura 16. Localización punto de distribución y zonas de atención.	70
Figura 17. Mapas de vías afectadas o disrupciones viales en el municipio de Roldanillo.	72
Figura 18. Rutas resultantes de la distribución de ayuda humanitaria.	74
Figura 19. Análisis de variación del número de vehículos disponibles entre 2 y 17 en escenario 1.	75
Figura 20. Análisis de variación en la proporción de disrupciones viales transitorias y tiempos esperados de culminación en la reparación (escenario 3).	78
Figura 21. Análisis de variación en la proporción de disrupciones viales transitorias y tiempos esperados de culminación [24, 72] horas en la reparación (escenario 3).	79

Figura 22. Interrelación de las decisiones y actividades del proceso de restauración de disrupciones viales transitorias.	83
Figura 23. Programación de operaciones para la restauración del acceso.	84
Figura 24. Actores proceso de restauración de disrupciones viales transitorias en redes logísticas humanitarias.	85
Figura 25. Red bipartita no dirigida interrelación actores y actividades proceso de restauración del acceso.	86
Figura 26. Grafo interrelación actores proceso de restauración de la malla vial organizado por comunidades y grado. El tamaño de cada nodo representa el grado de los actores. 87	
Figura 27. Grafo valorado interrelación actividades proceso de restauración objeto de estudio. 88	
Figura 28. Representación general del proceso de restauración del acceso.	90
Fuente: el autor.	90
Figura 29. Mapas de vías afectadas o disrupciones viales en el municipio de Roldanillo. 95	
Figura 30. Diagrama de Gantt secuencia de reparación de los recursos.	97
Figura 31. Análisis de la variación del número de cuadrillas disponibles.	100
Figura 32. Análisis de la variación del número de máquinas disponibles según tipo (escenario 2). 101	
Figura 33. Análisis de variación de los tiempos de reparación de las cuadrillas en el tiempo total finalización de reparación (escenario 3).	102
Figura 34. Análisis de variación de los tiempos de reparación de las cuadrillas en el makespan (escenario 3).	102
Figura 35. Análisis de la variación de los tiempos de operación de las máquinas en el tiempo total de finalización de la reparación (escenario 4).	104
Figura 36. Análisis de la variación de los tiempos de operación máquinas en el makespan (escenario 4).	104
Figura 37. Coordinación de los procesos de distribución de ayuda y restauración del acceso. 107	
Figura 38. Rutas de distribución de la ayuda humanitaria de acuerdo bajo el enfoque coordinado. 115	
Figura 39. Diagrama de Gantt para la secuencia de reparación de recursos.	117
Figura 40. Medidas de desempeño según dimensión.	123
Figura 41. Descripción proceso general de priorización de medidas de desempeño. 124	
Figura 42. Soluciones no dominadas y frontera de Pareto obtenido.	130
Figura 43. Soluciones no dominadas y frontera de Pareto para decisiones secuenciales. 132	

Figura 44. Frontera de Pareto consolidada Decisiones conjuntas y secuenciales en Tiempo total llegada, Tardanza máxima y Costo total.	133
Figura 45. Frontera de Pareto Consolidada Decisiones conjuntas y secuenciales en Tiempo finalización reparación, Tardanza máxima y Costo total (terna # 2).	136
Figura 46. Frontera de Pareto Consolidada Decisiones conjuntas y secuenciales en Tiempo máximo reparación, Tardanza máxima y Costo total (terna # 3).	136
Figura 47. Frontera de Pareto Consolidada Decisiones conjuntas y secuenciales en Tiempo máximo llegada, Tardanza máxima y Costo total (terna # 4).....	137

Introducción

Cuando ocurren desastres, ciertas áreas podrían aislarse y tener dificultades para recibir los suministros de socorro debido a la destrucción de las carreteras (Shin et al., 2019). Además, se producen daños adicionales si no se pueden suministrar bienes de socorro rápidamente a las áreas aisladas (Maya Duque et al., 2016). Por lo tanto, para proporcionar a tiempo bienes de socorro adecuados al área de demanda, es esencial recuperar los caminos destruidos y hacer accesibles los puntos de atención (Ozdamar et al., 2018). Además, los bienes de socorro deben distribuirse sobre la base de una programación óptima (Lorca et al., 2017). Si el orden de reparación de carreteras destruidas y el suministro de bienes de socorro a un área aislada se establece desde perspectivas independientes, se producirá un retraso en comparación con el cronograma óptimo considerando ambos procesos de forma coordinada (Çelik et al., 2015).

La investigación que se ocupa de la respuesta posterior al desastre sigue siendo insuficiente (Liubartseva et al., 2016; Wang, Liang, & Sun, 2020; Aksu & Ozdamar, 2014; Çelik, 2016; Maya Duque et al., 2016; Shin et al., 2019). Por lo tanto, se necesita investigación adicional sobre la respuesta después de un desastre, específicamente aquellas que se enfocan en minimizar el daño adicional o el tiempo de recuperación de las vías a través de sistemas de operación de recuperación eficientes (Goldschmidt & Kumar, 2016). La restauración del acceso se ocupa de los esfuerzos orientados a la determinación de la secuencia de reparación de las carreteras destruidas para volver a conectar los eslabones de la cadena de suministro (Lu et al., 2016). Especialmente en las zonas rurales, donde las redes de carreteras son escasas y las cadenas de suministro son limitadas, la reparación de la red de carreteras debe implementarse después del desastre, porque la destrucción de la carretera puede contribuir a una alta posibilidad de que las personas estén completamente aisladas (Arif et al., 2020; Huizing et al., 2020). Cuando se destruyen las carreteras y se aíslan ciertas áreas, que presentarán dificultades para recibir artículos de socorro, como alimentos de emergencia, medicamentos y agua potable (Shin et al., 2019). La respuesta rápida a las necesidades urgentes de ayuda humanitaria a través de una distribución logística de emergencia eficiente es vital para el alivio del impacto del desastre en las áreas afectadas, por ende, constituye un desafío en el campo de la logística humanitaria (Vodák et al., 2018; Minas et al., 2020).

En consecuencia, es necesaria la coordinación de los flujos logísticos de socorro considerando limitaciones de accesibilidad para la atención de la población afectada por un desastre natural súbito. La idea detrás del concepto de accesibilidad consiste en hacer que todos los puntos (nodos) sean accesibles o alcanzables desde cualquier otro lugar en el menor tiempo posible, para que los vehículos de ayuda humanitaria como bomberos, ambulancias y equipos especiales puedan llegar a la población afectada por

medio de la red de carreteras de una manera rápida, aliviando el sufrimiento, mediante un uso racional de los recursos (Leiras et al., 2014). Cuando la infraestructura de transporte se destruye y la cadena de suministro de ayuda se desconecta, los esfuerzos de ayuda a corto plazo y los planes de recuperación a largo plazo se ven obstaculizados (Caunhye et al., 2012).

La investigación presenta el diseño de una propuesta para la coordinación en la distribución de ayuda humanitaria con la restauración del acceso de la malla vial considerando limitaciones de accesibilidad bajo un ambiente de múltiples objetivos enmarcados en las dimensiones de eficiencia, eficacia y bienestar social, la cual constituye el principal aporte de esta investigación. Para ello, se realizó un análisis de los procesos de distribución de ayuda y restauración del acceso, a partir de un análisis de la red de actores haciendo uso de la teoría de grafos y el apoyo de modelos de programación matemática para entender la dinámica de sus actividades principales. El desarrollo de los modelos matemáticos en la distribución de ayuda y la restauración de las vías, permitieron identificar y analizar los parámetros determinantes que afectan a ambos procesos. Posteriormente, se seleccionaron medidas de desempeño basadas en las tres dimensiones identificadas, a través de los lineamientos de una herramienta de análisis multicriterio. Para la representación de la propuesta se definió un modelo de programación matemática multiobjetivo, en cuya generación del frente de Pareto correspondiente se empleó el método ϵ – restricciones y un algoritmo de ordenamiento rápido de soluciones no dominadas. Finalmente, se compararon los resultados de dicho frente con relación a un esquema de decisiones secuenciales entre ambos procesos, concluyendo que la propuesta de coordinación basada en las decisiones conjuntas y colaborativas entre ambos procesos genera mejores resultados en términos de eficiencia, eficacia y bienestar social. Como aporte adicional de la investigación, se abordaron las relaciones de interdependencia de recursos limitados, la determinación de los tiempos de llegada y salida de la flota vehicular hacia los puntos de demanda con base en los tiempos de finalización de la reparación. Por último, se estableció como aporte, la minimización de la tardanza máxima en la entrega de ayuda humanitaria, como medida de desempeño equivalente con la minimización del tiempo de privación o alivio del sufrimiento de la población afectada.

El documento se ha organizado de manera secuencial en siete capítulos. En el capítulo 1 se abordan los antecedentes, la identificación del problema, la justificación, la hipótesis general y los objetivos. El diseño del método de investigación se describe en el capítulo 2. La caracterización del sistema de distribución de ayuda humanitaria y el proceso de restauración del acceso se presenta en los capítulos 3 y 4. En el capítulo 5 se presenta la formulación de la propuesta de coordinación, la cual fue validada a partir de un contexto geográfico en Colombia. El capítulo 6 se enfoca en las conclusiones y los trabajos futuros. Finalmente, el capítulo 7 presenta la bibliografía utilizada en esta investigación.

1. Antecedentes de la investigación

El objetivo de este capítulo es describir los componentes principales que soportan el proyecto de investigación enmarcado en la logística humanitaria, y de manera particular en la logística de distribución de ayuda humanitaria considerando limitaciones de accesibilidad. Se describe de manera general el contexto y situación problemática, el marco teórico y el estado del arte. Se plantean las preguntas de investigación, los objetivos, la hipótesis y el alcance de la investigación.

1.1. Contexto y situación problemática

Los desastres han tenido un impacto en la población mundial a lo largo de la historia de la humanidad con terribles consecuencias para los habitantes y su entorno (Mejía-Argueta, Gaytán, Caballero, Molina, & Vitoriano, 2018). Como resultado de los desastres, las emergencias humanitarias se han incrementado notoriamente en años recientes. Según información de la base de datos Internacional de desastres (EM-DAT) desarrollada por el Centro de Investigación sobre la Epidemiología de los Desastres (CRED) en Bruselas, en el horizonte 1900-2020 se presentaron en el mundo 24,484 eventos de desastres, los cuales generaron alrededor de 38 millones de muertes, 8,198 millones de afectados y 3.6 trillones de dólares en daños y perjuicios. Estos desastres se clasifican de dos formas, según su velocidad de exposición en súbitos y lentos (Marín & Morales, 2018); donde los primeros representan el 79.4%. Por otra parte, según su origen los desastres se clasifican en Antrópicos y Naturales (Quesada, 2016), donde los últimos representan el 63.5% del total de desastres. En este sentido, los desastres naturales catalogados como súbitos representaron el 50.4% del total de eventos.

En la Figura 1, se evidencia que los desastres naturales súbitos además de ser los de mayor frecuencia, han sido también los más representativos en el total de daños y perjuicios durante el horizonte objeto de estudio. De igual forma, han generado mayor cantidad de afectados y una proporción importante de muertes a nivel mundial (EM-DAT: The Emergency Events, 2020).

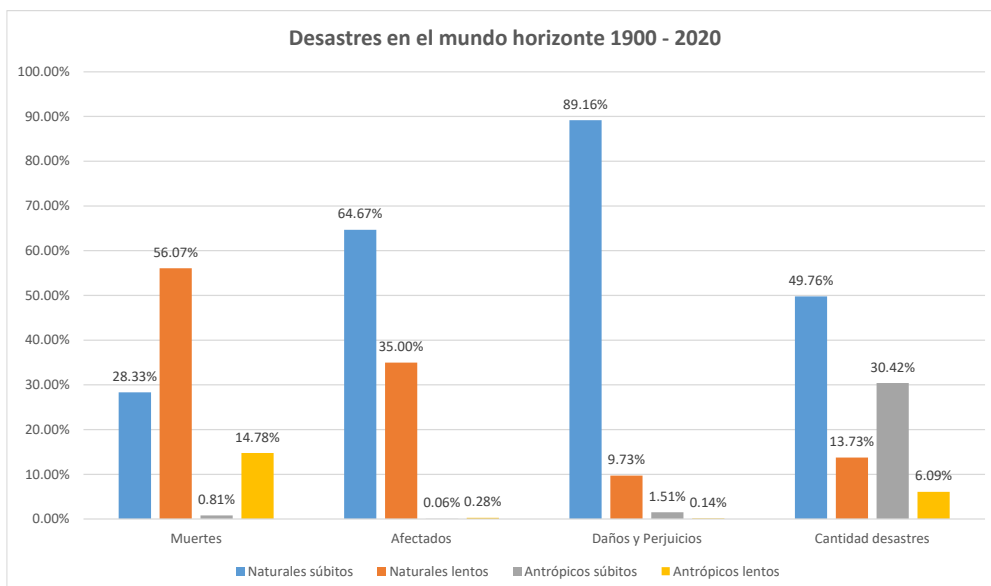


Figura 1. Tipos de Desastres naturales presentados en el mundo durante el horizonte 1900 - 2020.
Fuente: EM-DAT: The Emergency Events, (2020)

En Colombia, según la base de datos del EM-DAT: The Emergency Events, (2020), durante el horizonte 1906 – 2019 se presentaron 192 desastres naturales, los cuales generaron alrededor de 18 millones de afectados, 34,842 muertes y alrededor de 7 millones de dólares en daños y perjuicios. Desastres naturales súbitos como inundaciones, deslizamientos de tierra, terremotos y erupciones volcánicas representaron aproximadamente el 87.5% del total de eventos, ocasionando también una proporción importante del total de afectados, muertes, daños y perjuicios (Figura 2).

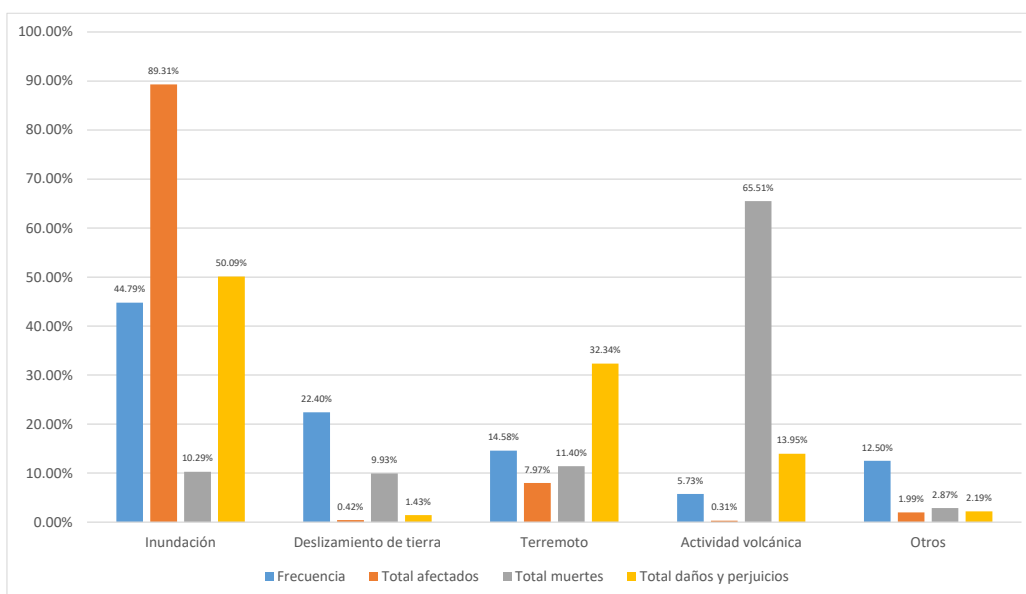


Figura 2. Desastres naturales presentados en Colombia horizonte 1906 - 2019.
Fuente: EM-DAT: The Emergency Events, (2020)

Hoy en día, los desastres naturales catalogados como súbitos ocurren con frecuencia en Colombia y todo el mundo (EM-DAT: The Emergency Events, 2020). Sin embargo, los preparativos y las contramedidas para los desastres siguen siendo insuficientes para minimizar el daño (J. Yan et al., 2020). En el caso de los países de mediano y bajo nivel de ingresos, los daños directos e indirectos son causados por la falta de infraestructura y por los esfuerzos posteriores al desastre (Goldschmidt & Kumar, 2016). El tsunami ocurrido en el Océano Índico en 2004 y el terremoto en Haití en 2010 ilustran esta situación. Sin embargo, los daños también son inevitables en los países de alto nivel de ingresos que se prepararon a fondo para un desastre (Kovács & Spens, 2009). En 2011, Japón sufrió daños humanos y de infraestructura importantes causados por el terremoto de Fukushima (EM-DAT: The Emergency Events, 2020).

Este tipo de desastres naturales pueden generar daños en infraestructura como edificaciones, servicios de redes eléctricas, alcantarillado o de comunicación y en las vías que conectan los diferentes eslabones asociados con la cadena de ayuda humanitaria y las zonas o poblaciones damnificadas, que finalmente dificultan las labores de ayuda y alivio del sufrimiento (EM-DAT: Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, 2017; Maya Duque, Dolinskaya, & Sörensen, 2016; Ibarra-Rojas, Ozuna Espinosa, & López-Piñón, 2019).

Dónde y cómo se reconstruye la infraestructura vial tiene un impacto significativo en el acceso a las comunidades afectadas o en condición de vulnerabilidad (Emergency Events Database – EM-DAT, 2019). Para ello, se debe implantar prácticas efectivas para la reconstrucción que además sean conducentes a mejorar las comunidades y a reducir el potencial de daños a consecuencia de futuros desastres (EM-DAT: Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, 2017, Hamedi, Haghani, & Yang, 2012). Sin embargo, no es suficiente tener un sistema establecido para la rehabilitación de la infraestructura (Ludema, 2000); tener también un buen sistema de transporte es esencial para reducir el impacto de los desastres y es crítico para lograr un desarrollo sustentable (EM-DAT: Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, 2017).

El sistema de transporte desempeña un papel fundamental tanto en situaciones cotidianas como durante eventos de desastre (Duwadi, 2010; Ibarra-Rojas, Ozuna Espinosa, & López-Piñón, 2019). Tener acceso a modos alternativos para movilizarse tales como sistemas de transporte marítimo, líneas de trenes, transporte aéreo y otros modos es deseable. Sin embargo, en muchos países estos medios de transporte no están disponibles de forma inmediata por razones geográficas o presupuesto (EM-DAT: Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, 2017; Maghsoudi & Pazirandeh, 2016; Kovács & Spens, 2011), dejando el transporte terrestre por carretera como la única alternativa razonable (Overstreet, Hall, Hanna, & Rainer, 2011). El transporte por carretera tiene las características de servicio directo y altamente maniobrable, por

lo tanto, es la forma más conveniente y factible de llegar a las víctimas resultantes por el área destruida o dañada (Iloglu & Albert, 2018; Maya-Duque et al., 2016; Shin et al., 2019). Después del evento este tipo de transporte es imprescindible para la movilidad de las brigadas y personal médico hacia los lugares afectados, entrega de ayuda humanitaria y para el proceso de reconstrucción de las comunidades (Emergency Events Database – EM-DAT, 2019). Sin embargo, este tipo de transporte se ve afectado por las interrupciones viales generadas principalmente por desastres naturales súbitos (Maya-Duque et al., 2016, Coco et al., 2020).

Más de un tercio de las víctimas y pérdidas causadas por un desastre están directamente relacionadas con retrasos en la recuperación de flujo de los servicios críticos a una zona afectada (Duwadi, 2010). En Colombia, según el consolidado anual de atención de emergencias de la Unidad Nacional de Gestión y Riesgos de Desastres (UNGRD, 2020), la cantidad de vías afectadas por desastres naturales súbitos han sido generadas principalmente por inundaciones y deslizamientos de tierras (EM-DAT: The Emergency Events, 2020). En la Figura 3 se puede observar que hay una relación importante entre el número de vías afectadas y la cantidad de personas afectadas por desastres naturales súbitos por año en Colombia entre los años 1998 al 2019 (UNGRD, 2020), de lo cual se infiere que al presentarse limitaciones de accesibilidad en la red vial por carretera, se compromete la integridad y bienestar de la población ante un desastre natural súbito, restringiendo también la entrega de ayuda humanitaria (UNGRD, 2020; EM-DAT: The Emergency Events, 2020).

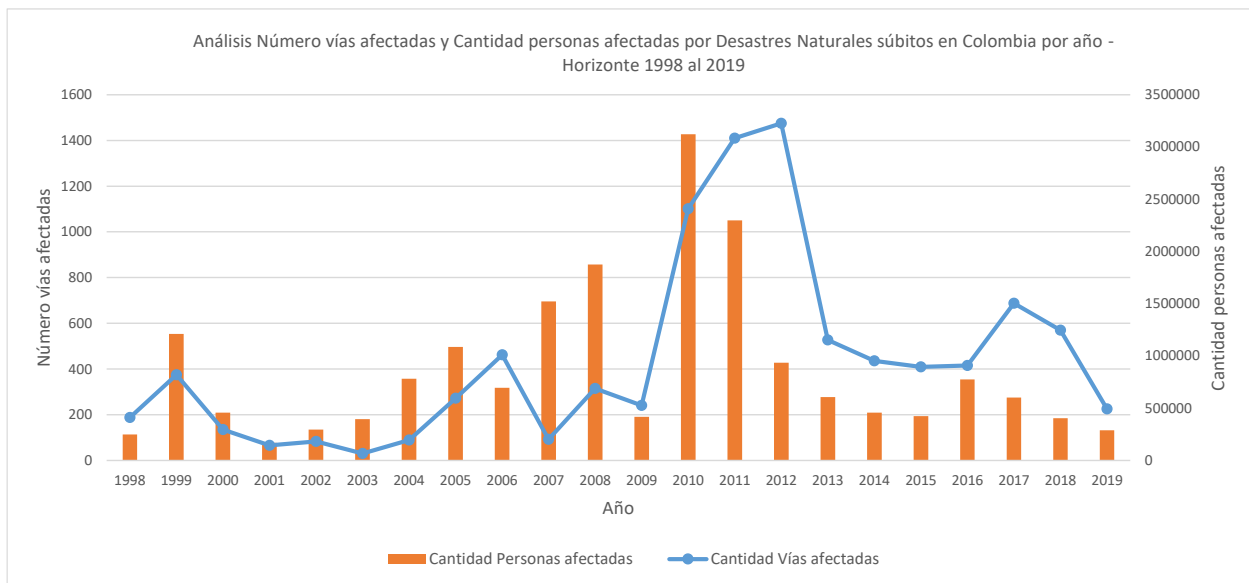


Figura 3. Cantidad vías afectadas por año y personas afectadas por desastres naturales súbitos 1998 - 2019.

Fuente: UNGRD, (2020)

En resumen, los desastres naturales que se han presentado en Colombia y el mundo han generado un importante número de personas afectadas o damnificadas y también daños en la infraestructura; específicamente en la malla vial, lo cual puede contribuir a la generación de damnificados y víctimas adicionales (J. W. Wang et al., 2019). Estos daños en la infraestructura en la red vial generan limitaciones de accesibilidad en algunas zonas, lo cual dificulta la entrega de ayuda humanitaria (Shin et al., 2019, Coco et al., 2020).

1.2. Marco teórico

En el apartado anterior se presentó el contexto y situación problemática de esta investigación. Con base en lo anterior, este apartado presenta los principales elementos teóricos relacionadas con este proyecto de investigación.

1.2.1. Logística y cadena de suministro humanitaria

Los desastres naturales y causados por el ser humano se han convertido en un asunto de relevancia regional, local y mundial (Leiras, Queiroz Peres, Rejane Bertazzo, & Yoshida Yoshizaki, 2014). Lo anterior implica retos en proveer asistencia de manera eficiente a través de sistemas de entrega (Tzeng, Cheng, & Huang, 2007; Yi & Özdamar, 2007; Tatham & Spens, 2011). Por esta razón, aparece la Logística humanitaria (LH), definida por Thomas & Kopczak, (2005), como “el proceso de planificar, implementar y controlar bajo un costo efectivo, el flujo y almacenamiento de bienes y materiales, así como la información relativa, desde el punto de origen al punto de consumo con el fin de aliviar el sufrimiento de las personas vulnerables”. Su objetivo consiste en mejorar la respuesta ante cualquier tipo de desastre, para proveer los productos de primera necesidad en escenarios de incertidumbre. Además, el campo de la logística humanitaria vinculado a la gestión de la cadena de suministro ha ganado relevancia (Kovács & Spens, 2011) debido al aumento del impacto y la frecuencia de los desastres, conllevando a las organizaciones humanitarias a reconocer la importancia del papel estratégico de la logística, y emprender mejoras en sus niveles de integración a través del desarrollo de capacidades operativas y el diseño de cadenas de suministro humanitarias (Kovács & Spens, 2009).

En este sentido, Day, et al. (2012) definen la cadena de suministro humanitaria (CSH) como el sistema responsable de gestionar los procesos logísticos en el manejo de desastres, así como la evaluación, integración y coordinación de los procesos y actores involucrados en el sistema. Otros autores como Dubey, R (2022) y Jae-Dong Hong (2023) la definen como el flujo de ayuda de socorro e información relacionada entre personas de áreas afectadas por desastres y organizaciones humanitarias para aliviar el sufrimiento de

las personas vulnerables. Las cadenas logísticas humanitarias comprenden la ejecución de un conjunto de decisiones y actividades que tienen como finalidad entregar los suministros de ayuda tan rápido como sea posible, minimizando las pérdidas humanas y haciendo un uso racional de los recursos (Kovács & Spens, 2009; Dubey, R, 2022). Las decisiones y actividades enmarcadas en LH y CSH se pueden estudiar desde las características de las fases de gestión de desastre y bajo un enfoque jerárquico de toma de decisiones (Viera, Moscatelli, & Tansini, 2012).

Las fases en la gestión de desastres obedecen a un enfoque de ciclo de vida, con cuatro etapas principales: mitigación, preparación, respuesta y recuperación (Viera, Moscatelli, & Tansini, 2012; Leiras, Queiroz Peres, Rejane Bertazzo, & Yoshida Yoshizaki, 2014). Dentro de estos estudios, las dos fases de mayor interés han sido respuesta (Kovács & Spens, 2009) y preparación (Overstreet, Hall, Hanna, & Rainer, 2011). Una explicación para este resultado se centra en el interés de los investigadores por aportar soluciones a la problemática de ineficiencia y poca efectividad identificada en las operaciones de respuesta, especialmente cuando se trata de desastres naturales de inicio súbito (Overstreet, Hall, Hanna, & Rainer, 2011).

La fase de mitigación es la aplicación de medidas que evitarán la aparición de un desastre o reducirán los impactos en caso de que ocurra uno (Viera, Moscatelli, & Tansini, 2012). La naturaleza aleatoria de los desastres naturales dificulta la mitigación de tales eventos (Goldschmidt & Kumar, 2016). La siguiente fase corresponde a la preparación, la cual incluye todas "las actividades y medidas adoptadas de antemano para asegurar una respuesta eficaz a los efectos de los peligros, incluida la emisión de alertas tempranas oportunas y eficaces y la evacuación temporal de personas y bienes de los lugares amenazados" (Van Wassenhove & Pedraza Martinez, 2012).

Por otra parte, en la fase de respuesta, es donde se realizan actividades que emplean diferentes tipos de recursos y se aplican procedimientos de emergencia para preservar la vida, la propiedad, el medio ambiente, así como la estructura social, económica y política de la comunidad afectada (Kovács & Spens, 2011). Los esfuerzos de respuesta inicial incluyen las primeras 72 horas después del comienzo del desastre, que son cruciales para salvar vidas (Tatham & Houghton, 2011). Las actividades en la fase de respuesta se centran en las medidas de salvamento y alivio del sufrimiento de las comunidades afectadas; donde el proceso de distribución de ayuda humanitaria se convierte en un proceso clave en la respuesta a la población vulnerable (Ozdamar et al., 2018). Estas actividades a menudo requieren colaboración de los gobiernos, las comunidades locales, las organizaciones humanitarias internacionales, las organizaciones no gubernamentales y en circunstancias extremas los militares (Goldschmidt & Kumar, 2016), ya que en estos contextos los recursos tienden a ser escasos (Çelik et al., 2015).

La fase de recuperación o rehabilitación implica las acciones tomadas a largo plazo después de que el impacto inmediato del desastre haya pasado: estabilizar la comunidad y restaurar las zonas de afectación (Duwadi, 2010). Durante esta actividad, las organizaciones humanitarias comienzan a ayudar a las víctimas en la recuperación, ayudando a devolver a los afectados a una "vida normal", así como trabajar para mitigar futuros desastres (Leiras et al., 2014).

Independiente de la fase de interés, el desarrollo de cada una de las actividades relacionadas requiere una gestión adecuada de recursos que contribuya a un adecuado despliegue logístico para proporcionar ayuda a las víctimas del desastre y reducir el sufrimiento causado (Tatham & Houghton, 2011). Por ejemplo, en la fase de respuesta, existe también el proceso de programación de recursos de reparación y se utiliza para decidir las formas de gestionar las reparaciones transitorias de las vías que conectan a los miembros de las redes de la cadena de suministro con la población afectada por un desastre natural (Hasani & Mokhtari, 2019). La reparación transitoria de las redes de carreteras es una actividad muy importante porque la destrucción de las carreteras puede contribuir en altas tasas de aislamiento, generando problemas de accesibilidad en las zonas afectadas por un desastre (Lu et al., 2016).

Por otra parte, las decisiones enmarcadas en la logística humanitaria pueden clasificarse como estratégicas, tácticas y operativas (Leiras et al., 2014). Dentro de las decisiones estratégicas está el diseño de la red logística, es decir, la localización de centros logísticos, puntos de distribución, refugios, centros de reparación de vías, entre otros. Se trata de determinar su cantidad, ubicación geográfica, capacidad y las zonas de influencia. (Gómez Ramírez, 2017; Leiras et al., 2014). De igual forma, se incluyen estudios de riesgos, los análisis estructurales (Yi & Özdamar, 2007) y la determinación de los posibles usos del suelo y la infraestructura, para asegurar la accesibilidad a las zonas afectadas y dimensionamiento de flota vehicular (Kovács & Spens, 2009). Estas decisiones generalmente se identifican en las fases de mitigación y preparación (Leiras et al., 2014).

Dentro de las decisiones tácticas, que se enmarcan principalmente en la fase de preparación, se encuentran la determinación de políticas de control y mantenimiento de inventario o preposicionamiento de kits de ayuda humanitaria, herramientas, maquinaria y repuestos para habilitar la accesibilidad en las vías y el reemplazo o mantenimiento de vehículos asociados a las operaciones humanitarias (Kovács & Spens, 2009; Kunz & Reiner, 2012).

Finalmente, en las decisiones operativas se incluye la distribución de suministros a partir de la planificación y configuración de rutas de vehículos para la entrega de ayuda humanitaria en los puntos de atención, la programación de operaciones de reparación de las vías generadas por interrupciones viales

transitorias, así como actividades de evacuación (Leiras, Queiroz Peres, Rejane Bertazzo, & Yoshida Yoshizaki, 2014) (Maya Duque, Dolinskaya, & Sörensen, 2016). Particularmente, la distribución de ayuda y la restauración del acceso constituyen uno de los temas más estudiados en logística humanitaria (Kovács & Spens, 2010; Leiras, Queiroz Peres, Rejane Bertazzo, & Yoshida Yoshizaki, 2014; Mejia-Argueta, Gaytán, Caballero, Molina, & Vitoriano, 2018), porque son los procesos clave que garantizan de forma directa la entrega de los productos y servicios de ayuda humanitaria a la población afectada por un desastre, siendo una situación apremiante que demanda nuevas y novedosas investigaciones constantemente. Los procesos que se enmarcan en este nivel de decisión son característicos de la fase de respuesta (Mejia-Argueta et al., 2018).

1.2.2. Proceso de distribución de ayuda humanitaria

La distribución de ayuda humanitaria se refiere a la entrega de suministros de ayuda desde centros de distribución locales a las zonas afectadas por desastres a través de vehículos o medios de transporte (P. Li et al., 2019). Las principales actividades consisten en asignar suministros de socorro desde los puntos de distribución hacia los puntos de demanda y la determinación de horarios y rutas de entrega para cada vehículo a lo largo del horizonte de planificación (Özdamar et al., 2014; Tuzun Aksu & Ozdamar, 2014).

Este proceso consiste en establecer un conjunto de rutas para que los vehículos disponibles para tal fin transporten la ayuda humanitaria desde los depósitos hasta las zonas afectadas o puntos de atención (Zhou et al., 2017). El reparto debe ser rápido y económicamente eficiente, pero también equitativo en la medida de lo posible y prestar atención a distintos niveles de urgencia que existan en los lugares de destino (Zhang et al., 2014). Se deben tener en cuenta el estado de la malla vial y el posible ambiente de inseguridad que se pueda generar como efecto del desastre y que el transporte de la ayuda se realice con normalidad (Donnini et al., 2017). Todos estos factores hacen de éste un proceso relevante en la prestación de ayuda humanitaria a la población vulnerable o afectada por un desastre (Çelik et al., 2015).

Uno de los principales aspectos que influyen en la entrega de alimentos, refugio y suministros médicos a las regiones afectadas es el estado de la red de carreteras. En muchas situaciones, no es la falta de suministros lo que afecta a las personas, sino la imposibilidad de llevar esos suministros a las personas que lo necesitan (Maya Duque, Dolinskaya, & Sörensen, 2016a; Rodríguez-Espíndola et al., 2018). En el terremoto de Haití, por ejemplo, la amplia cobertura mediática resultó en un exceso de existencias de suministros de ayuda. La distribución de esos suministros a las aldeas afectadas resultó mucho más difícil ya que la infraestructura vial se había dañado o destruido (EM-DAT: The Emergency Events, 2020).

Después del terremoto y tsunami de Japón en 2011, alrededor de tres cuartas partes de las carreteras de la región no estaban operativas, lo que impidió las actividades de respuesta de emergencia (Sanci & Daskin, 2019). Por otro lado, cantidades considerables de suministros de emergencia esperaron inactivas en el puerto principal de Puerto Rico debido a la escasez de camioneros y la infraestructura dañada después del huracán María en 2017 (Iloglu & Albert, 2020). Con base en lo anterior, en respuesta a un desastre natural, se debe realizar una serie de esfuerzos logísticos para satisfacer la creciente demanda de bienes y servicios de socorro en las regiones afectadas (Alinaghian et al., 2019), donde la distribución de artículos esenciales debe desarrollarse durante varios días después de la ocurrencia de un desastre, sin embargo, este tipo de eventos repentinos pueden desarrollar daños en la red de infraestructura vial, lo cual dificulta la entrega de ayuda humanitaria (Minas et al., 2020; J. Yan et al., 2020).

Dentro de los enfoques metodológicos empleados en el estudio de la distribución de ayuda, se encuentran principalmente los modelos de ruteo de vehículos, basados en la programación matemática (Tavana et al., 2018, Shin et al., 2018, Rojas et al., 2023a). En estos modelos, cada vehículo se mueve en la red de distribución, visitando cada punto de atención o demanda (Ahmadi et al., 2015). No obstante, dadas las limitaciones de recursos y la infraestructura vial dañada, es difícil planificar las rutas de distribución (Balcik, 2016).

1.2.3. Proceso de restauración del acceso vial para la ayuda humanitaria

Las redes de infraestructura juegan un papel importante al proporcionar un medio para el desarrollo de las actividades cotidianas de las comunidades (J. Yan et al., 2020). Entre ellas, las redes de carreteras ayudan a las organizaciones a establecer la conectividad entre nodos de las cadenas de suministro de sus productos y servicios, además de facilitar la movilidad de las personas y la accesibilidad a instalaciones y recursos críticos en momentos de necesidad (J. Wu & Wang, 2020). En caso de eventos que requieren acción humanitaria, como desastres naturales y ocasionados por el hombre, la restauración y recuperación de las redes de infraestructura se vuelven cada vez más importantes debido principalmente a dos razones: a largo plazo, la restauración y reparación de las redes de infraestructura es un factor importante para estabilizar la comunidad y restaurar al menos algún nivel de normalidad después del evento (Lu et al., 2016). A corto plazo, estas redes proporcionan la línea base para realizar actividades de respuesta tales como evacuación, búsqueda y rescate, distribución de socorro y establecer comunicación entre los diversos interesados que responden al evento (Nurre et al., 2012). Por lo tanto, dentro de los primeros días o semanas posteriores al evento, el objetivo principal es llevar estas redes a condiciones de trabajo mínimas para que se puedan realizar las actividades de respuesta (Arif et al., 2020).

Los daños a las redes de infraestructura después de eventos disruptivos pueden ser de muchas formas diferentes, como el colapso de las redes de carreteras y puentes, la generación de escombros, fallas de los sistemas de energía y telecomunicaciones, daños en instalaciones críticas y acumulación de grandes cantidades de nieve (Karakoc et al., 2020). En cualquiera de estos casos, las actividades de restauración y recuperación son costosas y difíciles, lo cual puede obstaculizar las operaciones de respuesta, especialmente los daños e interrupciones temporales en la infraestructura vial durante la fase de respuesta pueden obstaculizar la distribución de ayuda humanitaria (Arif et al., 2020; Kim et al., 2018; Lu et al., 2016).

Por ejemplo, el huracán Katrina en el año 2005 generó más de 100 millones de yardas cúbicas de escombros, cuya limpieza representó el 27% de todos los costos relacionados con el desastre (EM-DAT: Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, 2017). Del mismo modo, el huracán Sandy en el año 2012 causó daños significativos en los sistemas de infraestructura, lo que resultó en un costo estimado de US \$ 33 mil millones para reparación y limpieza (Iloglu & Albert, 2020). En el terremoto de Haití del año 2010, a pesar de la abundancia de suministros de socorro, el daño en la infraestructura vial generó que la distribución de la ayuda humanitaria a las personas afectadas fuera imposible (Sakuraba et al., 2016). En otro ejemplo, las actividades de respuesta al tifón Haiyan en el año 2013 en Filipinas se vieron afectadas por los daños y escombros en la red de carreteras (EM-DAT: The Emergency Events, 2020). Tomó en promedio seis horas realizar un viaje de ayuda humanitaria de 22 km desde el centro de distribución humanitario hasta el centro de la ciudad de Tacloban donde se encontraban las personas afectadas, lo que ocasionó pérdida de tiempo vital para las actividades de entrega de ayudas (Emergency Events Database – EM-DAT, 2019).

La experiencia de estos eventos subraya la importancia de la necesidad de actividades de restauración y recuperación de redes viales oportunas, eficientes y efectivas después de eventos disruptivos, de modo que las necesidades de redes de infraestructura vial a corto plazo pueden aportar al proceso de distribución de ayuda humanitaria (Maya Duque, Dolinskaya, & Sørensen, 2016; Nurre et al., 2012; J. Wu & Wang, 2020).

La disponibilidad de la infraestructura de la red vial juega un papel crucial en la determinación de la efectividad de las actividades de respuesta importantes, como la distribución y entrega de ayuda humanitaria a las poblaciones afectadas por un desastre natural (Çelik, 2016). Para este fin, una de las primeras actividades llevadas a cabo después de un desastre es la restauración o reparación de los segmentos de carreteras dañados, que se lleva a cabo de manera simultánea con las operaciones de respuesta en curso (Kim et al., 2018). Como señalaron Çelik, (2016) y Aksu & Ozdamar, (2014), en comunidades donde la recuperación de la carretera y el transporte de socorro son gestionados o coordinados de forma adecuada,

la planificación y programación integradas de estas actividades puede conducir a mejoras significativas en la puntualidad de las entregas y el alivio del sufrimiento, haciendo una mejor utilización de los recursos limitados (Shin et al., 2019). La coordinación y/o aspectos colaborativos entre los procesos de distribución de ayuda y restauración del acceso es un desafío (Sabbaghtorkan et al., 2020), porque la respuesta a desastres suele ser un esfuerzo conjunto entre varias agencias de ayuda (Morshedlou et al., 2018).

Dentro de los enfoques metodológicos empleados en el estudio de la restauración del acceso, se encuentra el scheduling, el cual se fundamenta en la programación de operaciones de reparación mediante modelos de programación matemática (Maya Duque et al., 2016, Coco et al., 2020, Rojas et al., 2023a).

1.2.4. Coordinación en la cadena de suministro humanitaria

En la cadena de suministro humanitaria intervienen diferentes procesos y actores interdependientes, por lo tanto, es importante la coordinación de estos (Kovács & Spens, 2010; Leiras et al., 2014). El concepto de coordinación según Malone (1987), se puede definir como la administración de dependencias entre actividades. Los procesos al interior de una cadena de suministro humanitaria corresponden a un conjunto de actividades que deben ejecutarse de manera simultánea o paralela (Shin et al., 2019). Por lo tanto, coordinar diferentes procesos en un modelo de toma de decisión para analizar de manera simultánea variables que tradicionalmente se han estudiado de manera secuencial o aislada, contribuye al mejoramiento del desempeño de la cadena (Pradhananga et al., 2016) y, por ende, alcanzar la coordinación deseada entre los procesos y actores involucrados (Rodríguez-Espíndola et al., 2018).

Una cadena de suministro en la que haya coordinación entre sus miembros y/o procesos no solo contribuye a un uso racional de los recursos, sino también constituye una estrategia que ha resultado ser esencial para alcanzar mejores niveles de respuesta hacia la población objetivo (Fikar et al., 2016). En las cadenas de suministro humanitarias, se necesita desarrollar estrategias de coordinación sólidas y relaciones a largo, mediano y corto plazo con sus organizaciones y procesos involucrados, con el fin de articular relaciones de integración y coordinación que permitan asegurar la eficiencia y eficacia de la cadena y el desarrollo de las operaciones orientadas al bienestar social de la población afectada por un desastre (Zhan et al., 2014).

Autores como López-Vargas & Cárdenas-Aguirre, (2018) describen la coordinación de una cadena de suministro como un conjunto de entidades independientes que interactúan conjuntamente para generar las salidas requeridas, compartiendo recursos y capacidades para satisfacer las necesidades de una población

objetivo. En las cadenas de suministro humanitarias el concepto de coordinación ha generado mayor relevancia, dado que intervienen diferentes actores, procesos y recursos que requiere un trabajo colectivo para la gestión adecuada de éstos que contribuyan a menores de tiempos de respuesta y un alivio del sufrimiento a la población afectada a un costo razonable.

Cuando ocurre un desastre, varios actores y/o procesos se involucran en las áreas del desastre para lidiar con los daños a través de sus respectivos roles. Debido a los diversos tipos de partes interesadas y procesos involucrados, se llevan a cabo varias actividades de socorro al mismo tiempo, de modo que se debe tomar una decisión integrada poco tiempo después del desastre (Prabawa & Choi, 2020). A pesar del importante papel que desempeñan, las decisiones críticas momentáneas, a menudo se toman sobre la base de experiencias personales o intuición. Este tipo de decisión pueden dar lugar a duplicaciones innecesarias de esfuerzos y recursos que pueden interferir entre sí (Holguín-Veras et al., 2012). Sin embargo, son muchos intereses en conflicto para considerar de forma simultánea e inmediata, donde todos los puntos de vista son difíciles de ver y como resultado, los juicios individuales pueden reflejar sesgos (S.-L. Zhan et al., 2014). Las organizaciones de socorro no actúan por sí mismas en situaciones de emergencia, sino como una unidad, donde sus objetivos pueden estar en conflicto entre sí (Coco et al, 2020). Por esta razón, es importante establecer mecanismos y/o determinantes que contribuyan a la coordinación de actores y/o procesos en la cadena de suministro humanitaria (Kovacs & Spens, 2007).

Dentro de los mecanismos que se han popularizado para la aplicación del concepto de coordinación en la CSH se encuentran: los contratos y acuerdos, políticas de inventario, las tecnologías de información, las iniciativas de colaboración y las decisiones colectivas o conjuntas (Enrique & Herrera, 2016).

Estos mecanismos de coordinación no son excluyentes unos con otros. Por ello es posible encontrar una mezcla de diferentes métodos que den como resultado una configuración adecuada para la CSH (Akbari & Salman, 2017).

Dentro de la CSH, el proceso de distribución de ayuda presenta aspectos importantes, como costos operativos, bienes y ventanas de tiempo adecuadas para la distribución (Tavana et al., 2018, Rojas et al, 2023a). La investigación sobre la respuesta post-desastre sigue siendo aún insuficiente, es decir, se necesita investigación adicional sobre las respuestas después de un desastre, de manera específica aquellas que se enfocan en minimizar el daño adicional o el tiempo de recuperación de las áreas destruidas a través de sistemas operativos de recuperación eficientes (Coco et al., 2020, Rojas et al., 2023a). Cuando las carreteras se destruyen y ciertas áreas quedan aisladas, será difícil entonces que la población afectada reciba artículos

de socorro como alimentos, medicinas y agua potable (Maya Duque, Dolinskaya, & Sørensen, 2016). Sin embargo, en el estado posterior al desastre, no se dispone de suficiente mano de obra y recursos para el despliegue de las actividades de reparación y distribución (Habib et al., 2016, Shin et al., 2019). En estos casos, el orden de operaciones para la reparación de carreteras destruidas y el transporte de ayuda tiene mucho efecto en términos de daños adicionales (Maya-Duque et al., 2016).

Si las decisiones de los procesos de reparación y distribución de ayudas se desarrollan de forma aislada o independiente, entonces las actividades en ambos procesos presentan ineficiencias en el cronograma de reparación de las carreteras dañadas o en el transporte de los suministros de socorro a las zonas de demanda (Akbari & Salman, 2017). La entrega de artículos de socorro depende del horario del equipo de reparación porque el transporte solo puede ser posible cuando se dispone de una carretera (Kim et al., 2018; Shin et al., 2019, Rojas et al., 2023a). Cuando las decisiones de reparar las carreteras destruidas y suministrar bienes de socorro no están coordinadas entre sí, pueden producirse retrasos en los tiempos de distribución y respuesta a la población afectada por un desastre (Çelik, et al., 2016, Zafri et al., 2020).

La logística de distribución de ayuda humanitaria en zonas con limitaciones de accesibilidad (LDAHLA) incluye definición de rutas y asignación de recursos, considerando la presencia de interrupciones viales transitorias o temporales que afectan la red o malla vial terrestre, ocasionando dificultad o restricción para acceder a los puntos de atención (Averbakh, 2012, Özdamar & Ertem, 2015). Los recursos en su mayoría corresponden a vehículos de transporte terrestre convencionales como camiones, cuadrillas de reparación y maquinaria necesaria para la reparación de las carreteras o vías.

1.3. Estado del Arte

Este apartado del documento tiene como finalidad realizar un estado del arte a través de una revisión sistemática de la literatura. Se tomó como horizonte de análisis desde el año 2000 al 2020. Se definió una estrategia de búsqueda para identificar, evaluar, interpretar y sintetizar las investigaciones existentes y relevantes en torno a la logística de distribución de ayuda humanitaria en zonas con limitaciones de accesibilidad. El análisis se centró en los siguientes aspectos: propósito de los estudios, características de los modelos empleados, tipos de resultados, conocimientos, desafíos y oportunidades de investigación (Manterola, Astudillo, Arias, & Claros, 2013).

La definición de la estrategia de búsqueda incluyó conceptos relacionados con la logística humanitaria, tipo de zona, tipo de proceso y tipo de documento, utilizando bases de datos electrónicas como Web of science, Scopus, Science Direct, Scielo, Springer Link, JASTOR, Emerald, EBSCO y Redalyc.

Se señalaron las características de los estudios para ser incluidos o excluidos, por medio de la definición de los criterios específicos de inclusión y exclusión separados por categorías asociadas a diseño del estudio, resultados e intervenciones.

De 356 artículos de investigación y revisión identificados al inicio, se establecieron 104 artículos al eliminar duplicados. Después se delimitó a 65 artículos al verificar si la temática del artículo estaba enmarcada en la Logística Humanitaria y si empleaba algún modelo de toma de decisiones. Entre estos 65 artículos, 8 artículos fueron excluidos con base en los criterios de exclusión definidos. Finalmente, 49 artículos fueron seleccionados para análisis y así proporcionar información relevante sobre la problemática o temática de interés, soportado a través de un diagrama de flujo PRISMA. Una vez seleccionados los artículos obtenidos, se procedió con la extracción y síntesis de la información de estos estudios, a través de una matriz de extracción.

El procedimiento detallado del desarrollo de la revisión sistemática de la literatura aparece descrito en el artículo publicado por Rojas et al., (2023a), como uno de los resultados de la tesis en mención. A continuación, se presentan los resultados de la revisión.

1.3.1. Propósito

La LDAHLA se aborda en la literatura desde dos enfoques principales, que se denominan distribución de la ayuda y restauración del acceso. A partir de la extracción y síntesis de la información relevante en los estudios enmarcados en el problema de interés, se determinó que 20 de los 49 artículos seleccionados exploraron el proceso de distribución de ayuda humanitaria. En algunas investigaciones (Aksu y Ozdamar, 2014; Edrissi et al., 2015; Sakiani et al., 2020), se evidencia que los trabajos desarrollados en este campo están destinados a elaborar una propuesta de planificación de rutas para la entrega de ayuda a los puntos de atención o población afectada por un desastre. Aunque este problema se ha abordado en la fase de respuesta, decisiones como la determinación de la ubicación óptima de las instalaciones y el preposicionamiento del inventario (Rezaei-Malek et al., 2016a, b) son específicas de la fase de preparación y obedecen a decisiones de carácter estratégico y táctico (Bai et al., 2018). Las medidas de desempeño más empleadas en este tipo de problemas se enmarcaron en la dimensión de eficiencia, basadas en la minimización de los costos logísticos, los cuales están representados por los costos totales de

distribución (Bai et al., 2018) y la minimización del tiempo total de distribución o respuesta hacia la población afectada, asociadas a la dimensión de eficacia (Wohlgemuth et al., 2012).

Veinticuatro de los 49 artículos exploraron el problema de la restauración del acceso. Autores como Barrera et al. (2012), Iloglu y Albert (2018), Maya Duque et al. (2016) y Nurre et al. (2012) analizaron el problema de la reparación de emergencia de una red rural o urbana afectada por la ocurrencia de un desastre. Las medidas de desempeño más utilizadas en este tipo de problemas se enmarcan en la dimensión de eficacia, basadas en maximizar la accesibilidad de la red vial o minimizar el tiempo total de reparación, limpieza o rehabilitación de la red. La minimización del costo total de reparación está asociada a la dimensión de eficiencia (Maya Duque et al., 2013). Asimismo, se pudo determinar que las decisiones de programación de operaciones de limpieza y reparación y asignación de recursos para la rehabilitación de la red se caracterizan por ser transitorias (Wu y Wang, 2020; Çelik, 2016).

Cinco de los 49 artículos realizaron una primera aproximación en la integración de las operaciones de distribución de ayuda y la restauración del acceso (Aslan y Celik, 2019; Sancı y Daskin, 2019; Shin et al., 2019; Vahdani et al., 2018b; Yan y Shih, 2009). En general, estos artículos trataban de determinar el orden de reparación de las carreteras destruidas y el transporte de artículos de socorro a las zonas de demanda después de que se produce un desastre, dado un número de carreteras conectadas, lo que genera limitaciones de accesibilidad. Entre las medidas de rendimiento que se han empleado, algunas se basan en la eficiencia y la eficacia, como la minimización de los costos logísticos representados por los costos de distribución y reparación y la minimización del tiempo total de entrega de la ayuda humanitaria desde los centros de distribución locales hasta las zonas afectadas (Minas et al., 2020; Wu y Wang, 2020; Yan et al., 2020). Sin embargo, no quedó clara ninguna medida de rendimiento enmarcada en la dimensión social.

1.3.2. Características de los modelos empleados.

Los trabajos que han sido desarrollados entre los años 2000 al 2020 en la logística de distribución humanitaria para zonas con limitaciones de accesibilidad se pueden clasificar en modelos de distribución de ayuda y restauración del acceso; sin embargo, aunque se han abordado generalmente de forma separada, en algunas investigaciones como (Iloglu & Albert, 2018; Maya Duque, Dolinskaya, & Sørensen, 2016) se discute la importancia de integrar ambos procesos. Estos problemas se han representado principalmente utilizando modelos de programación lineal entera y entera mixta (Lin et al., 2011; Edrissi et al., 2015; Ozdamar et al., 2018; Tavana et al., 2018; Tan et al., 2019; Shin et al., 2019; Hezam y Nayeem, 2020; Baxter et al., 2020; Coco et al., 2020).

Los modelos de programación matemática se han utilizado desde un enfoque determinista, utilizando algoritmos exactos (18 de 49), metaheurísticos (14 de 49) y heurísticos (15 de 49), como generación de columnas, Branch and price, branch and cut, descomposición de Benders, Programación dinámica, ϵ restricciones, algoritmos genéticos, colonia de hormigas, NSGA-II y por enjambre de partículas (Maya Duque et al., 2013, 2016; Rodríguez-Espíndola et al., 2018; Nurre et al., 2012; Iloglu y Albert, 2020; Sakuraba et al., 2016a; Vahdani et al., 2018b; Ozdamar et al., 2014; Averbakh, 2012; Rezaei-Malek et al., 2016a; Sabbaghtorkan et al., 2020; Yan y Shih, 2009; Tuzun Aksu y Ozdamar, 2014; Al Theeb y Murray, 2017; Victoria et al., 2016; Lu et al., 2016; Wohlgemuth et al., 2012).

También, se determinó que los procesos de distribución de la ayuda y la restauración del acceso obedecen a la fase de respuesta (Çelik, 2016). Por lo tanto, en la restauración del acceso, las actividades de reparación o limpieza de vías se consideran transitorias (Maya-Duque, et al., 2016; Nurre et al., 2012). Las actividades de reparación o habilitación de la malla vial No transitorias o de largo plazo obedecen a la fase de recuperación (Yan et al., 2020).

Los modelos de distribución de ayuda desarrollados por autores como Averbakh, (2012), Moreno et al., (2019), Rezaei-Malek, Sanci & Daskin, (2019), Shanshan et al., (2015), Zafri et al., (2020) y Zhou et al., (2017) no han considerado las limitaciones propias de acceso de vehículos en ciertas rutas o zonas con base en sus condiciones geológicas y de infraestructura (J. Wu & Wang, 2020). Además, se ha ignorado la participación de diferentes actores en este proceso (Ibarra-Rojas et al., 2018). Quince de los modelos analizados consideraron múltiples depósitos asumiendo implícitamente una capacidad ilimitada (Chen et al., 2020; Grass y Fischer, 2016; Liu et al., 2019; Rezaei-Malek et al., 2016a, b).

En la programación de operaciones transitorias para la rehabilitación de vías, autores como Averbakh, (2012); Çelik, (2016); Kim et al., (2018); Maya Duque et al., (2013, 2016); Özdamar et al., (2014); Sakuraba et al., (2016) y Shin et al., (2019) consideran que los recursos como tripulaciones, maquinaria y materiales provienen de un único depósito central. Los modelos enmarcados en este problema asumieron un único tipo de recurso ilimitado para la restauración de la red (Nurre et al., 2012; Sanci y Daskin, 2019; Vahdani et al., 2018b; Yan et al., 2014a, b). Estos modelos pretenden resolver problemas de asignación y enrutamiento de recursos en cada uno de los enlaces dañados de la red (Iloglu y Albert, 2018; Morshedlou et al., 2018; Reddy et al., 2017; Sanci y Daskin, 2019; Yan et al., 2014a, b).

Los artículos que analizaron los problemas de distribución del socorro y restauración del acceso consideraron una flota homogénea de vehículos (Victoria et al., 2016) o heterogénea (Alinaghian et al., 2019), no obstante, suponen que el número de vehículos es ilimitado. También se ha asumido que la flota

de vehículos es propiedad de los organismos de socorro, cuando, en contextos reales, parte de ella puede estar subcontratada (Bai et al., 2018).

Los modelos de distribución de la ayuda y de restablecimiento del acceso, que se han desarrollado hasta ahora, han considerado entornos multiperiodo, pero se omite la dinámica del propio sistema (Iloglu y Albert, 2018). Los modelos multiperiodo asumen que la demanda acumulada de ayuda humanitaria se produce al principio o al final del periodo u horizonte de planificación (Özdamar y Ertem, 2015; Shanshan et al., 2015). En el contexto real, la demanda puede presentarse en varios instantes de tiempo según la dinámica del evento disruptivo, las características sociodemográficas de la población afectada y el alivio del sufrimiento generado (Bai et al., 2018).

Además, se observó que 38 de los trabajos consideraron modelos de distribución de ayuda y restauración del acceso con un único objetivo o medida de desempeño (Ahmadi et al., 2015; Al Theeb y Murray, 2017; Alinaghian et al., 2019; Arif et al., 2020; Averbakh, 2012; Li et al., 2019; Nurre et al., 2012) y algunos trabajos presentaron dos o más medidas de desempeño u objetivos (Karakoc et al., 2020; Özdamar y Ertem, 2015; Rodríguez-Espíndola et al., 2018; Tavana et al., 2018; Vahdani et al., 2018a; Zhou et al., 2017).

Según la literatura, las medidas de rendimiento pueden agruparse en tres dimensiones: bienestar social, eficiencia y eficacia (Ransikarbumand Mason, 2016; Regis-Hernandez et al., 2017; Rezaei-Malek et al., 2016a, b; Tavana et al., 2018). La dimensión de eficiencia incluye medidas de rendimiento asociadas en la forma como se utilizan o gestionan los recursos para llevar a cabo las operaciones humanitarias (12 de 49) (Sanci y Daskin, 2019; Tzeng et al., 2007). La dimensión de eficacia determina la velocidad y la precisión en la entrega de ayuda humanitaria y la respuesta a la población afectada (36 de 49) (Jiang et al., 2012; Tzeng et al., 2007; Wang et al., 2019). Por otro lado, la dimensión de bienestar social se relaciona con el alivio del sufrimiento de las personas afectadas por un desastre (Zhou et al., 2017; Coco et al., 2020; Liu et al., 2019). Solo 4 de los 49 trabajos sobre la distribución de la ayuda consideraron medidas de bienestar social (Al Theeb y Murray, 2017; Zhou et al., 2017; Coco et al., 2020; Liu et al., 2019). En el caso de los trabajos que abordaron los modelos de restauración del acceso, no se pudieron identificar medidas de beneficio social (Wu y Wang, 2020). Estas medidas enmarcadas en las tres dimensiones suelen estar en conflicto, lo que se asemeja mucho a los contextos reales de la logística humanitaria (Sanci & Daskin, 2019).

Una vez realizado el análisis exhaustivo de las diferentes investigaciones enmarcadas en la logística de distribución de ayuda humanitaria en zonas con limitaciones de accesibilidad, se puede concluir que las principales contribuciones que han desarrollado los autores están enmarcadas en los modelos de

distribución de ayuda humanitaria y la restauración del acceso en la fase de respuesta. Sin embargo, estos problemas se han abordado de manera aislada, desconociendo la interdependencia entre ambos procesos. Por lo tanto, las acciones encaminadas al alivio del sufrimiento de las personas afectadas por un desastre, el tiempo de respuesta y asistencia a la población vulnerable y los costos totales logísticos de ambas operaciones tienen a ser sub-optimizados (Averbakh, 2012; Çelik, 2016; Dubey et al., 2019; Sanci & Daskin, 2019; Shanshan et al., 2015; Shin et al., 2019; Yan et al., 2014).

Aunque se han desarrollado trabajos aproximados en torno a la integración de las operaciones de distribución y restauración del acceso (Aslan & Celik, 2019; Sanci & Daskin, 2019; Shin et al., 2019; Vahdani et al., 2018; S. Yan & Shih, 2009), aún se presentan vacíos referentes a la no consideración de aspectos colaborativos y decisiones conjuntas entre ambos procesos, desconociendo su interrelación. De igual manera, no se ha considerado las limitaciones de recursos para la ejecución conjunta de actividades de distribución de ayuda humanitaria y de programación de operaciones para la rehabilitación de las vías.

Es necesario analizar el impacto de estas decisiones sobre medidas de desempeño en conflicto las cuales se encuentran enmarcadas en las tres dimensiones identificadas. Estas particularidades predominan en las primeras 72 horas una vez generado el desastre. Considerando los artículos que han sido analizados desde el año 2000 hasta el 2020, se pudo determinar que falta aún investigación en torno a la coordinación de la distribución de ayudas humanitarias con la restauración del acceso generado por disrupciones viales transitorias en zonas afectadas por desastres naturales súbitos en el corto plazo (short-term disasters) con limitaciones en la accesibilidad.

1.3.3. Tipos de resultados y conocimientos generados

Los estudios orientados en los procesos enmarcados en la distribución de ayuda y restauración del acceso generaron resultados y conocimientos respecto a las características de las operaciones, considerando elementos importantes tales como las organizaciones que participan en ambos procesos, las medidas de desempeño que se han empleado, las restricciones o limitaciones que se han considerado, y los tipos de recursos, que en conjunto han influenciado en el diseño y desarrollo de los modelos de toma de decisión orientados a representar y dar una solución aproximada a cada problemática en consideración (Çelik, 2016; Coco et al., 2020; Nurre et al., 2012; Özdamar & Ertem, 2015; Tuzun Aksu & Ozdamar, 2014).

En el proceso de distribución de ayuda humanitaria considerando limitaciones en el acceso, se pudo identificar que uno de los factores que inciden en la toma de decisión en la fase de respuesta son los tipos

de recursos empleados en el proceso como la flota de vehículos disponible, características de la demanda y zonas afectadas por el desastre, el estado actual de las rutas o función de desempeño empleada, predominando aquellas relacionadas con las dimensiones de eficiencia y eficacia (Anaya-Arenas et al., 2014a; Edrissi et al., 2015b; Rodríguez-Espíndola et al., 2018; Sakiani et al., 2020).

El proceso de reparación y restauración del acceso de la malla vial afectada por un evento disruptivo como los desastres naturales súbitos en la fase de respuesta se caracteriza por ser de carácter temporal o transitorio (Baxter et al., 2020; Çelik, 2016; Kim et al., 2018; Maya-Duque, et al., 2016; Nurre et al., 2012; S. Yan et al., 2012). Estas decisiones se ven afectadas por las limitaciones de recursos requeridos en las labores de limpieza, rehabilitación y despeje de las rutas o vías afectadas para la atención a la población afectada. De igual forma, la prioridad o programación de rehabilitación de cada ruta está determinado por los costos asociados a la operación.

Finalmente, en los primeros trabajos que abordaron de forma aproximada la integración entre ambos procesos o conjuntos de operaciones (Yan & Shih, 2009); por su complejidad asumieron de forma general que los recursos necesarios para el desarrollo óptimo de ambos procesos son ilimitados (Shin et al., 2019), empleando medidas de desempeño basadas en las dimensiones de eficiencia y eficacia; sin embargo, las medidas de desempeño enmarcadas en el beneficio social, se han pasado por alto en la literatura (Çelik, 2016).

1.3.4. Desafíos y oportunidades de trabajo

Dentro de los estudios o artículos analizados existen desafíos y oportunidades de trabajo. Debido a la destrucción generalizada resultante de los desastres, asumir enlaces e instalaciones sin daños es poco realista (Rodríguez-Espíndola et al., 2018). Tener en cuenta los desastres múltiples en varios periodos de tiempo representa otra vía de investigación (Grass & Fischer, 2016). Los objetivos en conflicto son comunes en la gestión de desastres y merecen especial atención (Macea et al., 2018; Sabbaghtorkan et al., 2020). Las organizaciones de socorro no actúan por sí mismas en situaciones de emergencia, sino como una unidad donde sus objetivos pueden estar en conflicto (Minas et al., 2020; Rodríguez-Espíndola et al., 2018). Por lo tanto, un enfoque de múltiples objetivos permite una visión amplia del problema, en términos de conocer la naturaleza de múltiples actores que participan en las cadenas de ayuda humanitaria (Rodríguez-Espíndola et al., 2018). Por otro lado, faltan investigaciones que consideren medidas de desempeño basadas en el bienestar social (Grass & Fischer, 2016; Karakoc et al., 2019). Para establecer la prioridad en la programación de rutas se han utilizado los tiempos de entrega como el factor de conducción principal, sin embargo, puede ser reemplazado también por otras reglas de prioridad, por ejemplo, las áreas afectadas por

desastres con un mayor porcentaje de niños, personas mayores y personas heridas pueden tener prioridades más altas (Faiz et al., 2019).

Encontrar el mejor momento para comenzar a colocar los recursos de distribución de ayuda y reparación de las vías también es un desafío para los administradores de emergencias al enfrentar un desastre (Maya Duque, Dolinskaya, & Sörensen, 2016). Diferentes agentes están involucrados en la reparación de la red vial, por ende, aspectos de colaboración y coordinación también deben tenerse en cuenta, así como la toma de decisiones cuando dos o más recursos de reparación pueden trabajar de forma paralela para reparar una sola vía dañada (Prabawa & Choi, 2020). También es necesario considerar la cantidad limitada de recursos en las decisiones de distribución de ayuda y reparación de las vías restringidas (Victoria et al., 2016; Maya Duque et al., 2013; Rodríguez-Espíndola et al., 2018). Analizar la consideración de interrupciones parciales, de modo que el sistema pueda operar con capacidades reducidas es un tema importante que merece ser estudiado (Karakoc et al., 2020). Las características socioeconómicas y la densidad de la población también podrían incluirse en los estudios futuros (Karakoc et al., 2019). La coordinación entre la distribución de ayuda y la restauración del acceso, debido a la interdependencia que existe entre ambos procesos o conjunto de operaciones es un asunto de relevancia que merece ser abordado (Shin et al., 2019; S. Yan & Shih, 2009).

Adicional, durante el horizonte 2021 – 2023, se identificó como aportes a la distribución de ayuda el trabajo realizado por Vahdani et al., (2022) que estudiaron las decisiones de ubicación y asignación instalaciones, redistribución, uso compartido de servicios y ruteo de vehículos. También, Steenbergen et al., (2023) consideraron la entrega dividida y viajes múltiples con tiempos de viaje estocásticos. En la reparación de vías, Akbari et al., (2021) consideraron decisiones de restauración con equipos homogéneos asumiendo que el tiempo necesario para abrir una vía bloqueada es igual para todos los equipos. Además, Mohammad et al., (2023) asumieron equipos consolidados de restauración con tiempos de desbloqueo estocástico. Finalmente, en los estudios concernientes a la integración de la distribución de ayuda y restauración del acceso, Akbari & Sayarshad, (2022) abordaron un marco integrado de evaluación de daños, recuperación carreteras y distribución de socorro bajo un enfoque secuencial.

1.4. Definición del problema de investigación

Con base en la revisión de la literatura realizada, este apartado presenta la declaración del vacío del conocimiento de esta investigación, la formulación del problema y las preguntas que guían la investigación.

1.4.1. Declaración del vacío del conocimiento

A partir del análisis del panorama global y de la revisión sistemática de la literatura y el contexto real de la problemática (EM-DAT: The Emergency Events, 2020, UNGRD, 2020); se declara como vacío de conocimiento general la ausencia de estudios, metodologías, herramientas y técnicas con el fin de entender como coordinar las operaciones de distribución de ayuda humanitaria y la restauración transitoria del acceso de la malla vial en la respuesta de desastres naturales súbitos en el corto plazo, considerando recursos restringidos, aspectos colaborativos y la evaluación de múltiples objetivos en conflicto. En la Figura 6 se presentan las principales fuentes que apoyan esta declaración.

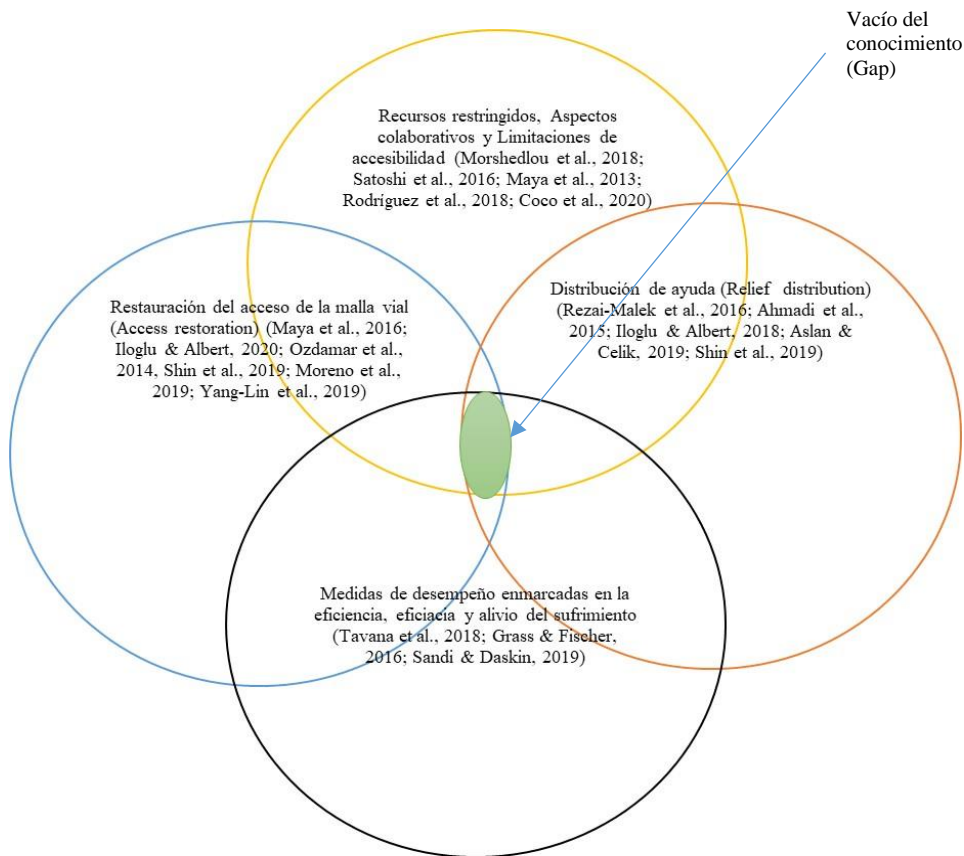


Figura 4. Declaración del vacío del conocimiento.
Fuente: el autor

En lo metodológico, se declara como vacío de conocimiento la necesidad de establecer bajo qué condiciones la coordinación de operaciones de la distribución de ayudas y la restauración del acceso presenta mejores resultados en los indicadores de eficiencia, eficacia y beneficio social a la población vulnerable afectada por desastres naturales súbitos en el corto plazo. El estudio de cómo coordinar de

manera óptima tanto la restauración de la infraestructura vial como los esfuerzos de respuesta de emergencia después de los desastres, permite lograr una mayor capacidad y confiabilidad en la distribución enrutando los vehículos de transporte para que los suministros sean entregados de manera oportuna a la población vulnerable (Kovács & Spens, 2011).

Desde el punto de vista de la modelación del problema, existe la necesidad de representar las limitaciones de recursos, los aspectos colaborativos y múltiples medidas de desempeño en conflicto en la logística de distribución de ayuda humanitaria con limitaciones de accesibilidad. Además, es necesario involucrar la programación de operaciones transitorias en la red vial y su impacto en la entrega de ayudas. El daño a la infraestructura vial puede provocar interrupciones y una capacidad disminuida para responder a emergencias (Özdamar et al., 2014). Por lo tanto, es necesario modelar las interdependencias entre la restauración de la infraestructura vial y la distribución de ayuda humanitaria, donde se deben programar la entrega de servicios de emergencia, mientras los equipos de recuperación de la red vial reparan los daños a la infraestructura vial generados por desastres naturales súbitos de corta duración.

1.4.2. Formulación del problema de investigación

De acuerdo con los antecedentes del problema y el vacío del conocimiento detectado en la revisión sistemática de la literatura, la pregunta que reúne los aspectos claves y que orientó el desarrollo del presente proyecto de investigación, es la siguiente: *¿cómo coordinar la distribución de ayudas humanitarias con la restauración de disrupciones viales transitorias en zonas afectadas por desastres naturales súbitos con limitaciones de accesibilidad desde un enfoque de múltiples objetivos (eficiencia, eficacia y beneficio social), de tal modo que permita establecer en qué condiciones se presenta un mejor desempeño en la programación de entregas?*

1.5. Hipótesis general de la investigación

La hipótesis que orienta la investigación es la siguiente: la coordinación de la distribución de ayudas humanitarias con la restauración de disrupciones viales transitorias mejora el desempeño en términos de eficiencia, eficacia y alivio del sufrimiento en el proceso de atención humanitaria en zonas afectadas por desastres naturales súbitos con limitaciones de accesibilidad.

1.6. Objetivos

Objetivo General

Desarrollar una propuesta de coordinación que integre distribución de ayuda humanitaria con restauración de disrupciones viales transitorias en zonas afectadas por desastres naturales súbitos con limitaciones de accesibilidad, mediante la formulación de un modelo bajo un enfoque de múltiples objetivos (Eficiencia, Eficacia y Beneficio Social) que contribuya al proceso de toma de decisiones.

Objetivos Específicos

- Caracterizar el sistema de distribución de ayuda humanitaria con limitaciones de accesibilidad mediante la identificación de actores y recursos que tienen mayor participación en la entrega de ayudas.
- Identificar factores, variables y organismos que intervienen en el proceso de toma de decisiones en la reparación de disrupciones viales transitorias en redes logísticas humanitarias.
- Proponer un modelo que integre las decisiones de distribución de ayudas y la restauración del acceso vial considerando múltiples medidas de desempeño (Eficiencia, Eficacia y Beneficio Social) en zonas con limitaciones de accesibilidad.
- Validar el desempeño del modelo de toma de decisiones a partir de un contexto geográfico particular o caso de estudio.

2. Diseño metodológico de la investigación

En este capítulo se presenta el diseño del método de investigación encaminado al logro de los objetivos general y específicos del presente proyecto. Primero se describe el tipo o enfoque de investigación, la selección del diseño de investigación y luego la metodología de investigación.

2.1. Selección tipo o enfoque de investigación

El diseño de esta investigación, dada su naturaleza, requirió del uso de métodos mixtos. Los métodos mixtos representan un conjunto de procesos sistemáticos, experimentales y críticos de investigación, lo cual implica la recolección y el análisis de datos cuantitativos y cualitativos, para realizar inferencias como resultado de la información recolectada, con el fin de lograr una mayor comprensión del problema o fenómeno objeto de estudio (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014). El diseño mixto seleccionado para esta investigación fue el diseño secuencial dando una mayor preponderancia en aspectos cuantitativos, cuyo propósito es realizar un acercamiento a la problemática mediante información cualitativa; este análisis servirá para proceder a la fase cuantitativa, en la cual, mediante la formulación de un modelo de toma de decisiones, se incluyeron las interacciones y relaciones encontradas entre los procesos de distribución de ayuda humanitaria y la restauración del acceso de la red vial.

2.2. Selección del diseño de investigación

Según Hernández, Fernández, & Baptista, (2014), Creswell, (2005), Williams & Tutty, (2005), el diseño de una investigación mixta puede ser concurrente, secuencial, diseños de conversión, diseños de integración, exploratorio secuencial, explicativo secuencial, transformativo secuencial, diseño de triangulación concurrente, diseño anidado o incrustado concurrente de modelo dominante, diseño anidado concurrente de varios niveles, diseño transformativo concurrente y diseño de integración múltiple. El diseño de la presente investigación es de tipo explicativo secuencial (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014). Este diseño se caracteriza por una primera fase donde se recolectan y analizan datos cuantitativos, seguida de otra fase donde se recogen y evalúan datos cualitativos, dando una mayor ponderación al enfoque cuantitativo (Creswell, 2005).

2.3. Metodología de la investigación

La metodología de la investigación está enmarcada en tres fases, las cuales se presentan en la Figura 5 y se describen a continuación.

Fase 1. Caracterización del sistema actual objeto de estudio.

La primera fase fue encaminada al cumplimiento de los primeros dos objetivos específicos. En esta fase se identificaron los recursos, actividades, factores clave y parámetros que impactan las decisiones de distribución de ayuda y la restauración del acceso, a partir de una revisión sistemática de la literatura. También se realizó una revisión del estado de la práctica, a partir un proceso de planeación de la revisión, el desarrollo de la búsqueda y el reporte y difusión de los resultados. Posteriormente, se identificaron los actores críticos que intervienen en la toma de decisiones en la distribución de ayuda humanitaria y la restauración del acceso, a través de un análisis de grafos empleando el software Gephi ® versión 0.9.2 y RStudio ®, el cual se describe en el capítulo 3 de este documento.

En la revisión sistemática de la literatura se emplearon bases de datos como Science Direct, SCOPUS, JASTOR, EBSCO, Emerald, Redalyc y Web of Science. La revisión de la literatura implicó definir, consultar y obtener la bibliografía y demás recursos que fueron relevantes para el propósito del estudio, para posteriormente extraer y recopilar la información clave y suficiente para enmarcar el problema de investigación (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014). También se consideraron otras bases de datos especializadas de organizaciones como: CRED, UNGRD, Instituto Nacional de Vías (INVIAS), Comité Internacional de la Cruz Roja (CICR) y la Organización de las Naciones Unidas (ONU). Posteriormente, se analizaron las características de la distribución de la ayuda y la restauración del acceso, a través de modelos de programación matemática. Para su validación, se empleó como contexto geográfico particular el municipio de Roldanillo en el departamento del Valle del Cauca, Colombia, según las estadísticas de la UNGRD durante el horizonte 1998 – 2019 ha sido uno de los municipios con mayor casos de inundaciones en el Valle del Cauca. Luego, se realizó un análisis de escenarios de cada modelo a partir de la variación de parámetros de interés agrupados en cantidad de recursos disponibles y tiempos de operación y su impacto en la función de desempeño de cada modelo, empleando el solver CPLEX en el entorno de desarrollo AMPL IDE. Como técnicas de recolección y análisis de información se utilizaron tablas de resultados y gráficos de línea, permitiendo analizar el impacto en la función objetivo de cada modelo con relación a la variación del parámetro de interés. Finalmente, se realizó una discusión de los resultados obtenidos en cada modelo de programación matemática.

Fase 2. Modelación del sistema.

La segunda fase estuvo encaminada al cumplimiento del tercer objetivo específico. En esta fase se realizó una identificación de los mecanismos o estrategias de solución existentes en la literatura para la coordinación de procesos en logística humanitaria. Luego, se formuló un modelo de toma de decisión que representó las características de la propuesta de coordinación de la distribución de ayuda humanitaria y la restauración del acceso.

Dentro de la revisión sistemática de la literatura, se pudo determinar que la programación matemática comprende los modelos de toma de decisión dominantes en el análisis de la distribución de ayuda y la restauración transitoria de red vial (Aksu & Ozdamar, 2014; Anaya-Arenas; Çelik, 2016; Habib, Lee, & Memon, 2016; Özdamar & Ertem, 2015; Sakiani et al., 2020; Shin et al., 2019; Vahdani et al., 2018). Estos modelos permiten incorporar una o diferentes medidas de desempeño en conflicto, considerando diferentes tipos de limitaciones y un estudio detallado de alternativas en ambientes de alta complejidad generando un conjunto de soluciones factibles con relación a otro tipo de modelos como la simulación de eventos discretos, la dinámica de sistemas y la simulación basada en agentes (Ransikarbum & Mason, 2016; Wohlgemuth et al., 2012).

En primera instancia, se formuló un modelo matemático mono-objetivo, el cual incluyó la identificación de supuestos, conjuntos, parámetros, variables de decisión, restricciones y función objetivo. Para la solución del modelo matemático mono-objetivo se empleó el solver CPLEX en el entorno de desarrollo AMPL IDE. Luego, se formuló un modelo matemático multiobjetivo. Para la definición de las funciones objetivo del modelo matemático multiobjetivo, se identificaron las medidas de desempeño enmarcadas en las dimensiones de eficiencia, eficacia y bienestar social. Para la selección de las medidas de desempeño según cada dimensión, se realizó una priorización de las medidas a partir de una evaluación de expertos o juicios de interesados (stakeholders), y los lineamientos de una herramienta de análisis multicriterio (Mendoza Patiño et al., 2018; Venkatesh et al., 2019).

Una vez seleccionadas las medidas de desempeño por cada dimensión, se formuló el modelo matemático multiobjetivo. La formulación del modelo incluyó la identificación de supuestos, conjuntos, parámetros, variables de decisión, restricciones y funciones objetivo. Como desde el punto de vista operativo es imposible definir un solo valor óptimo cuando existen varios objetivos (Karakoc et al., 2019), la programación multiobjetivo pretende establecer el conjunto de Soluciones No- Dominadas o Frente de Pareto (Sörensen & Vanovermeire, 2013). Entre los métodos más utilizados y apropiados para resolver este tipo de modelos se encuentra épsilon restricciones (ϵ -constraints method), dado que posee características

importantes enmarcadas en su flexibilidad y rigurosidad para su implementación y solución de modelos matemáticos multiobjetivo (Osorio et al., 2014). Este método fue desarrollado mediante la utilización del lenguaje de programación matemática AMPL. Para la determinación de soluciones no dominadas y generación del frente de Pareto, se empleó el algoritmo *fast-nondominated-sort* desarrollado por Deb et al., (2002), a través del lenguaje de programación Python.

Fase 3. Validación del modelo.

La tercera fase estuvo encaminada al cumplimiento del cuarto y último objetivo específico de la tesis doctoral. Para validar el modelo de toma de decisión, se describió un contexto geográfico particular, el cual corresponde a una investigación centrada en analizar un contexto, suceso o episodio en particular representativo de la problemática de interés (Gómez Ramírez, 2017). Este contexto geográfico particular se enmarcó en un municipio en Colombia, a través del diseño y preparación de recolección de información como entrevistas semiestructuradas, bases de datos municipales o regionales e informes de vulnerabilidad social (Sarache et al., 2005).

Según Alumur et al., (2012), existen diferentes criterios de validación, los cuales resultaron apropiados para el modelo de la presente tesis doctoral. El primer criterio consiste en la obtención de información real del sistema estudiado, a través de la recopilación de datos históricos y actuales en un contexto real (García, 2017). El segundo criterio se refiere a un análisis de escenarios, el cual permite analizar los posibles resultados obtenidos en caso de cambiar las condiciones iniciales del experimento (Rojas Trejos et al., 2017).

Una vez definido el contexto geográfico particular, se realizó un análisis de los resultados del modelo y su impacto en las medidas de desempeño (Arredondo et al., 2016). De igual forma, se realizó una validación de la hipótesis, a partir de un análisis comparativo de los resultados del modelo para los procesos de distribución de ayuda humanitaria y la restauración del acceso, considerando dos esquemas de decisión: coordinación de ambos procesos y un enfoque secuencial de los mismos. La comparación de los resultados de ambos esquemas de decisión se analizó desde las perspectivas mono-objetivo y multiobjetivo. En la comparación de los resultados desde la perspectiva mono-objetivo se realizó un análisis de escenarios a partir de la variación de parámetros de interés y su impacto en la función de desempeño. En la comparación de los resultados multiobjetivo se realizó una comparación de las fronteras de Pareto de ambos esquemas de decisión, considerando los aportes realizados por Deb et al., (2002) y Zitzler & Thiele, (1999), la cantidad de soluciones factibles y repetidas generadas. Finalmente se realizó una discusión de los resultados obtenidos.

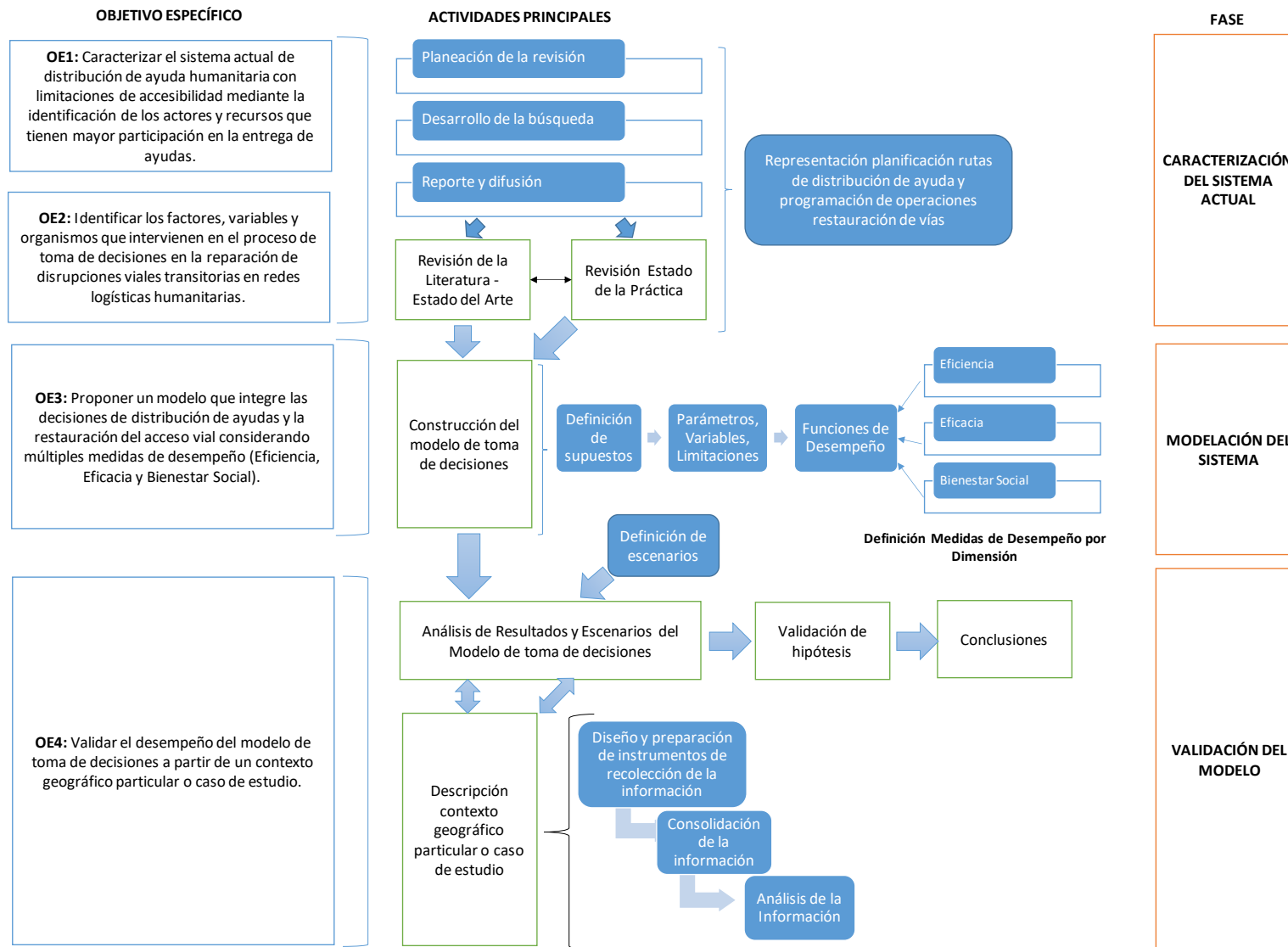


Figura 5. Estrategia metodológica.
Fuente: el autor.

3. Caracterización del sistema de distribución de ayuda humanitaria en zonas con limitaciones de accesibilidad.

Este capítulo presenta la caracterización del sistema de distribución de ayuda humanitaria en zonas con limitaciones de accesibilidad. Se realizó una revisión de la literatura para determinar el estado del arte y la práctica en torno al sistema bajo análisis. En este sentido, se describieron las decisiones, actividades, recursos y medios requeridos para la distribución de ayuda humanitaria hacia los puntos de atención enmarcados durante la fase de respuesta. También, se describieron los actores que participan en las actividades del sistema de distribución de ayuda humanitaria bajo análisis.

3.1. Características del sistema de distribución de ayuda humanitaria.

Un sistema de distribución de ayuda humanitaria comprende el conjunto de actores y/o procesos responsables de la atención y respuesta inmediata a la población afectada durante de las primeras 72 horas que se consideran críticas para la población afectada por un desastre (Minas et al., 2020). Estudios realizados por Edrissi et al., (2015) y Özdamar & Ertem, (2015) han considerado que durante este lapso de tiempo se puede comprometer el bienestar, salud, supervivencia y la vida de las familias y personas víctimas de un desastre, y de manera particular en los desastres naturales denominados como súbitos, ya que por su naturaleza, el tiempo de exposición de estos eventos disruptivos son impredecibles y de gran impacto a la infraestructura vial, ocasionando que algunas zonas presenten limitaciones de acceso (Sakuraba, Santos, Prins, et al., 2016).

Las zonas con limitaciones de accesibilidad son generadas por el bloqueo temporal de carreteras o puentes que conectan las fuentes de suministro y los puntos de atención (Fikar et al., 2016), generando dificultades en la distribución de ayuda humanitaria (Coco et al., 2020b; Shin et al., 2019). Los tipos de infraestructura vial se catalogan como: red terciaria, red secundaria, red primaria, puentes vehiculares y túneles. Las condiciones de la infraestructura vial afectada son: cerrada o con paso restringido (Organización de las Naciones Unidas, 2014).

En términos generales, el sistema de distribución de ayuda humanitaria se enmarca en dos niveles o escalones (Figura 6) (Balcik, 2016). En el primer nivel está el transporte desde los centros de distribución regionales hacia los puntos locales de distribución. En el segundo nivel está el transporte desde los puntos

locales de distribución hacia las zonas afectadas, albergues o puntos de atención, representada por la distribución de última milla (Kovacs & Moshtari, 2019).

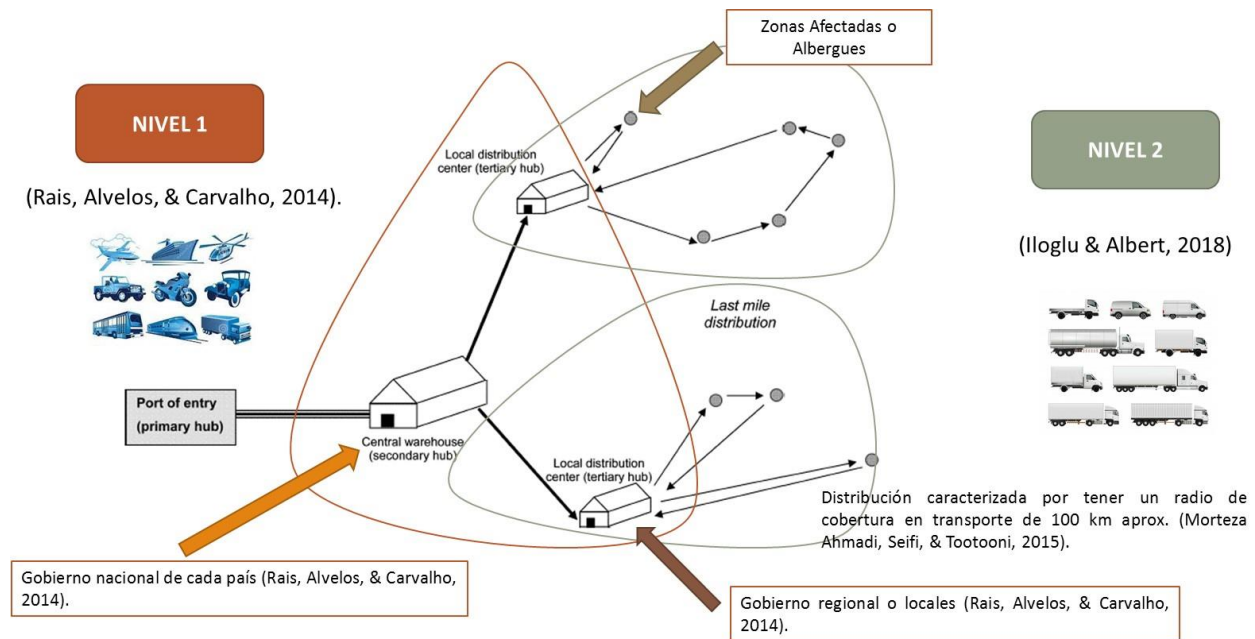


Figura 6. Sistema general de distribución de ayuda humanitaria.

Fuente: Adaptado de Balcik, (2016).

En el primer nivel, los centros de distribución son los principales nodos de transporte (aeropuertos, estaciones de ferrocarril, puertos marítimos, terminal de autobuses) que pertenecen al gobierno nacional en cada país. Por otra parte, en el segundo nivel, los centros de emergencia son los mismos centros de ayuda caracterizados por pequeños depósitos o puntos locales, administrados por el gobierno regional o municipal (entes territoriales), los cuales están ubicados cerca de las áreas afectadas por el desastre (Rais, Alvelos, & Carvalho, 2014). Un punto local de distribución puede ser una tienda de campaña, un almacén, una unidad prefabricada o una instalación existente (Liu et al., 2019). Los albergues o puntos de atención son determinados a partir de un análisis de zonas seguras establecido por los comités locales de apoyo en la gestión y atención de emergencias, como una iglesia, un coliseo, centro de reunión comunitario o un almacén (Ahmadi et al., 2015).

Existen varios modos de transporte disponibles y adoptados en el primer nivel, mientras que el modo de transporte por carretera predomina en el segundo nivel (Morteza et al., 2015). El transporte terrestre por carretera tiene las características de servicio directo, por lo tanto, es considerado la forma más factible y disponible de llegar a las víctimas (Iloglu & Albert, 2018). En este sentido, se puede inferir que

los sistemas de distribución de ayuda humanitaria en zonas con limitaciones de accesibilidad predominan en el segundo nivel, e incluye el proceso de planificación de rutas y la asignación de los vehículos de transporte terrestre considerando aspectos de vulnerabilidad y confiabilidad de la red o malla vial para acceder a las zonas poblacionales afectadas por un desastre o evento disruptivo (Averbakh, 2012). A continuación, se describe de forma detallada cada una de las decisiones relacionadas en el sistema de distribución de ayuda humanitaria considerando limitaciones de accesibilidad, enmarcadas en el segundo nivel. Estas decisiones involucran un conjunto de actividades importantes que se interrelacionan.

3.2. Decisiones y actividades en el sistema de distribución de ayuda humanitaria en zonas con limitaciones de accesibilidad.

Ante la ocurrencia de un desastre, es necesario desarrollar un conjunto de actividades asociadas en los siguientes tipos o marcos de decisión: evaluación de la situación actual y suministro de información, ubicación de las instalaciones, control del inventario y la planificación y configuración de rutas de vehículos, considerada esta última como una de las decisiones más importantes y críticas en la atención humanitaria, y se relaciona directamente con el sistema de distribución de ayuda humanitaria que se analiza en esta investigación (Silva et al., 2019). La descripción e interrelación de las decisiones y actividades asociadas al sistema de interés se presentan en el siguiente apartado.

3.2.1. Descripción e interrelación de decisiones y actividades.

Los sistemas de distribución de ayuda humanitaria en zonas con limitaciones de accesibilidad se operacionalizan a través de la información de ocurrencia de un evento de desastre, que suele ser la alerta de emergencia dada por las autoridades de la zona afectada o por la comunidad según la escala y gravedad del evento (Figura 7) (Silva et al., 2019). Esta decisión se relaciona con el despliegue de un equipo exploratorio y de emergencia para evaluar la situación, identificando las capacidades locales, los recursos y las fuentes de suministros, así como la determinación de las necesidades de la población afectada (Safarpour et al., 2020) y la condición o estado de acceso de las vías que conducen hacia las zonas afectadas, albergues, nodos de demanda o puntos de atención (Kim et al., 2018; Tuzun Aksu & Ozdamar, 2014). Esta información es fundamental para estimar los recursos necesarios para la operación de respuesta y se denomina este primer marco de decisión como evaluación de la situación actual y/o potencial y suministro de información (Maghsoudi & Pazirandeh, 2016). Las actividades en este primer marco de decisión se soporta con el mapeo de la región afectada a través de un plan de vuelo y sistemas de información geográfica (Silva et al., 2019),

recopilación de datos y procesamiento de imágenes digitales de la zona (Coco et al., 2020); permitiendo diagnosticar el estado de la infraestructura vial (Sakuraba et al., 2016), la identificación de las zonas seguras, áreas afectadas y las zonas con restricción de acceso por presencia de interrupciones viales transitorias (Kim et al., 2018). Este marco de decisión está inmerso en las fases de mitigación, preparación, respuesta y recuperación y es transversal en los niveles de decisión estratégico, táctico y operativo (López & Cárdenas, 2017; Silva et al., 2019).

Como resultado de la evaluación de la situación actual y/o potencial y suministro de información, es posible la consecución de actividades asociadas a la ubicación de locaciones como los puntos locales de distribución y atención, a partir del suministro de información relacionada con la identificación de zonas seguras y afectadas por el evento disruptivo, la demanda estimada de kits de ayuda humanitaria en cada zona afectada, la capacidad mínima de almacenamiento o aglomeración en cada locación potencial y los vehículos disponibles en la zona (Balcik & Beamon, 2008; Ozdamar et al., 2018; Paul & MacDonald, 2016; Silva et al., 2019) (Figura 7). Por otra parte, una vez desarrolladas las actividades asociadas con la ubicación de locaciones, se ejecutan las actividades enmarcadas en las decisiones de almacenamiento y control del inventario de ayuda humanitaria en cada locación, permitiendo la disponibilidad de producto y flujo físico entre los nodos existentes (Paul & MacDonald, 2016; Rodríguez-Espíndola et al., 2018) (Figura 7). La localización de instalaciones, el repositionamiento del inventario, el control y gestión del inventario de kits de ayuda humanitaria se caracterizan por ser decisiones de nivel estratégico y táctico, las cuales predominan durante la fase de preparación (Rojas et al., 2023a, López & Cárdenas, 2017, 2018).

No obstante, uno de los principales aspectos que influyen en la entrega de alimentos, refugio y suministros médicos a las regiones afectadas por desastres en el mundo ha sido el estado de la red de carreteras y las limitaciones de accesibilidad generadas (Duwadi, 2010; E Sanci & Daskin, 2019). En muchas situaciones, no es la falta de suministros en el centro local de distribución o puntos de atención, la cantidad de locaciones disponibles y capacidad de la flota terrestre vehicular que afectan el bienestar de la población afectada, sino la dificultad de llevar esos suministros a las personas y familias que lo necesitan por la presencia de interrupciones viales transitorias (Maya Duque, Dolinskaya, & Sörensen, 2016; Oscar Rodríguez-Espíndola, Albores, & Brewster, 2018).

En este sentido, las decisiones y actividades propias asociadas con la planificación y configuración de rutas de vehículos para la distribución o entrega de ayuda humanitaria hacia los puntos de atención constituye un reto importante desde el punto de vista logístico, dado que considera la condición de la infraestructura vial y las limitaciones de accesibilidad generadas por las interrupciones viales transitorias, la

demanda estimada de ayuda humanitaria en cada punto de atención y la disponibilidad de la flota terrestre vehicular (Coco et al., 2020; Huizing et al., 2020; Iloglu & Albert, 2020; Shin et al., 2019).

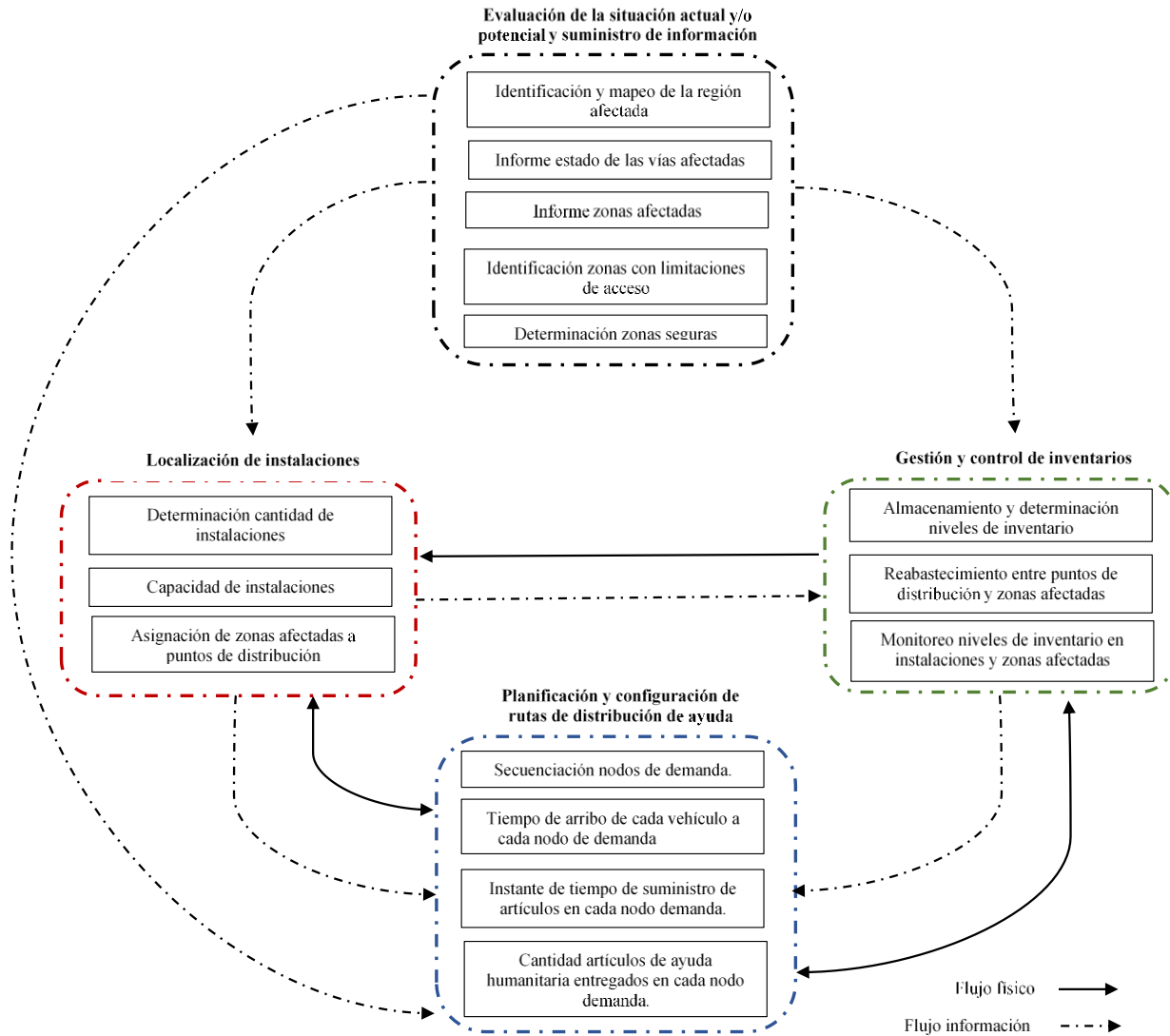


Figura 7. Interrelación de decisiones y actividades enmarcadas en la logística de distribución de ayuda humanitaria en zonas con limitaciones de accesibilidad.
Fuente: el autor.

La planificación y configuración de rutas de distribución de ayuda constituye un proceso afectado o sensible por la presencia de interrupciones viales transitorias, el cual se enmarca en la fase de respuesta y se caracteriza por ser una decisión de nivel operacional (Rojas et al., 2023a). Por lo tanto, constituye el proceso analizado en esta tesis doctoral. Este proceso comprende la secuenciación de nodos de demanda, la determinación de tiempos de arribo y salida de cada vehículo para el suministro o entrega de ayuda humanitaria en cada nodo o punto de demanda (Shin et al., 2019, Tavana et al., 2018) (Figura 7).

3.2.2. Planificación y configuración de rutas de distribución de ayuda considerando limitaciones de accesibilidad

La planificación y configuración de rutas de distribución de ayuda considerando limitaciones de accesibilidad comprende todas las actividades relacionadas con la construcción de las rutas para la entrega de ayuda humanitaria desde los puntos de distribución hacia las zonas afectadas, albergues, nodos de demanda o puntos de atención (Akbari & Salman, 2017). Para ello, se parte de información de entrada relacionada con la localización y niveles de inventario en el centro local de distribución y los puntos de atención (Aslan & Çelik, 2019; López-Vargas, 2018; Lin et al., 2011; Shin et al., 2019) (Figura 8). Además, contempla otros elementos de entrada asociados con la cantidad y capacidad de la flota vehicular (Maya Duque, Dolinskaya, & Sorensen, 2016), demanda de kits de ayuda humanitaria en cada punto de atención (M. Liu & Zhao, 2012) e información del estado de las vías terrestres habilitadas para su movilidad (Aksu & Ozdamar, 2014). En esta etapa los vehículos se cargan con la máxima capacidad posible (Silva et al., 2019), determinando los tiempos de llegada de cada vehículo (M. Liu & iang, 2013) y la secuenciación o establecimiento del orden de visita o atención en cada nodo con el fin de satisfacer la demanda de ayuda humanitaria en cada punto de atención (F.-H. Hu et al., 2015).

Para la construcción o generación del plan de rutas es necesario poseer información relacionada con el tiempo de viaje entre nodos, el tiempo necesario para suministrar el bien de socorro en un punto de atención y el momento esperado en que la vía será accesible (Delgado-Antequera et al., 2020). Con base en lo anterior, se obtiene como resultado el orden en que los puntos de atención son visitados por los vehículos de socorro, el instante de tiempo que cada vehículo de socorro sale y arriba a cada nodo y la cantidad de kits de ayuda humanitaria entregados en cada punto de atención (Shin et al., 2019).

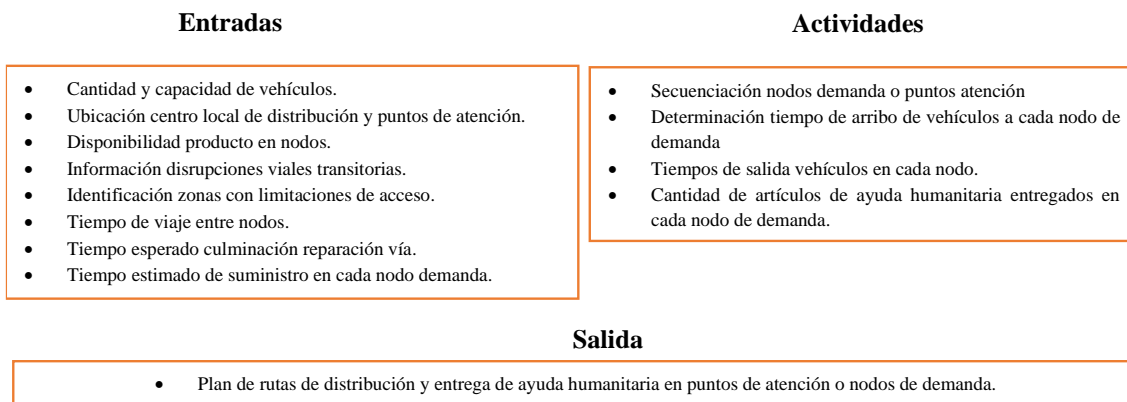


Figura 8. Planificación y configuración de rutas de distribución.

Fuente: el autor.

El proceso actual de distribución de ayuda considerando limitaciones de accesibilidad se lleva a cabo a través de un procedimiento estándar y sistemático de asistencia humanitaria basado en lineamientos internacionales como: estándares mínimos de asistencia humanitaria del Proyecto Esfera (El Proyecto Esfera, 2011), directrices generales de evaluación de seguridad alimentaria del Programa Mundial de Alimentos (Programa Mundial de Alimentos, 2021), el Marco Sendai y el Programa UN-SPIDER de la Organización de las Naciones Unidas (Organización de las Naciones Unidas, 2014) y de asistencia humanitaria de la Federación Internacional de Sociedades de la Cruz Roja y de la Media Luna Roja (Federación Internacional de Sociedades de la Cruz Roja y de la Media Luna Roja, 2021). En el caso particular de Colombia, estos referentes internacionales se relacionan en la Ley 1523 del 2012 (Congreso de Colombia, 2012) y el documento estándar de ayuda humanitaria elaborado por la UNGRD (Unidad Nacional de Atención de Riesgos y Desastres, 2013).

Sin embargo, la entrega de los artículos o suministros de socorro depende del cronograma del equipo de reparación, porque el transporte sólo puede ser posible cuando se dispone de una vía con condiciones mínimas de accesibilidad (Sakuraba, Santos, Prins, et al., 2016). Por ende, la planificación y configuración de rutas de distribución de ayuda o ruteo de vehículos representa una de las decisiones de mayor complejidad en el sistema de distribución de ayuda humanitaria, al considerar las limitaciones de accesibilidad generadas por las interrupciones viales transitorias (Hammontree et al., 2000). También constituye un proceso (Calderón et al., 2016; Meza et al., 2021), dado que involucra un conjunto de actividades relacionadas entre sí, orientadas a la generación del plan de rutas de distribución y entrega de ayuda humanitaria hacia los puntos de atención, a partir de la consideración de información o elementos de entrada como se ilustra en la Figura 8. En el transcurso de este proyecto, la planificación y configuración de rutas de distribución de ayuda considerando limitaciones de accesibilidad, se denominará proceso de distribución de ayuda humanitaria con limitaciones de accesibilidad.

3.3. Actores en el sistema de distribución de ayuda humanitaria en zonas con limitaciones de accesibilidad.

En el apartado anterior se realizó una descripción de las decisiones y actividades del sistema de distribución en consideración y la interrelación existente entre estas. En estas decisiones y actividades participan diversos actores que desempeñan un rol importante en la atención de las personas afectadas por desastres (Regis-Hernandez et al., 2017; Rodríguez-Espíndola et al., 2018). En este apartado se presentan los actores relevantes que participan en el sistema de distribución de ayuda humanitaria en zonas con limitaciones de accesibilidad.

3.3.1. Descripción de los actores.

La capacidad de mantener los servicios de transporte, mitigar los efectos económicos adversos, satisfacer las necesidades de la sociedad y trasladar al personal de socorro de emergencia y a los productos básicos dependerá de la adopción de decisiones efectivas en cualquier nivel del sistema de distribución de ayuda humanitaria y la participación de varios organismos (Cozzolino et al., 2012). Estos organismos están asociados a entidades gubernamentales locales, estatales, territoriales, federales o distritales, organizaciones voluntarias, organizaciones no gubernamentales y al sector privado en respuesta a desastres o amenazas potenciales (Agarwal et al., 2019). Las funciones de estas organizaciones o actores incluyen: el monitoreo y reporte del estado y daños a la red de transporte y a la infraestructura como resultado de un desastres o incidente, el transporte de ayuda humanitaria y la coordinación y apoyo de las actividades de respuesta considerando las limitaciones de recursos y de accesibilidad en cada zona afectada (Prabawa & Choi, 2020).

Los actores involucrados en el sistema de distribución de ayuda humanitaria bajo análisis se pueden clasificar como: gobierno nacional, regional o local; fuerza armada, agencias humanitarias, proveedores logísticos, Organizaciones No Gubernamentales (ONG's) y Donantes (Kovacs & Spens, 2009) (Figura 9).

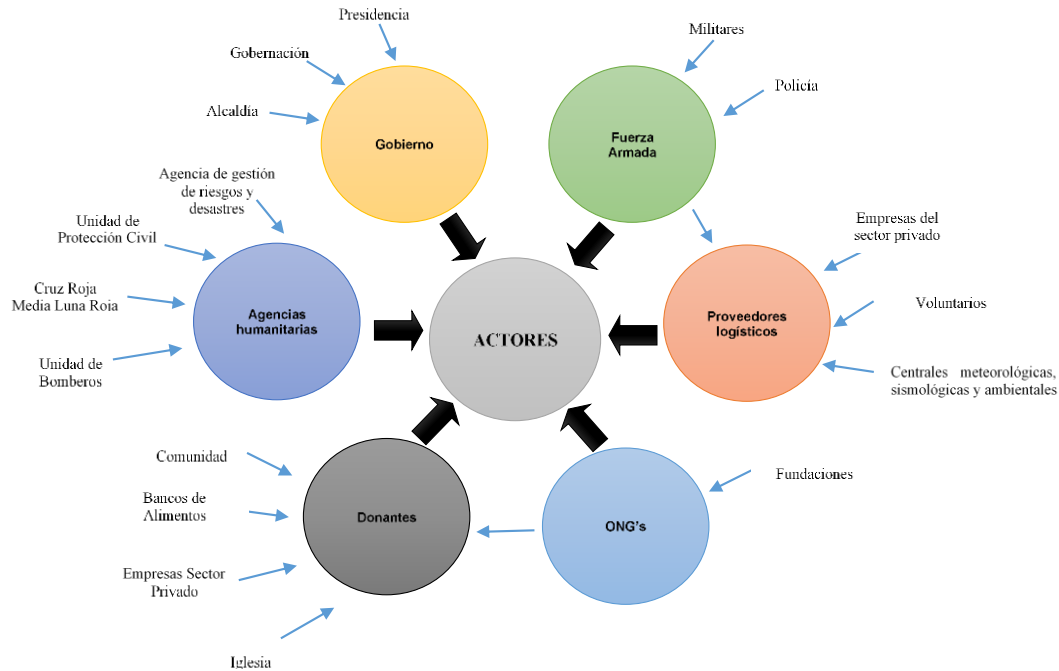


Figura 9. Actores sistema de distribución de ayuda humanitaria en zonas con limitaciones de accesibilidad.

Fuente: Adaptado de (Kovacs & Spens, 2009).

A continuación, se describen los perfiles de los actores que participan en el sistema de distribución de ayuda humanitaria, identificando sus responsabilidades y recursos. En el Anexo 1 (pág. 6) se presenta una descripción detallada.

El gobierno nacional, regional y local son responsables de la coordinación de los actores involucrados o partes interesadas en el proceso de distribución de ayuda (Agarwal et al., 2019), es decir, facilitar la coordinación entre organizaciones durante la gestión del desastre (Altay et al., 2013). Por otra parte, las organizaciones no gubernamentales (ONG's) tienen como función principal la distribución de ayuda alimentaria y no alimentaria a la población afectada por un desastre o evento disruptivo (Maghsoudi & Pazirandeh, 2016). Estas organizaciones al igual que las organizaciones gubernamentales, los voluntarios y el sector privado, son responsables de la gestión de la ayuda humanitaria para las víctimas de desastres (Safarpour et al., 2020). Tienen como propósito general gestionar los recursos para maximizar la cobertura y la equidad de la demanda hacia las zonas afectadas (Nurmala et al., 2017). Estos organismos regularmente trabajan en operaciones asociadas con el abastecimiento de kits de alimentos, enseres domésticos, materiales básicos de construcción, medicinas, albergues, entre otras (Solomatin, 2018). Los voluntarios agrupan entidades organizadas en la comunidad, juntas de acción comunal, asociaciones diversas y aquellas que pueden emerger en situaciones disruptivas. En Colombia, un ejemplo de asociaciones son los motociclistas. Según el Ministerio de Transporte (2023) más 12 millones de motocicletas se encuentran registradas en el país, es decir, por cada 4 habitantes existe una motocicleta, aspecto que puede ser determinante en la atención de emergencias, dado que dicha capacidad se podría aprovechar como flota vehicular alternativa para el transporte de kits de ayuda humanitaria y por su tamaño sería de fácil acceso en zonas afectadas.

Los proveedores logísticos y los donantes representados por empresas del sector privado, la iglesia, voluntarios y centrales meteorológicas, sismológicas y ambientales; son responsables de aportar donaciones financieras o en especie, suministrar recursos de transporte, físicos, tecnológicos y/o conocimientos con el fin de apoyar la labor de distribución de ayuda humanitaria y operaciones de salvamento (Safarpour et al., 2020). Por otro lado, se encuentran las fuerzas armadas, cuya función es proporcionar seguridad, habilidades logísticas, reparación, comunicaciones y atención médica (Bealt et al., 2016), maximizando la fiabilidad del proceso de entrega de la ayuda, pero también minimizando el tiempo de respuesta de la ayuda hacia la población damnificada (Bealt et al., 2016).

Particularmente, los proveedores de logística, las fuerzas militares y la iglesia juegan un papel vital en la respuesta a desastres, ya que poseen una cantidad importante de información y conocimiento logístico

para lidiar con las interrupciones en el suministro de ayuda humanitaria, dado que estas organizaciones de socorro tienen el equipo y recursos necesarios para enviar producto de manera eficiente a través de las áreas dañadas o zonas aisladas (Silva et al., 2019). Otro actor importante son las agencias humanitarias, encargadas de proporcionar asistencia y ayuda humanitaria a la población afectada por un evento disruptivo (Lozano et al., 2012) contribuyendo a minimizar el sufrimiento de la población afectada (Loree & Aros-Vera, 2018).

Es evidente que, ante un evento disruptivo, la infraestructura física como carreteras y puentes, a menudo se destruyen y la accesibilidad del transporte por carretera se vuelve limitada (Maya Duque et al., 2013). Por lo tanto, uno de los principales problemas en una operación de respuesta es la dificultad de actualizar la información geográfica local y la ubicación de los puntos geoestratégicos cuando la accesibilidad aún es limitada (Contreras et al., 2014), donde el gobierno, las agencias humanitarias, los proveedores logísticos y la fuerza armada se convierten en actores importantes para mejorar la eficacia de las labores humanitarias (Gossler et al., 2019) a través de la minimización del tiempo de respuesta de la ayuda (Bealt et al., 2016). Además, se ha determinado que el gobierno y las agencias humanitarias tienen como función adicional el despliegue de equipos exploratorios y de emergencia para evaluar la situación, identificando las capacidades locales, los recursos y las fuentes de suministros, así como el número y las necesidades de los afectados (Silva et al., 2019). Esta información es fundamental para estimar los recursos necesarios para la operación de respuesta (Tavana et al., 2018).

3.3.2. Análisis de la red de actores en el sistema de distribución de ayuda humanitaria.

Como se discutía en el apartado anterior, en el sistema de distribución de ayuda humanitaria bajo análisis intervienen diversas decisiones, cuya responsabilidad de ejecución está a cargo de diversos actores (Akhtar et al., 2012). En la evaluación de la situación actual y/o potencial y suministro de información; organismos como gobierno, agencias humanitarias, fuerzas armadas y proveedores logísticos tienen una participación importante (Silva et al., 2019). Para la selección del conjunto de centros de distribución, refugios y distribución local; actores como gobiernos, agencias humanitarias y proveedores logísticos cumplen un papel relevante (Balcik & Beamon, 2008; Boonmee et al., 2017). Por otra parte, en el proceso de establecimiento de niveles de inventario en cada instalación; la participación principal está dada por gobiernos, organizaciones no gubernamentales, donantes, iglesia y agencias humanitarias (Aslan & Çelik, 2019; Bai et al., 2018; Rodríguez-Espíndola et al., 2018). En el despliegue del plan de rutas; organizaciones como gobiernos, agencias humanitarias, organizaciones no gubernamentales, fuerzas militares, donantes y

proveedores logísticos, cumplen una responsabilidad conjunta relevante para el suministro de ayuda humanitaria en las zonas afectadas, especialmente aquellas con limitaciones de acceso (Caunhye et al., 2012; Lin et al., 2011; Rodríguez-Espíndola et al., 2018).

Se puede concluir que el sistema de distribución de ayuda humanitaria en zonas con limitaciones de accesibilidad implica la participación de un número importante de partes interesadas para la gestión del desastre y el desarrollo de diferentes actividades (Safarpour et al., 2020). A continuación, se representa la interrelación existente entre los actores involucrados y las actividades de toma de decisión enmarcadas en el sistema de distribución, a través de una red bipartita no dirigida que representa la interrelación entre los actores y actividades enmarcadas en el sistema de distribución de ayuda humanitaria en zonas con limitaciones de accesibilidad (Figura 10), cuyo análisis fue posible a través de la revisión de la literatura realizada y aplicación de entrevista semiestructurada dirigida hacia actores que integran el sistema (Anexo 1).

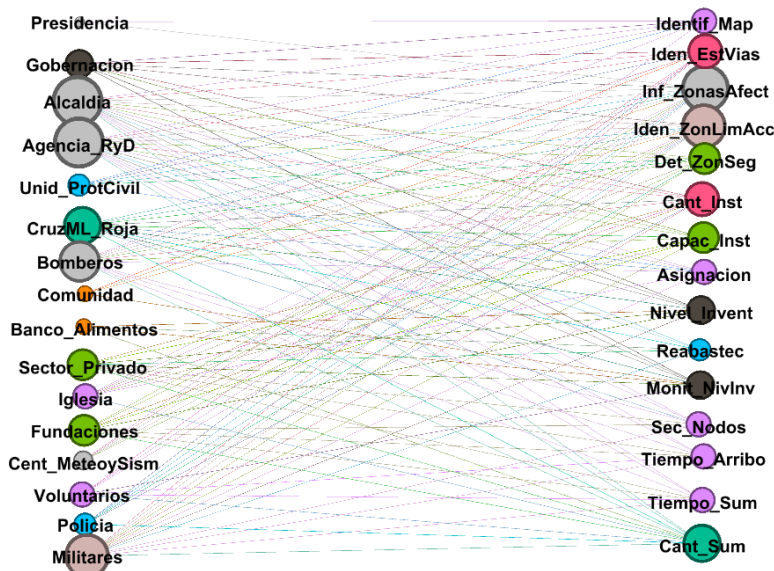


Figura 10. Red bipartita no dirigida interrelación actores y decisiones en el sistema de distribución de ayuda humanitaria considerando zonas con limitaciones de accesibilidad.

Fuente: Autor

La información utilizada en la construcción de red bipartita aparece en el Anexo 2. A través del entorno de desarrollo RStudio® para el lenguaje de programación R, se obtuvieron los siguientes resultados y análisis (Tabla 1).

Tabla 1. Indicadores Red bipartita actores y actividades sistema de distribución objeto de estudio.

Indicador	Resultado	Análisis
Número de actores	16	Con base en la revisión de la literatura se identificaron 16 actores que participan generalmente en el sistema de distribución objeto de estudio.
Número de actividades	15	Con base en la revisión de la literatura se identificaron 15 tipos de actividades que participan generalmente el sistema de distribución objeto de estudio.
Número medio de socios compartidos	4.683333	En promedio cada actor se relaciona con 5 organismos, lo cual significa una buena interrelación entre los actores.
Número medio de actividades compartidas	5.752381	En promedio cada actividad se relaciona con 6 actividades adicionales, que obedece a una buena interdependencia entre las actividades del sistema.
Coefficiente de agrupación de actores	0.6721805	Como el valor del coeficiente es cercano a 1, existe una conexión o conectividad moderada entre los actores del sistema.
Coefficiente de agrupación de actividades	0.5906955	Como el valor del coeficiente es cercano a 1, existe una conexión o conectividad moderada entre las actividades del sistema.

Fuente: el autor

A partir de un grafo bipartito se pueden definir a su vez dos grafos proyectados, el grafo proyección de actores (Figura 11) y el grafo de proyección de actividades (Figura 12). Para cada nodo se calcularon dos estadísticas, el grado y la comunidad, a través el software académico Gephi ® versión 0.9.2, generando los siguientes resultados y análisis (Tablas 2 y 3).

De acuerdo con los resultados de la Tabla 2 y Figura 11, se pudo determinar que las alcaldías, las agencias de gestión de riesgos y desastres, los militares, la Cruz Roja (Media Luna Roja), la gobernación, el sector privado y las unidades de protección civil son los actores que mayor incidencia o interacción poseen en las actividades de toma de decisión del sistema de distribución de ayuda humanitaria (Baharmand et al., 2020; Jahre & Jensen, 2010; Vega & Roussat, 2015).

De igual forma, se observa que los actores se organizan en dos clústeres o comunidades (Tabla 2). En el primer clúster se encuentran organismos como alcaldías, comunidad, fundaciones, voluntarios, bancos de alimentos e iglesia. Estos actores tienden a trabajar solidariamente en las actividades propias del sistema de distribución. En el segundo clúster participan organismos como la Presidencia, Gobernación, Cruz Roja (Media Luna Roja), Bomberos, Centrales meteorológicas, sismológicas y ambientales, sector privado, unidades de protección civil, policía y militares, los cuales poseen conexiones o interrelaciones sólidas de trabajo.

Tabla 2. Grado y comunidad de los actores.

Nodo	Descripción	Grado	Comunidad
Alcaldia	Alcaldía	15	1
Agencia_RyD	Agencia de gestión de riesgos y desastres	15	2
CruzML_Roja	Cruz Roja Media Luna Roja	14	2
Gobernacion	Gobernación	13	2
Sector_Privado	Empresas del sector privado	12	2
Unid_ProtCivil	Unidad de Protección Civil	12	2
Bomberos	Bomberos	12	2
Comunidad	Comunidad	11	1
Fundaciones	Fundaciones	11	1
Policia	Policía	9	2
Militares	Militares	9	2
Voluntarios	Voluntarios	9	1
Presidencia	Presidencia	8	2
Banco_Alimentos	Bancos de Alimentos	8	1
Cent_MeteoySism	Centrales meteorológicas, sismológicas y ambientales	7	2
Iglesia	Iglesia	7	1

Fuente: el autor.

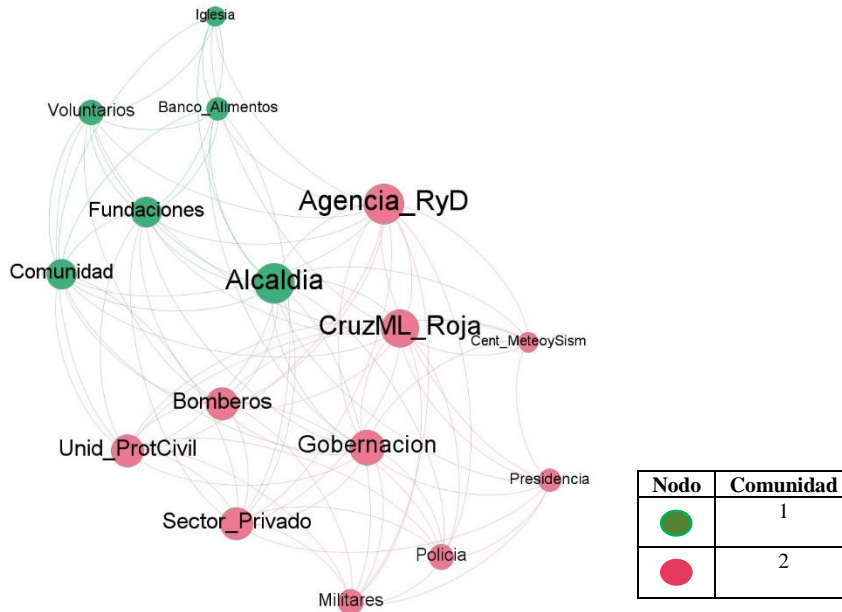


Figura 11. Grafo interrelación actores sistema de distribución de ayuda humanitaria en zonas con limitaciones de accesibilidad. El tamaño de cada nodo representa el grado de los actores.

Fuente: Autor

La Figura 12 concierne a un grafo valorado, es decir, el valor de cada arco expresa la cantidad de actores comunes que participan entre cada par de nodos de actividades relacionadas. A partir de los resultados de la Tabla 3 y Figura 12, se puede observar que actividades que conciernen al informe de zonas afectadas, la identificación zonas con limitaciones de acceso, la determinación de zonas seguras, la

determinación de la cantidad artículos de ayuda humanitaria a entregar en cada nodo demanda, la definición de la cantidad y capacidad de instalaciones, informe estado de las vías afectadas, la secuenciación de nodos y los tiempos de arribo en cada punto de demanda; son las actividades que tienen una mayor interacción de organismos o actores comunes (Silva et al., 2019; Vega & Roussat, 2015).

Con base en los resultados de la comunidad (Tabla 3) se determinó que existen dos comunidades o clústeres de actividades. El primer clúster está formado por actividades relacionadas con la cantidad y capacidad de instalaciones, la asignación de puntos de demanda, la determinación de cantidades de suministro de ayuda, el reabastecimiento entre puntos de distribución y demanda, la determinación de niveles de inventario y su monitoreo; son actividades que poseen una interdependencia importante dentro del sistema de distribución (Rodríguez-Espíndola et al., 2018; Shin et al., 2019; Tavana et al., 2018). Estas actividades se enmarcan en decisiones a nivel estratégico y táctico, durante la fase de preparación (López & Cárdenas, 2017, 2018; Rojas et al., 2023a).

Tabla 3. Grado y comunidad de las actividades.

Nodo	Descripción	Grado	Comunidad
Det_ZonSeg	Determinación zonas seguras	11	2
Asignacion	Asignación de puntos de demanda	11	1
Cant_Sum	Cantidad artículos de ayuda humanitaria entregados en cada nodo demanda	10	1
Inf_ZonasAfect	Informe zonas afectadas	9	2
Iden_ZonLimAcc	Identificación zonas con limitaciones de acceso	9	2
Cant_Inst	Determinación cantidad de instalaciones	9	1
Iden_EstVias	Informe estado de las vías afectadas	8	2
Tiempo_Sum	Instante de tiempo de suministro de artículos en cada nodo demanda	8	2
Sec_Nodos	Secuenciación nodos de demanda	7	2
Tiempo_Arribo	Tiempo de arribo de cada vehículo a cada nodo de demanda	7	2
Capac_Inst	Capacidad de instalaciones	7	1
Nivel_Invent	Almacenamiento y determinación niveles de inventario	6	1
Reabastec	Reabastecimiento entre puntos de distribución y zonas afectadas	6	1
Monit_NivInv	Monitoreo niveles de inventario en instalaciones y zonas afectadas	6	1
Identif_Map	Identificación y mapeo de la región afectada	4	2

Fuente: el autor.

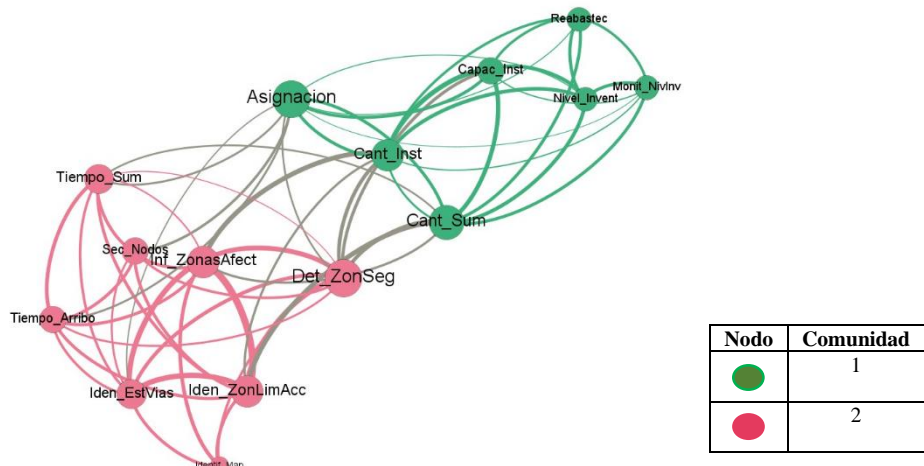


Figura 12. Grafo valorado interrelación actividades sistema de distribución de ayuda humanitaria en zonas con limitaciones de accesibilidad. El tamaño de cada nodo representa el grado de las actividades.
Fuente: el autor.

Actividades como la determinación de zonas seguras, identificación de zonas con limitaciones de acceso, informe zonas afectadas y estado de las vías afectadas, secuenciación de nodos de demanda, identificación y mapeo de la región afectada, establecimiento de tiempos de arribo de cada vehículo a cada nodo de demanda y tiempos de suministro de artículos en cada nodo demanda; poseen una interacción importante para el despliegue de las rutas de entrega de ayuda humanitaria y forman parte del segundo clúster identificado (Figura 12), dado que una vez ocurre el desastre, es necesario definir las características de la región y vías afectadas (Balcik & Beamon, 2008). Posteriormente, se procede con la secuenciación de entrega o configuración de rutas de distribución de ayuda humanitaria y la determinación de los tiempos de arribo en cada punto de demanda (Chang et al., 2014; Ibarra-Rojas et al., 2018; Shin et al., 2019). Estas actividades obedecen a decisiones de nivel operativo enmarcadas en la fase de respuesta (Rojas et al., 2023a).

En el proceso de distribución de ayuda humanitaria con limitaciones de accesibilidad, los actores que mayor intervención poseen son: gobierno local, la unidad municipal de atención de riesgos y desastres, bomberos y organizaciones del sector privado y militares. Sin embargo, el ente coordinador local es el comité municipal de atención de riesgos y desastres, el cual es presidido por la alcaldía municipal, e integrado por representantes de las fuerzas armadas y agencias humanitarias (ONU, 2014). Sin embargo, para la ejecución de sus actividades, es necesario emplear un conjunto de recursos (UNGRD, 2013; El Proyecto Esfera, 2011).

3.4. Recursos principales en el proceso de distribución de ayuda humanitaria con limitaciones de accesibilidad.

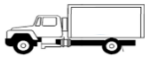





El proceso de planificación y configuración de rutas de distribución de ayuda humanitaria bajo análisis, requiere la utilización de un conjunto de recursos caracterizados en las locaciones destinadas para el funcionamiento del punto local de distribución y los puntos de atención, la flota terrestre vehicular y los tipos de kits de ayuda humanitaria (Organización de las Naciones Unidas 2014, Programa Mundial de Alimentos, 2021; Unidad Nacional de Atención de Riesgos y Desastres, 2013; El Proyecto Esfera, 2011).

Los centros o puntos locales de distribución son administrados por el gobierno regional o municipal (entes territoriales), los cuales están ubicados cerca de las áreas afectadas por el desastre (Rais, Alvelos, & Carvalho, 2014). Un punto local de distribución puede ser una tienda de campaña, una unidad prefabricada o una instalación existente; por ejemplo, un coliseo, una iglesia o un almacén. (Liu et al., 2019).

Los puntos de atención o albergues temporales se pueden clasificar en: toldos, carpas, centros colectivos y alojamientos temporales (El Proyecto Esfera, 2011). Los toldos son construcciones rústicas que sirven para brindar alojamiento inmediato en caso de emergencia a las familias afectadas o damnificadas, que usualmente se construyen con madera, plástico negro, poli sombra y palmiche (UNGRD, 2020). Las carpas son locaciones temporales para 4, 6 u 8 personas, destinadas a ser instaladas en el campo, las cuales pueden ser de tela o de algún material sintético, por su mayor ligereza, durabilidad y resistencia al agua, sol y lluvia (UNGRD, 2013). Los centros colectivos pueden corresponder a coliseos, centros culturales, centros comunales y estadios, excepto escuelas o instituciones educativas para no afectar el normal desarrollo de las actividades educativas (UNGRD, 2013).

Por otra parte, los vehículos terrestres para el despliegue de entrega de ayuda humanitaria en términos generales son de diferentes tipos (Tabla 4). En el primer nivel de distribución participan vehículos de carga terrestre de mayor tamaño como Tractomula, Minimula, Cuatromanos, Dobletroque y Sencillo (Solano & Torres, 2014). Sin embargo, en el segundo nivel de distribución participan vehículos de menor tamaño como Turbos (Solano & Torres, 2014; Vivares, 2022). Las referencias más populares de turbos son: NHR, NKR II, NNR, NPR y NQR. Particularmente, el NHR se caracteriza por ser un camión rígido de dos ejes, cuya capacidad de carga es hasta 2.7 Ton y posee un espacio disponible de 7 metros cúbicos aproximadamente, con velocidad media de 60 kilómetros por hora.

Tabla 4. Configuración vehículos de carga.

Configuración de vehículos de carga		
Configuración	Esquema del vehículo	Descripción
Turbo		Camión rígido de dos ejes. Turbo Capacidad de carga: 4.5 - 5 Ton. Metros cúbicos: 21.5
Sencillo		Camión rígido de dos ejes. Capacidad de carga: 8.5 - 10 Ton. Metros cúbicos: 37
Dobletroque		Camión rígido de tres ejes. Capacidad de carga: 17 Ton. Metros cúbicos: 40
Cuatromanos		Camión rígido de cuatro ejes. Capacidad de carga: 20 Ton. Metros cúbicos: 40
Minimula (Patineta)		Tractocamión de dos ejes con semirremolque de dos ejes. Capacidad de carga: 27 Ton. Metros cúbicos: 72
Tractomula		Tractocamión de tres ejes con semirremolque de tres ejes. Capacidad de carga: 34 - 38 Ton. Metros cúbicos: 72

Fuente: Resolución 4100, Ministerio de Transporte (2004).

El kit de ayuda humanitaria constituye el principal producto que se entregará a los damnificados o afectados. Estos son armados en los almacenes centrales o centros de distribución regionales y son enviados desde ahí hacia los puntos locales de distribución en el momento que se active la emergencia (El Proyecto Esfera, 2011). Los kits de ayuda humanitaria se definen como el conjunto de artículos que son utilizados para cubrir necesidades de la demanda que generan los efectos negativos de las emergencias y desastres (Organización para la Seguridad y la Cooperación en Europa, 2017). Estos kits se pueden clasificar básicamente en dos categorías generales: ayuda alimentaria y no alimentaria (El Proyecto Esfera, 2011), los cuales consisten en camas plegables, carpas familiares, frazadas, colchones, calaminas, herramientas, bidones, baldes y bobinas de plástico, menaje de cocina, así como alimentos no perecederos (El Proyecto Esfera, 2011; Mori et al., 2017). Cada familia afectada deberá recibir ayuda alimentaria, en las primeras 48 horas de ocurrido el evento, el cual por su composición tendrá una duración promedio de 8 a 10 días en un núcleo familiar estándar no superior de 5 integrantes. La ayuda No alimentaria se entrega a cada familia de tamaño estándar una sola vez (El Proyecto Esfera, 2011; UNGRD, 2013).

Una vez definidas las decisiones, actividades, actores y recursos del sistema, y lo que comprende el proceso de distribución de ayuda humanitaria con limitaciones de accesibilidad; el siguiente apartado

tiene como finalidad realizar una representación de dicho proceso, con el fin de comprender su dinámica, a través de un modelo de programación matemática.

3.5. Representación del proceso de distribución de ayuda humanitaria con limitaciones de accesibilidad

El proceso de distribución de ayuda humanitaria con limitaciones de accesibilidad se presenta en la Figura 13. Dado un conjunto de vehículos con capacidad Q y velocidad media v que parten de un punto local de distribución deben atender un conjunto de nodos de demanda o puntos de atención j con requerimiento de kits de ayuda humanitaria qu_j con tiempo de estimado de suministro ts_i . Además, estos nodos están conectados por una red de carreteras con distancia d_{ij} . Sin embargo, existe un conjunto de disrupciones viales transitorias generadas por un desastre, las cuales implican limitaciones de accesibilidad en algunas zonas o puntos de atención. La ubicación de cada disrupción vial se define como $prop_{ij}$ y posee un tiempo esperado de finalización de restauración td_{ij} . Por lo tanto, es necesario establecer la secuencia de visita entre nodos X_{ij} , los tiempos de salida de la flota vehicular entre nodos TS_{ij} y el tiempo de llegada de la ayuda humanitaria hacia cada punto de atención TL_i y la cantidad de kits de ayuda humanitaria a entregar en cada punto de atención Z_i .

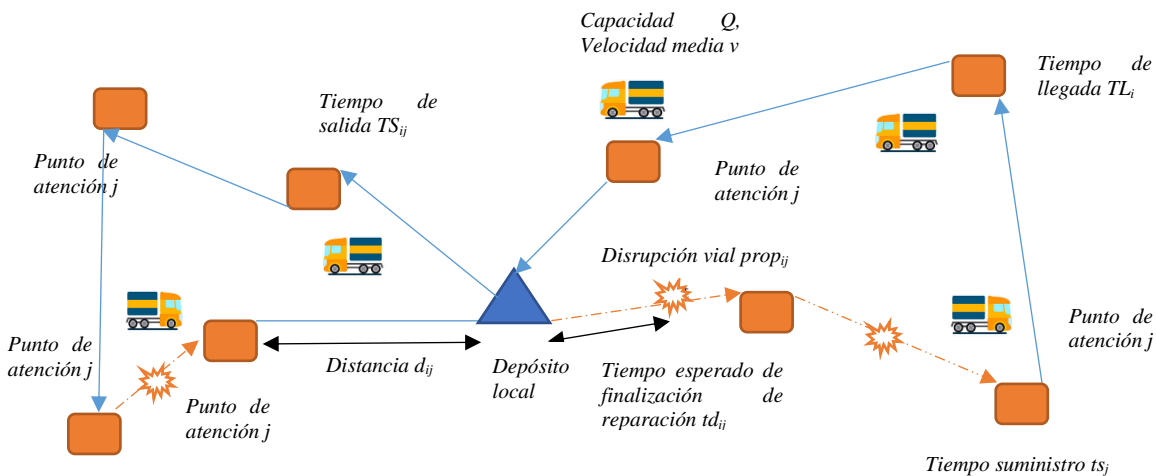


Figura 13. Representación general del proceso de distribución de ayuda con restricciones de accesibilidad.

Fuente: el autor.

La formulación del modelo matemático (Tabla 5) que contiene las principales características del proceso de distribución de ayuda humanitaria se presenta a continuación.

Supuestos

- Se consideró un único nodo de origen o depósito donde la flota de vehículos parte y retorna a ese nodo, cuya localización está en una zona segura.
- Se dispone de kits de ayuda humanitaria suficientes para atender a la población afectada por el desastre. Se asume que un kit de ayuda humanitaria se compone de ayuda alimentaria y no alimentaria, es decir, se considera una demanda agregada de kits de ayuda humanitaria en cada nodo o punto de atención.
- Se asumió una flota limitada de vehículos de capacidad homogénea la cual está representada en cantidad de kits de ayuda humanitaria, y con velocidad media constante, es decir, las corridas del modelo se realizaron para un vehículo de tamaño medio.
- Los tiempos de culminación de las labores de restauración y proporción de la vía en que inicia la reparación son determinísticos.
- Se consideró una flota disponible inicial de vehículos equivalente a la cantidad de nodos de atención.
- Las condición o estado de las vías es conocida con base en una evaluación inicial de daños realizada sobre la infraestructura vial por parte de los organismos responsables de la evaluación de la situación actual y suministro de información una vez generado el evento disruptivo.

Tabla 5. Modelo matemático de distribución de ayuda humanitaria.

Conjuntos
N : conjunto de nodos indexado por i, j ; el cual contiene al depósito $\{i=0\}$ y los puntos de atención $\{i>0\}$.
Parámetros
qu_i : cantidad de ayuda humanitaria a entregar en el nodo i ts_i : tiempo de servicio del nodo i Q : capacidad del vehículo en cantidad de kits v : velocidad promedio de un vehículo nv : número de vehículos disponibles pro_{ij} : proporción de la vía que va del nodo i al nodo j , en la que inicia la reparación dis_{ij} : distancia recorrido desde el nodo i hacia el nodo j td_{ij} : tiempo esperado de culminación de las labores de restauración de la vía afectada, que va del nodo i al nodo j
Variables de decisión
$X_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si el vehículo sale del nodo } i \text{ hacia el nodo } j, \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases}$ Z_i = cantidad de kits que lleva el vehículo cuando llega al nodo i TL_i = tiempo en que el vehículo llega al nodo i TS_{ij} = tiempo en que el vehículo sale del nodo i al nodo j
Función objetivo
$Z_{min} = \sum_{i \in N} TL_i \quad (1)$

Restricciones

$$\sum_{i \in N/i \neq j} X_{ij} = 1 \quad \forall j \in N | j > 0 \quad (2)$$

$$\sum_{i \in N/i \neq h} X_{ih} = \sum_{j \in N/j \neq h} X_{hj} \quad \forall h \in N \quad (3)$$

$$\sum_{j \in N | j > 0} X_{0j} \leq nv \quad (4)$$

$$Z_i \leq Q \quad \forall i \in N \quad (5)$$

$$Z_i - qu_i * X_{ij} \geq Z_j - Q * (1 - X_{ij}) \quad \forall i, j \in N | i > 0 \quad (6)$$

$$Z_i - qu_i * X_{ij} \leq Z_j + Q * (1 - X_{ij}) \quad \forall i, j \in N | i > 0 \quad (7)$$

$$TL_j \leq TL_i + X_{ij} * ts_i + X_{ij} * \frac{dis_{ij}}{v} + M * (1 - X_{ij}) \quad \forall i \in N, j \in N | j > 0, i > 0, j <> i \quad (8)$$

$$TL_j \geq TL_i + X_{ij} * ts_i + X_{ij} * \frac{dis_{ij}}{v} - M * (1 - X_{ij}) \quad \forall i \in N, j \in N | j > 0, i > 0, j <> i \quad (9)$$

$$TL_j \geq X_{0j} * \frac{dis_{0j}}{v} \quad \forall j \in N | j > 0 \quad (10)$$

$$X_{ij} + X_{ji} \leq 1 \quad i \in N, j \in N | j > 0, i > 0, j <> i \quad (11)$$

$$\sum_{j \in N | j > 0} X_{0j} = \sum_{i \in N | i > 0} X_{i0} \quad (12)$$

$$TS_{ij} \geq TL_i + X_{ij} * ts_i - M * (1 - X_{ij}) \quad \forall i \in N, j \in N | i > 0, j <> i \quad (13)$$

$$TS_{ij} \leq TL_i + X_{ij} * ts_i + M * (1 - X_{ij}) \quad \forall i \in N, j \in N | i > 0, j <> i \quad (14)$$

$$TS_{ij} \leq M * X_{ij} \quad \forall i \in N, j \in N | j <> i \quad (15)$$

$$TS_{0j} + X_{0j} * \frac{dis_{0j}}{v} \leq TL_j + M * (1 - X_{0j}) \quad \forall j \in N | j <> 0 \quad (16)$$

$$TS_{ij} + X_{ij} * \frac{dis_{ij}}{v} * pro_{ij} \geq td_{ij} * X_{ij} \quad \forall i \in N, j \in N | j <> i \quad (17)$$

$$X_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in N \quad (18)$$

$$Z_i, TL_i \geq 0, \quad \forall i \in N \quad (19)$$

$$TS_{ij} \geq 0, \quad \forall i, j \in N \quad (20)$$

Fuente: el autor.

La ecuación (1) representa la función objetivo del modelo que minimiza el tiempo total de llegada hacia los puntos de entrega o atención. La ecuación (2) asegura que en cada nodo de atención j solamente ingrese un sólo vehículo o recorrido. La ecuación (3) establece la continuidad de la ruta. La restricción (4) garantiza que la cantidad de vehículos que salen del depósito no supere la disponibilidad de la flota vehicular. La restricción (5) limita que la cantidad de kits de ayuda humanitaria que cargue cada vehículo no supere su capacidad. Las restricciones (6) y (7) garantizan que la carga de vehículo en el nodo j sea igual a la carga del vehículo el nodo de atención i menos la cantidad de kits de ayuda humanitaria entregada en el nodo i , si y solo si existe un arco que conecte a estos nodos. Las restricciones (8) y (9) garantizan que el tiempo de llegada al nodo de atención j sea igual al tiempo de llega al nodo de atención i más el tiempo de servicio en el nodo de atención i y el tiempo de recorrido entre ambos nodos, si y solo si existe un arco que conecte a estos nodos. La restricción (10) especifica que el tiempo de llegada al nodo de atención j desde el depósito o nodo de origen sea mayor o igual al tiempo de recorrido entre estos nodos, siempre y cuando estén conectados a través de un arco. La restricción (11) permite la continuidad del recorrido del vehículo entre cada par de nodos de atención, contribuyendo a la no generación de subtours. La ecuación (12) establece que la cantidad de vehículos que salgan de un depósito retorne a este al final de su recorrido. Las restricciones (13) y (14) permiten que el tiempo en que sale el vehículo desde el nodo i hacia el nodo j sea igual al tiempo de llegada al nodo i más el tiempo de servicio en el nodo i , si y sólo si, existe un arco que conecte a estos nodos. La restricción (15) garantiza que el tiempo en que sale el vehículo desde el nodo i hacia el nodo j transcurre si y solo si existe una ruta o arco que conecte a estos nodos. La restricción (16) garantiza que el tiempo de llegada del vehículo al nodo j debe ser mayor o igual al tiempo de salida desde el depósito hacia el nodo j más el tiempo de viaje o recorrido entre estos nodos. La restricción (17) determina que el tiempo de salida de cada vehículo debe ser mayor o igual al tiempo esperado de culminación de las labores de reparación. Finalmente, las restricciones (18 - 20) representan la condición de No negatividad y lógica de las variables de decisión.

3.5.1. Descripción del contexto geográfico particular.

Con el fin de validar el modelo matemático formulado, el contexto geográfico se enmarca en el municipio de Roldanillo ubicado en el norte del departamento de Valle del Cauca, Colombia; cuya información fue obtenida a partir de consulta de bases de datos de la UNGRD y entrevista semiestructurada realizada a algunos de los actores del CMGRD (Anexo 1). El municipio fue fundado el 20 de enero de 1576, por Francisco Redondo Ponce de León y se sitúa aproximadamente a 149 kilómetros de Santiago de Cali, la capital del departamento (Alcaldía Municipal de Roldanillo, 2017). El municipio de Roldanillo está dividido en dos regiones: una plana, que se extiende desde la margen izquierda del río Cauca hasta el pie

de la Cordillera Occidental, y una zona montañosa que comprende la vertiente oriental de la Cordillera Occidental de los Andes. El municipio tiene una superficie de 209 km² y 36.797 habitantes, teniendo el 0.67% de la población total del país según el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), en su último censo poblacional del 2018 (DANE, 2019). De acuerdo con datos registrados por la UNGRD en el municipio de Roldanillo se tiene reporte de por lo menos 36 casos de desastres naturales entre los años 2000-2021, de los cuales las inundaciones abarcan el mayor porcentaje de ocurrencia (Figura 14).

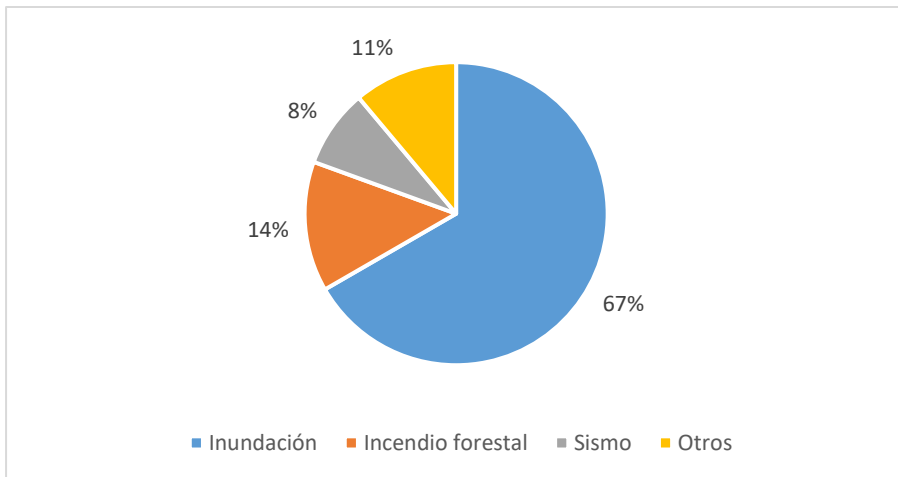
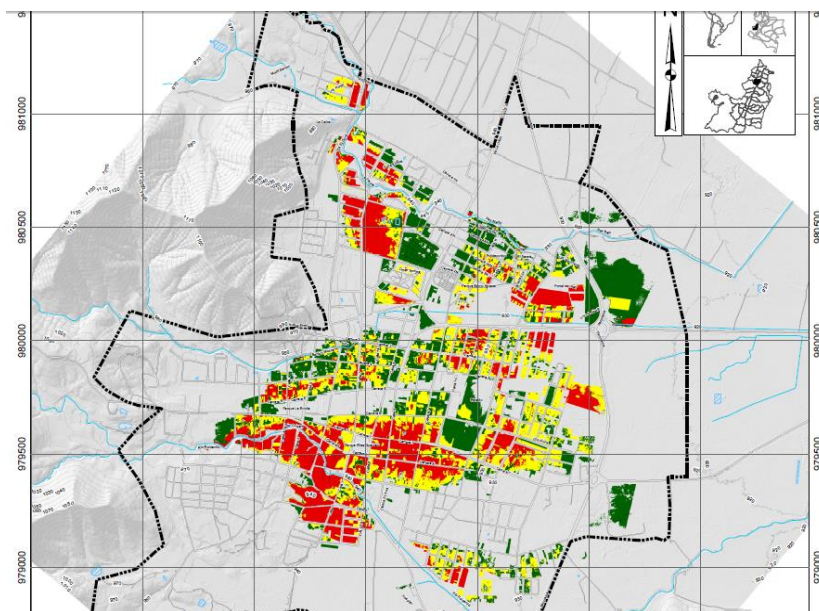


Figura 14. Ocurrencia desastres naturales súbitos en el municipio de Roldanillo (2000 - 2021).
Fuente: Adaptado de UNGRD (2022).

Identificación de zonas de riesgo por inundación

El casco urbano de Roldanillo se encuentra expuesto a las amenazas y riesgos por los fenómenos naturales y algunos de carácter tecnológico que ponen en peligro a sus habitantes. Las zonas que presentan peligro de inundación son: los ríos Roldanillo y Cáceres, la quebrada el Rey y los zanjones Ipira y la Seca (Alcaldía Municipal de Roldanillo, 2017). En el contexto geográfico particular, se consideraron aquellas zonas que se caracterizan por presentar alta vulnerabilidad a la exposición de inundaciones como se evidencia en la Figura 15. De este modo, se tomarán como afectados las familias que habitan los barrios ubicados en las zonas más vulnerables a este tipo de eventos, donde la cantidad de familias afectadas por barrio se ilustran en la Tabla 6.






AFECTACIÓN	Descripción	Área (m ²)	Pedios
	BAJA - La zona se caracteriza por presentar unos niveles de amenaza relativamente bajos al igual que unas condiciones de vulnerabilidad bajas. Los daños que pueden presentarse en las edificaciones son ligeros sin que se vea afectada la estabilidad de las estructuras.	384838	1322
	MEDIA - La zona se caracteriza por presentar unos niveles de amenaza moderada, al igual que unos niveles de vulnerabilidad socioeconómica y estructural relativamente moderados.	340103	1940
	ALTA - La zona se caracteriza por presentar unas condiciones complejas de exposición a la amenaza, además de valores de vulnerabilidad alta y media caracterizada por edificaciones precarias y en mal estado, además de una población con poca o nula capacidad de resistencia.	274972	1429

Figura 15. Zonificación de áreas de afectación de inundación Roldanillo.

Fuente: Adaptado de Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (2017).

Según las declaraciones de la Alcaldía de Roldanillo en el plan de desarrollo territorial 2020, estas zonas están catalogadas como las más vulnerables durante las temporadas de lluvias, ya que se encuentran ubicadas cerca de las fuentes hidrográficas del municipio generando desbordamiento de los ríos e inundaciones súbitas (Secretaría de gobierno del municipio de Roldanillo, 2019).

Tabla 6. Familias afectadas por zona de atención.

Barrio	Familias afectadas
El Portal	213
Sector Hospital	93
La Ceiba	114
Obrero	249
San Sebastián	418
Ipira	196
Los Alpes	138
Arrayanes	318
La Asunción	825

Fuente: Adaptado de CMGR Roldanillo (2020).

Identificación centro de distribución y puntos de entrega de ayuda humanitaria

Considerando que el posicionamiento de kits de ayudas se realiza en cercanías a la alcaldía municipal, el comité municipal de atención de riesgos y desastres (CMGRD) establece como punto de distribución la alcaldía municipal. Adicionalmente, se consideraron 9 puntos de atención o entrega instalados en cada barrio para el suministro de ayuda o asistencia humanitaria a las familias afectadas (Figura 16). La localización de cada punto de atención o entrega se determinó con base en la identificación de zonas seguras por parte de los organismos que integran el CMGRD, expresados como nodos enumerados desde cero (0) a nueve (9) (Tabla 7). Para el proceso de distribución de ayuda, el municipio posee siete (7) vehículos cuya capacidad individual de transporte es de 2400 kits de ayuda humanitaria y emplean una velocidad promedio de 36 kilómetros por hora.

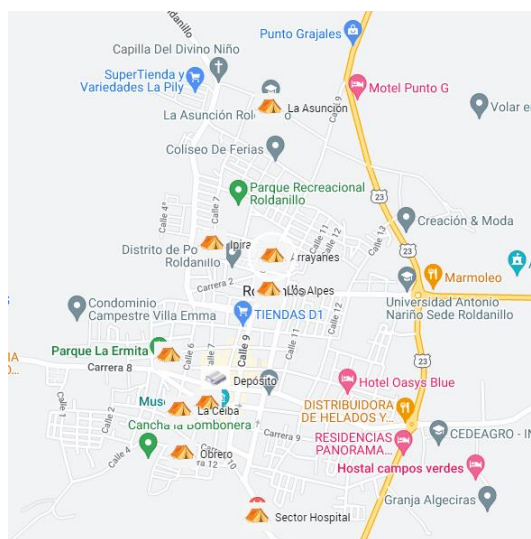


Figura 16. Localización punto de distribución y zonas de atención.

Fuente: Adaptado de CMGR Roldanillo (2020).

Tabla 7. Punto de distribución y puntos de atención de ayuda humanitaria municipio de Roldanillo.

Puntos	Lugar	Nodo
Punto de distribución	Alcaldía Municipal	0
El portal	Iglesia Divino Niño	1
Sector Hospital	Hospital	2
La Ceiba	Beatdown Academy	3
Obrero	Cancha La Bombonera	4
San Sebastián	Coliseo Cubierto Iván Muñoz	5
Ípíra	Supermercado HR	6
Los Alpes	Cuerpo Voluntario de Bomberos	7
Arrayanes	Iglesia de La Medalla Milagrosa	8
La Asunción	INTEP	9

Fuente: Adaptado de CMGR Roldanillo (2020).

Según el estándar de ayuda humanitaria definido por la UNGRD, cada familia censada y catalogada como afectada deberá recibir un kit de ayuda humanitaria, dentro de las primeras 48 horas una vez ocurrido el evento, el cual por su composición tendrá una duración promedio de 8 a 10 días en un núcleo familiar estándar no superior de 5 integrantes (Unidad Nacional para la Gestión de Riesgos de Desastres, 2013). Dado que la composición de las familias afectadas no supera el estándar, entonces existe una relación de 1:1 en la cantidad de familias afectadas y los requerimientos de kits de ayuda humanitaria en cada zona de atención. Por otra parte, con base en información suministrada por los actores responsables del proceso de distribución de ayuda humanitaria, en promedio se suministran 8 kits de ayuda humanitaria por minuto, considerando una media de preparación o alistamiento de 5 minutos, generando los tiempos de suministro en la Tabla 8.

Tabla 8. Tiempo de suministro por zona de atención.

Punto de atención	Tiempo suministro (min)
El Portal	31.625
Sector Hospital	16.625
La Ceiba	19.25
Obrero	36.125
San Sebastián	57.25
Ipira	29.5
Los Alpes	22.25
Arrayanes	44.75
La Asunción	108.125

Fuente: Adaptado de CMGR Roldanillo (2020).

Además, a partir del cálculo de la distancia euclidiana entre cada uno de los nodos compuestos por el punto de distribución localizado en cercanías a la Alcaldía municipal y los puntos de atención o entrega en cada barrio afectado, se determinó la matriz de distancias (Tabla 9) con base en los centroides de dichos puntos (Martínez & Rojas, 2020).

Tabla 9. Matriz de distancias entre nodos.

Nodo	x (kms)	y (kms)		Destinos										
				0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Alcaldía	-0.8	-7.1	Orígenes	0	1.7	1.1	1.5	0.55	1	0.4	0.8	1.3	0.75	
El Portal	-15.2	-5.9		1	1.7	0	2.8	0.45	3	2.1	1.3	2.5	0.7	2.4
Sector Hospital	-4.5	5.2		2	1.1	2.8	0	2.4	0.85	1.4	1.5	0.35	2.3	0.75
La Ceiba	-2	4.8		3	1.5	0.45	2.4	0	2.3	1.4	0.9	2.1	0.35	1.8
Obrero	0.2	-14.8		4	0.55	3	0.85	2.3	0	1.5	0.95	0.75	1.8	1.4
San Sebastián	-25.2	-5.1		5	1	2.1	1.4	1.4	1.5	0	0.95	1.1	1.4	0.35
Ipira	-11.9	-2.2		6	0.4	1.3	1.5	0.9	0.95	0.95	0	1.1	0.85	0.9
Los Alpes	-2.5	-16		7	0.8	2.5	0.35	2.1	0.75	1.1	1.1	0	2	0.4
Arrayanes	-4.1	1.9		8	1.3	0.7	2.3	0.35	1.8	1.4	0.85	2	0	1.6
La Asunción	-14	-10		9	0.75	2.4	0.75	1.8	1.4	0.35	0.9	0.4	1.6	0

Fuente: Adaptado de Martínez & Rojas (2020).

Identificación vías afectadas

Cuando se presenta este tipo de eventos, algunas de las vías se ven afectadas, estas interrupciones viales transitorias generan dificultades en la entrega de ayuda humanitaria, lo que causa que el tiempo de desplazamiento sea mayor, ya que se deben buscar rutas alternas para llegar a las zonas afectadas poniendo así en peligro la vida de los habitantes por la falta de suministros. Según información proporcionada por los actores responsables de la atención de las interrupciones viales, históricamente se afectan las vías denotadas en la Figura 17 con regularidad, las cuales aparecen señaladas en color púrpura.

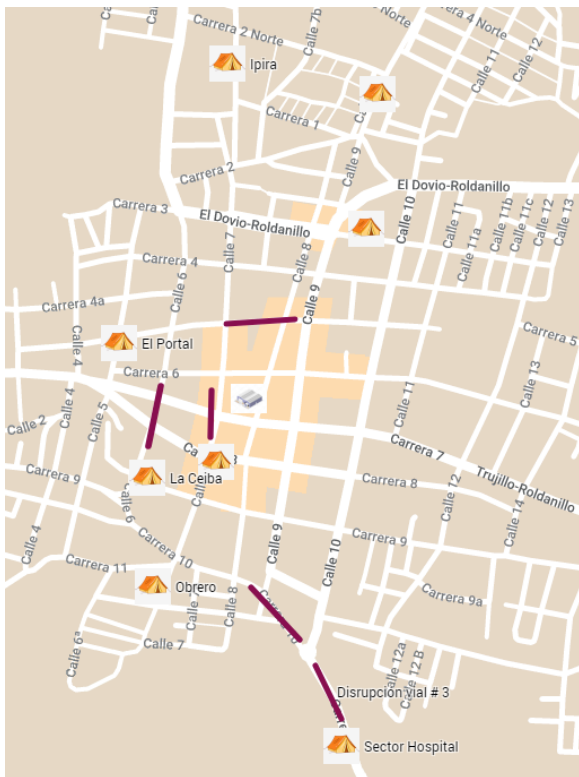


Figura 17. Mapas de vías afectadas o interrupciones viales en el municipio de Roldanillo.
Fuente: Adaptado de CMGR Roldanillo (2020).

Con base en información proporcionada por los organismos que integran el comité municipal de atención de riesgos y desastres, son cinco (5) las interrupciones viales transitorias o vías afectadas que regularmente generan limitaciones de accesibilidad y dificultan el proceso de distribución de ayuda humanitaria. Las labores de reparación de las vías son atendidas por organismos del municipio con base en sus registros históricos, por lo cual fue posible determinar el tiempo esperado de culminación de las labores de reparación en cada vía y tener una aproximación en qué punto de cada vía afectada o arco se inicia con

la reparación. El punto de ubicación de cada reparación se estima como una proporción de la longitud de cada arco o vía afectada (Tabla 10).

Tabla 10. Información tiempo esperado culminación de reparación vías afectadas y estimación puntos de reparación.

Disrupción vial	Tiempo esperado culminación reparación (Min)	Punto de reparación
1	114	0.25
2	113	0.63
3	118	0.22
4	114	0.39
5	100	0.48

Fuente: Adaptado de CMGR Roldanillo (2020).

3.5.2. Resultados modelo de distribución de ayuda humanitaria

Para la ejecución del modelo se empleó el lenguaje de programación matemática AMPL y el solver CPLEX (Anexo 3), disponible en el entorno de desarrollo AMPL IDE versión profesional, por medio de un ordenador con las siguientes especificaciones: Intel® Core™ i7-10750H (6C / 12T, 2,6 / 5,0GHz, 12MB), 32 GB de RAM y 1 TB de disco duro. Se generó un total de 200 variables de decisión, de las cuales 90 fueron binarias y 110 continuas. Además, se obtuvieron 673 restricciones, 19 de igualdad y 654 de desigualdad, generando un tiempo de solución de 77 centésimas de segundo.

Rutas de distribución

A partir de los datos de entrada, el modelo generó cuatro rutas de entrega de ayuda humanitaria. De los 7 vehículos disponibles, la solución óptima implica utilizar sólo el 57.14% de la flota de transporte actual. Las coordenadas geodésicas de cada uno de los nodos pertenecientes a cada ruta se trazaron a continuación con ayuda de Google Maps ® (Figura 18). Estas rutas indican la secuencia de visitas en el proceso de distribución de ayuda humanitaria, desde el depósito hasta cada uno de los puntos de atención.

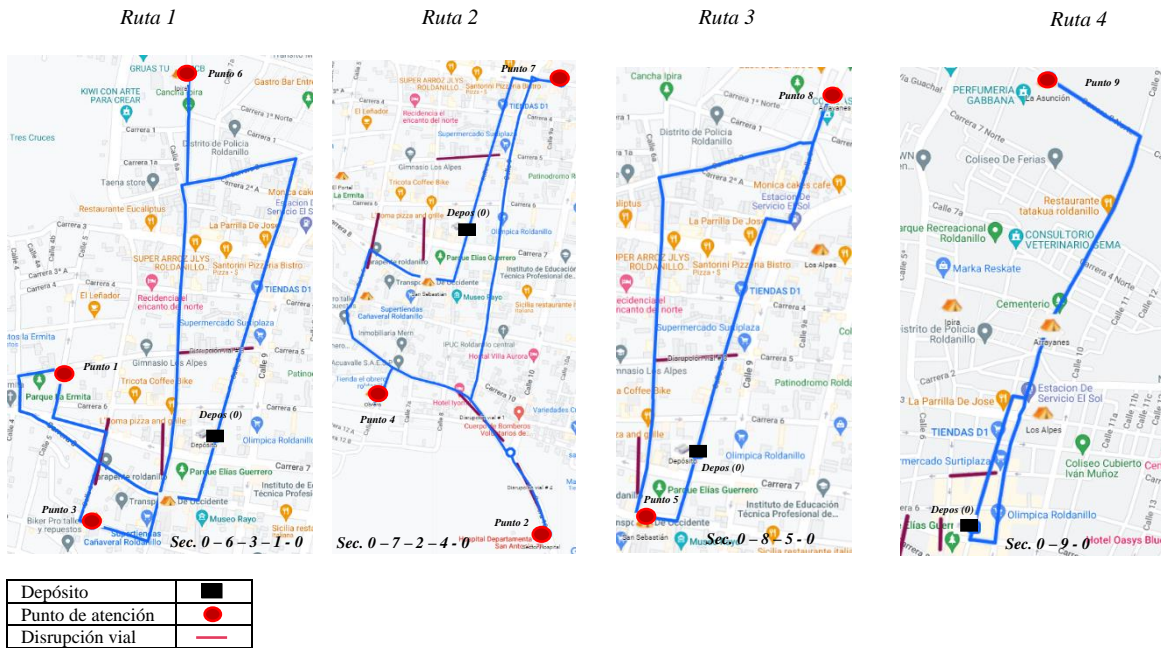


Figura 18. Rutas resultantes de la distribución de ayuda humanitaria.

Fuente: Adaptado de Google Maps ®

La secuencia de nodos obtenida para cada ruta (Tabla 11 y Figura 18) muestra que los vehículos no consideraron al comienzo las rutas con disrupción vial (Tabla 10), es decir, abordaron rutas alternas para llegar a los puntos de atención. Lo anterior, generó un tiempo máximo de finalización de llegada de ayuda humanitaria de 110.8 minutos y un tiempo medio de llegada de 22.7 minutos. Estos resultados informan que la programación de rutas se puede ver afectada por el tiempo de finalización de las obras de reparación de las carreteras afectadas, dado que existe una menor cantidad de rutas alternas disponibles para llegar a cada punto de atención por la presencia de disrupciones viales transitorias. En el escenario 2 del apartado 3.5.3 cuando se realiza el análisis sin presencia de disrupciones viales, se evidenciará claramente el impacto que genera la presencia de estas disrupciones en el tiempo total de llegada.

Tabla 11. Descripción de las rutas de distribución de la ayuda humanitaria.

Ruta	Secuencia	Tiempo de inicio de la ruta (Min)	Tiempo finalización de la ruta (Min)	Distancia ruta (Km)	Duración de la ruta (Min)	Carga ruta (Kits)	Porcentaje de tiempo que el vehículo está en ruta	Tiempo esperado de finalización de las actividades de reparación de carreteras (Min)
1	0-6-3-1-0	0,0	86,2	3,5	86,2	523	100%	-
2	0-7-2-4-0	0,0	79,5	2,7	79,5	480	100%	-
3	0-8-5-0	0,0	108,3	3,7	108,3	736	100%	-
4	0-9-0	0,0	110,8	1,6	110,8	825	100%	-
Tiempo total mínimo de llegada a los puntos de entrega o zonas de atención = 205 Min.								
Tiempo máximo de llegada de ayuda humanitaria = 110.8 Min.								
Tiempo promedio de llegada a los puntos de entrega o zonas de atención = 22.7 Min.								

Fuente: el autor.

3.5.3. Análisis de escenarios

Para establecer el impacto que la variación en el número de vehículos disponibles y en los tiempos de disponibilidad de las carreteras puede tener en el tiempo total de llegada de los vehículos a los puntos de atención y en la configuración de las rutas, se evaluaron tres escenarios.

Escenario 1. Variación flota de vehículos disponible

En este escenario, se realizó una variación del número de vehículos disponibles entre 2 y 17, analizando su impacto en el tiempo total de llegada de ayuda humanitaria o función de desempeño del modelo (Figura 19). Se comprobó que, si el número de vehículos disponibles es mayor o igual a 4, no hay ningún efecto sobre el tiempo total de llegada de ayuda humanitaria hacia los puntos de atención, es decir, el valor de la función de desempeño se mantiene estable. Sin embargo, si el número de vehículos disponibles es inferior a 4, se produce un efecto negativo en la función de desempeño, es decir, el tiempo total de llegada de los vehículos a cada uno de los puntos de atención es mayor.

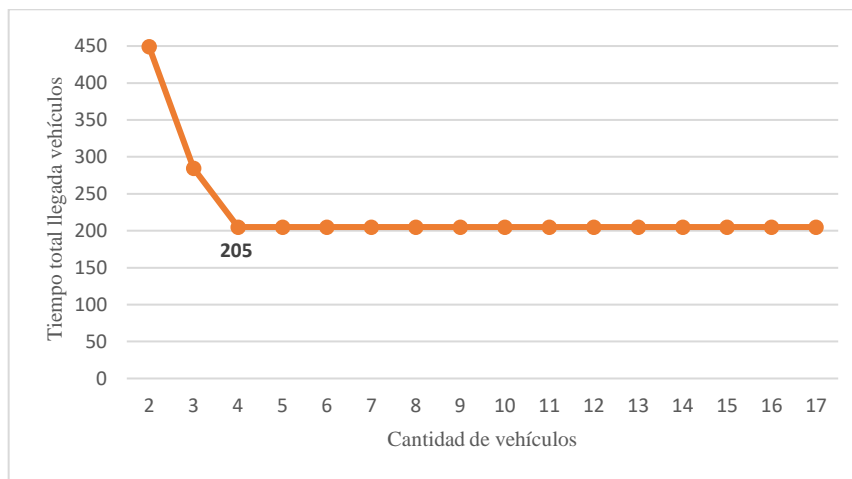


Figura 19. Análisis de variación del número de vehículos disponibles entre 2 y 17 en escenario 1.

Fuente: el autor.

Considerando los resultados obtenidos, se puede determinar que, para el despliegue de ayuda humanitaria, es suficiente considerar una flota de cuatro vehículos. Con lo anterior se puede inferir que la adquisición de más vehículos con el fin de minimizar el tiempo total de llegada de ayuda humanitaria a cada uno de los puntos de atención dada la presencia de interrupciones viales transitoria no genera el impacto esperado. Por lo tanto, en lugar de la adquisición de más vehículos para el despliegue de ayuda humanitaria, es necesario realizar una programación efectiva de la flota vehicular con base en el progreso las operaciones de restauración de las vías afectadas y así contribuir en la búsqueda de tiempos de respuesta más cortos.

Escenario 2. Sin presencia de interrupciones viales transitorias

Para comparar el impacto que tiene una variación en la disponibilidad de carreteras sobre la función de desempeño y otros indicadores, se realizó una corrida sin tener en cuenta las restricciones de las carreteras. Para generar este escenario, se realizó una modificación en la restricción (17) del modelo matemático. Esta restricción garantiza que el tiempo de salida del vehículo desde el nodo i hacia el nodo j , más el tiempo transcurrido hasta el momento en que comienzan los trabajos de reparación de la vía afectada, fuera mayor o igual que el tiempo de finalización de la reparación de la vía. Sin embargo, cuando no hay presencia de interrupciones viales en la red de carreteras, el tiempo de finalización de la reparación es igual a cero, lo cual equivale a suponer que hay disponibilidad inmediata de la carretera, es decir, no hay interrupciones en la vía, generando la restricción (21):

$$TS_{ij} + X_{ij} * \frac{dis_{ij}}{v} * pro_{ij} \geq td_{ij} * X_{ij} \quad \forall i \in N, j \in N | j <> i \quad (17)$$

$$TS_{ij} + X_{ij} * \frac{dis_{ij}}{v} \geq 0 \quad \forall i \in N, j \in N | j <> i \quad (21)$$

Esta variación se tradujo en una mejora de 152.1 minutos, es decir, del 74.2% en el tiempo total de llegada a cada punto de servicio, en comparación con el escenario actual en el que el tiempo total de llegada, con interrupciones de la carretera, era de 205 minutos; considerando una flota homogénea disponible de 7 vehículos, donde cada uno está asignado a una ruta. Los resultados muestran el impacto que tienen los trabajos de restauración de las vías en el tiempo total de llegada y en el porcentaje de tiempo que el vehículo está en la carretera durante el proceso de distribución de ayuda humanitaria (Tabla 12).

Tabla 12. Descripción rutas de distribución de ayuda humanitaria sin interrupciones viales transitorias.

Ruta	Secuencia	Tiempo de inicio de la ruta (Min)	Tiempo finalización de la ruta (Min)	Distancia ruta (Km)	Duración de la ruta (Min)	Carga ruta (Kits)	Porcentaje de tiempo que el vehículo está en ruta	Tiempo máximo de finalización de las actividades de reparación de carreteras (Min)
1	0-2-7-0	0.0	20.4	2.3	20.4	231	100%	-
2	0-3-1-0	0.0	57.1	3.7	57.1	327	100%	-
3	0-4-0	0.0	38.1	1.2	38.1	249	100%	-
4	0-5-0	0.0	60.6	2.0	60.6	418	100%	-
5	0-6-0	0.0	30.8	0.8	30.8	196	100%	-
6	0-8-0	0.0	49.1	2.6	49.1	318	100%	-
7	0-9-0	0.0	110.8	1.6	110.8	825	100%	-
Tiempo total mínimo de llegada a los puntos de entrega o zonas de atención = 52.9 Min.								
Tiempo máximo de llegada de ayuda humanitaria = 110.8 Min.								
Tiempo promedio de llegada a los puntos de entrega o zonas de atención = 5.9 Min.								

Fuente: el autor.

Con base en lo anterior, se puede concluir que en escenarios reales de desastres, especialmente aquellos catalogados como naturales de inicio súbito, se pueden desarrollar interrupciones viales transitorias

generando limitaciones de accesibilidad que pueden dificultar el proceso de distribución de ayuda humanitaria, por lo tanto es importante realizar una programación de las rutas de distribución y definición de los tiempos de salida y arribo de los vehículos en cada nodo de atención en función del progreso de las labores de restauración de las vías.

Escenario 3. Variabilidad en la cantidad de interrupciones viales transitorias y tiempos esperados de culminación en la reparación

En este escenario se realizó una variación simultánea en la cantidad de interrupciones viales transitorias o vías a reparar considerando la variabilidad que puede darse en los tiempos esperados de culminación en la restauración de estas y se analizó su impacto en el tiempo total de distribución de la ayuda humanitaria (Figura 20). Para ello, se utilizó una simulación de Monte Carlo para determinar qué carreteras podrían estar o no interrumpidas, lo que permitió evaluar 385 escenarios. Para el cálculo del número de escenarios se seleccionó el método planteado por Linet & Marrero, (2017); Sánchez Pedraza & Jaramillo González, (2009) y Sc et al., (2011). La cantidad de escenarios n se determina asumiendo una distribución de probabilidad binomial.

$$n = \frac{z^2 * p * (1 - p)}{\epsilon^2} \quad (22)$$

Donde:

n = número de escenarios

p = proporción estimada del error

z = es el valor normal estándar correspondiente al nivel de confianza deseado

ϵ = nivel de precisión deseado

Según Linet & Marrero, (2017) el valor de p oscila entre 0.01 – 0.5 y el valor de E entre 0.01 – 0.3. En este estudio se empleó un nivel de confianza del 95%, $z = 1.96$, $p = 0.5$; $\epsilon = \pm 0.05$ tomando como referente el trabajo realizado por Ojeda & Behar (2006).

$$n = \frac{1.96^2 * 0.5 * (1 - 0.5)}{(0.05)^2}$$

$$n = 384.16$$

$$n \approx 385 \text{ escenarios}$$

De acuerdo con el resultado anterior, se puede definir entonces que el número de escenarios a emplear en el estudio es 385.

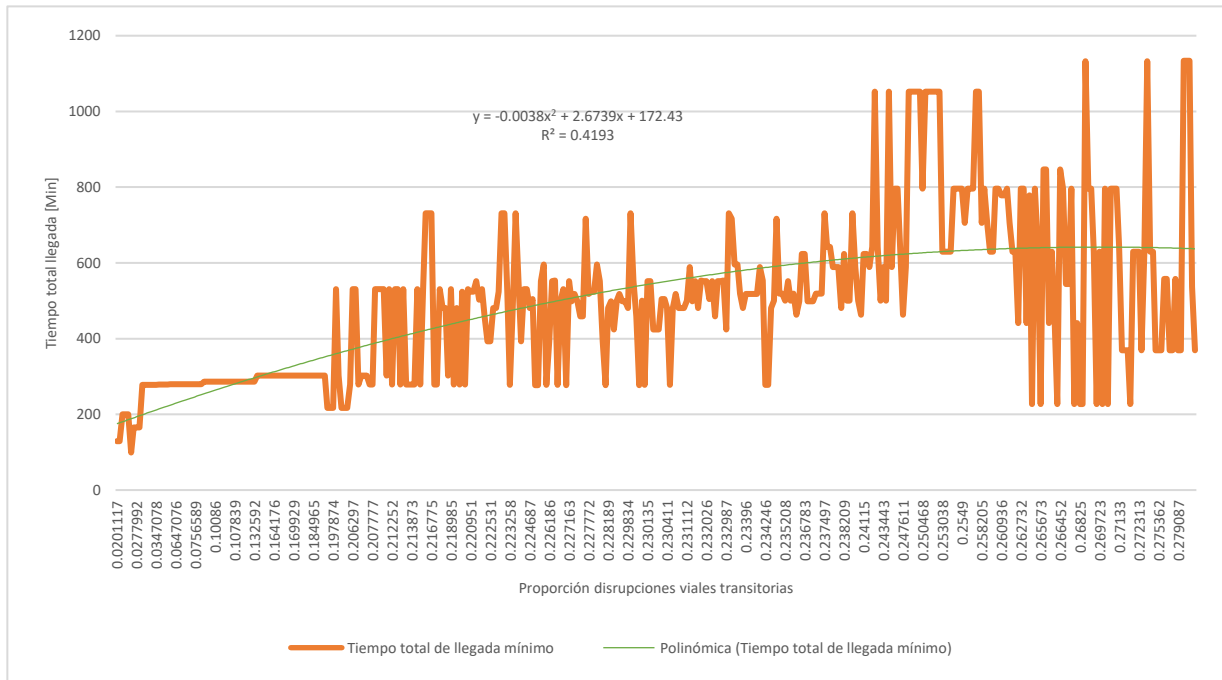


Figura 20. Análisis de variación en la proporción de interrupciones viales transitorias y tiempos esperados de culminación en la reparación (escenario 3).
Fuente: el autor.

Se consideraron tiempos de culminación de reparación estocásticos basados en una distribución uniforme $U(a, b)$ cuyos parámetros se establecieron con base en información proporcionada por los actores responsables de la operación de reparación de carreteras. En cada escenario se determinó la proporción estimada de carreteras dañadas y el tiempo total de llegada de ayuda humanitaria mínimo. Con base en los resultados de la Figura 20, se infiere que si la proporción de vías afectadas se sitúa entre el 2.01% y menos del 10%, puede generar incrementos en el tiempo total de llegada de entre 99.18 y 286.10 minutos. Sin embargo, si esta proporción está entre el 10% y menos del 20%, se puede alcanzar un tiempo total de llegada entre 217.13 y 302.63 minutos. Finalmente, si dicha proporción se encuentra entre un 20% y 30%, se puede alcanzar un tiempo total máximo de distribución de 1133.88 minutos.

Además, se pudo determinar que un análisis estocástico en los tiempos de reparación de carreteras y la cantidad de interrupciones viales transitorias, puede generar un crecimiento polinomial en el tiempo total de llegada de ayuda humanitaria, lo que afecta la programación de las rutas y los tiempos de llegada o arribo a cada nodo de destino o punto de atención. Este resultado se pudo establecer a partir del análisis de diversos modelos de regresión como el lineal, exponencial, logarítmico, entre otros, donde precisamente el modelo

polinomial de grado dos (2) tuvo un mejor ajuste. Por lo tanto, es importante concluir que, para contribuir a la futura minimización de los tiempos de respuesta a la población afectada, es fundamental que los actores responsables de la respuesta humanitaria coordinen las operaciones de reparación de carreteras con la entrega de ayuda o asistencia humanitaria.

Por otra parte, se realizó un análisis adicional cuando los tiempos esperados de finalización de la reparación oscilan entre 24 y 72 horas, es decir, las disrupciones viales transitorias por su condición o gravedad generan tiempos esperados de culminación más prolongados. En la Figura 21, se puede observar que cuando la proporción de disrupciones viales son superiores al 24%, el tiempo total o promedio de llegada de la ayuda humanitaria hacia cada uno de los puntos de atención puede verse afectado. Dado que cuando la proporción de vías afectadas son inferiores al 24%, los vehículos de ayuda humanitaria toman vías alternar para llegar a cada punto de atención, es decir, poseen más opciones de vías o rutas para el despliegue de ayuda humanitaria. Sin embargo, a medida que la proporción de vías afectadas aumenta el tiempo total de llegada puede aumentar de forma importante.

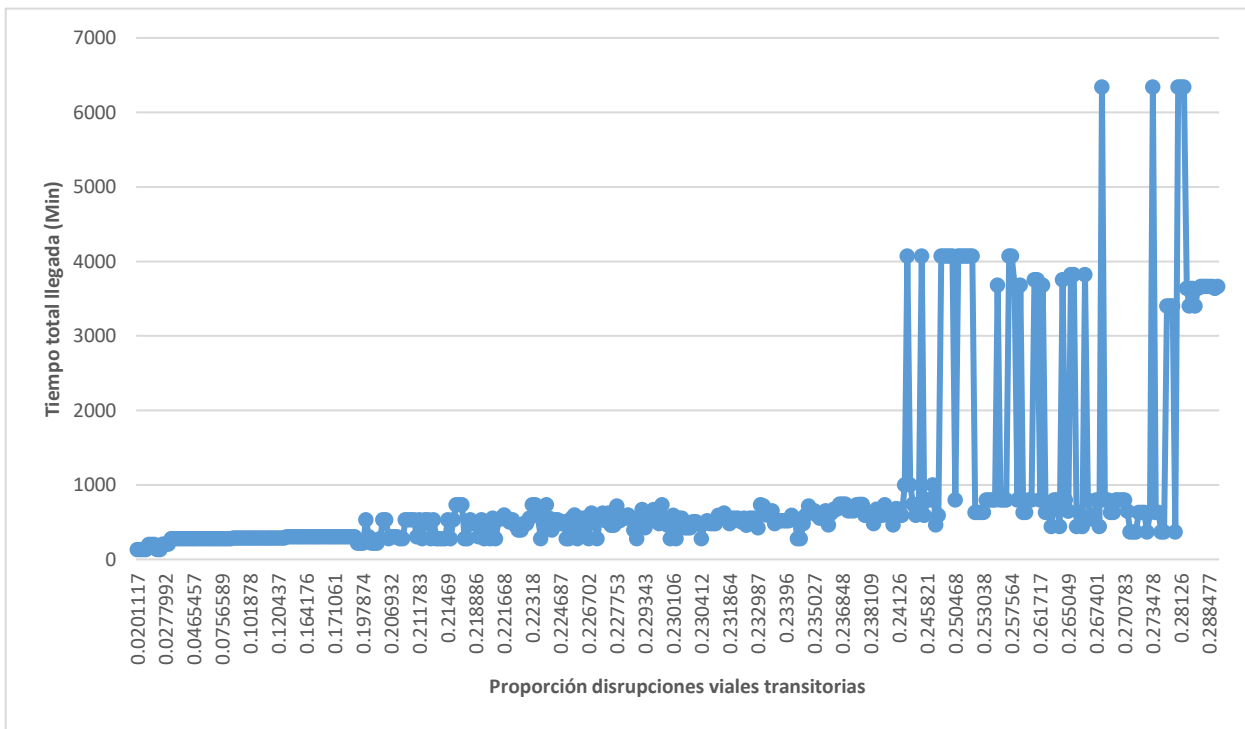


Figura 21. Análisis de variación en la proporción de disrupciones viales transitorias y tiempos esperados de culminación [24, 72] horas en la reparación (escenario 3).

Fuente: el autor.

Finalmente, se pudo determinar que en los casos donde los vehículos no consideraron las rutas que presentan disrupciones transitorias o condiciones de accesibilidad limitada, éstos abordaron rutas alternas para llegar a los puntos de atención. Sin embargo, esto no necesariamente contribuye a minimizar el tiempo total o medio de llegada hacia los puntos de atención. Por ejemplo, en la Tabla 13 se puede observar un escenario donde un vehículo esperó 11.4 minutos para poder iniciar su recorrido hacia el punto de atención # 4, dado que en la vía que conecta al depósito con el nodo de atención se presenta una disrupción vial, implicando la realización de una operación de reparación cuyo tiempo esperado de finalización, generado de forma aleatoria, fue de 11.8 minutos. Aquí se pudo observar un tiempo total mínimo y medio de llegada de 165.2 minutos y 18.4 minutos respectivamente. Los resultados de este escenario son mejores con relación a la solución actual. Esto demuestra, que para generar un menor tiempo total o promedio de llegada de la ayuda humanitaria hacia los puntos de atención, no necesariamente se logra evitando las rutas que presentan disrupciones o ampliando la flota vehicular. La solución radica en que los tiempos de salida de vehículos se ejecuten en función de los tiempos de finalización de las vías afectadas, lo cual implica una decisión conjunta o colectiva entre los procesos de distribución de ayuda y restauración del acceso.

Tabla 13. Descripción de las rutas de distribución de la ayuda humanitaria.

<i>Ruta</i>	<i>Secuencia</i>	<i>Tiempo de inicio de la ruta (Min)</i>	<i>Tiempo de finalización de la ruta (Min)</i>	<i>Distancia de la ruta (Km)</i>	<i>Duración de la ruta (Min)</i>	<i>Carga ruta (Kits)</i>	<i>Porcentaje de tiempo que el vehículo está en ruta</i>	<i>Tiempo esperado de finalización de las actividades de reparación de carreteras (Min)</i>
1	0-4-0	11.4	49.5	1.2	38.1	249	76.97%	11.8
2	0-6-3-0	0.0	53.5	2.8	53.5	310	100%	-
3	0-7-2-5-0	0.0	102.2	3.6	102.2	649	100%	-
4	0-8-1-0	0.0	82.6	3.7	82.6	531	100%	-
5	0-9-0	0.0	110.8	1.6	110.8	825	100%	-
Tiempo total mínimo de llegada a los puntos de entrega o zonas de atención = 165.2 Min.								
Tiempo máximo de llegada de ayuda humanitaria = 110.8 Min.								
Tiempo promedio de llegada a los puntos de entrega o zonas de atención = 18.4 Min.								

Fuente: el autor.

4. Caracterización del proceso de restauración de interrupciones viales transitorias

Este capítulo presenta la caracterización del proceso de restauración de interrupciones viales transitorias. Para ello, se realizó una revisión de la literatura para determinar el estado del arte y la práctica en torno al proceso bajo análisis. En este sentido, se describieron las decisiones, actividades, recursos y medios requeridos para la restauración del acceso de la malla vial por carretera que conecta los puntos locales de distribución y los puntos de atención durante la fase de respuesta. También, se describieron los actores que participan en las actividades del proceso de restauración.

4.1. Características del proceso de restauración del acceso vial.

Las redes de carreteras proporcionan la línea de base para realizar actividades de respuesta tales como evacuación, búsqueda y rescate, distribución de ayuda y establecer comunicación entre los diversos actores o interesados que responden al evento (Nurre et al., 2012). Por lo tanto, dentro de los primeros días o semanas posteriores al evento, el objetivo principal es llevar estas redes a condiciones de trabajo mínima para que se puedan realizar las actividades de respuesta (Arif et al., 2020). El proceso de reparación o restauración de interrupciones viales transitorias consiste en determinar el programa de reparaciones de las vías que conectan a los miembros de las redes de la cadena de suministro con la población afectada por un desastre (Hasani & Mokhtari, 2019). La reparación transitoria de las redes de carreteras es una actividad muy importante, porque la destrucción de éstas puede contribuir en altas tasas de aislamiento, generando problemas de accesibilidad en las zonas afectadas (Lu et al., 2016). Además, la naturaleza impredecible de los desastres genera preocupación para los responsables de la gestión posterior a los desastres (Lu et al., 2016). En el corto plazo después de un desastre, las características de los daños pueden cambiar de forma dramática, generando dificultades en la distribución de ayuda humanitaria, dentro de las primeras 72 horas una vez generado el evento disruptivo (Lu et al., 2016; Matsumaru et al., 2012; Shin et al., 2019).

El proceso de restauración de las vías terrestres inicia con la identificación y mapeo de la región afectada por el desastre, cuya finalidad es determinar el grado de complejidad de la operación de respuesta requerida a través de la evaluación del estado de la red de transporte o carreteras, identificación de las áreas afectadas y los sitios con restricción de acceso, información de la ubicación y disponibilidad de recursos necesarios para las operaciones de restauración de la malla vial como presupuesto, materiales, maquinaria y cuadrillas de reparación (Maya Duque et al., 2016; Silva et al., 2019; Tuzun Aksu & Ozdamar, 2014).

Posterior, se inicia con el despliegue de las actividades de restauración de carreteras, que implica ciertas decisiones como la selección de las carreteras a restaurar y la programación de las rutas de las cuadrillas y maquinaria que realizarán las actividades de reparación (Kim et al., 2018d). Para ello, se parte de información relacionada con el tiempo de reparación de cada enlace dañado, el tiempo de viaje de la cuadrilla de reparación entre vías dañadas y la cantidad disponible de recursos (Maya Duque et al., 2016; Shin et al., 2019). Luego, se determina la secuencia u orden en el que los enlaces destruidos son reparados por el equipo de reparación, el tiempo de llegada del equipo de reparación al enlace dañado, el instante de tiempo el cual la carretera es reparada y accesible, estableciendo por último el cronograma de reparación correspondiente (Çelik, 2016; Kim et al., 2018; Maya Duque et al., 2016).

4.2. Decisiones y actividades relacionadas con el proceso de restauración de interrupciones viales transitorias

Ante la ocurrencia de un desastre natural súbito, es necesario desarrollar un conjunto de decisiones que desencadenan una serie de actividades enmarcadas en la evaluación de la situación actual y/o potencial y suministro de información y la programación de operaciones de restauración del acceso asociadas a la reparación, limpieza, remoción de material o rehabilitación de la malla vial o infraestructura de carreteras (Çelik, 2016; Mansoori et al., 2020).

La evaluación de la situación actual y/o potencial y suministro de información, incluye la identificación y mapeo de la región afectada a través de un plan de vuelo y sistemas de información geográfica (Silva et al., 2019), recopilación de datos y procesamiento de imágenes digitales de la zona (Coco et al., 2020), análisis de la situación local de la zona antes y después del desastre (Sarkissian et al., 2019); identificación de las áreas afectadas y las zonas con restricción de acceso por interrupciones viales (Kim et al., 2018), la condición de infraestructura de las vías (Sakuraba, et al., 2016), así como la disponibilidad de recursos necesarios para planificar las operaciones de remoción de material, limpieza y restauración o rehabilitación de la malla vial tales como: flota vehículos necesarios para el transporte de las cuadrillas de reparación (Shin et al., 2019) y la maquinaria para el despeje o remoción de escombros y rehabilitación de vías (Maya Duque et al., 2016; Aslan & Celik, 2019).

Partiendo de la información anterior, se procede a realizar la programación de operaciones de restauración del acceso, el cual, para su ejecución, parte de información adicional relacionada con el tiempo estimado de reparación de cada vía afectada, el tiempo de viaje entre puntos de restauración y la cantidad de cuadrillas y maquinaria disponible necesaria para las labores de restauración (Kim et al., 2018; Maya

Duque et al., 2016). Además, es necesario considerar la interdependencia entre recursos de reparación y relaciones de precedencia de algunas vías a reparar (Rojas et al., 2023a). Lo anterior, permite la asignación recursos de reparación a cada vía afectada, el orden en el que las vías afectadas son reparadas, los tiempos de salida de los recursos entre puntos de reparación, el instante en que el equipo de reparación llega al enlace afectado y el instante en que cada lugar es accesible (Çelik, 2016; Kim et al., 2018; Lu et al., 2016; Maya Duque et al., 2016; Shin et al., 2019). Las labores de restauración y rehabilitación de la red de carreteras dentro de las primeras 72 horas una vez generado el evento disruptivo se pueden clasificar de dos formas:

- *Despeje de escombros*: los escombros son perjudiciales a corto plazo, ya que cubren carreteras y obstaculizan las actividades de búsqueda y rescate, la accesibilidad a instalaciones críticas y la distribución de ayuda humanitaria (Çelik, 2016). Las actividades de remoción de escombros tienen como objetivo empujar los escombros resultantes a los lados de las carreteras para que se pueda mantener la distribución de socorro, la búsqueda y rescate y el acceso a instalaciones críticas (Ozdamar et al., 2018).
- *Restauración y rehabilitación de carreteras*: la restauración y rehabilitación de la infraestructura de transporte difieren de otras redes de infraestructura en que las interrupciones en las redes de carreteras generalmente conducen a la pérdida de la conexión física en ciertas partes de la red (Maya Duque et al., 2013). Por lo tanto, en un momento dado, solo se puede restaurar o reparar un subconjunto de carreteras (Lu et al., 2016).

En resumen, la interrelación de los dos esquemas de toma de decisión se puede representar en la Figura 22.

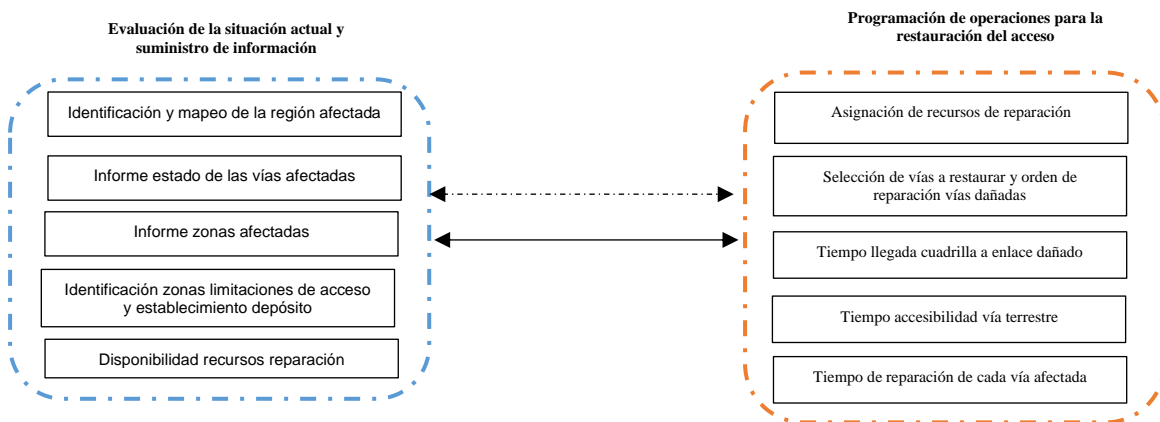


Figura 22. Interrelación de las decisiones y actividades del proceso de restauración de interrupciones viales transitorias.

Fuente: el autor.

Con base en lo anterior, se puede determinar entonces que los factores o criterios que inciden en el proceso de restauración transitoria de las carreteras están asociados a la identificación de las vías y zonas afectadas (Sharma et al., 2019), la disponibilidad de recursos de reparación como personal, maquinaria, materiales y presupuesto (Çelik, 2016; Maya Duque et al., 2016), la cantidad de puntos o vías a restaurar (Çelik, 2016; Lu et al., 2016), los tiempos de llegada de los equipos de reparación a cada nodo o vía dañada (Shin et al., 2019d), los tiempos de reparación de cada vía afectada (Zou & Chen, 2020), y el instante en que la vía es accesible para el suministro de ayuda (Shin et al., 2019; Veysmoradi et al., 2018).

En este capítulo se estudia la programación de operaciones para la restauración del acceso de las vías terrestres durante la fase de respuesta, dado que corresponde a una decisión de nivel operacional durante la fase de respuesta (Figura 23), la cual se encuentra en el alcance de investigación de esta tesis doctoral.

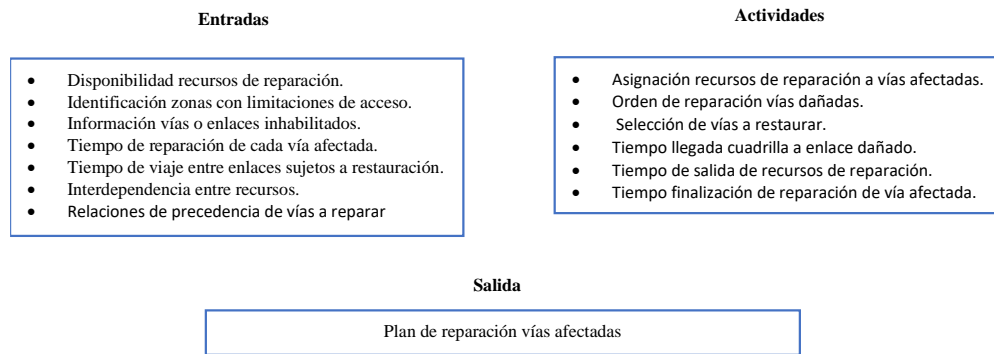


Figura 23. Programación de operaciones para la restauración del acceso.

Fuente: el autor.

4.3. Actores del proceso de restauración de interrupciones viales transitorias

Las operaciones de socorro en casos de desastre se ven afectadas por la disponibilidad de la infraestructura vial (Berariu et al., 2015). Eventos como inundaciones, deslizamientos de tierra y terremotos son ejemplos de desastres naturales súbitos que podrían dañar la red general compuesta por carreteras, puentes y túneles, contribuyendo así a la interrupción de los servicios y las actividades logísticas de respuesta humanitaria y la generación de zonas afectadas con limitaciones de acceso (Çelik, 2016). Por lo tanto, es necesario realizar un despliegue de actividades y recursos que contribuya al despeje de materiales, limpieza y restauración de la malla vial, a través de la participación de varios organismos o actores involucrados, agrupados en: Gobierno, Agencias humanitarias, Fuerza armada y Proveedores logísticos (Cozzolino et al., 2012; Kim et al., 2018; Maya Duque et al., 2016; Yan & Shih, 2009) (Figura 24).

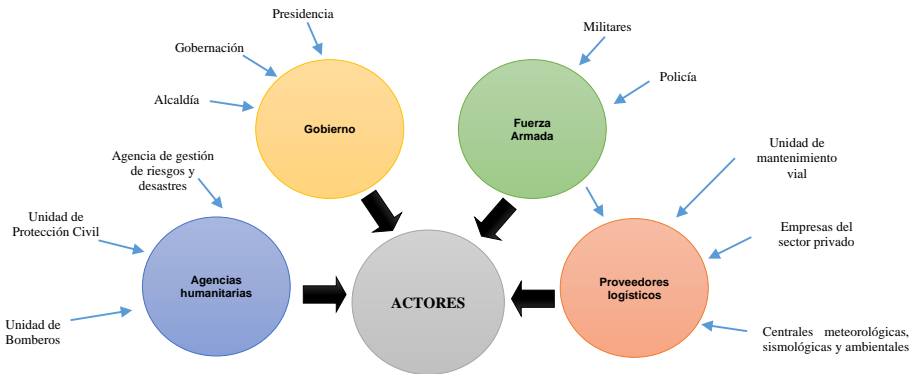


Figura 24. Actores proceso de restauración de interrupciones viales transitorias en redes logísticas humanitarias.

Fuente: Adaptado de Kovacs & Spens, (2009).

Estos actores o partes interesadas poseen diferentes responsabilidades y recursos, que soportan el proceso de restauración de la malla vial terrestre (Mansoori et al., 2020). En el Anexo 4 (pág. 5) se presenta una descripción detallada.

Los proveedores logísticos y la fuerza armada juegan un papel vital en las actividades de restauración dado que pueden proporcionar maquinaria y materiales necesarios en la operación (Delgado-Antequera et al., 2020). Si bien dichos proveedores tienen una cantidad importante de información y recursos, las agencias humanitarias tienen el conocimiento, el equipo y el poder de toma de decisiones regulatorias necesarias para intervenir en las zonas que presentan limitaciones de acceso y generar cronogramas de restauración de la red vial (Moreno et al., 2019). Por otro lado, los gobiernos nacional, regional y local proporcionan un apoyo importante en la reconstrucción de los principales servicios comunitarios y coordinación de los actores involucrados en el proceso de restauración transitoria de la red vial (Rodríguez-Espíndola et al., 2018; Silva et al., 2019).

En la evaluación de la situación actual y/o potencial y suministro de información, la identificación de zonas afectadas y con limitaciones de accesibilidad y el estado de la malla vial; organismos como gobierno, agencias humanitarias y fuerzas armadas tienen una participación importante en las actividades propias de este proceso (Çelik, 2016). En las actividades de la programación de operaciones de restauración transitoria de infraestructura vial participan actores adicionales como los proveedores de logística, los cuales cumplen también un rol importante en la toma de decisiones y ejecución de estas actividades (Prakash et al., 2020; Shin et al., 2019). Con base en lo anterior, se puede concluir que el proceso de restauración de interrupciones viales transitorias implica el desarrollo de diferentes actividades por parte de actores o partes interesadas (Balcik et al., 2010; Rodríguez-Espíndola et al., 2018). En la Figura 25 se

representa la interrelación existente entre los actores involucrados y las actividades enmarcadas en el proceso de restauración del acceso. Este análisis fue soportado a través de la revisión de la literatura realizada y la aplicación de entrevista semiestructurada hacia actores del proceso (Anexo 4).

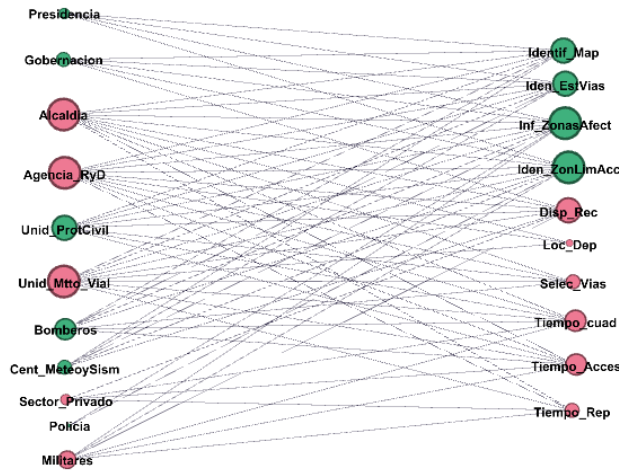


Figura 25. Red bipartita no dirigida interrelación actores y actividades proceso de restauración del acceso.
Fuente: Autor

La información utilizada en la construcción de red bipartita aparece en el Anexo 5. A través del entorno de desarrollo RStudio ® para el lenguaje de programación R, se obtuvieron los siguientes resultados y análisis (Tabla 14).

Tabla 14. Indicadores red bipartita actores y actividades proceso de restauración de interrupciones viales transitorias.

Indicador	Resultado	Análisis
Número de actores	11	Con base en la revisión de la literatura se identificaron 11 actores que participan generalmente en el proceso de restauración de interrupciones viales transitorias en redes logísticas humanitarias.
Número de actividades	10	Con base en la revisión de la literatura se identificaron 10 tipos de actividades que participan generalmente en el proceso objeto de estudio.
Número medio de socios compartidos	4.345455	En promedio cada actor se relaciona con 4 organismos, donde se infiere una buena interrelación entre los actores.
Número medio de actividades compartidas	5.155556	En promedio cada actividad se relaciona con 5 actividades adicionales, que obedece a una buena interdependencia entre las actividades del proceso objeto de estudio.
Coefficiente de agrupación de actores	0.7535211	Como el valor del coeficiente es cercano a 1, existe una conexión o conectividad moderada entre los actores del sistema.
Coefficiente de agrupación de actividades	0.7029449	Como el valor del coeficiente es cercano a 1, existe una conexión o conectividad moderada entre las actividades del sistema.

Fuente: el autor

A partir de un grafo bipartito se definen dos grafos proyectados: el grafo proyección de actores (Figura 25) y el grafo de proyección de actividades (Figura 26). Para cada nodo se calcularon dos estadísticas asociadas a su grado y comunidad a través el software académico Gephi ® versión 0.9.2.

Con base en los resultados de la Tabla 15 y la Figura 26, se puede determinar que las alcaldías, las agencias de gestión de riesgos y desastres, la gobernación, las unidades de protección civil y la unidad de reparación y mantenimiento vial; son los actores que mayor incidencia o interacción poseen en las

actividades relacionadas con la restauración de disrupciones viales transitorias (Iloglu & Albert, 2020; Kim et al., 2018; Maya Duque et al., 2016), ya que poseen el mayor grado. De igual forma, se observa que los actores están agrupados en dos clústeres o comunidades (Figura 26). En el primer clúster se encuentran organismos como alcaldía, agencia de gestión de riesgos y desastres, militares, policía, unidad de protección civil, bomberos y empresas del sector privado; los cuales tienden a trabajar solidariamente en las actividades propias del proceso de reparación. En el segundo clúster, organismos como presidencia, gobernación, unidades de reparación y mantenimiento vial y centrales meteorológicas, sismológicas y ambientales, poseen conexiones o interrelaciones sólidas de trabajo.

Tabla 15. Grado y comunidad de los actores.

Nodo	Descripción	Grado	Comunidad
Alcaldia	Alcaldía	10	1
Agencia_RyD	Agencia de gestión de riesgos y desastres	10	1
Gobernacion	Gobernación	9	2
Militares	Militares	9	1
Unid_ProtCivil	Unidad de Protección Civil	9	1
Unid_Mtto_Vial	Unidad de reparación y mantenimiento vial	8	2
Presidencia	Presidencia	7	2
Cent_MeteoySism	Centrales meteorológicas, sismológicas y ambientales	7	2
Policia	Policía	7	1
Sector_Privado	Empresas del sector privado	7	1
Bomberos	Bomberos	7	1

Fuente: el autor.

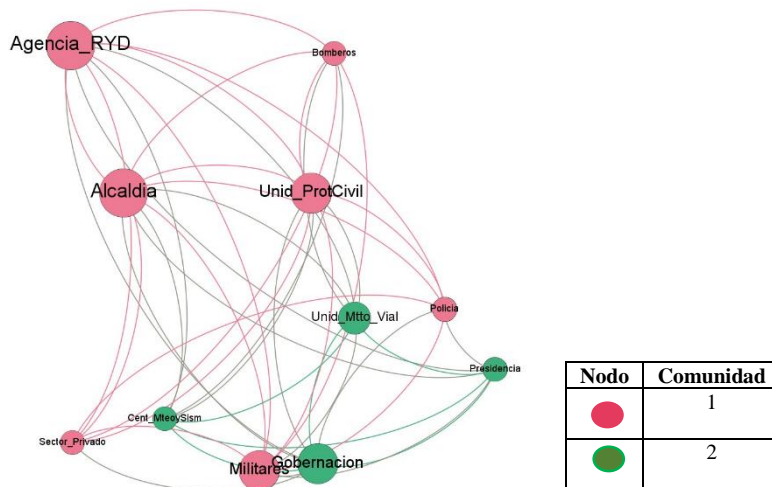


Figura 26. Grafo interrelación actores proceso de restauración de la malla vial organizado por comunidades y grado. El tamaño de cada nodo representa el grado de los actores.

Fuente: el autor.

A partir de los resultados de la Tabla 16 y la Figura 27, se puede observar que las actividades que conciernen al informe del estado de las vías afectadas, identificación zonas con limitaciones de acceso, la selección y secuenciación de reparación de las vías afectadas y la determinación de los tiempos de

accesibilidad y llegada de las cuadrillas en cada disrupción vial; son las actividades que poseen mayor interacción de organismos comunes (Tan et al., 2019; Wu & Wang, 2020), ya que poseen un mayor grado. Por otra parte, se observa que las actividades se agrupan en dos comunidades o clúster (Tabla 16).

Tabla 16. Grado y comunidad de las actividades.

Nodo	Descripción	Grado	Comunidad
Iden_EstVias	Informe estado de las vías afectadas	9	1
Iden_ZonLimAcc	Identificación zonas con limitaciones de acceso	9	1
Selec_Vias	Selección de vías a restaurar y orden de reparación vías dañadas	8	2
Tiempo_cuad	Tiempo llegada cuadrilla a enlace dañado	7	2
Tiempo_Rep	Tiempo de reparación de cada vía afectada	7	2
Disp_Rec	Ubicación y disponibilidad de recursos de reparación	7	2
Loc_Dep	Localización depósitos temporales para el despliegue de reparación	7	2
Tiempo_Acces	Tiempo accesibilidad nodo de demanda	6	2
Identif_Map	Identificación y mapeo de la región afectada	5	1
Inf_ZonasAfect	Informe zonas afectadas	5	1

Fuente: el autor.

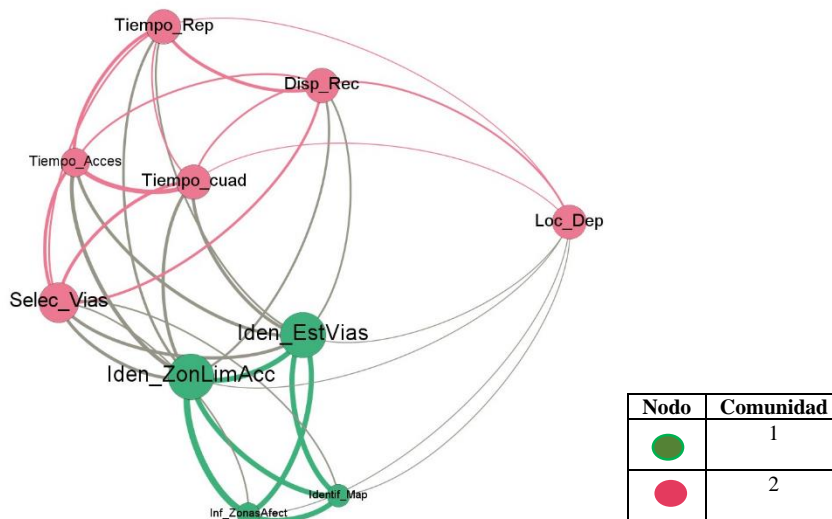


Figura 27. Grafo valorado interrelación actividades proceso de restauración objeto de estudio.

Fuente: el autor. El tamaño de cada nodo representa el grado de las actividades.

En el primer clúster se encuentran relacionadas con la identificación y mapeo de la región afectada, el estado de las vías afectadas y las zonas con limitaciones de acceso, las cuales poseen una interdependencia importante dentro del proceso restauración de disrupciones viales transitorias (Liu et al., 2020; Lu et al., 2016; Maya Duque et al., 2016). En el segundo clúster participan actividades asociadas con el análisis de disponibilidad de recursos de reparación, la selección de vías a restaurar y orden de reparación vías dañadas, la determinación de los tiempos de accesibilidad, llegada de las cuadrillas hacia cada disrupción vial y el tiempo de reparación de las vías (Maya Duque et al., 2016; Coco et al., 2020).

4.4. Recursos empleados en el proceso de restauración del acceso objeto de estudio

Durante la fase de respuesta, el proceso de restauración del acceso de la malla vial involucra dos tipos de recursos: cuadrillas de trabajadores y maquinaria (Rojas et al., 2023a; INVIAS, 2016). Una cuadrilla de trabajadores está apoyada con equipos de transporte y herramientas con el fin de retirar de las vías todos los escombros y otros materiales que generen obstrucción o interferencia en el flujo normal del tránsito. De igual forma, las cuadrillas de trabajadores poseen los materiales y herramientas (barras, picas, palas u otras herramientas de mano) necesarias para la atención o reparación transitoria de las vías afectadas por eventos disruptivos.

Finalmente, con relación a la maquinaria, existen tres tipos (Martínez, 2013). El primer tipo de máquina corresponde a las máquinas dedicadas a la excavación y movimiento de tierras. Dentro de este grupo se encuentran máquinas o equipos como: tractor, bulldozer, retroexcavadora, motoniveladora, pala mecánica y zanjadora. El segundo tipo se asocia a los equipos o máquinas de transporte horizontal de materiales. Dentro de este grupo se encuentran aquellas máquinas destinadas al acarreo de material. Entre este grupo se cuentan los camiones, cargadores frontal y vagones. El tercer y último grupo se relaciona con los equipos de compactación y terminación. Como máquinas de compactación se incluyen las siguientes: placas compactadoras vibratorias, compactadores neumáticos y vibrocompactadoras.

Una vez identificados las decisiones, actividades, actores y recursos que participan en el proceso de restauración de la malla vial, que concierne a la programación de operaciones de restauración del acceso, en el siguiente apartado se presenta la formulación de un modelo de programación lineal entera mixta que contiene los principales elementos de toma de decisión relacionados con la programación de operaciones de restauración de la malla vial. En el transcurso de este documento, se denominará a la programación de operaciones de restauración de la red vial como proceso de restauración del acceso.

4.5. Representación del proceso de restauración del acceso

El proceso de restauración del acceso se presenta en la Figura 28. Dado un conjunto de equipos de reparación nc y maquinaria cm con velocidad v que parten de un origen o depósito ($i=0$), la tarea consiste en programar los recursos de reparación a un conjunto de arcos o carreteras que requieren reparación j . La solución debe considerar la distancia de viaje entre arcos que requieren reparación dis_{ij} , los tiempos de reparación de las cuadrillas en cada arco tr_i , el tiempo que necesita la máquina para restaurar la carretera

afectada tm_{mi} y el tiempo esperado de culminación de la restauración de cada arco tc_i . Así como la proporción de trabajo manual al inicio y final en cada arco o vía a reparar dado por p_{mi} y p_{mf} respectivamente. Es necesario establecer la secuencia de visita de las cuadrillas entre arcos XR_{ij} , la secuencia de visita de cada tipo de máquina Y_{ijm} y los tiempos de llegada, espera y salida de los recursos de reparación en cada arco o vía afectada.

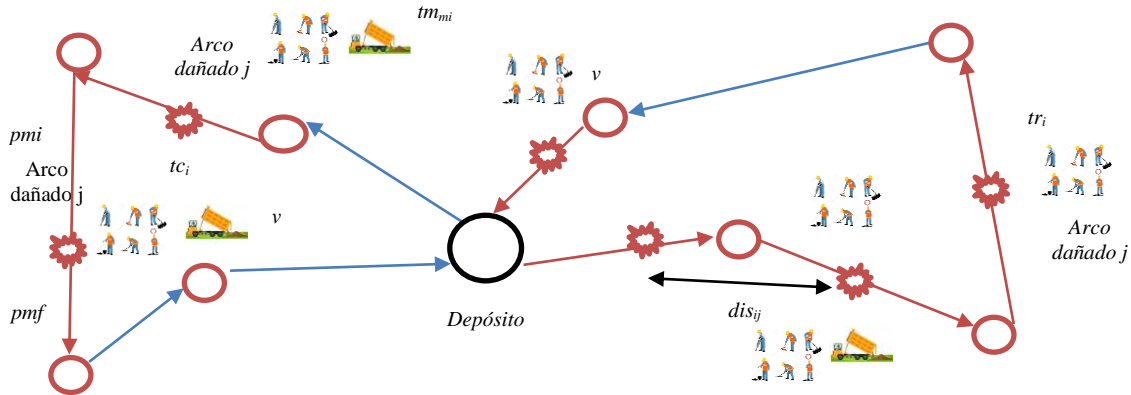


Figura 28. Representación general del proceso de restauración del acceso.
Fuente: el autor.

Con base en la descripción del proceso de restauración del acceso de la malla vial, a continuación, se presenta el desarrollo de un modelo matemático (Tabla 17) el cual contiene las características principales de dicho proceso contenido en el alcance de esta investigación.

Supuestos

Los supuestos considerados fueron los siguientes:

- Los tiempos de culminación de las labores de restauración y proporción de la vía en que inicia la reparación son determinísticos.
- Se asumió una matriz de distancias por carretera simétrica entre nodos.
- La condición o estado actual de las vías es conocida con base en una evaluación inicial de daños realizada sobre la infraestructura vial.
- Se consideró un origen o depósito inicial donde las cuadrillas y maquinaria inician y culminan su recorrido.
- Se asumió una cuadrilla homogénea y maquinaria limitadas con velocidad media constante.
- Los tiempos de reparación en cada arco dañado son conocidos.
- Los requerimientos de recursos de reparación en cada arco dañado son conocidos con base en una evaluación inicial de daños realizada sobre la infraestructura vial de parte de los organismos responsables de la evaluación de la situación actual y suministro de información una vez generado el evento disruptivo.

Tabla 17. Modelo matemático programación de operaciones de reparación de vías.

Conjuntos	
<p><i>NI</i>: conjunto de interrupciones viales transitorias o arcos a reparar indexado por i, j <i>M</i>: conjunto de tipos de máquina m <i>PRE</i> $\{NI, NI\}$: conjunto de parejas de arcos de la forma (p, s), donde el arco p se de reparar primero que el arco s <i>JUN</i> $\{M, M\}$: Conjunto de máquinas (m, n) donde si las máquinas se requieren ambas en un arco, deben estar juntas en el arco <i>SEP</i> $\{M, M\}$: Conjunto de máquinas (m, n) donde si las máquinas se requieren ambas en un arco no se deben traslapar y la máquina m se utiliza primero que la máquina n <i>NM</i> $\{M\}$: Conjunto de arcos que requieren la máquina m.</p>	
Parámetros	
<p>tr_i: tiempo mínimo o medio que dura la reparación de la interrupción en el arco i por la cuadrilla tc_i: tiempo esperado de culminación de las labores de restauración del arco i tm_{mi}: tiempo mínimo o medio que dura la reparación de la interrupción en el arco i por la máquina m nc: cantidad de cuadrillas disponibles cm: cantidad de máquinas por tipo $v1$: velocidad promedio en que viajan las cuadrillas $v2$: velocidad promedio en que viajan las máquinas pmi: proporción de trabajo preparativo y manual al inicio pmf: proporción de trabajo manual al final</p>	
Variables de decisión	
<p>$XR_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si una cuadrilla sale despues de reparar el arco, } i, \text{ hacia el arco, } j \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases}$ $Y_{ijm} = \begin{cases} 1 & \text{si la máquina } m \text{ sale despues de reparar el arco, } i, \text{ hacia el arco, } j \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases}$ TLR_i = tiempo en que la cuadrilla llega al lugar de inicio de la reparación del arco i TF_i = tiempo que la cuadrilla sale del lugar de finalización de la reparación de arco i ETC_i = tiempo espera cuadrilla en el arco i, por encima del tiempo mínimo o medio requerido TLM_{mi} = tiempo en que la máquina m llega al lugar de inicio de la reparación del arco i TFM_{mi} = tiempo máquina m sale del lugar de finalización de la reparación de arco i ETM_{mi} = tiempo espera máquina m en arco i, por encima del tiempo mínimo o medio requerido</p>	
Función objetivo	
$Z_{min} = \sum_{i \in NI} TF_i \quad (23)$	
Restricciones	
$\sum_{i \in NI/i \neq j} XR_{ij} = 1 \quad \forall j \in NI/j > 0 \quad (24)$	
$\sum_{i \in NM\{m\}/i \neq j} Y_{ijm} = 1 \quad \forall m \in M, j \in NM\{m\}/j > 0 \quad (25)$	
$\sum_{i \in NI/i \neq h} XR_{ih} = \sum_{j \in NI/j \neq h} XR_{hj} \quad \forall h \in NI \quad (26)$	
$\sum_{i \in NM\{m\}/i \neq h} Y_{ihm} = \sum_{j \in NM\{m\}/j \neq h} Y_{hjm} \quad \forall m \in M, h \in NM\{m\} \quad (27)$	

Restricciones

$$\sum_{j \in NI | j > 0} XR_{0j} \leq nc \quad (28)$$

$$TLR_j \leq TLR_i + XR_{ij} * tr_i + XR_{ij} * \frac{dis_{ij}}{v1} + ETC_i + M * (1 - XR_{ij}) \quad \forall i \in NI, j \in NI | j > 0, i > 0, j <> i \quad (29)$$

$$TLR_j \geq TLR_i + XR_{ij} * tr_i + XR_{ij} * \frac{dis_{ij}}{v1} + ETC_i - M * (1 - XR_{ij}) \quad \forall i \in NI, j \in NI | j > 0, i > 0, j <> i \quad (30)$$

$$TLM_{mj} \leq TLM_{mi} + Y_{ijm} * tm_{mi} + Y_{ijm} * \frac{dis_{ij}}{v2} + ETM_{mi} + M * (1 - Y_{ijm}) \quad \forall m \in M, i \in NM\{m\}, j > 0, i > 0, j <> i \quad (31)$$

$$TLM_{mj} \geq TLM_{mi} + Y_{ijm} * tm_{mi} + Y_{ijm} * \frac{dis_{ij}}{v2} + ETM_{mi} - M * (1 - Y_{ijm}) \quad \forall m \in M, i \in NM\{m\}, j > 0, i > 0, j <> i \quad (32)$$

$$TLR_j \geq XR_{0j} * \frac{dis_{0j}}{v1} \quad \forall j \in NI | j > 0 \quad (33)$$

$$TLM_{mj} \geq Y_{0jm} * \frac{dis_{0j}}{v2} \quad \forall m \in M, j \in NM\{m\} | j > 0 \quad (34)$$

$$XR_{ij} + XR_{ji} \leq 1 \quad \forall i \in NI, j \in NI | j > 0, i > 0, j <> i \quad (35)$$

$$Y_{ijm} + Y_{jim} \leq 1 \quad \forall m \in M, i \in NM\{m\}, j \in NM\{m\} | j > 0, i > 0, j <> i \quad (36)$$

$$\sum_{j \in NI | j > 0} XR_{0j} = \sum_{i \in NI | i > 0} XR_{i0} \quad (37)$$

$$TF_i = TLR_i + tr_i + ETC_i \quad \forall i \in NI, |i| > 0 \quad (38)$$

$$TFM_{mi} = TLM_{mi} + tm_{mi} + ETM_{mi} \quad \forall m \in M, i \in NM\{m\}, i > 0 \quad (39)$$

$$TLR_j \geq TF_i \quad \forall (i, j) \in PRE | i > 0, j > 0, j <> i \quad (40)$$

$$TLR_i + pmi * tr_i \leq TLM_{mi} \quad \forall m \in M, i \in NM\{m\}, i > 0 \quad (41)$$

$$TF_i \geq TFM_{mi} + pmf * tr_i \quad \forall m \in M, i \in NM\{m\}, i > 0 \quad (42)$$

$$TLM_{mi} = TLM_{ni} \quad \forall (m, n) \in JUN, i \in (NM\{m\} \cap NM\{n\}) | i > 0 \quad (43)$$

$$TFM_{mi} \leq TLM_{ni} \quad \forall (m, n) \in SEP, i \in (NM\{m\} \cap NM\{n\}) | i > 0 \quad (44)$$

$$\sum_{i \in NM\{m\}, |i| > 0} Y_{0im} \leq cm \quad \forall m \in M \quad (45)$$

$$TF_i \leq tc_i \quad \forall i \in N, |i| > 0 \quad (46)$$

$$XR_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in NI \quad (47)$$

$$Y_{ijm} \in \{0,1\} \quad \forall m \in M, i \in NM\{m\}, j \in NM\{m\} | j <> i \quad (48)$$

$$TL_i, TF_i, ETC_i \geq 0 \quad \forall i \in NI \quad (49)$$

$$TLM_{mi}, TFM_{mi} \geq 0 \quad \forall m \in M, i \in NM\{m\} \quad (50)$$

Fuente: el autor.

La ecuación (23) representa la función objetivo que minimiza el tiempo de finalización de las cuadrillas de reparación. La ecuación (24) asegura que todo arco debe ser visitado una vez por una cuadrilla. La ecuación (25) garantiza que todo requerimiento de máquina debe ser atendido. La ecuación (26) garantiza que si una cuadrilla llega a un punto o arco de reparación debe salir de este. La ecuación (27) garantiza que si una máquina llega a un arco de reparación debe salir de este. La restricción (28) limita el número máximo de cuadrillas a asignar con base en la disponibilidad. Las restricciones (29) y (30) determinan los tiempos de llegada de las cuadrillas a los arcos de reparación. Las restricciones (31) y (32) determinan los tiempos de llegada de las máquinas según cada tipo a los arcos de reparación. La restricción (33) determina el tiempo de llegada de la cuadrilla al primer arco de reparación. La restricción (34) determina el tiempo de llegada de la máquina al primer arco de reparación. Las restricciones (35) y (36) garantizan la exclusión de arcos simétricos para cuadrillas y las máquinas respectivamente, por ende, contribuye a la no formación de subtours. La restricción (37) garantiza que el número de cuadrillas que sale al inicio de sus recorridos es igual al número cuadrillas que entra al finalizar sus recorridos. Las ecuaciones (38) y (39) determinan los tiempos de finalización de las cuadrillas y las máquinas respectivamente, el cual es determinado por el tiempo de llegada, el tiempo de reparación u operación y el tiempo de espera del recurso. La restricción (40) asegura que el tiempo de llegada de la cuadrilla al arco j sea mayor o igual al tiempo de finalización de la reparación en el arco anterior i , es decir, especifica la precedencia entre nodos de reparación. La restricción (41) garantiza que el tiempo de llegada de la máquina tipo m al arco i sea mayor o igual al tiempo de llegada de la cuadrilla al arco i y al tiempo de preparación de la cuadrilla, el cual este último se determinó como una proporción del tiempo estimado de reparación del arco i , es decir, establece la precedencia entre cuadrillas y máquinas, donde las máquinas deben llegar después de que la cuadrilla se ha instalado. La restricción (42) asegura que el tiempo de finalización de la cuadrilla en el arco i sea mayor o igual al tiempo de finalización de la máquina tipo m en dicho arco y al tiempo de acondicionamiento de la cuadrilla al final de la operación, calculado este último como una proporción del tiempo estimado de reparación, es decir, garantiza que la cuadrilla debe salir después que las máquinas hayan concluido su operación. La restricción (43) garantiza que las máquinas que deben estar juntas en un arco de reparación i que requiera esa condición, lleguen al arco al mismo tiempo. La restricción (44) garantiza la precedencia entre máquinas, es decir, determina que el tiempo de finalización de la máquina m debe ser menor o igual al tiempo de llegada de la máquina n en el arco i , considerando que la máquina m se utiliza primero que la máquina n . La restricción (45) determina la cantidad de máquinas disponibles según su tipo. La restricción (46) garantiza que el tiempo de finalización de las labores de reparación sea mayor o igual al tiempo esperado de culminación de dichas labores, es decir, al tiempo esperado en que la vía estará accesible. Finalmente, las restricciones (47 - 50) representan la condición de No negatividad y lógica de las variables de decisión.

4.5.1. Descripción del contexto geográfico particular.

Con el fin de validar el modelo matemático formulado, el contexto geográfico se enmarca en el municipio de Roldanillo ubicado en el norte del departamento de Valle del Cauca, Colombia; cuya información fue obtenida a partir de consulta de bases de datos de la UNGRD y entrevista semiestructurada realizada a algunos de los actores del CMGRD (Anexo 4). De acuerdo con datos registrados por la UNGRD (2021), en el municipio de Roldanillo se tiene reporte de por lo menos 36 casos de desastres naturales entre los años 2000-2021, de los cuales las inundaciones abarcan el mayor porcentaje de ocurrencia, y generan al menos cinco (5) interrupciones viales transitorias que se presentan con mayor regularidad según información del CMGRD (Figura 28). Además, considerando que el preposicionamiento de recursos de reparación se realiza en cercanías a la alcaldía municipal, el comité municipal de atención de riesgos y desastres (CMGRD) establece como centro logístico o depósito la alcaldía municipal, donde se despliegan los recursos de reparación. Una cuadrilla de reparación está constituida por cuatro (4) trabajadores aproximadamente que poseen las herramientas y materiales necesarios para la operación de reparación. En este contexto geográfico referente se consideraron las cinco (5) interrupciones viales transitorias que se presentan con mayor regularidad según información del CMGRD (Figura 28).

Para el proceso de restauración del acceso, el municipio objeto de estudio posee dos (2) cuadrillas de reparación disponibles y emplean una velocidad media de 36 kilómetros por hora en su desplazamiento. Por otra parte, se consideran cuatro (4) tipos de maquinaria caracterizadas por bulldozer (máquina 1), retroexcavadoras (máquina 2), vibrocompactadores (máquina 3) y volquetas (máquina 4); donde se posee disponible dos (2) ejemplares de cada tipo y emplean una velocidad media de 24 kilómetros por hora en su desplazamiento. Por otro lado, con base en la información suministrada por los actores responsables del proceso de restauración del acceso, se pudo establecer que las vías a reparar 1 – 3 y 2 – 4, poseen relaciones de precedencia, dado que para poder reparar la vía o arco 3, antes es necesario reparar el arco 1, así mismo para reparar la vía 4 antes hay que reparar la vía 2 (Figura 29). También, partiendo de una evaluación inicial de las vías realizada por los actores responsables del proceso de restauración del acceso, se determinaron los requerimientos de maquinaria para cada vía a reparar (Tabla 18).

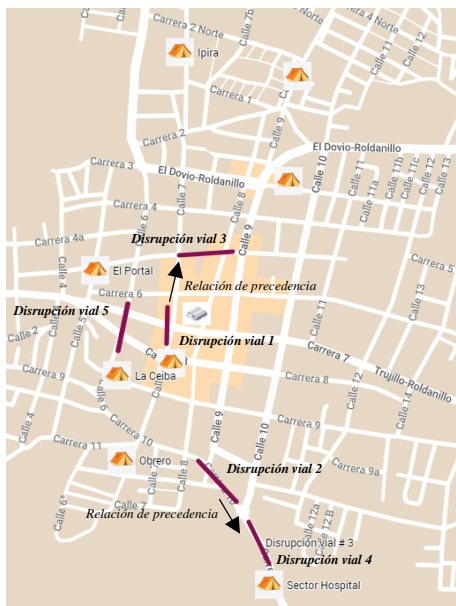


Figura 29. Mapas de vías afectadas o disrupciones viales en el municipio de Roldanillo.

Fuente: Adaptado de CMGR Roldanillo (2020).

Tabla 18. Tipo de maquinaria requerida para restauración de la malla vial.

Tipo de máquina requerida	Disrupción vial transitoria (arco a reparar)
Bulldozer (máquina 1)	1, 3, 4, 5
Retroexcavadora (máquina 2)	1, 2, 4
Vibrocompactador (máquina 3)	2, 3, 5
Volqueta (máquina 4)	2, 4

Fuente: CMGR Roldanillo (2020).

Además, en el proceso de restauración del acceso, por las características de la operación de reparación, es necesario que algunas máquinas lleguen juntas o haya una relación de precedencia entre éstas hacia el arco sujeto a reparación. La retroexcavadora y volqueta es necesario que lleguen al mismo tiempo al arco de reparación que requiera estos recursos. Por otro lado, el bulldozer y el vibrocompactador es necesario que lleguen de forma separada o haya una relación de precedencia entre éstas, dado que las características del arco a reparar así lo requieren. A partir del cálculo de la distancia euclidiana entre cada uno de los puntos compuestos por el centro de acopio localizado en cercanías a la Alcaldía municipal y los puntos o sitios de reparación, se determinó la matriz de distancias (Tabla 19) con base en los centroides de dichos puntos (Rodríguez et al., 2022).

Tabla 19. Matriz de distancias entre disrupciones viales (puntos de reparación).

Punto	x (kms)	y (kms)	Orígenes	Destinos					
				0	1	2	3	4	5
Alcaldía (0)	-0.8	-7.1	0	0	1.7	1.1	1.5	0.55	1
Disrupción (1)	-15.2	-5.9	1	1.7	0	2.8	0.45	3	2.1
Disrupción (2)	-4.5	5.2	2	1.1	2.8	0	2.4	0.85	1.4
Disrupción (3)	-2	4.8	3	1.5	0.45	2.4	0	2.3	1.4
Disrupción (4)	0.2	-14.8	4	0.55	3	0.85	2.3	0	1.5
Disrupción (5)	-25.2	-5.1	5	1	2.1	1.4	1.4	1.5	0

Fuente: Adaptado de Rodríguez et al., (2022).

Con base en los registros históricos de los organismos que integran el comité municipal de atención de riesgos y desastres, fue posible determinar el tiempo esperado de culminación de las labores de reparación en cada vía y tener una estimación de los tiempos de reparación que invierte cada cuadrilla y los tiempos de operación de cada máquina que invierte sobre cada arco o punto de reparación (Tabla 20).

Tabla 20. Información del tiempo esperado para la culminación de la reparación de las vías afectadas y estimación de los tiempos promedio de reparación y operación.

Disrupción vial (punto de reparación)	Tiempo esperado culminación reparación (min) [tc _i]	Tiempo promedio de reparación de la cuadrilla (min) [tr _i]	Tiempo promedio de operación según tipo de máquina (min) [tm _{mi}]			
			Máquina 1	Máquina 2	Máquina 3	Máquina 4
1	114	31	25	20	-	-
2	113	16	-	15	10	20
3	118	19	10	-	15	-
4	114	36	10	10	-	15
5	100	57	20	-	10	-

Fuente: Adaptado de CMGR Roldanillo (2020).

4.5.2. Resultados del modelo matemático

Para la ejecución del modelo se empleó el lenguaje de programación matemática AMPL y el solver CPLEX (Anexo 6), disponible en el entorno de desarrollo AMPL IDE versión profesional, por medio de un ordenador con las siguientes especificaciones: Intel® Core™ i7-10750H (6C / 12T, 2,6 / 5,0GHz, 12MB), 32 GB de RAM y 1 TB de disco duro. Se generó un total de 123 variables de decisión, de las cuales 71 fueron binarias y 52 continuas. Además, se obtuvieron 196 restricciones, 59 de igualdad y 137 de desigualdad, generando un tiempo de solución de 1 segundo con 5 centésimas.

4.5.3. Programación de recursos de reparación

A partir de los datos de entrada, el modelo generó dos secuencias de reparación, con números asignados del 1 al 5 para cada uno de los cinco arcos o interrupciones transitorias de carretera para expresar las rutas como secuencias fácilmente interpretables. La solución indica la utilización del 100% de los recursos de reparación disponibles. Para ilustrar los resultados del modelo, se crearon diagramas de Gantt para cada una de las cuadrillas y tipos de máquina, mostrando la hora de llegada, la duración y la finalización de la reparación de cada arco o ruta. La Figura 30 representa el resultado del modelo, cuyos tiempos están dados en minutos.

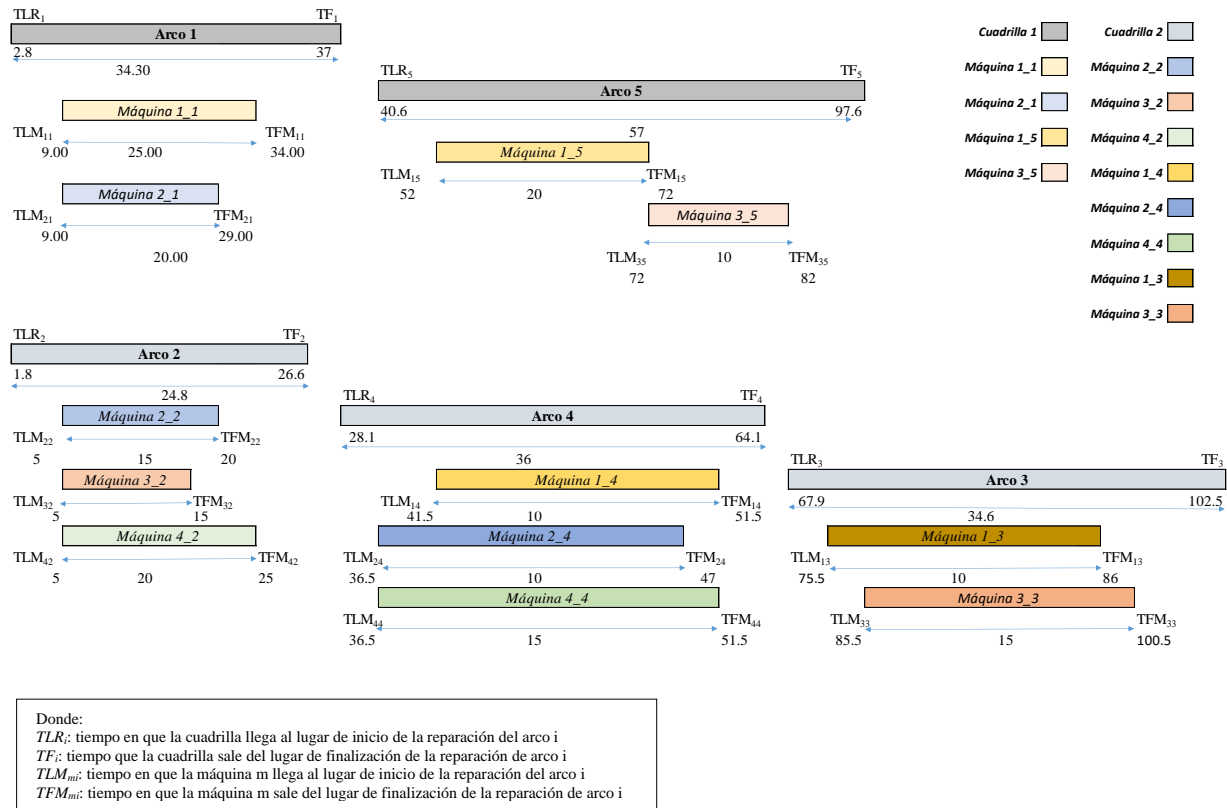


Figura 30. Diagrama de Gantt secuencia de reparación de los recursos.

Fuente: el autor.

Los resultados presentados en las Tablas 21 – 22 y Figura 30 indican que la disponibilidad y la interdependencia de la maquinaria pueden influir en los tiempos de inicio y finalización de las cuadrillas de reparación de las carreteras afectadas, dado que, para facilitar los trabajos de restauración en algunas carreteras, se requiere de maquinaria específica, donde los tiempos de arribo de las máquinas están condicionados a los tiempos de llegada de las cuadrillas (Figura 30). Por ejemplo, en algunos casos, la reparación de un arco dañado requiere la presencia simultánea de maquinaria, como es el caso de los arcos 1, 2 y 4 (Figura 30), lo cual se puede evidenciar claramente en los tiempos de llegada de las máquinas en dichos arcos o vías, dado que son iguales. Por ejemplo, en el arco 1 se requiere la presencia simultánea de las máquinas 1 y 2, por lo tanto, el tiempo de llegada de ambas máquinas es igual, en este caso 5 minutos.

Para otros arcos, algunas máquinas poseen condiciones de precedencia, es decir, para algunas vías, se requiere primero la llegada de un tipo de máquina para acondicionar la vía a reparar y luego requiere la presencia de otro tipo de máquina para la culminación de la operación, como es el caso de los arcos 3, 4 y 5 (Figura 30). Por ejemplo, en el arco 3 se puede evidenciar esta condición de precedencia en los tiempos de llegada de las máquinas 1 y 3 dado que son diferentes, en este caso se requiere primero la llegada de la máquina 1 a los 75.5 minutos y luego la llegada de la máquina 3 a los 85.5 minutos.

Debido a la importancia y conexión de ciertas rutas, algunas de estas deben repararse primero, para luego poder facilitar la reparación de otros arcos a posteriori, lo que da lugar a relaciones de precedencia entre vías sujetas a reparación, como se evidencia en los arcos 1 - 3 y 2 - 4 (Figura 30). Por otra parte, nótese que el tiempo de llegada de las cuadrillas es inferior al tiempo de llegada de las máquinas requeridas, dado que en condiciones reales de operación en el proceso de restauración de la malla vial, se requiere un trabajo de preparación manual al inicio de parte de las cuadrillas. Además, nótese que los tiempos de salida de las cuadrillas al final de la restauración de cada vía son superiores a los tiempos de salida de las máquinas en cada arco, dado que, en condiciones reales de operación, una vez terminado cada máquina su labor, la cuadrilla correspondiente requiere realizar al final un trabajo manual de culminación de la vía restaurada (Figura 30).

Tabla 21. Descripción de la secuencia de reparación de las cuadrillas.

Cuadrilla # 1	Sec.	1	5	Cuadrilla # 2	Sec.	2	4	3
	¹ TLRi	2.8	40.6		¹ TLRi	1.8	28.1	67.9
	² tri	31	57		² tri	16	36	19
	³ ETCi	3.3	0		³ ETCi	8.8	0	15.6
	⁴ TFi	37.1	97.6		⁴ TFi	26.6	64.1	102.5
	⁵ pmi	0.2	0.2		⁵ pmi	0.2	0.2	0.2
	⁶ pmf	0.1	0.1		⁶ pmf	0.1	0.1	0.1
	⁷ tci	114	100		⁷ tci	113	114	118
Tiempo máximo de reparación (Makespan) = 102.5 Min.								
Tiempo total de reparación = 327.9 Min.								
Tiempo medio de reparación = 65.58 Min.								
Duración de la secuencia de reparación cuadrilla # 1 = 94.8 Min.								
Duración de la secuencia de reparación cuadrilla # 2 = 100.7 Min.								
Tiempo de inicio de la ruta (Min después de que el desastre es reportado) cuadrilla # 1 = 2.8 Min.								
Tiempo de inicio de la ruta (Min después de que el desastre es reportado) cuadrilla # 2 = 1.8 Min.								
Tiempo medio de espera intra-reparaciones = 2.93 Min.								
¹ tiempo en que la cuadrilla llega al lugar de inicio de la reparación del arco i ² tiempo promedio que dura la reparación de la disrupción en el arco i por la cuadrilla ³ tiempo de espera de la cuadrilla en el arco i por encima del tiempo mínimo requerido ⁴ tiempo en que la cuadrilla sale del lugar de finalización de la reparación de arco i ⁵ proporción de trabajo preparativo y manual al inicio ⁶ proporción de trabajo manual al final ⁷ tiempo esperado de culminación de las labores de restauración del arco								

Fuente: el autor.

El tiempo de finalización de las reparaciones de carreteras realizadas por las cuadrillas de reparación depende de los tiempos de llegada y finalización de la maquinaria necesaria, que se basa en las características de la vía dañada que se va a reparar. Por otra parte, se pudo determinar cuáles medidas de rendimiento, como el tiempo máximo de finalización de las reparaciones (102.5 minutos) y el tiempo medio de finalización de las reparaciones de carreteras (65.58 minutos), son afectadas por la disponibilidad de recursos y el funcionamiento sincronizado que debe existir entre las cuadrillas y la maquinaria utilizada. Adicionalmente, se determinó que el tiempo máximo (100.5 minutos) y medio de operación de la maquinaria (51.04 minutos) se ven afectados por las relaciones de precedencia y simultaneidad existentes según las condiciones del arco a reparar.

Tabla 22. Descripción de la secuencia según tipo de máquina.

Máq.	Máquina Tipo 1		Máquina Tipo 2		Máquina Tipo 3		Máquina Tipo 4
	Arco 1	Arco 4	Arco 1	Arco 4	Arco 2		Arco 2
¹ TLMmi	9	41.5	9	36.5	5		5
² tmmi	25	10	20	10	10		20
³ ETMmi	0	0	0	0	0		0
⁴ TFMmi	34	51.5	29	46.5	15		25
# 2	Arco 5	Arco 3	Arco 2		Arco 5	Arco 3	Arco 4
¹ TLMmi	52	75.5	5		72	85.5	36.5
² tmmi	20	10	15		10	15	15
³ ETMmi	0	0	0		0	0	0
⁴ TFMmi	72	85.5	20		82	100.5	51.5
Tiempo máximo de operación = 100.5 Min.							
Tiempo medio de operación = 51.04 Min.							
Duración secuencia de reparación Máquina # 1_1 = 42.5 Min.							
Duración secuencia de reparación Máquina # 1_2 = 33.5 Min.							
Duración secuencia de reparación Máquina # 2_1 = 15.0 Min.							
Duración secuencia de reparación Máquina # 2_2 = 54.63 Min.							
Duración secuencia de reparación Máquina # 3_1 = 10.0 Min.							
Duración secuencia de reparación Máquina # 3_2 = 28.5 Min.							
Duración secuencia de reparación Máquina # 4_1 = 20.0 Min.							
Duración secuencia de reparación Máquina # 4_2 = 15.0 Min.							
¹ tiempo en que la máquina m llega al lugar de inicio de la reparación del arco							
² tiempo mínimo que dura la reparación de la disrupción en el arco i por la máquina m							
³ tiempo de espera de la máquina m en el arco i por encima del tiempo mínimo o medio requerido							
⁴ tiempo en el que la máquina m sale del lugar de finalización de la reparación de arco i							

Fuente: el autor.

Se pudo inferir que la duración de la secuencia de reparación de cada cuadrilla, el tiempo medio de espera intra-reparaciones, los tiempos de inicio de cada ruta y la duración de la operación de cada máquina, están condicionados a las características intrínsecas del ambiente de reparación como son la cantidad de recursos disponibles, las relaciones de precedencia y simultaneidad requeridas de cada tipo de máquina según las condiciones de las vías a reparar. Se concluyó que la finalización de las operaciones de reparación posee una relación importante con el tiempo esperado de culminación de las vías, para el despliegue de la distribución de ayuda y demás actividades de asistencia humanitaria hacia la población afectada.

4.5.4. Análisis de escenarios

Se realizó un análisis de escenarios para determinar el impacto de las variaciones en el número de cuadrillas y tipos de máquinas disponibles, los tiempos de restauración de las carreteras y los tiempos esperados de finalización de la reparación de cada arco dañado sobre el tiempo total de reparación y el tiempo máximo de reparación (makespan).

Escenario # 1. Variación de la cantidad de cuadrillas disponibles

En este escenario se analizó el impacto de la cantidad de cuadrillas disponibles sobre el tiempo total de finalización de la reparación o función de desempeño del modelo, la duración y secuencia de reparación

(Tabla 23). En el marco del contexto geográfico referente, los resultados indicaron que, si el número de cuadrillas disponibles era igual o superior a 5, no se producía ningún efecto en el tiempo total de finalización de la reparación, en el makespan y la secuencia de las operaciones de reparación. Sin embargo, si el número de cuadrillas disponibles era inferior a 5, la función de desempeño se afecta de forma desfavorable, lo que se traduce en tiempos de finalización de reparación más largos (Figura 31). Lo anterior significa que, el incremento en la cantidad de cuadrillas de reparación no necesariamente garantiza menores tiempos de finalización de las operaciones de reparación y en el makespan, si no, una adecuada programación de dichos recursos.

Tabla 23. Análisis de la cantidad de cuadrillas disponibles.

Número de cuadrillas	Tiempo total de finalización de la reparación (Min)	Makespan (Min)	Secuencia
2 (Actual)	327.90	102.4	1 - 5 / 2 - 4 - 3
3	255.10	68.6	1 - 3 / 2 - 4 / 5
4	253.70	68.6	1 - 3 / 2 / 4 / 5
5	252.90	67.8	1 / 2 / 3 / 4 / 5
6	252.90	67.8	1 / 2 / 3 / 4 / 5
7	252.90	67.8	1 / 2 / 3 / 4 / 5
8	252.90	67.8	1 / 2 / 3 / 4 / 5
9	252.90	67.8	1 / 2 / 3 / 4 / 5
10	252.90	67.8	1 / 2 / 3 / 4 / 5
11	252.90	67.8	1 / 2 / 3 / 4 / 5
12	252.90	67.8	1 / 2 / 3 / 4 / 5
13	252.90	67.8	1 / 2 / 3 / 4 / 5
14	252.90	67.8	1 / 2 / 3 / 4 / 5
15	252.90	67.8	1 / 2 / 3 / 4 / 5

Fuente: el autor.

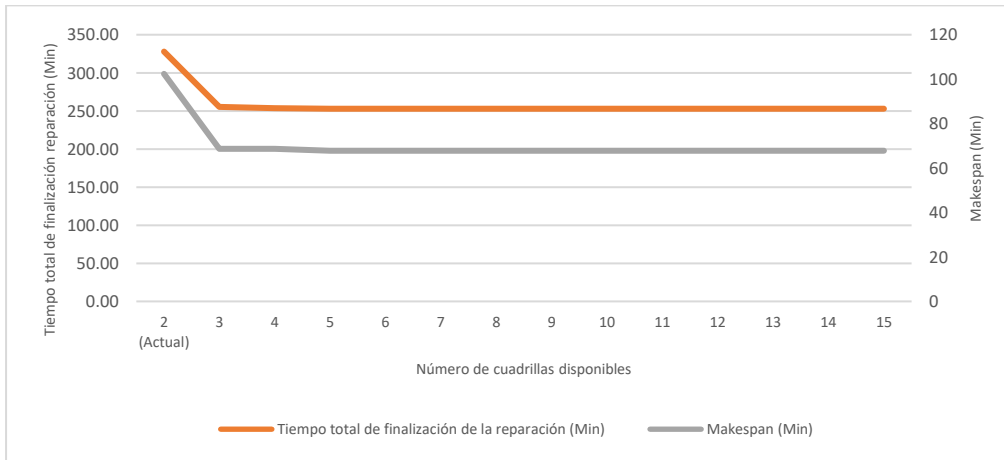


Figura 31. Análisis de la variación del número de cuadrillas disponibles.

Fuente: el autor.

Escenario # 2. Variación del número de máquinas disponibles por tipo.

En este escenario se analizó el impacto de la variación del número de máquinas disponibles según su tipo en el tiempo total de finalización de la reparación, el makespan y la secuencia de reparación (Tabla 24). Los resultados determinaron que, si el número de máquinas disponibles era de 3 o más, no se producía ningún efecto en el valor de la función de desempeño del modelo y el tiempo máximo de finalización de

las operaciones de reparación. Sin embargo, si el número de tipos de máquinas disponibles era inferior a 3, la función de desempeño se afecta desfavorablemente, lo que se traduce en tiempos de reparación prolongados (Figura 32). Para el contexto geográfico analizado, pudo deducirse que invertir en más de 3 máquinas de cada tipo es innecesario para agilizar los trabajos de reparación, es decir, se sugiere a los actores responsables del proceso de atención de interrupciones viales transitorias hacer una mejor gestión y programación de estos recursos con el fin de contribuir en mejorar el tiempo total de finalización de la reparación y en el makespan.

Tabla 24. Análisis del número de máquinas disponibles según su tipo (escenario 2).

Cantidad tipos de máquina	Tiempo total finalización reparación (Min)	Makespan (Min)	Secuencia
2 (Actual)	327.90	102.4	1 - 5 / 2 - 4 - 3
3	324.00	98.6	1 - 5 / 2 - 4 - 3
4	324.00	98.6	1 - 5 / 2 - 4 - 3
5	324.00	98.6	1 - 5 / 2 - 4 - 3
6	324.00	98.6	1 - 5 / 2 - 4 - 3
7	324.00	98.6	1 - 5 / 2 - 4 - 3
8	324.00	98.6	1 - 5 / 2 - 4 - 3
9	324.00	98.6	1 - 5 / 2 - 4 - 3
10	324.00	98.6	1 - 5 / 2 - 4 - 3
11	324.00	98.6	1 - 5 / 2 - 4 - 3
12	324.00	98.6	1 - 5 / 2 - 4 - 3
13	324.00	98.6	1 - 5 / 2 - 4 - 3
14	324.00	98.6	1 - 5 / 2 - 4 - 3
15	324.00	98.6	1 - 5 / 2 - 4 - 3

Fuente: el autor.

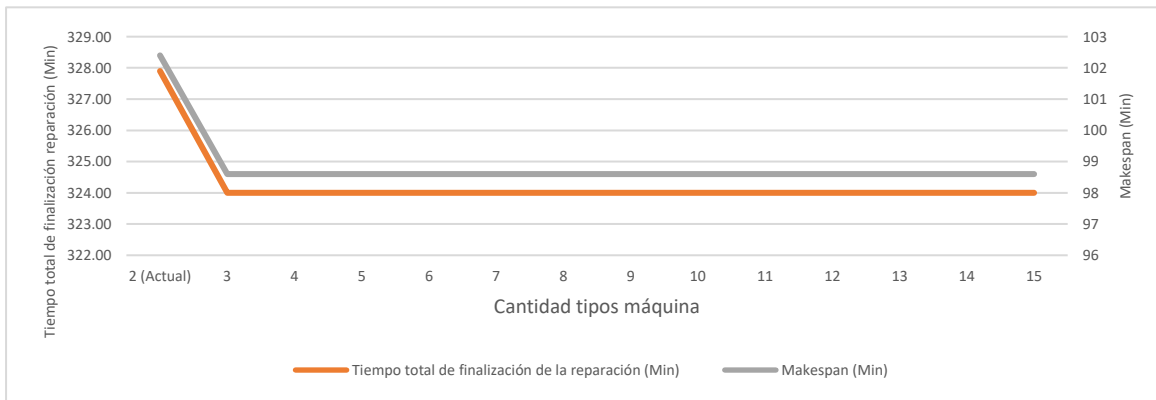


Figura 32. Análisis de la variación del número de máquinas disponibles según tipo (escenario 2). Fuente: el autor.

Escenario # 3. Variación de los tiempos de reparación de las cuadrillas.

En este escenario se analizó el impacto de la variación de los tiempos de reparación de las tripulaciones, sobre el tiempo total de finalización de la reparación (Figura 33), el makespan (Figura 34) y la secuencia de reparación (Tabla 25). Se utilizó una simulación Monte Carlo para generar escenarios y evaluar la condición de las interrupciones transitorias de las vías en función del tiempo de reparación requerido para recuperar la accesibilidad de las vías. Los tiempos de reparación se consideraron estocásticos

a partir de una distribución uniforme $U(a, b)$, cuyos parámetros se establecieron a partir de los registros históricos de reparación de carreteras de los organismos responsables.

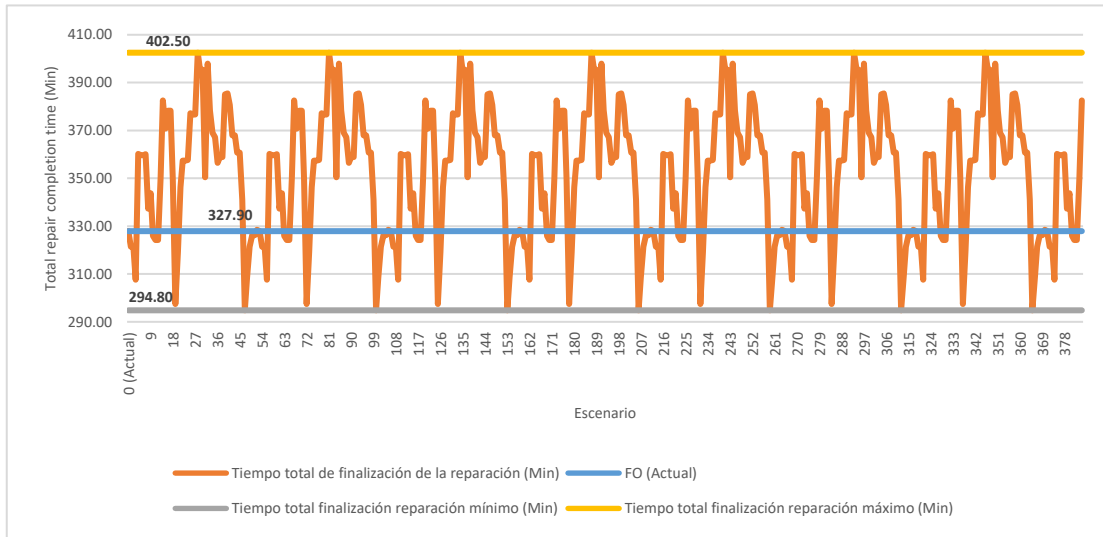


Figura 33. Análisis de variación de los tiempos de reparación de las cuadrillas en el tiempo total finalización de reparación (escenario 3).

Fuente: el autor.

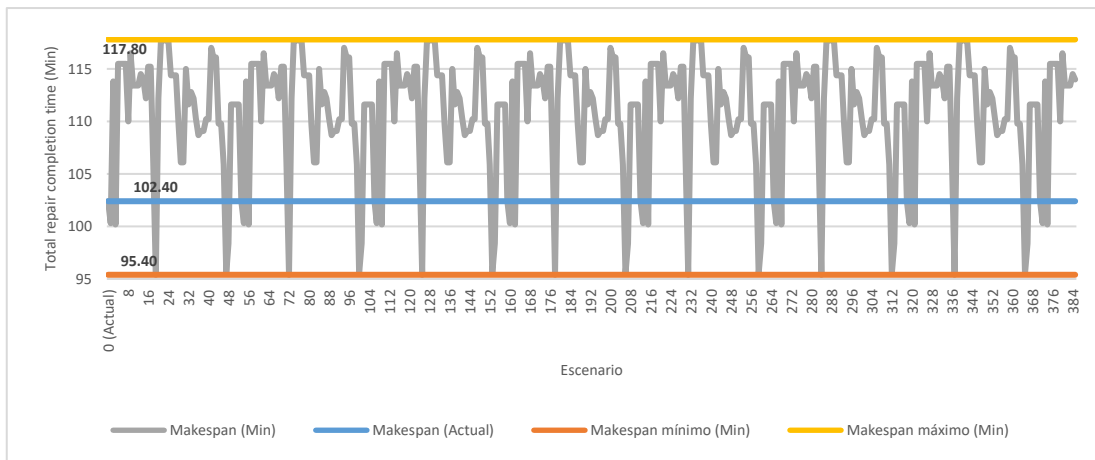


Figura 34. Análisis de variación de los tiempos de reparación de las cuadrillas en el makespan (escenario 3).

Fuente: el autor.

Tabla 25. Análisis de las secuencias de reparación según la variación de tiempos de reparación de las cuadrillas.

Secuencia	Descripción secuencia	Frecuencia Absoluta	Frecuencia Relativa
Secuencia # 1	1 - 5 / 2 - 4 - 3	286.00	74.3%
Secuencia # 2	2 - 1 - 3 / 5 - 4	57.00	14.8%
Secuencia # 3	1 - 3 / 2 - 5 - 4	42.00	10.9%
Total		385.00	100.0%

Fuente: el autor.

Se evaluó un total de 385 escenarios, cuyos resultados mostraron que, considerando la variabilidad en los tiempos de reparación de cada arco dañado o interrupción vial transitoria entre 16 y 57 minutos según

los registros históricos del CMGRD, se pueden alcanzar reducciones entre 0.5% y el 10.1% en el tiempo total de finalización de la reparación en comparación con el escenario actual, representando el 25.2% (37 de 385) del total de escenarios. Sin embargo, esta variabilidad también generó escenarios con incrementos entre 2.1% y el 6.8% en el tiempo total de finalización en comparación con el escenario actual, representando el 74.8% (288 de 385) del total de escenarios (Figura 32). También se pudo inferir que el tiempo total de finalización de la reparación estuvo contenido en un rango de 95.4 a 117.8 minutos. Se pudo determinar que, del total de escenarios contemplados, se obtuvieron 37 resultados donde el makespan de las operaciones de reparación, fue inferior a 102.40 minutos que es el valor del tiempo máximo de finalización de las reparaciones en el escenario o instancia actual, alcanzando reducciones entre el 0.2% y 22.8%. De igual forma, se encontraron 348 escenarios donde el makespan fue mayor o igual al valor actual, donde se observaron incrementos entre el 3.4% y 15% (Figura 33). Además, se pudo identificar que el makespan de la reparación estuvo contenido en un rango de 294.8 a 402.5 minutos. Como resultado se encontró el 74.3% de los escenarios se obtuvo la misma secuencia de reparación con relación al escenario actual, es decir, considerando la variabilidad en los tiempos de reparación de las cuadrillas y la cantidad disponible de las mismas, la secuencia inicial de reparación no cambió en la mayor parte de los casos. Sin embargo, hubo un 25.7% de los casos donde la secuencia de reparación cambió como resultado de la variabilidad en los tiempos de reparación de las cuadrillas (Tabla 25).

Escenario # 4. Variación de los tiempos de operación de las máquinas.

En este escenario, se analizó y evaluó el impacto en la variación de los tiempos de operación de los tipos de máquinas, sobre el tiempo total de finalización de la reparación (Figura 34), el makespan (Figura 35) y secuencia de reparación. Se generó un total de 385 escenarios, donde se utilizó una simulación Monte Carlo para evaluar el tiempo de operación requerido para recuperar la accesibilidad de las vías. Los tiempos de operación se consideraron estocásticos basados en una distribución uniforme $U(a, b)$ cuyos parámetros se establecieron utilizando registros históricos de reparación de carreteras de los organismos responsables de la operación de reparación de carreteras. Los resultados mostraron que, considerando la variabilidad en los tiempos de operación de cada tipo de máquina entre 10 y 25 minutos considerando los registros históricos del CMGRD, se pueden alcanzar reducciones entre 0.03% y 5.09% en el tiempo total de finalización de la reparación en comparación con el escenario actual, representando el 30.9% (119 de 385) del total de escenarios. Sin embargo, esta variabilidad también generó escenarios con incrementos entre 0.49% y 4.39% del tiempo total de finalización en comparación con el escenario actual, representando el 69.1% (266 de 385) del total de escenarios (Figura 35). También se pudo inferir que el tiempo total de finalización de la reparación estuvo contenido en un rango de 311.20 a 348.7 minutos. Por otra parte, se pudo determinar que, del total de escenarios contemplados, se obtuvieron 18 resultados donde el makespan

de las operaciones de reparación, fue inferior a 102.40 minutos que es el valor del tiempo máximo de finalización de las reparaciones en el escenario o instancia actual, alcanzando reducciones entre el 0.06% y 6.34%. De igual forma, se encontraron 367 escenarios donde el makespan fue mayor o igual al valor actual, donde se observaron incrementos entre el 0.8% y 15% (Figura 36). Además, se pudo identificar que el makespan de la reparación estuvo contenido en un rango de 97.9 a 117.8 minutos. Cabe señalar que no se registró ningún cambio en la secuencia de la reparación.

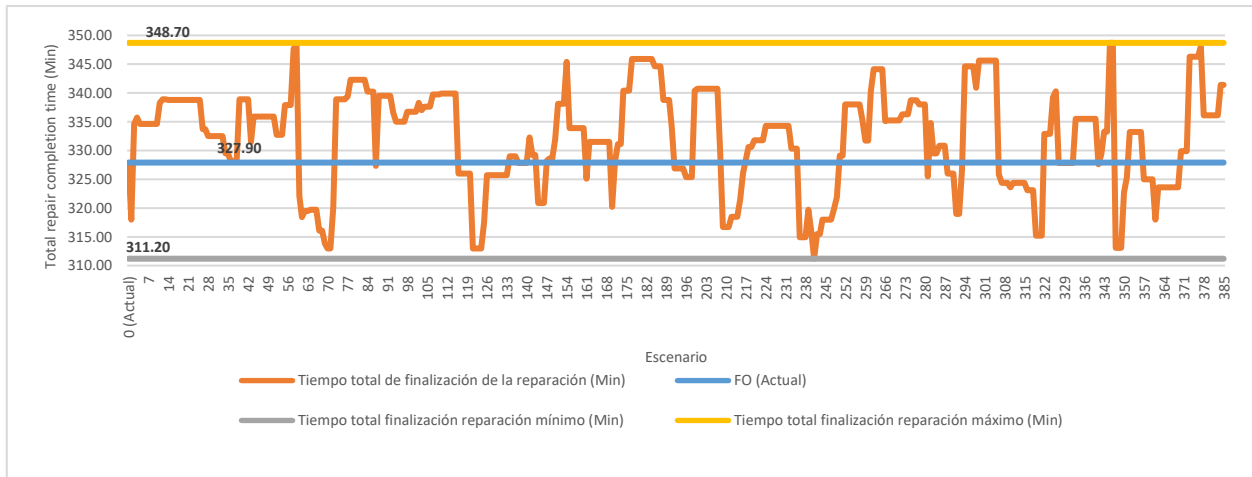


Figura 35. Análisis de la variación de los tiempos de operación de las máquinas en el tiempo total de finalización de la reparación (escenario 4).

Fuente: el autor.

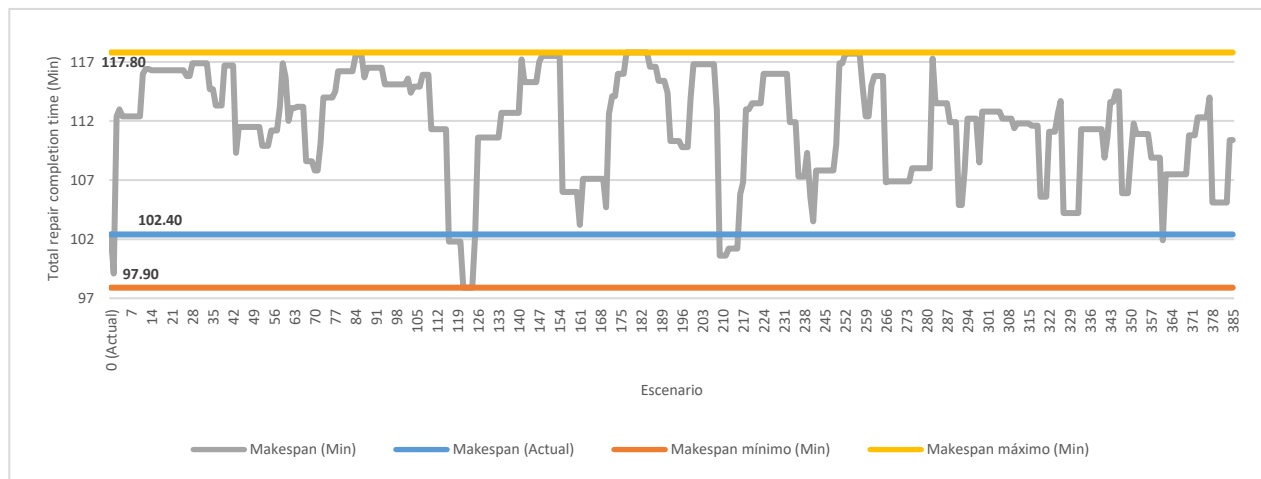


Figura 36. Análisis de la variación de los tiempos de operación máquinas en el makespan (escenario 4).

Fuente: el autor.

5. Coordinación de la distribución de la ayuda humanitaria y la restauración del acceso

En el capítulo 3 se abordó la distribución de la ayuda humanitaria teniendo en cuenta las limitaciones de accesibilidad debidas a las interrupciones transitorias de las carreteras, un problema considerado como uno de los puntos centrales tanto para los académicos como para las organizaciones encargadas de la labor humanitaria durante la fase de respuesta (Anaya-Arenas et al., 2014; P. Y. Zhang et al., 2020; Rojas et al., 2023a). Esta investigación concluyó que los tiempos de llegada y salida de los vehículos en el suministro de ayuda humanitaria se ven afectados por las interrupciones de las carreteras y los tiempos de finalización de las obras de reparación, por lo tanto, es importante sincronizar los tiempos de inicio de recorrido y establecimiento de la secuencia de visitas hacia cada uno de los puntos de demanda en función del progreso de las operaciones de reparación de las vías afectadas. En el capítulo 4 se estudió la restauración del acceso, el cual implica la programación de operaciones de reparación de las vías que conectan los puntos de atención (García-Alviz et al., 2021; Moreno et al., 2020). Esta investigación concluyó que la asignación y secuenciación de recursos de reparación para la atención de disrupciones viales transitorias en la fase de respuesta, considerando la interdependencia de éstos en función de las características de las vías a reparar, es vital para la minimización del tiempo total de finalización de la reparación de las vías con limitaciones de acceso, dado que la malla vial por carretera constituye el principal mecanismo de movilidad de la asistencia humanitaria (Shin et al., 2019; Tavana et al., 2018; Rojas et al., 2023a).

Para proporcionar bienes de socorro adecuados a los puntos de demanda a tiempo, es esencial recuperar los caminos destruidos, como principal causante de las limitaciones de accesibilidad de las zonas afectadas o puntos de demanda (Ozdamar et al., 2018). Además, los bienes de socorro deben distribuirse sobre la base de una programación óptima (Lorca et al., 2017). Si el orden de reparación de carreteras destruidas y el suministro de bienes de socorro se establece desde perspectivas independientes, se producirá un retraso en comparación con el cronograma óptimo considerando ambos procesos de forma coordinada (Çelik et al., 2015; Rojas et al., 2023a). En este sentido, existe una interrelación importante entre los procesos de distribución de ayuda y restauración del acceso de la malla vial, lo cual determina que las decisiones de ambos procesos deben considerarse conjuntamente desde un enfoque coordinado. Por esta razón, en el presente capítulo se aborda una propuesta de coordinación a través de la representación de la decisión conjunta o colectiva entre los procesos de distribución de ayuda humanitaria y restauración del acceso mediante la formulación de un modelo de programación lineal entera mixta bajo los enfoques mono y multi-objetivo.

5.1. Descripción de una propuesta de coordinación de los procesos de distribución de la ayuda humanitaria y la restauración del acceso vial.

El concepto de coordinación se puede definir como la administración de dependencias entre actividades (Malone, 1987). Al analizar los procesos al interior de una cadena de suministro humanitaria, corresponden a un conjunto de actividades que deben ejecutarse de manera simultánea o paralela (Balcik et al., 2010). Como se mencionó, dentro de los procesos logísticos más comunes en la fase de respuesta se encuentran la distribución de ayuda y la restauración del acceso (Chen & Paulraj, 2004; Rojas et al., 2023a). La integración de estos procesos en un modelo de toma de decisión que contribuya a optimizar de manera simultánea decisiones en procesos que se han estudiado de manera secuencial o aislada, puede contribuir a la mejora del desempeño de la cadena y, por ende, alcanzar la coordinación deseada entre los actores y/o procesos involucrados (Akbari & Salman, 2017; Shin et al., 2019; Coco et al., 2020; Rojas et al., 2023a).

Entre los mecanismos de coordinación presentados en el apartado 1.2.4 se encuentra las decisiones conjuntas o colectivas (Shin et al., 2019; Parra 2016). Este mecanismo de coordinación permite la consideración conjunta de las decisiones de los actores y/o procesos logísticos en la cadena de suministro con el fin de mejorar el desempeño de esta (Parra, 2016; Osorio 2016; Akbari & Salman, 2017). En este orden de ideas, la propuesta de coordinación de la distribución de ayuda humanitaria y restauración del acceso de las vías está fundamentada en las decisiones conjuntas o colectivas entre ambos procesos objeto de estudio, considerando recursos restringidos o limitados.

Las decisiones colectivas tienen como finalidad compartir uno o más objetivos en común y el desarrollo de las actividades operativas en ambos procesos, por ende, la satisfacción de los actores involucrados es conjunta, lo cual favorece en el rendimiento de los procesos y los recursos relacionados (Jahre & Jensen, 2010; Özdamar et al., 2014; Tatiana & Duarte, 2017; Zhan et al., 2014). Sin embargo, también constituye y representa una iniciativa o acuerdo colaborativo (Aldunate et al., 2005; Bealt et al., 2016; Guan et al., 2020; Rodríguez-Espíndola et al., 2018; Balcik et al., 2010), dado que se pretende que los actores de ambos procesos en consideración trabajen de manera conjunta para planificar y ejecutar operaciones en la cadena de distribución de ayuda humanitaria, con lo cual se obtenga un éxito mayor que el producido por la suma del trabajo individual (Akhtar et al., 2012; Fikar et al., 2016). En este sentido, la coordinación y los esfuerzos mutuos en ambos procesos, con el objetivo de mejorar la atención a las personas afectadas por un desastre, constituye una prioridad (Balcik et al., 2010; Mutebi et al., 2020).

5.2. Representación de una propuesta de coordinación

En la Figura 37, se representa la propuesta de coordinación basada en las decisiones conjuntas o colectivas en los procesos de distribución de ayuda y la restauración del acceso.

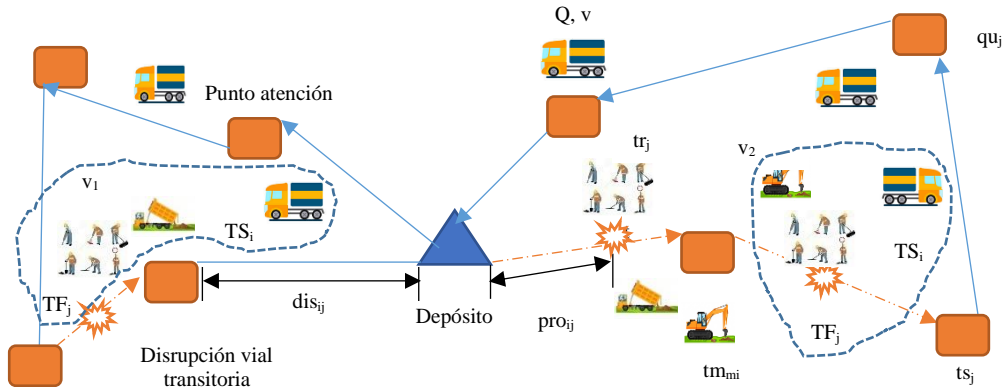


Figura 37. Coordinación de los procesos de distribución de ayuda y restauración del acceso.
Fuente: el autor.

Con el fin de minimizar el tiempo total de llegada en la entrega de ayuda humanitaria en los puntos de atención, una flota de vehículos con cantidad limitada nv y capacidad limitada Q con velocidad v , parte desde un depósito local para satisfacer las necesidades de demanda de ayuda humanitaria qu_i en cada punto de atención dado un tiempo de suministro ts_i . La operación de distribución se realiza por medio de una red de carreteras, cuya distancia entre puntos está dada por dis_{ij} . Sin embargo, como resultado de un desastre, se pueden presentar algunas disrupciones viales transitorias cuyos puntos susceptibles a reparación están denotados por pro_{ij} . En el proceso de atención de disrupciones viales transitorias se posee una cantidad limitada de cuadrillas de reparación limitada nc con velocidad v_1 y tipos de máquinas necesarias con velocidad v_2 para labores de despeje, limpieza o reparación con cantidad limitada cm hacia cada carretera que por su afectación genera limitaciones de accesibilidad y por ende dificulta la entrega oportuna de ayuda humanitaria en los puntos de atención. Los tiempos de reparación de cada cuadrilla y operación de cada tipo de máquina está definido por tr_j y tm_{mi} respectivamente. Por lo tanto, es necesario establecer de forma simultánea o conjunta las secuencias, tiempos de inicio, espera y salida de los recursos que participan en ambos procesos, haciendo un uso racional de éstos (Figura 37).

Con base en lo anterior y considerando lo descrito en la Figura 37, la propuesta de coordinación basada en las decisiones conjuntas o colectivas en los procesos de distribución de ayuda y restauración del acceso, se caracteriza por: la sincronización y determinación conjunta de los tiempos de salida de la flota vehicular entre los diferentes puntos que integran la cadena de distribución de ayuda humanitaria compuesta

por un depósito y diferentes puntos de atención TS_{ij} , con las operaciones y recursos que determinan el progreso y los tiempos de finalización de la reparación de cada vía afectada TF_j considerando la interdependencia entre recursos de reparación, es decir, las cuadrillas y tipos de máquinas; con el fin de que ambos procesos de manera conjunta se orienten en un objetivo común asociado con la minimización del tiempo total de llegada de la ayuda humanitaria hacia cada uno de los puntos de atención.

Lo anterior contribuye a una relación interorganizacional entre los actores involucrados (Aros & Gibbons, 2018; Brower et al., 2009; Kalkman & de Waard, 2017; Zagorecki et al., 2010) y una iniciativa de colaboración entre estos (Balcik et al., 2019; Nassereddine et al., 2019; Velasquez et al., 2010), permitiendo a los procesos objeto de estudio compartir o contemplar información conjunta referente a distancia entre puntos, velocidad media de los recursos, cantidad estimada de demanda de ayuda humanitaria, tiempos estimados de reparación, tiempo estimado de suministro en cada punto de atención e identificación de puntos de reparación de las vías afectadas; así como la planificación, integración y sincronización de las decisiones para la realización conjunta de actividades en ambos procesos, con el fin de ayudar a la atención oportuna de la población afectada por un desastre, especialmente aquellos desastres catalogados como naturales súbitos, ya que por su naturaleza tienden a generar disrupciones viales transitorias y por ende limitaciones de accesibilidad en las zonas de atención (Groenendaal et al., 2013; Mutebi et al., 2020; Regis-Hernández et al., 2017).

De acuerdo con los mecanismos propuestos por Balcik et al., (2010) con potencial de aplicación en el contexto humanitario, este trabajo doctoral contempla también los acuerdos colaborativos, materializados en una relación en la que los equipos de reparación comparten los detalles de la planificación y programación de las vías restauradas con el transportista responsable de la distribución de ayuda (Feng y Yuan, 2007; Balcik et al., 2010). El transportista traduce estos detalles en tiempos estimados de llegada en cada punto de atención y la programación de la secuencia de visitas y los tiempos de salida desde cada nodo (Feng y Yuan, 2007; Shin et al., 2019) con el fin de minimizar el tiempo total de llegada de la ayuda humanitaria en los puntos de atención o la consideración de múltiples medidas de desempeño.

En el siguiente apartado, se presenta el modelo de toma decisión que incluye los aspectos detallados de la propuesta de coordinación en los procesos objeto de estudio.

5.3. Modelo para la coordinación de los procesos de distribución de la ayuda humanitaria y la restauración del acceso

En este apartado se presenta la formulación del modelo matemático (Tabla 26) que representa la propuesta de coordinación de los procesos de distribución de ayuda y restauración del acceso.

Supuestos

Los supuestos de este modelo matemático consideran lo descrito en los apartados 3.5 y 4.5 del presente documento. Sin embargo, como supuesto adicional se consideró un origen o depósito inicial donde la flota vehicular, las cuadrillas y maquinaria inician y culminan su recorrido.

Tabla 26. Modelo matemático para la coordinación de la distribución de ayuda y la restauración del acceso.

Conjuntos
<p>N: conjunto de nodos indexado por i, j; depósito $\{i=0\}$ y los puntos de atención $\{i>0\}$. $A_2 \{N, N\}$: conjunto de arcos conformado por la pareja de nodos i, j NI: Nodos de inicio de reparación indexado por i, r $ANI \{(i, j) \subseteq A_2\}$: conjunto inducido de los nodos de inicio que pertenecen al arco (i, j) M: conjunto de tipos de máquina m $PRE \{NI, NI\}$: conjunto de parejas de arcos de la forma (p, s), donde el arco p se debe reparar primero que el arco s $JUN \{M, M\}$: Conjunto de máquinas (m, n) donde si las máquinas se requieren ambas en un arco se deben estar juntas en el arco $SEP \{M, M\}$: Conjunto de máquinas (m, n) donde si las máquinas se requieren ambas en un arco no se deben traslapar y la máquina m de usarse primero que la máquina n $NM \{M\}$: Conjunto de arcos que requieren la máquina m.</p>
Parámetros
<p>qu_i: cantidad de ayuda humanitaria a entregar en el nodo i ts_i: tiempo de servicio del nodo i Q: capacidad del vehículo en cantidad de kits v: velocidad promedio de un vehículo nv: número de vehículos disponibles pro_{ij}: proporción de la vía que va del nodo i al nodo j, en la que inicia la reparación dis_{ij}: distancia recorrida desde el nodo i hacia el nodo j tr_i: tiempo promedio que dura la reparación de la interrupción en el arco i por la cuadrilla tm_{mi}: tiempo promedio que dura la reparación en el arco i por la máquina m nc: número de cuadrillas disponibles cm: cantidad de máquinas disponibles por tipo $v1$: velocidad promedio en que viajan las cuadrillas $v2$: velocidad promedio en que viajan las máquinas pmi: porcentaje de trabajo preparativo y manual al inicio pmf: porcentaje de trabajo manual al final</p>

Variables de decisión

$X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si el vehículo sale del nodo } i \text{ hacia el nodo } j; \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases}$
$Z_i = \text{cantidad de kits que lleva el vehículo cuando llega al nodo } i$
$TL_i = \text{tiempo en que el vehículo llega al nodo } i$
$TS_{ij} = \text{tiempo en que el vehículo sale del nodo } i \text{ al nodo } j$
$XR_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si la cuadrilla sale después de reparar el arco } i \text{ hacia el arco } j; \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases}$
$Y_{ijm} = \begin{cases} 1, & \text{si la máquina } m \text{ sale después de reparar el arco } i \text{ hacia el arco } j; \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases}$
$TLR_i = \text{tiempo en que la cuadrilla llega al lugar de inicio de la reparación del arco } i$
$TF_i = \text{tiempo en que la cuadrilla sale del lugar de finalización de la reparación del arco } i$
$ETC_i = \text{Tiempo consumo cuadrilla arco } i, \text{ por encima del tiempo mínimo requerido}$
$TLM_{mi} = \text{tiempo en que la máquina } m \text{ llega al lugar de inicio de la reparación del arco } i$
$TFM_{mi} = \text{tiempo en que la máquina } m \text{ sale del lugar de finalización de la reparación de arco } i$
$ETM_{mi} = \text{Tiempo que consume la máquina } m \text{ en el arco } i, \text{ por encima del tiempo mínimo}$

Función objetivo

$$Z_{min} = \sum_{i \in N} TL_i \quad (51)$$

Restricciones

$$\sum_{i \in N/i \neq j} X_{ij} = 1 \quad \forall j \in N/j > 0 \quad (52)$$

$$\sum_{i \in N/i \neq h} X_{ih} = \sum_{j \in N/j \neq h} X_{hj} \quad \forall h \in N \quad (53)$$

$$\sum_{j \in N/j > 0} X_{0j} \leq nv \quad (54)$$

$$Z_i \leq Q \quad \forall i \in N \quad (55)$$

$$Z_i - qu_i * X_{ij} \geq Z_j - Q * (1 - X_{ij}) \quad \forall i, j \in N/i > 0 \quad (56)$$

$$Z_i - qu_i * X_{ij} \leq Z_j + Q * (1 - X_{ij}) \quad \forall i, j \in N/i > 0 \quad (57)$$

$$TL_j \leq TL_i + X_{ij} * ts_i + X_{ij} * \frac{dis_{ij}}{v} + M * (1 - X_{ij}) \quad \forall i \in N, j \in N/j > 0, i > 0, j <> i \quad (58)$$

$$TL_j \geq TL_i + X_{ij} * ts_i + X_{ij} * \frac{dis_{ij}}{v} - M * (1 - X_{ij}) \quad \forall i \in N, j \in N/j > 0, i > 0, j <> i \quad (59)$$

$$TL_j \geq X_{0j} * \frac{dis_{0j}}{v} \quad \forall j \in N/j > 0 \quad (60)$$

$$X_{ij} + X_{ji} \leq 1 \quad i \in N, j \in N/j > 0, i > 0, j <> i \quad (61)$$

$$\sum_{j \in N/j > 0} X_{0j} = \sum_{i \in N/i > 0} X_{i0} \quad (62)$$

$$TS_{ij} \geq TL_i + X_{ij} * ts_i - M * (1 - X_{ij}) \quad \forall i \in N, j \in N/i > 0, j <> i \quad (63)$$

Restricciones

$$TS_{ij} \leq TL_i + X_{ij} * ts_i + M * (1 - X_{ij}) \forall i \in NI, j \in NI | i > 0, j <> i \quad (64)$$

$$TS_{ij} \leq M * X_{ij} \forall i \in NI, j \in NI | j <> i \quad (65)$$

$$TS_{0j} + X_{0j} * \frac{dis_{0j}}{v} \leq TL_j + M * (1 - X_{0j}) \forall j \in NI | j <> 0 \quad (66)$$

$$\sum_{i \in NI | i \neq j} XR_{ij} = 1 \quad \forall j \in NI | j > 0 \quad (67)$$

$$\sum_{i \in NM\{m\} | i \neq j} Y_{ijm} = 1 \quad \forall m \in M, j \in NM\{m\} | j > 0 \quad (68)$$

$$\sum_{i \in NI | i \neq h} XR_{ih} = \sum_{j \in NI | j \neq h} XR_{hj} \quad \forall h \in NI \quad (69)$$

$$\sum_{i \in NM\{m\} | i \neq h} Y_{ihm} = \sum_{j \in NM\{m\} | j \neq h} Y_{hjm} \quad \forall m \in M, h \in NM\{m\} \quad (70)$$

$$\sum_{j \in NI | j > 0} XR_{0j} \leq nc \quad (71)$$

$$TLR_j \leq TLR_i + XR_{ij} * tr_i + XR_{ij} * \frac{dis_{ij}}{v1} + ETC_i + M * (1 - XR_{ij}) \forall i \in NI, j \in NI | j > 0, i > 0, j <> i \quad (72)$$

$$TLR_j \geq TLR_i + XR_{ij} * tr_i + XR_{ij} * \frac{dis_{ij}}{v1} + ETC_i - M * (1 - XR_{ij}) \forall i \in NI, j \in NI | j > 0, i > 0, j <> i \quad (73)$$

$$TLM_{mj} \leq TLM_{mi} + Y_{ijm} * tm_{mi} + Y_{ijm} * \frac{dis_{ij}}{v2} + ETM_{mi} + M * (1 - Y_{ijm}) \forall m \in M, i \in NM\{m\}, j \in NM\{m\} | j > 0, i > 0, j <> i \quad (74)$$

$$TLM_{mj} \geq TLM_{mi} + Y_{ijm} * tm_{mi} + Y_{ijm} * \frac{dis_{ij}}{v2} + ETM_{mi} - M * (1 - Y_{ijm}) \forall m \in M, i \in NM\{m\}, j \in NM\{m\} | j > 0, i > 0, j <> i \quad (75)$$

$$TLR_j \geq XR_{0j} * \frac{dis_{0j}}{v1} \forall j \in NI | j > 0 \quad (76)$$

$$TLM_{mj} \geq Y_{0jm} * \frac{dis_{0j}}{v2} \forall m \in M, j \in NM\{m\} | j > 0 \quad (77)$$

$$XR_{ij} + XR_{ji} \leq 1 \forall i \in NI, j \in NI | j > 0, i > 0, j <> i \quad (78)$$

$$Y_{ijm} + Y_{jim} \leq 1 \forall m \in M, i \in NM\{m\}, j \in NM\{m\} | j > 0, i > 0, j <> i \quad (79)$$

$$\sum_{j \in NI | j > 0} XR_{0j} = \sum_{i \in NI | i > 0} XR_{i0} \quad (80)$$

$$TF_i = TLR_i + tr_i + ETC_i \quad \forall i \in NI, |i > 0 \quad (81)$$

$$TFM_{mi} = TLM_{mi} + tm_{mi} + ETM_{mi} \quad \forall m \in M, i \in NM\{m\}, |i > 0 \quad (82)$$

$$TLR_j \geq TF_i \quad \forall (i, j) \in PRE | i > 0, j > 0, j <> i \quad (83)$$

$$TLR_i + pmi * tr_i \leq TLM_{mi} \quad \forall m \in M, i \in NM\{m\}, |i > 0 \quad (84)$$

Restricciones

$$TF_i \geq TFM_{mi} + pmf * tr_i \quad \forall m \in M, i \in NM\{m\}, i > 0 \quad (85)$$

$$TLM_{mi} = TLM_{ni} \quad \forall (m, n) \in JUN, i \in (NM\{m\} \cap NM\{n\}) \quad |i > 0 \quad (86)$$

$$TFM_{mi} \leq TLM_{ni} \quad \forall (m, n) \in SEP, i \in (NM\{m\} \cap NM\{n\}) \quad |i > 0 \quad (87)$$

$$\sum_{i \in NM\{m\}, |i > 0} Y_{oim} \leq cm \quad \forall m \in M \quad (88)$$

$$TS_{ij} + X_{ij} * \frac{dis_{ij}}{v} * pro_{ij} \geq TF_r - (1 - X_{ij}) * M \quad \forall (i, j) \in A, r \in ANI\{(i, j)\}, |r > 0 \quad (89)$$

$$X_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in N \quad (90)$$

$$Z_i, TL_i \geq 0, \quad \forall i \in N \quad (91)$$

$$TS_{ij} \geq 0, \quad \forall i, j \in N \quad (92)$$

$$XR_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in NI \quad (93)$$

$$Y_{ijm} \in \{0,1\} \quad \forall m \in M, i \in NM\{m\}, j \in NM\{m\} \quad |j \neq i \quad (94)$$

$$TLR_i, TF_i, ETC_i \geq 0 \quad \forall i \in NI \quad (95)$$

$$TLM_{mi}, TFM_{mi} \geq 0 \quad \forall m \in M, i \in NM\{m\} \quad (96)$$

Fuente: el autor.

La ecuación (51) representa la función objetivo del modelo que minimiza el tiempo total de llegada hacia los puntos de entrega o atención. La ecuación (52) asegura que en cada nodo de atención j solamente ingrese un sólo vehículo o recorrido. La ecuación (53) establece la continuidad de la ruta. La restricción (54) garantiza que la cantidad de vehículos que salen del depósito no supere la disponibilidad de la flota vehicular. La restricción (55) limita que la cantidad de kits de ayuda humanitaria que cargue cada vehículo no supere su capacidad. Las restricciones (56) y (57) garantizan que la carga de vehículo en el nodo j sea igual a la carga del vehículo el nodo de atención i menos la cantidad de kits de ayuda humanitaria entregada en el nodo i, si y solo si existe un arco que conecte a estos nodos. Las restricciones (58) y (59) garantizan que el tiempo de llegada al nodo de atención j sea igual al tiempo de llegada al nodo de atención i más el tiempo de servicio en el nodo de atención i y el tiempo de recorrido entre ambos nodos, si y solo si existe un arco que conecte a estos nodos. La restricción (60) especifica que el tiempo de llegada al nodo de atención j desde el depósito o nodo de origen sea mayor o igual al tiempo de recorrido entre estos nodos, siempre y cuando estén conectados a través de un arco. La restricción (61) permite la continuidad del recorrido del vehículo entre cada par de nodos de atención, contribuyendo a la no generación de subtours. La ecuación (62) establece que la cantidad de vehículos que salgan de un depósito retorne a este al final de su recorrido. Las restricciones (63) y (64) permiten que el tiempo en que sale el vehículo desde el nodo i

hacia el nodo j sea igual al tiempo de llegada al nodo i más el tiempo de servicio en el nodo i , si y sólo si, existe un arco que conecte a estos nodos. La restricción (65) garantiza que el tiempo en que sale el vehículo desde el nodo i hacia el nodo j transcurre si y solo si existe una ruta o arco que conecte a estos nodos. La restricción (66) garantiza que el tiempo de llegada del vehículo al nodo j debe ser mayor o igual al tiempo de salida desde el depósito hacia el nodo j más el tiempo de viaje o recorrido entre estos nodos.

La ecuación (67) asegura que todo arco debe ser visitado una vez por una cuadrilla. La ecuación (68) garantiza que todo requerimiento de máquina debe ser atendido. La ecuación (69) garantiza si una cuadrilla llega a un punto o arco de reparación debe salir de este. La ecuación (70) garantiza si una máquina llega a un arco de reparación debe salir de este. La restricción (71) limita el número máximo de cuadrillas a asignar con base en la disponibilidad. Las restricciones (72) y (73) determinan los tiempos de llegada de las cuadrillas a los arcos de reparación. Las restricciones (74) y (75) determinan los tiempos de llegada de las máquinas según cada tipo a los arcos de reparación. La restricción (76) determina el tiempo de llegada de la cuadrilla al primer arco de reparación. La restricción (77) determina el tiempo de llegada de la máquina al primer arco de reparación. Las restricciones (78) y (79) garantizan la exclusión de arcos simétricos para cuadrillas y las máquinas respectivamente, por ende, contribuye a la no formación de subtours. La restricción (80) garantiza que el número de cuadrillas que sale al inicio de sus recorridos es igual al número de cuadrillas que entra al finalizar sus recorridos. Las ecuaciones (81) y (82) determinan los tiempos de finalización de las cuadrillas y las máquinas respectivamente, el cual es determinado por el tiempo de llegada, el tiempo de reparación u operación y el tiempo de espera del recurso. La restricción (83) asegura que el tiempo de llegada de la cuadrilla al arco j sea mayor o igual al tiempo de finalización de la reparación en el arco anterior i , es decir, especifica la precedencia entre nodos de reparación. La restricción (84) garantiza que el tiempo de llegada de la máquina tipo m al arco i sea mayor o igual al tiempo de llegada de la cuadrilla al arco i y al tiempo de preparación de la cuadrilla, el cual este último se determinó como una proporción del tiempo estimado de reparación del arco i , es decir, establece la precedencia entre cuadrillas y máquinas, donde las máquinas deben llegar después de que la cuadrilla se ha instalado. La restricción (85) asegura que el tiempo de finalización de la cuadrilla en el arco i sea mayor o igual al tiempo de finalización de la máquina tipo m en dicho arco y al tiempo de acondicionamiento de la cuadrilla al final de la operación, calculado este último como una proporción del tiempo estimado de reparación, es decir, garantiza que la cuadrilla debe salir después que las máquinas hayan concluido su operación. La restricción (86) garantiza que las máquinas que deben estar juntas en un arco de reparación i que requiera esa condición, lleguen al arco al mismo tiempo. La restricción (87) garantiza la precedencia entre máquinas, es decir, determina que el tiempo de finalización de la máquina m debe ser menor o igual al tiempo de llegada de la máquina n en el arco i , considerando que la máquina m se utiliza primero que la máquina n . La restricción

(88) determina la cantidad de máquinas disponibles según su tipo. La restricción (89) garantiza que el tiempo de salida del vehículo desde el nodo i hacia el nodo j más el tiempo transcurrido hasta el momento en que inicia la labor de reparación de la vía sea mayor o igual al tiempo de culminación de la labor de reparación de la vía. Finalmente, las restricciones (90 – 96) representan la condición de No negatividad y lógica de las variables de decisión.

5.4. Resultados del modelo matemático

Con el fin de validar el modelo matemático formulado, se utilizó como contexto geográfico referente el municipio de Roldanillo, Colombia; considerando la información y parámetros de entrada que aparece en los apartados 3.5.2 y 4.6.2 del presente documento. Para la ejecución del modelo se empleó el lenguaje de programación matemática AMPL y el solver CPLEX (Anexo 7), disponible en el entorno de desarrollo AMPL IDE versión profesional, por medio de un ordenador con las siguientes especificaciones: Intel® Core™ i7-10750H (6C / 12T, 2,6 / 5,0GHz, 12MB), 32 GB de RAM y 1 TB de disco duro. Se generó un total de 333 variables de decisión, de las cuales 170 fueron binarias y 163 continuas. Además, se obtuvieron 906 restricciones, 79 de igualdad y 827 de desigualdad, generando un tiempo de solución de 22 segundos con 3 centésimas. A continuación, se presentan y analizan los resultados obtenidos del modelo matemático formulado.

Rutas de distribución

El modelo matemático generó seis rutas de entrega de ayuda humanitaria. A cada uno de los 9 puntos de atención se le asignó también un número del 1 al 9 para expresar más fácilmente las rutas como secuencias. De los 7 vehículos disponibles, la solución óptima implica utilizar sólo el 85.7% de la flota de transporte actual. Las coordenadas geodésicas de cada uno de los nodos pertenecientes a cada ruta se trazaron a continuación con ayuda de Google Maps ® (Figura 38). Estas rutas indican la secuencia de visitas en el proceso de distribución de ayuda humanitaria, desde el depósito hasta cada uno de los puntos de atención.

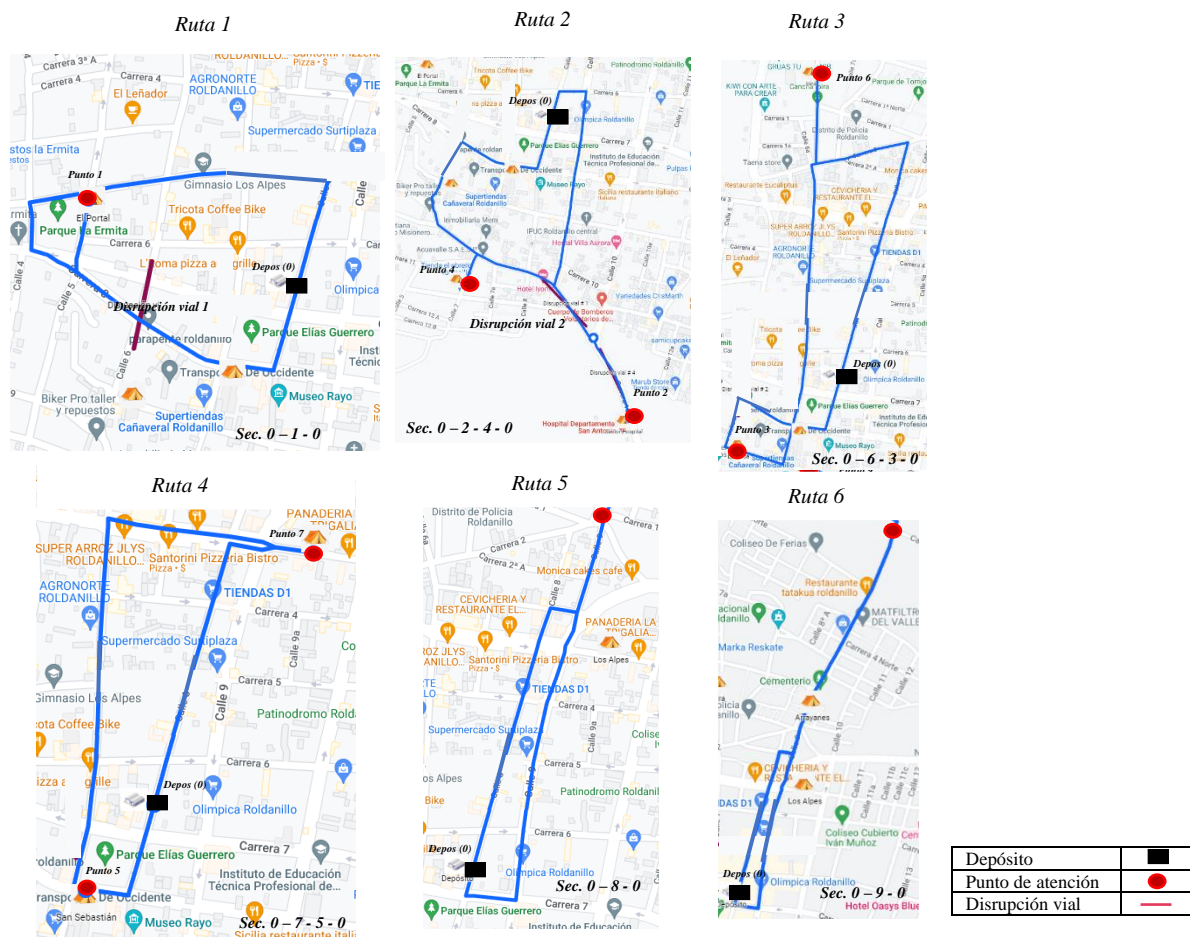


Figura 38. Rutas de distribución de la ayuda humanitaria de acuerdo bajo el enfoque coordinado.

Fuente: Adaptado de Google Maps ®

La secuencia de nodos obtenida para cada ruta (Tabla 27) determina el tiempo de inicio de una ruta considerando el tiempo de finalización de las obras de reparación de las carreteras afectadas, lo cual puede generar un tiempo de espera en los vehículos para iniciar su recorrido. Del mismo modo, cabe destacar que, en la relación entre el tiempo medio de espera de los vehículos con el tiempo esperado de reparación de las carreteras y su impacto en el tiempo total mínimo de llegada de la ayuda humanitaria, es decir, en las decisiones de planificación de rutas de los vehículos es importante considerar el avance de la restauración de las carreteras para llevarlas a condiciones mínimas de accesibilidad. Particularmente en los resultados del modelo, se encontró en las rutas 1 y 2, se presentaron disrupciones viales transitorias, generando tiempos de inicio de ruta de 36.4 y 25.5 minutos respectivamente como resultado de las labores de restauración de las vías, generando un tiempo total mínimo de llegada de ayuda humanitaria en los puntos de atención de 174.42 minutos, un tiempo máximo de finalización de llegada de ayuda humanitaria de 110.63 minutos y un tiempo medio de llegada de 19.38 minutos. Este resultado refleja la importancia de programar los

tiempos de salida de los vehículos en cada ruta de distribución, en función de los tiempos de inicio y finalización de las operaciones de reparación de las vías afectadas que aparecen involucradas en cada una de las rutas (Figura 39), como es el caso de los trayectos 0 -1 y 0 - 2. Por ejemplo, en la ruta de distribución # 2, el tiempo de inicio de la ruta del vehículo es de 25.5 minutos (Tabla 27), adicionando el tiempo de desplazamiento del vehículo hasta el punto donde aparece la disrupción vial # 2 ($dis_{02} * prop_{02/v}$), se genera un tiempo acumulado de 26.6 minutos, el cual coincide con el tiempo de finalización de la reparación realizado por las cuadrillas y maquinaria necesaria según las características de la vía afectada (Figura 39), permitiendo el curso normal en la entrega de ayuda humanitaria hacia el punto de demanda o atención # 2.

Tabla 27. Descripción de las rutas de distribución de ayuda humanitaria.

Ruta	Secuencia	Tiempo de inicio de la ruta (Min Min después de reportado el desastre)	Tiempo finalización de la ruta (Min)	Distancia ruta (Km)	Duración de la ruta (Min)	Carga ruta (Kits)	Porcentaje de tiempo que el vehículo está en ruta	Tiempo esperado de finalización de las actividades de reparación de carreteras (Min)
1	0 - 1 - 0	36.4	73.7	3.4	37.3	213	50.61%	37.13
2	0 - 2 - 4 - 0	25.5	82.4	2.5	56.9	342	69.05%	26.63
3	0 - 6 - 3 - 0	0.0	53.4	2.8	53.4	310	100%	0.0
4	0 - 7 - 5 - 0	0.0	84.3	2.9	84.3	556	100%	0.0
5	0 - 8 - 0	0.0	49.1	2.6	49.1	318	100%	0.0
6	0 - 9 - 0	0.0	110.6	1.5	110.6	825	100%	0.0
Tiempo total mínimo de llegada a los puntos de entrega o zonas de atención = 174.42 Min.								
Tiempo máximo de llegada de ayuda humanitaria = 110.63 Min.								
Tiempo promedio de llegada a los puntos de entrega o zonas de atención = 19.38 Min.								

Fuente: el autor.

Programación de recursos de reparación

A partir de los datos de entrada, el modelo produjo dos secuencias de reparación, con números asignados del 1 al 5 para cada una de los arcos afectados o disrupciones viales transitorias. La solución indica la utilización del 100% de los recursos de reparación disponibles. Para ilustrar los resultados del modelo, se crearon diagramas de Gantt para cada una de las cuadrillas y tipos de máquina, mostrando la hora de llegada, la duración y la finalización de la reparación de cada arco o ruta. Este diagrama representa el resultado del modelo en la Figura 39, cuyos tiempos están dados en minutos.

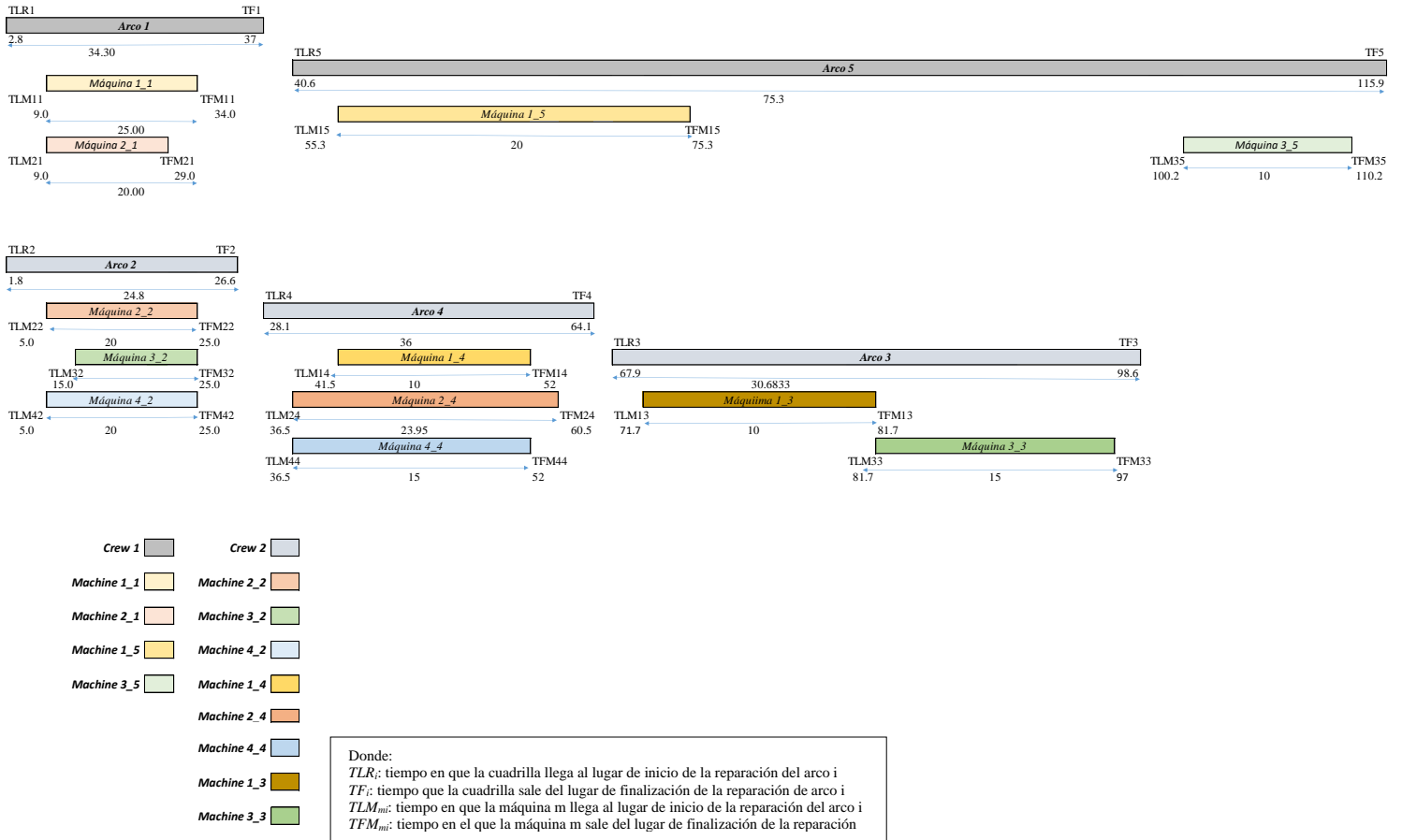


Figura 39. Diagrama de Gantt para la secuencia de reparación de recursos.
Fuente: el autor.

El análisis presentado en las Tablas 28 – 29 y Figura 39 indican que la disponibilidad y la interdependencia de la maquinaria influyen significativamente en los tiempos de inicio y finalización de las cuadrillas de reparación de las carreteras afectadas, es decir, para facilitar los trabajos de restauración en algunas carreteras, se requiere de maquinaria específica. Por ejemplo, en algunos casos, la reparación de un arco dañado requiere la presencia simultánea de maquinaria, por ejemplo, los arcos 1, 2 y 4 (Figura 39). Esto se puede evidenciar claramente en los tiempos de llegada de las máquinas en dichas vías, dado que son iguales. Por ejemplo, en la vía # 1 se requiere la presencia simultánea de las máquinas 1 y 2, por lo tanto, el tiempo de llegada de ambas máquinas es igual, en este caso 9 minutos.

Para otras vías, algunas máquinas poseen condiciones de precedencia, es decir, para ciertas vías, se requiere primero la llegada de un tipo de máquina para acondicionar la vía a reparar y luego requiere la presencia de otro tipo de máquina para la culminación de la operación, como es el caso de los arcos 5, 2, 4 y 3 (Figura 39). Por ejemplo, en el arco 5 se puede evidenciar esta condición de precedencia en los tiempos

de llegada de las máquinas 1 y 3 dado que son diferentes, en este caso se requiere primero la llegada de la máquina 1 a los 55.3 minutos y luego la llegada de la máquina 3 a los 100.2 minutos.

Por otra parte, debido a la importancia y conexión de ciertas vías, algunas de estas deben repararse primero, para luego poder facilitar la reparación de otras vías a posteriori, lo que da lugar a relaciones de precedencia entre vías sujetas a reparación, como se evidencia en los arcos 1 - 3 y 2 - 4 (Figura 39). Por otra parte, nótese que el tiempo de llegada de las cuadrillas es inferior al tiempo de llegada de las máquinas requeridas, dado en condiciones reales de operación, se requiere un trabajo de preparación manual al inicio de parte de las cuadrillas. Además, se observa que los tiempos de salida de las cuadrillas al final de la restauración de cada vía son superiores a los tiempos de salida de las máquinas, dado que, en condiciones reales de operación, una vez terminado cada máquina su operación, la cuadrilla correspondiente requiere realizar al final un trabajo manual de culminación de la vía restaurada (Figura 39).

Como consecuencia de lo anterior, en el marco del contexto geográfico analizado, se obtuvieron como resultados un tiempo máximo de finalización de las reparaciones de 115.9 minutos, un tiempo medio de finalización de las reparaciones de carreteras de 68.50 minutos, descritas en la Tabla 28, un tiempo máximo de operación de maquinaria de 110.2 minutos y un tiempo medio de operación de la maquinaria de 55.45 minutos, las cuales aparecen en la Tabla 29.

Este resultado refleja la importancia de programar los tiempos de salida de los vehículos en cada ruta de distribución, en función de los tiempos de inicio y finalización de las operaciones de reparación de las vías afectadas como es el caso de los trayectos 0 -1 y 0 - 2. Por ejemplo, en la ruta de distribución # 1, el tiempo de inicio de la ruta del vehículo es de 36.4 minutos (Tabla 27), adicionando el tiempo de desplazamiento del vehículo hasta el punto donde aparece la disrupción vial ($dis_{01} * prop_{01/v}$), se genera un tiempo acumulado de 37 minutos, el cual coincide con el tiempo de finalización de la reparación realizado por las cuadrillas y maquinaria necesaria según las características de la vía afectada (Figura 39), permitiendo el curso normal en la entrega de ayuda humanitaria hacia el punto de demanda o atención # 1. Lo anterior refleja un esfuerzo en la sincronización de recursos de reparación como cuadrillas y maquinaria en función de las características de la vía a reparar, dado que, dependiendo de las condiciones de la vía a reparar, se requerirá la llegada simultánea de máquinas caracterizadas por poseer igual tiempo de llegada (por ejemplo: vía 1 - máquinas 1 y 2; vía 2 - máquinas 2 y 4; vía 4 - máquinas 2 y 4) (Figura 39) o no simultánea de máquinas en cada vía caracterizadas por tiempos de llegada diferentes (por ejemplo: vía 5 - máquinas 1 y 3; vía 3 - máquinas 1 y 3) (Figura 39) y la precedencia de algunas vías a reparar (arcos 1 y 3; arcos 2 y 4)

(Figura 39), con el fin de contribuir en tiempos de llegada temprana de ayuda humanitaria en los puntos de demanda.

Tabla 28. Descripción de la secuencia de reparación de las cuadrillas.

Cuadrilla # 1	Sec.	1	5	Cuadrilla # 2	Sec.	2	4	3
	¹ TLRi	2.8	40.6		¹ TLRi	1.8	28.1	67.9
	² tri	31	57		² tri	16	36	19
	³ ETCi	3.3	18.3		³ ETCi	8.8	0	11.7
	⁴ TFi	37.1	115.9		⁴ TFi	26.6	64.1	98.6
	⁵ pmi	0.2	0.2		⁵ pmi	0.2	0.2	0.2
	⁶ pmf	0.1	0.1		⁶ pmf	0.1	0.1	0.1
Tiempo máximo de reparación (Makespan) = 115.9 Min.								
Tiempo total de reparación = 342.3 Min.								
Tiempo medio de reparación = 68.5 Min.								
¹ tiempo en que la cuadrilla llega al lugar de inicio de la reparación del arco i ² tiempo promedio que dura la reparación de la disrupción en el arco i por la cuadrilla ³ tiempo espera cuadrilla en arco i por encima del tiempo mínimo requerido ⁴ tiempo que la cuadrilla sale del lugar de finalización de la reparación de arco i ⁵ proporción de trabajo preparativo y manual al inicio ⁶ proporción de trabajo manual al final ⁷ tiempo esperado de culminación de las labores de restauración del arco								

Fuente: el autor.

Tabla 29. Descripción de la secuencia de reparación según tipo de máquina.

Máq.	Máquina Tipo 1			Máquina Tipo 2		Máquina Tipo 3		Máquina Tipo 4
# 1	Arco 3			Arco 1	Arco 4	Arco 2		Arco 2
¹ TLMmi	71.7			9.0	36.5	15.0		5.0
² tmmi	10			20	10	10		20
³ ETMmi	0			0	13.9	0		0
⁴ TFMmi	81.7			29.0	60.5	25.0		25.0
# 2	Arco 1	Arco 4	Arco 5	Arco 2		Arco 3	Arco 5	Arco 4
¹ TLMmi	9.0	41.5	55.3	5.0		81.7	100.2	36.5
² tmmi	25	10	20	15		15	10	15
³ ETMmi	0	0	0	5		0	0	0
⁴ TFMmi	34.0	51.5	75.3	25.0		96.7	110.2	51.5
Tiempo máximo de operación = 110.2 Min.								
Tiempo medio de operación = 55.45 Min.								
¹ tiempo en que la máquina m llega al lugar de inicio de la reparación del arco ² tiempo mínimo que dura la reparación de la disrupción en el arco i por la máquina m ³ tiempo espera máquina m en el arco i por encima del tiempo mínimo o medio requerido ⁴ tiempo máquina m sale del lugar de finalización de la reparación de arco i								

Fuente: el autor.

5.5. Análisis comparativo de las decisiones secuenciales vs. las decisiones conjuntas

Con el fin de evaluar el desempeño de la propuesta de coordinación, en este apartado se realiza un análisis comparativo de dos (2) esquemas de decisión, denominados como: decisiones secuenciales y decisiones conjuntas. Esta última corresponde a la propuesta de coordinación desarrollada en esta tesis doctoral.

Las decisiones secuenciales se basan en dos etapas. Primero se determinan los tiempos de finalización de reparación de las vías afectadas, a partir de la programación de los recursos de reparación para la atención de las interrupciones viales transitorias. Una vez restauradas las vías que fueron afectadas de manera transitoria, en segundo lugar, se realiza la planificación de las rutas de distribución de ayuda humanitaria basadas en el ruteo de vehículos destinados a visitar a los puntos de atención. En términos de la modelación, lo anterior significa que la información de salida del modelo de reparación representado a partir de los tiempos de finalización de reparación de las vías afectadas TS_j se convierte en un parámetro de entrada en modelo de distribución de ayuda para definir los tiempos de llegada TL_i y salida TS_{ij} hacia los diferentes puntos de atención.

Los resultados obtenidos del esquema de decisión anterior son comparados con los obtenidos a través de la propuesta de coordinación basada en las decisiones conjuntas o colectivas de ambos procesos, es decir, la distribución de la ayuda y la restauración del acceso.

Se generó un total de 23 instancias adicionales a la actual (denotada como instancia cero), donde se evaluaron diferentes cantidades de interrupciones viales transitorias, cantidad de cuadrillas y tipos de máquina disponibles (Tabla 30). De los 23 resultados obtenidos, el 34.8% (8 de 23) de los casos el valor del tiempo total mínimo de llegada de ayuda humanitaria o función objetivo (FO) coincidió en ambos esquemas de decisión, es decir, la decisión sería seleccionar un esquema de decisión secuencial o conjunto. Sin embargo, el 65.2% (15 de 23) de los casos el valor de la función de desempeño en las decisiones conjuntas entre ambos procesos obtuvo un mejor resultado con relación al esquema de decisión secuencial. En el Anexo 8 se presentan los resultados obtenidos de cada una de las 23 instancias adicionales evaluadas y sus características.

Tabla 30. Comparación resultados - Decisiones secuenciales vs. Decisiones conjuntas según valor tiempo total de llegada mínimo o FO.

Instancia	FO (Decisiones secuenciales)	FO (Decisiones conjuntas)	Mejor decisión
0	174.423	174.423	Decisiones secuenciales o conjuntas
1	240.757	240.757	Decisiones secuenciales o conjuntas
2	365.731	365.731	Decisiones secuenciales o conjuntas
3	519.232	515.202	Decisiones conjuntas
4	640.212	621.655	Decisiones conjuntas
5	631.314	621.646	Decisiones conjuntas
6	479.576	478.809	Decisiones conjuntas
7	510.534	506.904	Decisiones conjuntas
8	476.021	470.084	Decisiones conjuntas
9	475.714	464.021	Decisiones conjuntas
10	469.432	464.021	Decisiones conjuntas
11	469.432	464.021	Decisiones conjuntas
12	469.432	464.021	Decisiones conjuntas
13	674.689	578.326	Decisiones conjuntas
14	578.409	578.176	Decisiones conjuntas
15	505.676	505.676	Decisiones secuenciales o conjuntas
16	466.438	466.438	Decisiones secuenciales o conjuntas
17	444.405	444.405	Decisiones secuenciales o conjuntas

18	440.91	437.13	Decisiones conjuntas
19	431.137	431.137	Decisiones secuenciales o conjuntas
20	431.137	431.137	Decisiones secuenciales o conjuntas
21	431.137	431.137	Decisiones secuenciales o conjuntas
22	468.227	466.438	Decisiones conjuntas
23	581.893	466.438	Decisiones conjuntas

Fuente: el autor.

Los resultados obtenidos permiten determinar que la coordinación de la distribución de ayuda humanitaria con la restauración del acceso basado en las decisiones conjuntas mejora el desempeño en términos del tiempo total mínimo de llegada en el proceso de atención humanitaria en zonas afectadas por desastres naturales súbitos con limitaciones de accesibilidad generadas por la presencia de interrupciones viales transitorias, permitiendo validar de manera parcial la hipótesis general de investigación definida.

5.6. Análisis de la coordinación de los procesos de distribución de ayuda y restauración del acceso considerando múltiples medidas de desempeño

Como se mencionó en el apartado 5.1, las decisiones conjuntas o colectivas tienen como finalidad compartir uno o más objetivos en común y el desarrollo de las actividades operativas en los procesos (Jahre & Jensen, 2010; Özdamar et al., 2014; Tatiana & Duarte, 2017; Zhan et al., 2014), correspondientes a la distribución de ayuda y la restauración del acceso.

En este orden de ideas, la propuesta de coordinación desarrollada en los apartados 5.1 y 5.2 que integra la distribución de ayuda humanitaria con la restauración del acceso en zonas afectadas por desastres naturales súbitos con limitaciones de accesibilidad, se puede abordar bajo un enfoque de múltiples objetivos o medidas de desempeño. Con base en lo anterior, en este apartado se realizó un análisis bajo un enfoque multiobjetivo de las decisiones conjuntas o colectivas en los procesos de distribución de ayuda y restauración del acceso. Finalmente, se realizó un análisis comparativo de las decisiones conjuntas con las decisiones secuenciales.

5.6.1. Selección de objetivos o medidas de desempeño

Las medidas de desempeño empleadas en la logística de distribución considerando limitaciones de accesibilidad (Maya Duque et al., 2016; Rodríguez-Espíndola et al., 2018; Shin et al., 2019) se pueden clasificar en tres dimensiones o grupos de criterios (Immawan et al., 2019; Sancı & Daskın, 2019). A continuación, se describen cada una de las dimensiones.

- Dimensión de Eficiencia: esta dimensión incluye las medidas de desempeño asociadas a la forma como se utilizan o administran los recursos tales como equipos, mano de obra o presupuesto para llevar a cabo la distribución o reparación de la red vial afectada por un desastre (Sanci & Daskin, 2019; Tzeng et al., 2007).
- Dimensión de Eficacia: esta dimensión determina la rapidez y precisión de entrega de ayuda humanitaria a la población afectada y las actividades de limpieza, restauración o reparación de la infraestructura vial (Huang et al., 2012; Tzeng et al., 2007; Zhang et al., 2019).
- Dimensión de Bienestar Social: esta dimensión está asociada con el alivio del sufrimiento de las personas afectadas por un desastre, la cual se relaciona con la reducción de las muertes humanas o mejora de la supervivencia humana (Y. P. Jiang & Yuan, 2019; Macea et al., 2018).

Identificación de objetivos o medidas de desempeño

En este apartado se presentan cada una de las medidas de desempeño identificadas en la literatura asociadas a cada dimensión (Figura 39).



Figura 40. Medidas de desempeño según dimensión.

Fuente: el autor.

La descripción detallada cada una de las 18 medidas de desempeño identificadas aparece en el Anexo 9.

Por otra parte, se han desarrollado diversas herramientas para resolver problemas de priorización de un conjunto de alternativas de decisión o medidas de desempeño (Akin & Kara, 2020; Cinelli et al., 2014; Zyoud & Fuchs-Hanusch, 2017). Estas herramientas corresponden a los métodos de análisis de decisiones multicriterio (Rojas & González, 2018; Hosseini et al., 2016; Laguna-Salvado et al., 2019; Vahdat et al., 2014).

Los métodos de análisis de decisiones multicriterio (MCDA, por sus siglas en inglés) se han desarrollado para apoyar a los responsables en el proceso de toma de decisiones (Saaty, 2014), mediante técnicas encaminadas a encontrar una solución de compromiso (Coello & Lamont, 2004). No son métodos automatizables que conduzcan a la misma solución para todos los decisores, sino que incorporan información subjetiva (Yılmaz & Kabak, 2020). La información subjetiva, también conocida como información de preferencia, es generada por los decisores, lo que conduce a la priorización de las alternativas (Papamichail & French, 2013). Además, estas técnicas por su flexibilidad, robustez, practicidad y versatilidad facilitan el proceso de toma de decisiones en la selección de alternativas (Cinelli et al., 2014). En este caso, las alternativas corresponden a las medidas de desempeño enmarcadas en cada dimensión.

Con base en lo anterior, se identificaron las herramientas de análisis multicriterio que se han empleado generalmente en la literatura y en la selección de medidas de desempeño (Anjomshoae et al., 2019b; Berumen & Llamazares, 2007; Hwang et al., 2020; Sarache et al., 2005; Zyoud & Fuchs-Hanusch, 2017). Partiendo de los estudios señalados, se determinó que la herramienta AHP (Proceso de Jerarquía Analítica, por sus siglas en inglés) ha tenido un desarrollo importante en el proceso de toma de decisión encaminado a la selección de indicadores o medidas de desempeño en las organizaciones. Por lo tanto, se adopta los lineamientos del AHP como herramienta seleccionada por su flexibilidad y capacidad de manejar el juicio impreciso de los expertos (Yılmaz & Kabak, 2020) para priorizar las preferencias de los interesados (Mendoza Patiño et al., 2018). Esta herramienta se caracteriza por su practicidad, flexibilidad y su versatilidad (Zyoud & Fuchs-Hanusch, 2017; Henao et al., 2019). El desarrollo del proceso general de priorización de medidas de desempeño a partir de los lineamientos del AHP se presenta en la Figura 40.

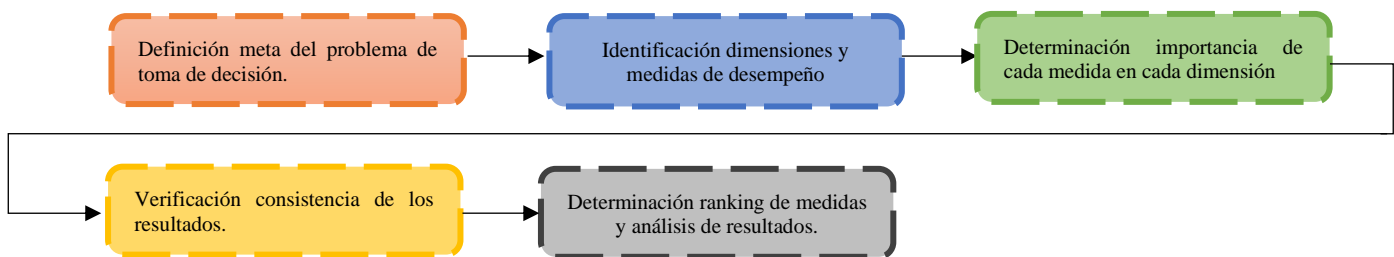


Figura 41. Descripción proceso general de priorización de medidas de desempeño.
Fuente: adaptado de Regis-Hernandez et al., (2017).

El procedimiento detallado de selección de expertos, selección de la herramienta multicriterio y desarrollo de la herramienta AHP se describe en el Anexo 9. Para la determinación de la importancia de cada medida según cada dimensión, participaron 30 expertos agrupados en siete grupos tales como: fuerza armada, ONG's, donantes, proveedores logísticos, gobierno, academia y agencias humanitarias. Cada

experto realizó una comparación pareada de criterios o medidas de desempeño según cada dimensión empleando la escala de valoración propuesta por Saaty (1977), a través de un formulario desarrollado en *Google forms* (Anexo 10).

Se consideró un total de tres (3) dimensiones y 18 criterios, de los cuales cuatro (4) están en la dimensión Eficiencia, diez (10) en la dimensión Eficacia y cuatro (4) asociados a la dimensión de Bienestar Social. Con base en los resultados obtenidos, se pudo determinar que las funciones objetivo o medidas de desempeño seleccionadas para las dimensiones de eficiencia, eficacia y bienestar social son el costo total de logística asociado a la distribución de ayuda humanitaria y programación de restauración transitoria de la red vial, el tiempo total de distribución o llegada y el costo o tiempo de privación, respectivamente.

5.6.2. Modelo matemático multiobjetivo coordinación - decisiones conjuntas y procesos distribución de ayuda y restauración del acceso

Con base en las medidas de desempeño seleccionadas, en este apartado se presenta la formulación del modelo de programación lineal entera mixta que representa la propuesta de coordinación de los procesos de distribución de ayuda y restauración del acceso bajo un enfoque multiobjetivo.

Supuestos

Los supuestos considerados fueron los mismos del apartado 5.3.

Conjuntos.

Se definieron los mismos conjuntos descritos en el apartado 5.3.

Parámetros

Adicional a los parámetros descritos en el apartado 5.3, también se consideraron en el modelo los siguientes parámetros.

cdes: costo por hora desplazamiento del vehículo de ayuda humanitaria

cfijo: costo fijo de operación de cada vehículo

cttm_m: costo por hora desplazamiento de cada tipo de máquina de reparación m

ctom_m: costo por hora consumo de cada tipo de máquina de reparación m

cfc: costo fijo de operación de cada cuadrilla de reparación

cfm_m: costo fijo de mantener cada tipo de máquina de reparación m

fe_i: tiempo estimado de entrega de ayuda humanitaria en cada punto de atención i

Variables de decisión

Adicional a las variables descritas en el apartado 5.3, también se incorporaron en el modelo las siguientes variables de decisión.

AD_i = tiempo de adelanto de entrega en el nodo de atención i
 TA_i = tardanza entrega de ayuda humanitaria en el nodo de atención i
 $TMAX$ = tardanza máxima entrega de ayuda humanitaria
 $BT_i = \{1, \text{si ocurre tardanza en el nodo de atención } i, 0 \text{ de lo contrario}\}$

Funciones Objetivo

Las funciones objetivo que se presentan a continuación corresponden a las medidas de desempeño en las dimensiones de eficacia, bienestar social y eficiencia, respectivamente, las cuales fueron seleccionadas en el apartado 5.6.1.

$$Z_{min} = \sum_{i \in N} TL_i \quad (51)$$

$$Z_{min} = TMAX \quad (97)$$

$$Z_{min} = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N: i \neq j} \left(\frac{dis_{ij}}{v_1} \right) * X_{ij} * cdes + \sum_{j \in N: j > 0} X_{0j} * cfijo +$$

$$\sum_{m \in M} \sum_{i, j \in NM[m]: i \neq j} \left(\frac{dis_{ij}}{v_2} \right) * Y_{mij} * cttm_m + \sum_{m \in M} \sum_{i \in NM[m]} ETM_{mi} * ctom_m +$$

$$\sum_{i \in NI: i \neq 0} XR_{0i} * cfc + \sum_{m \in M} \sum_{i \in NM[m]: i > 0} Y_{m0i} * cfm_m \quad (98)$$

Restricciones

El modelo matemático multiobjetivo incluye las restricciones (52) – (96) descritas en el apartado 5.3. Adicionalmente, se consideran las siguientes restricciones.

$$AD_i - TA_i = fe_i - TL_i \quad \forall i \in N: i > 0 \quad (99)$$

$$TA_i \leq TMAX \quad \forall i \in N: i > 0 \quad (100)$$

$$TA_i \leq BT_i * M \quad \forall i \in N: i > 0 \quad (101)$$

$$AD_i \leq (1 - BT_i) * M \quad \forall i \in N: i > 0 \quad (102)$$

$$BT_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in N \quad (103)$$

$$AD_i, TA_i \geq 0, \forall i \in N \quad (104)$$

$$TMAX \geq 0 \quad (105)$$

La ecuación (51) representa la función objetivo del modelo que minimiza el tiempo total de llegada hacia los puntos de entrega o atención, la cual se abordó en el apartado 5.2.5. La ecuación (97) representa la función objetivo que minimiza la tardanza máxima en la distribución de ayuda humanitaria o tiempo de privación de la población afectada por el desastre. La ecuación (98) representa la función objetivo que minimiza el costo total de logística representado como la suma del costo total de desplazamiento y costo total fijo de asignación de los vehículos que realizan la distribución de ayuda humanitaria más los costos totales del proceso de reparación asociados con la suma del costo total de desplazamiento e inactividad de las máquinas empleadas en la reparación transitoria de las vías y los costos fijos de asignación de cuadrillas y máquinas de reparación. La restricción (99) determina el cálculo del adelanto o tardanza potencial en la entrega de ayuda humanitaria para cada punto de atención i . La restricción (100) es una restricción de recursividad, la cual garantiza que la tardanza en cada nodo i es menor o igual a la tardanza máxima. Las restricciones (101) y (102) son limitaciones de exclusión, es decir, garantiza que en cada nodo de demanda i solamente puede presentarse un adelanto o una tardanza en la entrega de ayuda humanitaria. Finalmente, las restricciones (103 - 105) representan la condición de No negatividad y lógica de las variables de decisión.

5.6.3. Descripción contexto geográfico particular.

Con el fin de validar el modelo matemático formulado, se utilizó como contexto geográfico el municipio de Roldanillo, Colombia; considerando la información y parámetros de entrada que aparece en los apartados 3.5.1 y 4.5.1 del presente documento. De igual forma, se consideró información adicional, la cual se presenta a continuación. Como se mencionaba en el apartado 4.5.1, para el proceso de restauración del acceso, el municipio objeto de estudio posee dos (2) cuadrillas de reparación disponibles, cuyo costo fijo de operación individual suministrado por el CMGR es 100 miles \$, el cual se incurre cada vez se requiera el despliegue de la reparación. Por otra parte, se consideraron cuatro (4) tipos de maquinaria caracterizadas por bulldozer (máquina 1), retroexcavadoras (máquina 2), vibrocompactadores (máquina 3) y volquetas (máquina 4); considerando dos (2) ejemplares de cada tipo, costos variables asociados por hora de desplazamiento y hora de consumo y el costo fijo de operación de cada tipo de máquina, el cual se incurre cada vez se requiera el despliegue de la reparación, cuyos valores suministrados por los actores responsables del CMGR se presentan en la Tabla 31.

Tabla 31. Costos incurridos tipos de máquina en proceso de restauración de la malla vial.

Tipo de máquina requerida	Costo por hora desplazamiento de cada tipo de máquina (\$ miles / hora)	Costo por hora consumo de cada tipo de máquina (\$ miles / hora)	Costo fijo de operación cada tipo de máquina (\$ miles)
Bulldozer (máquina 1)	2	1	200
Retroexcavadora (máquina 2)	3	1.5	300
Vibrocompactador (máquina 3)	4	2	400
Volqueta (máquina 4)	2	1	150

Fuente: Adaptado de CMGR Roldanillo (2020).

Con base en información suministrada por los actores del CMGR, se pudo establecer el costo por hora de desplazamiento de un vehículo destinado a la operación de distribución de ayuda en 5 miles \$ y el costo fijo de operación de cada vehículo en 150 miles \$, el cual se incurre una vez se realice el despliegue del proceso de distribución. Finalmente, se fijó un tiempo estimado de entrega de ayuda humanitaria en cada punto de atención de 15 minutos, cuyo valor fue establecido por el CMGR como una meta establecida por parte de los organismos responsables del suministro de ayuda humanitaria con el fin de contribuir a la reducción del sufrimiento humano en la población afectada por un desastre.

5.6.4. Resultados modelo matemático multiobjetivo

Para la ejecución del modelo se empleó el lenguaje de programación matemática AMPL y el solver CPLEX (Anexo 11), disponible en el entorno de desarrollo AMPL IDE versión profesional, por medio de un ordenador con las siguientes especificaciones: Intel® Core™ i7-10750H (6C / 12T, 2,6 / 5,0GHz, 12MB), 32 GB de RAM y 1 TB de disco duro. Se generó un total de 364 variables de decisión, de las cuales 180 fueron binarias y 184 continuas. Además, se obtuvieron 942 restricciones, 88 de igualdad y 854 de desigualdad, generando un tiempo de 10 minutos, 25 segundos con 33 centésimas para las tres (3) ternas de resultados que conforman la matriz de pagos (Anexo 12). A continuación, se presentan y analizan los resultados obtenidos del modelo matemático formulado.

Generación de soluciones con el método epsilon restricciones

Con el fin de proporcionar una solución al modelo matemático multiobjetivo formulado existe un método propuesto por (YV & DA, 1971), denominado como de epsilon – restricciones. Este método consiste en transformar un problema multiobjetivo en una serie de problemas de optimización mono-objetivo. En cada problema, se considera uno de los objetivos como objetivo primario y los demás objetivos como restricciones, asociadas a un conjunto de parámetros llamados epsilon (Osorio et al., 2014).

Primero se optimizó el modelo por cada función objetivo (FO) o medida de desempeño y se toman los valores para cada una, con el fin de construir la matriz de pagos correspondiente. Después de haber

calculado los valores óptimos por cada función objetivo (FO), se determinaron los valores máximos y mínimos de cada medida de desempeño obtenidos. Una vez determinados los valores máximos y mínimos por cada función objetivo (FO), se obtiene el rango de cada función de desempeño, el cual se dividió en np pasos, con el fin de obtener una amplitud de paso, que delimitará las soluciones, para así obtener distintas soluciones. En otras palabras, con esta amplitud de paso, se determinaron los valores de ϵ para cada función objetivo diferente que se optimiza, estos valores van desde el valor máximo que puede alcanzar la solución, hasta el límite inferior o mejor valor de la medida de desempeño que se puede obtener por cada función objetivo. Luego se optimizaron cada una de las demás funciones objetivo, asignando las restricciones a las medidas de desempeño diferentes a la cual se va a optimizar. De esta forma, se convirtió el modelo multiobjetivo en mono-objetivo, seleccionando cada función objetivo como primaria y configurando las demás FO como restricciones, estas últimas a partir del conjunto de parámetros denominados ϵ .

El desarrollo del método ϵ restricciones generó un total de 18 soluciones por cada medida de desempeño optimizada, generando un total de 54 soluciones. Después, por cada medida de desempeño se graficaron estas soluciones determinando la frontera de Pareto que contiene las soluciones no dominadas de las soluciones resultantes. En el Anexo 12, se describen y desarrollan cada una de las etapas consideradas del método.

Representación gráfica de las soluciones generadas

Cuando se generan las soluciones por cada función objetivo (FO) se procede a representar gráficamente estas soluciones en una frontera de Pareto que contiene las soluciones no dominadas por las soluciones restantes obtenidas. En el contexto de la optimización multiobjetivo, una solución no dominada es aquella que no puede ser mejorada en ningún objetivo sin empeorar en al menos uno de los demás objetivos. Estas soluciones son importantes en la optimización multiobjetivo porque representan compromisos entre los diferentes objetivos que se buscan optimizar y ayudan a los decisores a elegir una solución que mejor se adapte a sus necesidades y preferencias (Aranda & Orjuela, 2015).

Para facilitar la identificación de las soluciones no dominadas y la generación del Frente de Pareto correspondiente se empleó el algoritmo *fast-nondominated-sort* desarrollado por (Deb et al., 2002), cuyas etapas se presentan en la Anexo 12. Una vez desarrollado el algoritmo correspondiente, se encontró que de las 54 soluciones generadas por la implementación del método ϵ restricciones, dos soluciones fueron

infactibles, una fue repetida y 14 soluciones fueron no dominadas, por lo tanto, hacen parte del primer frente de Pareto correspondiente (Figura 41).

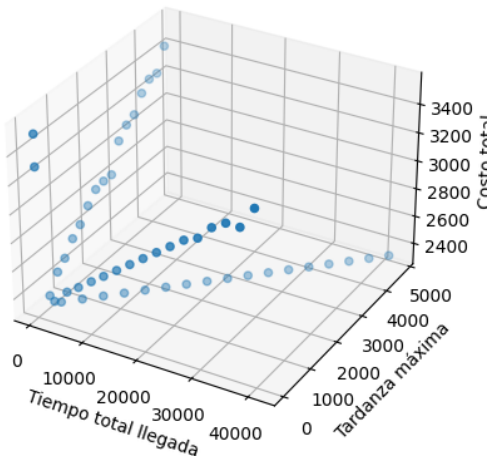


Figura 42. Soluciones no dominadas y frontera de Pareto obtenido.
Fuente: el autor.

En otras palabras, cada una de las 14 soluciones obtenidas constituye una solución de la propuesta de coordinación basada en decisiones conjuntas para los procesos de distribución de ayuda humanitaria y restauración del acceso, considerando medidas de desempeño enmarcadas en el tiempo total de llegada, tardanza máxima o tiempo de privación y el costo total, asociadas con las dimensiones de eficacia, bienestar social y eficiencia respectivamente. En el Anexo 12 se presenta en detalle el desarrollo de la frontera de Pareto para la estrategia de decisiones conjuntas a través del algoritmo *fast-nondominated-sort* y su código en *Python*.

5.7. Comparación Decisiones secuenciales vs. Decisiones conjuntas bajo un enfoque multiobjetivo

Con el fin de evaluar el desempeño de la propuesta de coordinación, en este apartado se realiza un análisis comparativo de dos (2) esquemas de decisión: decisiones secuenciales y decisiones conjuntas.

5.7.1. Decisiones secuenciales bajo un enfoque multiobjetivo

Las decisiones secuenciales se basan en dos etapas. Primero se determinan los tiempos de finalización de reparación de las vías afectadas, a partir de la programación de los recursos de reparación para la atención de las interrupciones viales transitorias, considerando como medidas de desempeño la minimización del tiempo total de finalización de la reparación y el costo total de la operación de la atención de interrupciones viales transitorias bajo un enfoque multiobjetivo. Una vez restauradas las vías, en segundo lugar, se realiza la planificación de las rutas de distribución de ayuda humanitaria basadas en el ruteo de

vehículos destinados a visitar a los puntos de atención, considerando como medidas de desempeño la minimización del tiempo total de llegada de ayuda humanitaria hacia los puntos de atención, la minimización de la tardanza máxima y el costo total de distribución bajo un enfoque multiobjetivo.

En otras palabras, las soluciones no dominadas obtenidas en el modelo de restauración del acceso considerando las funciones objetivo basadas en la minimización del tiempo total de finalización de la reparación y el costo total de la reparación; se convierten en parámetros de entrada para la solución del modelo multiobjetivo de distribución de la ayuda considerando funciones objetivo basadas en la minimización del tiempo total de llegada, la tardanza máxima y el costo total de distribución. La minimización del tiempo total de finalización de la reparación está dada por la ecuación (23), el tiempo total de llegada hacia los puntos de atención está dada por la ecuación (1) y la tardanza máxima o tiempo de privación por la ecuación (97) y las restricciones (99 – 105). La minimización del costo total de reparación y el costo total de distribución están dadas por las ecuaciones (106) y (107), respectivamente.

$$Z_{min} = \sum_{m \in M} \sum_{i \in NM[m]: i \neq j} \left(dis_{ij} / v_2 \right) * Y_{mij} * cttm_m + \sum_{m \in M} \sum_{i \in NM[m]} ETM_{mi} * ctom_m +$$

$$\sum_{i \in NI: i \neq 0} XR_{0i} * cfc + \sum_{m \in M} \sum_{i \in NM[m]: i > 0} Y_{m0i} * cfm_m \quad (106)$$

$$Z_{min} = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N: i \neq j} \left(dis_{ij} / v_1 \right) * X_{ij} * cdes + \sum_{j \in N: j > 0} X_{0j} * cfijo \quad (107)$$

Se evaluó un total de 54 resultados empleando el método épsilon restricciones para la estrategia de decisión secuencial, cuya identificación de soluciones no dominadas y frontera de Pareto se obtuvo con base en el algoritmo *Fast Nondominated Sorting*; es decir, del total de soluciones generadas, 12 soluciones fueron infactibles, dos fueron repetidas y 9 soluciones fueron no dominadas, por lo tanto, estas últimas hacen parte del primer frente de Pareto correspondiente. En la Figura 42 se exhibe la frontera de Pareto que contiene las soluciones no dominadas de dicha estrategia. El desarrollo del algoritmo *Fast Nondominated Sorting* y su código en *Python* para la identificación de soluciones no dominadas y frente de Pareto correspondiente al esquema de decisión secuencial es similar al desarrollado para la propuesta de coordinación basada en las decisiones conjuntas descrito en el Anexo 12.

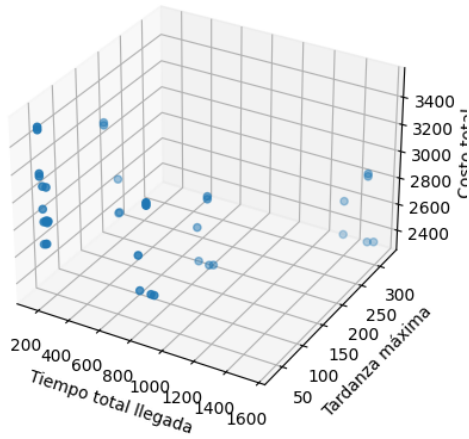


Figura 43. Soluciones no dominadas y frontera de Pareto para decisiones secuenciales.
Fuente: el autor.

La frontera de Pareto en el esquema de decisión secuencial contiene las soluciones no dominadas del tiempo total de llegada, la tardanza máxima o tiempo de privación y el costo total de distribución y reparación. El costo total de distribución y reparación es igual a la suma del costo total de reparación dada en las soluciones no dominadas del modelo de reparación de carreteras multiobjetivo correspondiente al primer nivel o etapa de decisión y del costo total de distribución obtenido de las soluciones no dominadas del modelo de distribución de ayuda multiobjetivo correspondiente el segundo nivel o etapa de decisión.

Por último, los resultados obtenidos del esquema decisión anterior, son comparados con los obtenidos a través de la propuesta de coordinación basada en las decisiones conjuntas o colectivas de ambos procesos, es decir, la distribución de la ayuda y la restauración del acceso bajo un enfoque multiobjetivo.

5.7.2. Comparaciones de las fronteras de Pareto para las decisiones conjuntas vs. Decisiones secuenciales

Para las estrategias de decisiones conjuntas y secuenciales, se corrió el modelo 54 veces, se encontraron sus respectivas fronteras de Pareto, luego este par de fronteras de Pareto se consolidaron y sobre este consolidado se determinó una nueva frontera de Pareto, que se denomina la frontera consolidada. Para comparar las fronteras de Pareto de la propuesta de coordinación basada en decisiones conjuntas de los procesos de distribución de ayuda y la restauración del acceso, con las decisiones secuenciales de ambos procesos, se establecieron dos medidas de desempeño, la primera es el número de soluciones que tiene cada frontera en la frontera consolidada y la segunda es la desviación porcentual de cada frontera frente a la

frontera consolidada. Estas medidas abordan la convergencia hacia la frontera y la amplitud de esta, que son los dos problemas claves en la búsqueda de frentes de Pareto (Deb et al., 2002).

Se evaluó un total de 54 resultados empleando el método ϵ restricciones para las estrategias de decisión conjunta y secuencial, cuya identificación de soluciones no dominadas y frontera de Pareto se obtuvo con base en el algoritmo *Fast Nondominated Sorting*. En la Figura 43 se exhibe la frontera de Pareto consolidada que contiene las soluciones no dominadas de ambas estrategias o esquema de decisión. En el Anexo 13 se presenta el código en *Python* para la obtención de los resultados de la frontera de Pareto consolidada. A continuación, se explican cada una de las métricas empleadas para la comparación de ambas fronteras de Pareto con relación a la consolidada, denominadas como: proporción de soluciones en la frontera de Pareto consolidada y desviación porcentual promedio a la frontera de Pareto Consolidada.

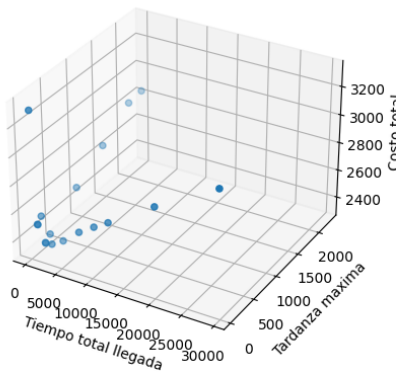


Figura 44. Frontera de Pareto consolidada Decisiones conjuntas y secuenciales en Tiempo total llegada, Tardanza máxima y Costo total.
Fuente: el autor.

Proporción de soluciones en la frontera de Pareto consolidada

Autores como Deb et al., (2002) presentaron un marco de clasificación de múltiples fronteras de Pareto, en el que se establece un ranking para las fronteras. En este caso la primera frontera tiene el mayor valor de importancia por estar conformada por las soluciones no dominadas. La segunda frontera está con un ranking menor que al anterior y está conformada por aquellas soluciones que sean no dominadas al retirar las soluciones de la primera frontera. El proceso se repite generando múltiples fronteras con un ranking de importancia, por lo tanto, este proceso sugiere que una frontera es mejor que otra en la medida en que sus soluciones dominen a la otra. Por otra parte, autores como Zitzler & Thiele, (1999) presentan el concepto de fuerza de una solución en proporción al número de soluciones que domina la solución, es decir, la fuerza de un conjunto de soluciones es directamente proporcional al número de soluciones que domina este conjunto.

Con base en lo anterior, se plantea como una de las medidas de comparación entre ambos esquemas de decisión, la proporción de soluciones que los esquemas de decisión conjunta y secuencial a la frontera de Pareto consolidada. De tal forma, se infiere que aquella estrategia que tiene un mayor porcentaje de soluciones en la frontera de Pareto consolidada posee un mejor desempeño con relación a la que posee un menor número de soluciones.

Desviación promedio a la frontera Consolidada

Esta métrica se asocia con el grado de convergencia entre las fronteras de Pareto estimadas de los esquemas de decisión conjunta y secuencial con relación a la frontera de Pareto consolidada. Esta lógica fue desarrollada por Deb et al., (2002), a partir de la distancia euclidiana al punto de la frontera de Pareto consolidada más cercano, cuyo promedio de las distancias obtenidas es la métrica de convergencia, de tal modo que entre más pequeño sea el valor, más cerca se encontrará la frontera de Pareto estimada de dichas estrategias o esquemas de decisión hacia la frontera consolidada. Aquella frontera que más se acerque a la consolidada y por tanto tenga el menor valor de la métrica, será la mejor desde el punto de vista de convergencia.

En esta investigación se encuentran tres fronteras de Pareto, donde las dos primeras corresponden a las decisiones conjuntas y secuenciales, es decir, cada una de ellas son la mejor aproximación a la frontera de Pareto óptima a la que se puede llegar con determinado esquema de decisión. Los puntos de estas dos fronteras se consolidan y con ellos se encuentra una nueva y mejor frontera consolidada, en este contexto la frontera consolidada representa la frontera óptima al problema (tercera frontera). En tal sentido, la convergencia de cada una de las fronteras de Pareto correspondiente a cada estrategia hacia la frontera consolidada representa un buen indicador de la calidad de cada frontera y una herramienta importante para poder comparar cuál de las dos fronteras o esquemas de decisión es mejor.

Dentro del desarrollo de las fronteras aproximadas de Pareto para ambos esquemas de decisión, se generó un total de 54 soluciones para cada uno, discriminando las soluciones repetidas e infactibles. Luego, se estableció la medida de convergencia hacia la frontera óptima hallando para cada punto de la frontera consolidada, el punto de cada frontera aproximada más cercano en distancia euclidiana mínima. De tal modo que dada una solución j de la frontera de Pareto consolidada en el objetivo i representado por X_{ji} ; se debe hallar por cada frontera de Pareto de las dos estrategias o esquemas de decisión (conjunta y secuencial) el punto de la frontera estimada que tenga la menor distancia dis_{je} , con el punto de la frontera de Pareto óptima aproximada (consolidada) definido así:

$$dis_{je} = \min_e \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{ji} - X_{ei})^2} \quad (108)$$

Donde X_{ei} es el valor que tiene la solución x de la frontera estimada e en el objetivo i . Una vez se encuentren para cada punto de la frontera óptima la menor distancia euclidiana, estos valores se promedian y esta medida se emplea para comparar las dos estrategias en términos de convergencia. Adicionalmente, al considerar todos los puntos de la frontera óptima o consolidada, incluso los puntos extremos, también ofrece una idea de la amplitud que tiene la frontera de Pareto de cada estrategia; debido a que entre menor sea este valor, esto indica que la frontera de dicha estrategia tiene puntos muy cercanos a cada punto de la frontera óptima o consolidada.

Las dos medidas anteriores se calculan para cada uno los esquemas de decisión, de tal manera que se logra establecer en qué escenarios es mejor la propuesta de coordinación basada en las decisiones conjuntas de los procesos de distribución de ayuda y restauración del acceso de la malla vial. En el Anexo 13 se presenta en detalle el proceso de cálculo de la métrica en consideración. En la Figura 43 se presentó la frontera de Pareto consolidada de los esquemas de decisiones conjuntas y secuenciales de los procesos de distribución de ayuda y restauración del acceso considerando como medidas de desempeño el tiempo total de llegada, la tardanza máxima y el costo total (Terna # 1).

Sin embargo, también se realizó el análisis para medidas de desempeño alternativas como el tiempo de finalización de la reparación, el tiempo máximo de reparación y el tiempo máximo de llegada de ayuda humanitaria hacia los puntos de atención, generando tres ternas adicionales, cuyas fronteras de Pareto consolidadas se presenta en las Figuras 44 - 46. En la Figura 44 se presente la frontera de Pareto consolidada de los esquemas de decisiones conjuntas y secuenciales de los procesos de distribución de ayuda y restauración del acceso considerando como medidas de desempeño el tiempo de finalización de la reparación de las vías, la tardanza máxima o tiempo de privación y el costo total (Terna # 2).

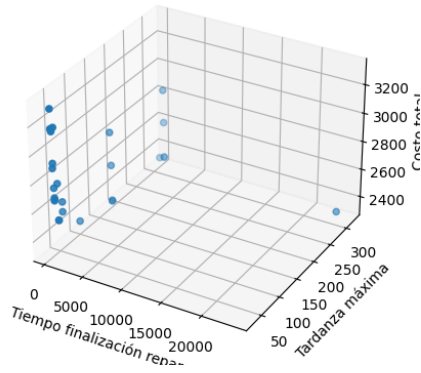


Figura 45. Frontera de Pareto Consolidada Decisiones conjuntas y secuenciales en Tiempo finalización reparación, Tardanza máxima y Costo total (terna # 2).
Fuente: el autor.

En la Figura 45 se presenta la frontera de Pareto consolidada de los esquemas de decisiones conjuntas y secuenciales de los procesos de distribución de ayuda y restauración del acceso considerando como medidas de desempeño el tiempo máximo de finalización de la reparación de las vías, la tardanza máxima o tiempo de privación y el costo total (terna # 3).

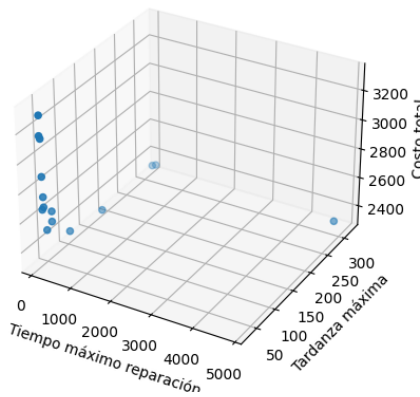


Figura 46. Frontera de Pareto Consolidada Decisiones conjuntas y secuenciales en Tiempo máximo reparación, Tardanza máxima y Costo total (terna # 3).
Fuente: el autor.

Finalmente, la Figura 46 presenta la frontera de Pareto consolidada de los esquemas de decisiones conjuntas y secuenciales de los procesos de distribución de ayuda y restauración del acceso considerando como medidas de desempeño el tiempo máximo de llegada, la tardanza máxima o tiempo de privación y costo total (terna # 4).

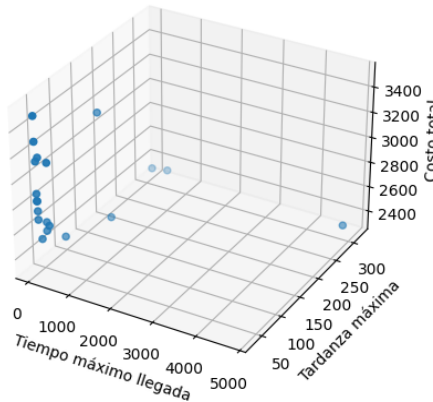


Figura 47. Frontera de Pareto Consolidada Decisiones conjuntas y secuenciales en Tiempo máximo llegada, Tardanza máxima y Costo total (terna # 4).
Fuente: el autor.

Con base en lo anterior, para cada frontera de Pareto correspondiente a cada estrategia se determinó la proporción de soluciones en la frontera de Pareto consolidada, la desviación porcentual promedio a la frontera consolidada y demás indicadores de interés como la cantidad de soluciones infactibles y repetidas generadas por cada esquema de decisión (Tabla 32).

Los resultados anteriores indicaron que el 3.7% (2 de 54) de las soluciones generadas por la propuesta de coordinación basada en las decisiones conjuntas de los procesos de distribución de ayuda y restauración del acceso son infactibles (Tabla 32), es decir, el 96.7% (52 de 54) de las soluciones obtenidas cumplen con las restricciones consideradas en el modelo matemático que representa propuesta de coordinación. En cambio, el 22.2% (12 de 54) de las soluciones del modelo que representa las decisiones secuenciales de ambos procesos fueron infactibles (Tabla 32), es decir, el 77.8% (42 de 54) de las soluciones obtenidas cumplieron con las restricciones en dicho esquema de decisión. Esto último significa que el 22.2% de las soluciones no dominadas generadas en el modelo matemático multiobjetivo que representa la operatividad del proceso de restauración del acceso de la malla vial que corresponde el primer nivel de decisión no satisfacen las limitaciones y características de operación del proceso de distribución de ayuda humanitaria o segundo nivel de decisión, dado que la lógica del esquema de decisiones secuenciales involucra decisiones dentro de una estructura jerárquica de dos niveles, desconociendo aspectos de colectividad entre ambos procesos objeto de estudio.

Con relación a la cantidad de soluciones no dominadas repetidas en las estrategias de decisión secuencial y conjunta en la frontera de Pareto consolidada, se pudo determinar que en las cuatro (4) ternas analizadas, la cantidad de soluciones repetidas en la terna # 2 fue igual en ambos esquemas de decisión

(Tabla 32). Sin embargo, la cantidad de soluciones repetidas en las ternas restantes, la cantidad de soluciones repetidas en el esquema de decisión conjunta fue menor con relación al esquema de decisión secuencial (Tabla 32). Lo anterior indica, que la propuesta de coordinación basada en decisiones conjuntas puede presentar un mayor conjunto o alternativas de solución con relación a las decisiones secuenciales.

Tabla 32. Resultados de comparación fronteras de Pareto para esquemas de decisión conjunta y secuencial.

Terna	Cantidad soluciones método epsilon restricciones	Cantidad soluciones infactibles Decisiones secuenciales	Cantidad soluciones infactibles Decisiones conjuntas	Cantidad soluciones repetidas Decisiones secuenciales	Cantidad soluciones repetidas Decisiones conjuntas
Tiempo total de llegada (Tiempo promedio llegada), Tardanza máxima, Costo total (terna # 1)	54	16	3	2	1
Tiempo total finalización reparación (Tiempo promedio reparación), Tardanza máxima, Costo total (terna # 2)	54	12	2	2	2
Tiempo máximo finalización reparación, Tardanza máxima, Costo total (terna # 3)	54	24	2	5	2
Tiempo máximo llegada, Tardanza máxima, Costo total (terna # 4)	54	12	2	2	2
Terna	Cantidad soluciones Frente Pareto aproximado Decisiones secuenciales	Cantidad soluciones Frente Pareto aproximado Decisiones conjuntas	Cantidad soluciones Decisiones secuenciales en Frente Pareto consolidado	Cantidad soluciones Decisiones conjuntas en Frente Pareto consolidado	
Tiempo total de llegada (Tiempo promedio llegada), Tardanza máxima, Costo total (terna # 1)	5	14	4	12	
Tiempo total finalización reparación (Tiempo promedio reparación), Tardanza máxima, Costo total (terna # 2)	16	10	12	9	
Tiempo máximo finalización reparación, Tardanza máxima, Costo total (terna # 3)	5	10	4	10	
Tiempo máximo llegada, Tardanza máxima, Costo total (terna # 4)	10	10	7	10	
Terna	Proporción soluciones Decisiones secuenciales en frontera de Pareto consolidada	Proporción soluciones Decisiones conjuntas en frontera de Pareto consolidada	Desviación Sol. Decisiones secuenciales promedio a la frontera consolidada	Desviación Sol. Decisiones conjuntas promedio a la frontera consolidada	
Tiempo total de llegada (Tiempo promedio llegada), Tardanza máxima, Costo total (terna # 1)	80.0%	85.7%	4343.2	107.5	
Tiempo total finalización reparación (Tiempo promedio reparación), Tardanza máxima, Costo total (terna # 2)	75.0%	90.0%	1142.5	63.3	
Tiempo máximo finalización reparación, Tardanza máxima, Costo total (terna # 3)	80.0%	100.0%	410.28	24.95	
Tiempo máximo llegada, Tardanza máxima, Costo total (terna # 4)	70.0%	100.0%	348.1	78	

Fuente: el autor.

Para cada terna se generaron los frentes de Pareto correspondientes según cada esquema de decisión, cuyas soluciones no dominadas permitió construir los frentes de Pareto consolidados. Los resultados indicaron que la proporción de las decisiones conjuntas en la frontera de Pareto fue mayor en las ternas “Tiempo total de llegada o Tiempo promedio llegada, Tardanza máxima o tiempo de privación, Costo

total” (Tabla 32) y “Tiempo máximo finalización reparación, Tardanza máxima, Costo total” (Tabla 32) ($\text{proporción soluciones FP Consolidado}^{[\text{Ternas 1 y 3}]_{[\text{Des. Conjuntas}]}} > \text{proporción soluciones FP Consolidado}^{[\text{Ternas 1 y 3}]_{[\text{Secuenciales}]}}$). Además, las decisiones conjuntas presentan una mejor convergencia dado que la desviación promedio de este esquema de decisión a la frontera de Pareto consolidada fue menor (Tabla 32) ($\text{desviación porcentual promedio}^{[\text{Ternas 1 y 3}]_{[\text{Des. Conjuntas}]}} < \text{desviación porcentual promedio}^{[\text{Ternas 1 y 3}]_{[\text{Des. Secuenciales}]}}$).

En las ternas “Tiempo total finalización reparación o Tiempo promedio reparación, Tardanza máxima, Costo total” (Tabla 32) y “Tiempo máximo llegada, Tardanza máxima o tiempo de privación, Costo total” (Tabla 32) la proporción de soluciones en la frontera de Pareto consolidada fue mayor en las decisiones conjuntas con respecto a las decisiones secuenciales ($\text{proporción soluciones FP Consolidado}^{[\text{Ternas 2 y 4}]_{[\text{Des. Consolidada}]}} > \text{proporción soluciones FP Consolidado}^{[\text{Ternas 2 y 4}]_{[\text{Secuenciales}]}}$) y la desviación promedio de la propuesta de coordinación basada en decisiones conjuntas a la frontera consolidada fue menor con respecto al esquema de decisión secuencial (Tabla 32) ($\text{desviación porcentual promedio}^{[\text{Ternas 2 y 4}]_{[\text{Des. Conjuntas}]}} < \text{desviación porcentual promedio}^{[\text{Ternas 2 y 4}]_{[\text{Des. Secuenciales}]}}$), lo cual indica una mejor convergencia y desempeño de las decisiones conjuntas a la frontera de Pareto consolidada. Aunque en la terna # 2 en el esquema de decisiones secuenciales generó un mayor número de soluciones en su frente de Pareto correspondiente comparado con el esquema de decisiones conjuntas, solamente el 75% de estas soluciones hacen parte del frente de Pareto consolidado. Al compararse con la cantidad de soluciones no dominadas del esquema de decisiones conjuntas en el frente de Pareto consolidado cuyas soluciones representan el 90%, este último esquema de decisión es mejor que las decisiones secuenciales.

Los resultados obtenidos permiten determinar que la propuesta de coordinación de la distribución de ayuda humanitaria con la restauración del acceso basada en las decisiones conjuntas de ambos procesos, mejora el desempeño en términos de medidas de desempeño enmarcadas en la dimensiones de eficacia, eficiencia y bienestar social para la atención humanitaria en zonas afectadas por desastres naturales súbitos con limitaciones de accesibilidad generadas por la presencia de interrupciones viales transitorias, con relación a un esquema de decisión secuencial o enfoque jerárquico en las decisiones de ambos procesos. Con base en lo anterior, los resultados obtenidos del análisis de ternas del modelo matemático multiobjetivo que representa la coordinación de la distribución de ayuda y la restauración del acceso de las vías contribuyen a validar la hipótesis general de la investigación.

Lo anterior significa que cada uno de los puntos o soluciones no dominadas de la propuesta de coordinación constituye una solución para los actores involucrados en la toma de decisiones de ambos

procesos. Por ejemplo, una solución no dominada en las decisiones conjuntas involucra un tiempo total de llegada mínimo de 174.42 minutos, una tardanza máxima de 30.3533 minutos y costo total de distribución y reparación de 3519.96 miles COP, asociada con la descrita en el apartado 5.4, que presenta la configuración de rutas de distribución de ayuda y la programación de recursos de restauración de vías en el contexto geográfico particular.

Por último, se realizó un total de 600 corridas, obteniendo las soluciones no dominadas para los marcos de decisión secuencial y conjunta de la distribución de ayuda y restauración malla vial (Tabla 33).

Tabla 33. Resultados comparación fronteras de Pareto para esquemas decisión conjunta y secuencial.

Terna	Cantidad soluciones método epsilon restricciones	Cantidad soluciones infactibles Decisiones secuenciales	Cantidad soluciones infactibles Decisiones conjuntas	Cantidad soluciones repetidas Decisiones secuenciales	Cantidad soluciones repetidas Decisiones conjuntas
Tiempo total de llegada (Tiempo promedio llegada), Tardanza máxima, Costo total (terna # 1)	600	103	5	261	112
Tiempo total finalización reparación (Tiempo promedio reparación), Tardanza máxima, Costo total (terna # 2)	600	98	10	170	167
Tiempo máximo finalización reparación, Tardanza máxima, Costo total (terna # 3)	600	85	21	161	130
Tiempo máximo llegada, Tardanza máxima, Costo total (terna # 4)	600	110	7	215	153
Terna	Cantidad soluciones Frente Pareto aproximado Decisiones secuenciales	Cantidad soluciones Frente Pareto aproximado Decisiones conjuntas	Cantidad soluciones Decisiones secuenciales en Frente Pareto consolidado	Cantidad soluciones Decisiones conjuntas en Frente Pareto consolidado	
Tiempo total de llegada (Tiempo promedio llegada), Tardanza máxima, Costo total (terna # 1)	151	426	17	57	
Tiempo total finalización reparación (Tiempo promedio reparación), Tardanza máxima, Costo total (terna # 2)	183	224	22	32	
Tiempo máximo finalización reparación, Tardanza máxima, Costo total (terna # 3)	227	118	17	10	
Tiempo máximo llegada, Tardanza máxima, Costo total (terna # 4)	275	183	17	34	
Terna	Proporción soluciones Decisiones secuenciales en frontera de Pareto consolidada	Proporción soluciones Decisiones conjuntas en frontera de Pareto consolidada	Desviación Sol. Decisiones secuenciales promedio a la frontera consolidada	Desviación Sol. Decisiones conjuntas promedio a la frontera consolidada	
Tiempo total de llegada (Tiempo promedio llegada), Tardanza máxima, Costo total (terna # 1)	11.3%	13.4%	177.94	38.66	
Tiempo total finalización reparación (Tiempo promedio reparación), Tardanza máxima, Costo total (terna # 2)	12.02%	14.29%	94.6	10.6	
Tiempo máximo finalización reparación, Tardanza máxima, Costo total (terna # 3)	7.5%	8.47%	43.1	9.8	
Tiempo máximo llegada, Tardanza máxima, Costo total (terna # 4)	6.18%	18.58%	171.7	69.7	

Fuente: el autor.

Los resultados reflejan que la proporción de las soluciones generadas en el frente de Pareto consolidado o frente aproximado óptimo para la propuesta de coordinación basada en las decisiones conjuntas en las ternas consideradas con relación a un esquema de decisión secuencial fue mejor al igual que su convergencia, dado que la desviación promedio en este esquema de decisión fue menor (Tabla 33). Con relación a la cantidad de soluciones repetidas e infactibles, el enfoque coordinado mostró también un mejor desempeño (Tabla 33).

De igual forma se realizó un análisis comparativo de la instancia inicial con relación a una instancia alternativa (Tabla 34) donde existe una mayor cantidad de vías afectadas con base en información suministrada por el CMGRD del municipio de Roldanillo. Para este caso particular se observó que al incrementar la cantidad de interrupciones viales transitorias a 3 unidades considerando la misma cantidad de vehículos de distribución de ayuda humanitaria, número cuadrillas y tipos de máquina disponibles para la atención de las vías afectadas, se obtiene en la propuesta de coordinación un mejor desempeño con respecto a las funciones objetivo enmarcadas en las dimensiones de eficacia, bienestar social y eficiencia, derivadas de la revisión sistemática de la literatura (Rojas et al., 2023a) y la participación del grupo de expertos consultado cuyo proceso de priorización de medidas de desempeño se realizó con base en los lineamientos de la herramienta AHP.

Tabla 34. Resultados comparación decisión conjunta y secuencial.

Funciones de desempeño referentes con base en consulta a expertos y revisión literatura	Cantidad soluciones método ϵ restricciones	Cantidad soluciones infactibles Decisiones secuenciales	Cantidad soluciones infactibles Decisiones conjuntas	Cantidad soluciones repetidas Decisiones secuenciales	Cantidad soluciones repetidas Decisiones conjuntas
Tiempo total de llegada (Tiempo promedio llegada), Tardanza máxima, Costo total (Instancia alternativa)	600	300	2	72	224
Tiempo total de llegada (Tiempo promedio llegada), Tardanza máxima, Costo total (Instancia inicial)	600	103	5	261	112
Terna	Cantidad soluciones Frente Pareto aproximado Decisiones secuenciales	Cantidad soluciones Frente Pareto aproximado Decisiones conjuntas	Cantidad soluciones Decisiones secuenciales en Frente Pareto consolidado	Cantidad soluciones Decisiones conjuntas en Frente Pareto consolidado	
Tiempo total de llegada (Tiempo promedio llegada), Tardanza máxima, Costo total (Instancia alternativa)	13	49	2	12	
Tiempo total de llegada (Tiempo promedio llegada), Tardanza máxima, Costo total (Instancia inicial)	151	426	17	57	
Terna	Proporción soluciones Decisiones secuenciales en frontera de Pareto consolidada	Proporción soluciones Decisiones conjuntas en frontera de Pareto consolidada	Desviación Sol. Decisiones secuenciales promedio a la frontera consolidada	Desviación Sol. Decisiones conjuntas promedio a la frontera consolidada	
Tiempo total de llegada (Tiempo promedio llegada), Tardanza máxima, Costo total (Instancia alternativa)	15.4%	24.5%	1658.06	899.53	
Tiempo total de llegada (Tiempo promedio llegada), Tardanza máxima, Costo total (Instancia inicial)	11.3%	13.4%	177.94	38.66	

Fuente: el autor.

La proporción de soluciones y desviación promedio como indicadores principales de comparación, reflejan que la propuesta de coordinación de la distribución de la ayuda y la restauración del acceso de la malla vial en el frente de Pareto consolidado u óptimo aproximado es mejor con relación a un trabajo realizado por los actores responsables de ambos procesos desde un enfoque secuencial, contribuyendo a una mejor convergencia y diversificación en la frontera de Pareto óptima consolidada. En conclusión, los resultados obtenidos del modelo matemático multiobjetivo que representa la propuesta de coordinación de la distribución de ayuda y la restauración del acceso de las vías contribuyen a validar nuevamente la hipótesis y objetivo general de la investigación.

6. Discusión, conclusiones y recomendaciones.

A continuación, se presentan las discusiones y conclusiones de la investigación doctoral realizada, asociadas al cumplimiento de los objetivos planteados, las contribuciones, recomendaciones de trabajo futuro y resumen de productos académicos generados.

6.1. Discusión de los resultados

Se han realizado diferentes investigaciones en torno a la distribución de ayuda humanitaria como Sancı & Daskin, (2019); Shin, et al., (2019); Vahdani, et al., (2018) los cuales resaltaron la importancia de la planificación de rutas eficientes para la entrega de ayudas considerando limitaciones de acceso en las vías. No obstante, existen oportunidades de investigación asociadas con la desatención del impacto que tienen los tiempos de reparación y atención de las interrupciones temporales de las carreteras en la programación de la entrega de la ayuda humanitaria. El trabajo desarrollado en la tesis doctoral retrató la importancia de tener en cuenta la temporización y la determinación de los tiempos de recorrido de los vehículos en el momento de determinar la entrega de la ayuda humanitaria y los tiempos de llegada a cada uno de los puntos de atención. La disponibilidad de carreteras, los tiempos de servicio en cada uno de los nodos de destino y los tiempos efectivos de viaje entre nodos son también factores clave a considerar (Rojas et al., 2023b). En el momento de distribuir la ayuda humanitaria teniendo en cuenta las limitaciones de acceso, uno de los factores clave que influyen en la toma de decisiones en la fase de respuesta son los recursos disponibles, como la capacidad y disponibilidad de la flota, las características particulares de la situación y de las zonas afectadas por el desastre, el estado actual de las carreteras y la operación de rehabilitación y limpieza de las carreteras afectadas de forma transitoria (Sancı & Daskin, 2019, Coco et al., 2020).

Los resultados extraídos en el modelo que involucra la distribución de ayuda considerando limitaciones de accesibilidad relacionados con la determinación de los tiempos de llegada y salida de vehículos en cada punto de atención y la configuración de las rutas son coherentes con los encontrados en la literatura. Por ejemplo, Vahdani et al., (2018) y Shin et al., (2019) demostraron que las interrupciones en las carreteras pueden generar retrasos en los tiempos de entrega de la ayuda humanitaria, y más aún si los recursos disponibles para llevar a cabo dicha operación son limitados. Del mismo modo, Sabouhi et al., (2020) mencionan la importancia de programar las rutas de transporte teniendo en cuenta las limitaciones viales generadas por los eventos disruptivos. Sin embargo, es necesario establecer una buena programación de las rutas de distribución en función de los avances en los trabajos de restauración y recuperación de las carreteras afectadas. También es necesario definir los tiempos de llegada de los vehículos a cada nodo de

destino y los tiempos de salida de los vehículos entre nodos. Los resultados del capítulo 3 llenan este vacío (Rojas et al., 2023b).

En esta investigación se muestra que existe un estudio incipiente sobre el proceso de toma de decisiones de distribución de ayuda humanitaria en función del avance de las operaciones para hacer frente a las interrupciones temporales de las carreteras que generan limitaciones de accesibilidad. Por lo tanto, el capítulo 3 muestra la importancia de considerar con antelación las ventanas temporales en las que las carreteras estarán disponibles una vez iniciadas las operaciones de reparación (Rojas et al., 2023b). Este trabajo también permitió considerar información del estado de las vías y la toma de decisiones en el proceso de planificación y configuración de rutas en función del tiempo de reparación de las vías, que normalmente se han estudiado por separado en la literatura.

Desde un punto de vista práctico, se contribuye al proceso de toma de decisiones de las organizaciones encargadas de programar la entrega de ayuda en escenarios de desastre. En estos escenarios, siempre existe al menos un impacto temporal en las carreteras que conectan cada uno de los eslabones de la red logística humanitaria que debe ser contabilizado, así como los diferentes factores que podrían dificultar la entrega de ayuda humanitaria durante las primeras 72 horas tras producirse el desastre (Rojas et al., 2021).

Además, en lo que se refiere a la toma de decisiones sobre la distribución de ayuda humanitaria en función del progreso de las operaciones de reparación de las interrupciones temporales de las carreteras en zonas afectadas por desastres, especialmente aquellos denominados naturales de inicio súbito, se contribuye a llenar un vacío en la literatura al considerar: el efectos sobre el tiempo total de llegadas de los vehículos a los nodos de atención (Rojas et al., 2023b) considerando los espacios de tiempo en que las carreteras están disponibles como consecuencia de las operaciones de reparación de las mismas, el momento de llegada del vehículo al nodo de demanda, el tiempo de salida del vehículo desde cada nodo y el tramo de la carretera en que inicia la reparación.

En un escenario de desastre, ciertas zonas pueden volverse inaccesibles debido a la destrucción de las vías. Lo anterior puede convertirse en un obstáculo para la posterior entrega de ayuda humanitaria y la evacuación de las familias afectadas, lo que podría ocasionar una mayor cantidad de víctimas. Por lo tanto, reparar las carreteras destruidas y garantizar la accesibilidad a las zonas afectadas es también fundamental para brindar asistencia humanitaria lo antes posible (Maya et al., 2016; Shin et al., 2019; Coco et al., 2020). Debido a la destrucción generalizada de la red vial provocada por los desastres, no es realista suponer que

los enlaces y las instalaciones permanecerán intactos. Durante un desastre, la mayoría de las carreteras y rutas de comunicación quedan destruidas y bloqueadas, por lo que es fundamental considerar las decisiones que corresponden a las operaciones de reparación (Maya et al., 2016, Vahdani et al., 2018). En esta investigación doctoral se encontró que la determinación de los tiempos de inicio de reparación de las vías considerando los recursos limitados y las relaciones de precedencia en la reparación de arcos y la interrelación entre cuadrillas y máquinas involucradas en la reparación de las vías, fue importante para determinar el tiempo mínimo de finalización de la restauración de las vías.

Factores clave considerados en la restauración del acceso como: la disponibilidad de recursos, los tiempos de reparación de cada arco, los tiempos de operación de cada máquina, las condiciones de simultaneidad y precedencia entre las cuadrillas y las máquinas en función del estado inicial de las vías y la relación de precedencia entre éstas, fueron cruciales en el desarrollo del modelo matemático que involucra la restauración de las vías, cuyos resultados en la programación de recursos y determinación de tiempos de inicio y finalización de reparación son coherentes con los encontrados en la literatura. Por ejemplo, Maya et al. (2016) y Coco et al. (2020) demostraron que las interrupciones en las vías demandan la programación de recursos de reparación que generalmente en escenarios de desastre tienden a ser limitados. Del mismo modo, Shin et al. (2019) destacaron la importancia de programar las rutas de recursos de restauración, teniendo en cuenta las limitaciones de las vías causadas por eventos disruptivos. Sin embargo, es necesario establecer una programación de los recursos en función de las limitaciones exigidas por las condiciones de las vías afectadas. Además, como resultado del análisis se pudo identificar que definir los instantes de llegada y salida de los recursos entre los arcos designados, es un aspecto crucial dentro del planteamiento del modelo analizado.

La investigación realizada también muestra que existen estudios limitados sobre el proceso de toma de decisiones en la restauración del acceso basado en la interdependencia y los recursos limitados para la atención de disrupciones viales transitorias las cuales generan limitaciones de accesibilidad durante la fase de respuesta (Rojas et al., 2022).

En la práctica, este trabajo contribuye al proceso de toma de decisiones de las organizaciones responsables del restablecimiento del acceso de las vías en escenarios de desastre. Dado que las disrupciones viales transitorias en las vías pueden dificultar la entrega de ayuda (Celik et al., 2016), es necesario tener en cuenta estos factores en la red logística humanitaria. Además, esta investigación contribuyó a considerar el impacto que poseen las franjas de tiempo en las cuales se espera que las vías

estén disponibles debido a las operaciones de restauración de carreteras, los tiempos de llegada y salida de los recursos y los tiempos de finalización de las reparaciones en cada arco o vía afectada.

Con base en lo anterior, es claro determinar que cuando se destruyen las carreteras y se aíslan ciertas áreas, éstas presentarán dificultades para recibir artículos de socorro, (Shin et al., 2019). Por ende, en el capítulo 5 se desarrolló la propuesta de coordinación basada en las decisiones conjuntas de los procesos de distribución de ayuda y restauración del acceso teniendo en cuenta las limitaciones de accesibilidad debidas a las interrupciones transitorias de las carreteras, un problema ampliamente considerado como uno de los puntos centrales tanto para los académicos como para las organizaciones encargadas de la labor humanitaria durante la fase de respuesta. Esta investigación concluyó que, a pesar de que se han realizado investigaciones en torno a la integración de los procesos de distribución de ayuda y restauración del acceso (Sanci & Daskin, 2019; Vahdani et al., 2018), aún existen investigaciones pendientes por realizar que aborden el impacto que poseen los tiempos de reparación y atención de las interrupciones temporales de las carreteras en la programación de la entrega de la ayuda humanitaria. El trabajo desarrollado en el capítulo 5 resaltó la importancia de tener en cuenta la temporización y la determinación de los tiempos de recorrido de los vehículos a la hora de determinar la entrega de la ayuda humanitaria y los tiempos de llegada a cada uno de los puntos de atención. La disponibilidad de carreteras, los tiempos de servicio en cada uno de los nodos de destino y los tiempos efectivos de viaje entre nodos son también factores clave a considerar.

Los resultados extraídos en el modelo son coherentes con los encontrados en la literatura. Por ejemplo, Vahdani et al., (2018) y Shin et al., (2019) demostraron que las interrupciones en las carreteras pueden generar retrasos en los tiempos de entrega de la ayuda humanitaria, y más aún si los recursos disponibles para llevar a cabo dicha operación son limitados. Del mismo modo, Sabouhi et al., (2020) mencionan la importancia de programar las rutas de transporte teniendo en cuenta las restricciones viales generadas por los eventos disruptivos. Sin embargo, es necesario establecer una programación de las rutas de distribución en función de los avances en los trabajos de restauración y recuperación de las carreteras afectadas, al igual que definir los tiempos de llegada de los vehículos a cada nodo destino y los tiempos de salida de los vehículos entre nodos. Este trabajo también permite considerar decisiones que normalmente se han estudiado por separado en la literatura en los procesos de distribución de ayuda humanitaria y la restauración del acceso de las vías afectadas de forma transitoria.

Desde un punto de vista práctico, esta investigación contribuyó al proceso de toma de decisiones de las organizaciones encargadas de programar la entrega de ayuda y la restauración de las vías en escenarios de desastre. En estos escenarios, siempre existe al menos un impacto temporal en las carreteras

que conectan cada uno de los eslabones de la red logística humanitaria que debe ser contabilizado, así como los diferentes factores que podrían dificultar la entrega de ayuda humanitaria. Además, en lo que respecta a la coordinación en la distribución de ayuda humanitaria y la atención de las interrupciones temporales de las carreteras en zonas con accesibilidad limitada afectadas por desastres de corta duración, este trabajo contribuyó a la literatura, particularmente en analizar el efecto de aspectos como las ventanas temporales en que las carreteras están disponibles por las operaciones de reparación y el tiempo de llegada y salida de los vehículos en puntos de atención, sobre funciones de desempeño como el tiempo total de llegada de los vehículos a los nodos de atención, la tardanza máxima en la atención a la población afectada y el costo total incurrido en las operaciones de distribución y reparación.

Además, se abordaron los posibles conflictos de intereses que pueden surgir de objetivos como minimizar el tiempo total o promedio de llegada de vehículo hacia los puntos de atención, la minimización de la tardanza máxima en la atención humanitaria como medida de desempeño equivalente al tiempo de privación y el costo total de la operación, las cuales son medidas de rendimiento habituales en la gestión de desastres y merecen especial atención (Rojas et al., 2022). Para efectos de comparación de la propuesta de coordinación basada en decisiones conjuntas de los procesos de distribución de ayuda y restauración del acceso, se desarrolló una estrategia o esquema de decisión basado en decisiones secuenciales de ambos procesos, donde primero se abordaron las decisiones concernientes a la programación de operaciones y recursos para la reparación de las vías, cuya información o resultados obtenidos, se convirtió en información de entrada para abordar las decisiones u operaciones que conciernen a la programación de rutas de distribución de ayuda humanitaria hacia los puntos de atención.

Los resultados obtenidos de los modelos que representan las características de ambos esquemas de decisión desde el enfoque mono-objetivo indicaron que la propuesta de coordinación basada en decisiones conjuntas genera mejores resultados en términos del tiempo total y promedio de llegada de la asistencia humanitaria hacia los puntos de atención con relación al marco de decisión alternativo basado en decisiones secuenciales. De los 23 resultados obtenidos, el 34.8% de los casos el valor del tiempo total mínimo de llegada de ayuda humanitaria coincidió en ambos esquemas de decisión, es decir, la decisión sería seleccionar un esquema de decisión secuencial o conjunto. Sin embargo, el 65.2% de los casos el valor de la función de desempeño en las decisiones conjuntas entre ambos procesos obtuvo un mejor resultado con relación al esquema de decisión secuencial, lo cual permitió validar parcialmente la hipótesis de la investigación.

Desde el enfoque multiobjetivo, a partir de la comparación de los frentes aproximados de Pareto de cada esquema de decisión con relación a la frontera consolidada, se pudo validar igualmente que las decisiones conjuntas de ambos procesos como mecanismo de coordinación propuesto presenta una mejor convergencia hacia dicha frontera considerando medidas de desempeño basadas en las dimensiones de eficacia, bienestar social y eficiencia. Los resultados obtenidos de métricas como la cantidad de soluciones repetidas e infactibles, la proporción de soluciones y desviación porcentual promedio en la frontera de Pareto consolidada permitieron determinar que la coordinación de la distribución de ayuda humanitaria con la restauración del acceso basado en las decisiones conjuntas mejora el desempeño en términos de las medidas de desempeño consideradas en las ternas evaluadas, permitiendo validar de manera total la hipótesis general de investigación.

6.2. Conclusiones

Como se ha señalado anteriormente, es fundamental suministrar a tiempo los bienes de socorro adecuados a los puntos de atención o zonas de demanda. Para ello, es esencial recuperar las carreteras destruidas y restablecer el acceso (Maya Duque et al., 2016). Sin embargo, en la práctica pueden surgir varias dificultades que ralenticen este proceso. Por ejemplo, cuando las decisiones de reparar las carreteras destruidas y suministrar bienes de socorro no están coordinadas entre sí, pueden producirse retrasos en los tiempos de distribución y respuesta a la población afectada por un desastre (Coco et al., 2020).

A partir de la revisión de la literatura realizada (Vahdani et al., 2018; Shin et al., 2019; Sabouhi et al., 2020; Rojas et al., 2023a), se pudo establecer que una parte importante de la literatura académica es limitada en la medida que no consideraba la importancia de la coordinación de las operaciones de distribución y restauración del acceso. Además, varios aspectos de investigación importantes, como las condiciones de disponibilidad de las carreteras, el inicio de las actividades de restauración y su impacto en la programación de entrega de la ayuda humanitaria, no han recibido la atención adecuada (Rojas et al., 2023a). Por lo tanto, los impactos de las rutas de distribución de ayuda y los tiempos de llegada de la flota de vehículos a cada nodo de destino sobre los tiempos de reparación y las operaciones de rehabilitación exigieron un estudio más profundo en esta investigación.

Con base en lo anterior, en esta investigación se logró formular un modelo que representara la coordinación de la distribución de ayuda humanitaria con la restauración de disrupciones viales transitorias en zonas afectadas por desastres naturales súbitos con limitaciones de accesibilidad, a partir de las decisiones conjuntas o colectivas de ambos procesos.

Inicialmente, se realizó una caracterización del sistema de distribución de ayuda humanitaria con limitaciones de accesibilidad mediante la identificación de los actores y recursos que tienen mayor participación en la entrega de ayudas, pudiendo determinar que actores como la Alcaldía y la unidad de atención de riesgos y desastres a nivel nacional, departamental y local poseen una incidencia importante en las decisiones de distribución de ayuda humanitaria hacia la población afectada, a través de un análisis de redes. A partir de un análisis de literatura y un acercamiento realizado con los actores responsables de dicho proceso, se determinó que, dentro del proceso de distribución de ayuda, la programación de rutas de la flota vehicular o ruteo de vehículos es la operación o decisión más crítica y compleja de establecer en dicho proceso. Para la representación del proceso de distribución de ayuda se empleó un modelo matemático que permitió establecer la configuración de rutas, determinando los tiempos de llegada y salida de vehículo en puntos de atención en función de los tiempos esperados de culminación de la restauración de las vías afectadas, con el fin de minimizar el tiempo total de llegada de ayuda humanitaria en los puntos de atención.

Seguidamente, se identificaron los factores, variables y organismos que intervienen en el proceso de toma de decisiones en la reparación de interrupciones viales transitorias en redes logísticas humanitarias. A partir de un análisis de redes, se determinó que actores gubernamentales como la Alcaldía y la unidad de atención de riesgos y desastres a nivel nacional, departamental y local poseen una incidencia importante en las decisiones de restauración de las vías afectadas de forma transitoria. De igual forma, a partir de la literatura y un acercamiento realizado con los actores responsables de dicho proceso en el municipio objeto de estudio, se determinó que, dentro de la restauración del acceso, la programación de cuadrillas y maquinaria para la reparación es la operación o decisión más crítica y compleja de establecer. Además, se logró establecer la importancia de realizar la asignación de rutas de la flota de vehículos en función de los tiempos esperados de disponibilidad de las vías, y como las interrupciones pueden impactar en el tiempo total de respuesta a la población afectada por un desastre. En la representación del proceso de restauración, se formuló un modelo matemático que permitió establecer la programación de recursos, determinando los tiempos de inicio y terminación de las operaciones de éstos, con el fin de minimizar el tiempo total de finalización de las reparaciones.

En el desarrollo de la propuesta de coordinación de los procesos de distribución de ayuda y restauración, se identificaron diversos mecanismos de coordinación, donde las decisiones conjuntas constituyó un mecanismo o estrategia importante con el fin de coordinar ambos procesos, de tal forma que contribuya a minimizar el tiempo total o promedio de llegada hacia los puntos de atención. Las decisiones conjuntas implican abordar de forma simultánea las decisiones u operaciones por parte de los actores responsables de los procesos de distribución de ayuda y restauración del acceso, logrando así una sinergia

entre ambos, impactando favorablemente en la minimización del tiempo de llegada de la ayuda o asistencia humanitaria hacia la población afectada por un desastre. También se determinó la importancia de considerar relaciones de interdependencia entre recursos de reparación y relaciones de precedencia en vías sujetas a reparación a través de un modelo matemático y su impacto sobre tiempo total o promedio de finalización de la reparación, empleando como contexto geográfico referente un municipio colombiano.

Con el fin de representar las características de las decisiones conjuntas de ambos procesos objeto de estudio, se formuló un modelo de programación lineal entera mixta, cuyos resultados indicaron que las decisiones conjuntas generan mejores resultados en el tiempo total o promedio de llegada hacia los puntos de atención comparado con un esquema de decisión secuencial, donde organismos de atención humanitaria primero atienden las disrupciones viales hasta llevarlas a unas condiciones mínimas de accesibilidad, y a continuación realizan el despliegue de la flota vehicular para la distribución de la ayuda humanitaria hacia los puntos de atención.

Posteriormente, con el fin de validar la hipótesis que orienta la investigación, se seleccionó un grupo de expertos o stakeholders con el fin de determinar la prioridad o grado de importancia de un conjunto de medidas de desempeño agrupadas en tres dimensiones relacionadas con aspectos de eficacia, eficiencia y alivio del sufrimiento o bienestar social, soportadas a través de una revisión sistemática de la literatura (Rojas et al., 2023a). Para facilitar el proceso de priorización se emplearon los lineamientos de la herramienta AHP, cuyo vector de prioridad de las medidas de desempeño según cada dimensión permitió establecer las medidas de desempeño con mayor nivel de importancia o prioridad. Las medidas de desempeño con mayor prioridad fueron el tiempo total de respuesta o llegada de ayuda humanitaria, la tardanza máxima o tiempo de privación y el costo total de la operación; las cuales se relacionan con las dimensiones de eficacia, bienestar social o alivio del sufrimiento y eficiencia, respectivamente. Como resultado de la consideración de estas tres medidas, se formuló un modelo de programación lineal entera mixta multiobjetivo, cuya solución se generó a través del método ϵ restricciones. Luego se identificaron las soluciones no dominadas y frente de Pareto a partir del algoritmo Fast Nondominated Sorting desarrollado por Deb et al., (2002).

Luego, se generó el frente de Pareto óptimo o consolidado el cual contiene las soluciones no dominadas de la propuesta de coordinación basada en la decisión conjunta de los procesos de distribución de ayuda y restauración del acceso de la malla vial, así como las soluciones no dominadas basadas en el esquema de decisión secuencial entre ambos procesos. La utilización de indicadores o métricas como la cantidad de soluciones infactibles, la cantidad de soluciones repetidas, la proporción de soluciones y la

desviación porcentual promedio a la frontera consolidada, permitieron determinar que la propuesta de coordinación basada en las decisiones conjuntas de los procesos de distribución de ayuda y la restauración de la restauración de interrupciones viales transitorias mejora el desempeño en términos de eficiencia, eficacia y alivio del sufrimiento en el proceso de atención humanitaria en zonas afectadas por desastres naturales súbitos con limitaciones de accesibilidad, en comparación con las decisiones secuenciales de ambos procesos, pudiendo así validar la hipótesis y el cumplimiento del objetivo general de la investigación.

Para validar el desempeño del modelo de toma de decisiones o propuesta de coordinación se empleó como contexto geográfico referente el municipio de Roldanillo, ubicado al norte del departamento del Valle del Cauca en Colombia. Para la recolección de la información necesaria para la validación del modelo, fue necesario realizar un acercamiento con los actores que integran el CMGRD, así como reportes físicos y digitales de información, donde se pudo comprobar que las inundaciones son el tipo de desastre que posee una mayor frecuencia en el municipio objeto de estudio, generando familias afectadas y la presencia de interrupciones viales transitorias que desarrollan finalmente limitaciones de accesibilidad en los puntos de atención donde se encuentran las familias o personas afectadas por el evento disruptivo. Además, se pudo inferir que aquellos desastres catalogados como naturales y súbitos, son lo que generalmente desarrollan interrupciones viales que dificultan el proceso de atención humanitaria.

6.3. Contribuciones de la investigación

La presente investigación realizó una propuesta de coordinación en la distribución de ayuda humanitaria con la restauración del acceso de la malla vial considerando limitaciones de accesibilidad y recursos limitados bajo un ambiente de múltiples objetivos enmarcados en las dimensiones de eficiencia, eficacia y bienestar social, empleando como mecanismo la decisión conjunta de la planificación y configuración de rutas y programación de operaciones de reparación, sincronizando los tiempos de salida y llegada de la flota vehicular con los tiempos de finalización de recursos de restauración de las vías, a partir de un modelo de programación matemática multiobjetivo, constituyendo el principal aporte de esta investigación.

Como aporte adicional se realizó un estudio de los procesos de distribución de ayuda y restauración del acceso, a partir de un análisis de la red de actores haciendo uso de la teoría de grafos (Rojas et al., 2023d) y el apoyo de modelos de programación matemática para entender la dinámica de sus actividades principales (Rojas et al., 2023 b, c).

Se desarrolló una herramienta de análisis multicriterio la cual permitió la selección de un conjunto de medidas de desempeño basadas en las tres dimensiones identificadas, a través de la participación de un grupo de expertos provenientes de siete grupos de actores caracterizados como agencias humanitarias, academia, gobierno, proveedores logísticos, donantes, ONG's y fuerza armada (Rojas et al., 2022).

Para la representación de la propuesta se definió un modelo de programación matemática multiobjetivo, cuya generación del frente de Pareto correspondiente se empleó el método ϵ – restricciones y un algoritmo de ordenamiento rápido de soluciones no dominadas. Por último, se compararon los resultados de dicho frente con relación a un esquema de decisiones secuenciales entre ambos procesos, concluyendo que la propuesta de coordinación basada en las decisiones conjuntas y colaborativas entre ambos procesos genera mejores resultados en términos de eficiencia, eficacia y bienestar social.

Se abordaron las relaciones de interdependencia de recursos limitados, la determinación de los tiempos de llegada y salida de la flota vehicular hacia los puntos de demanda con base en los tiempos de finalización de la reparación. Además, se consideraron relaciones de precedencia entre cuadrillas de reparación y tipos máquinas con base en las características de la vía a reparar. Por último, se estableció como aporte, la minimización de la tardanza máxima en la entrega de ayuda humanitaria, como medida de desempeño equivalente con la minimización del tiempo de privación o alivio del sufrimiento de la población afectada.

6.4. Recomendaciones de trabajo futuro

En el marco de las limitaciones de la investigación, en la distribución de ayuda humanitaria se consideró una flota homogénea de vehículos, por lo tanto, es necesario introducir nuevas estrategias que permitan lograr mejores desempeños en la entrega de ayuda, por ello se propone como investigación futura el análisis frente a la consideración de procesos de ruteo con transbordos de rutas, lo cual implica definir una estrategia en la que se configure una red con nodos de transbordo, que permitan obtener beneficios en los tiempos de atención o respuesta hacia la población afectada. Otra investigación futura es la consideración de los tiempos de reparación y demanda estocásticos en el problema de restauración del acceso y distribución de ayuda respectivamente, analizando su impacto en medidas de desempeño enmarcadas en las dimensiones de eficacia, eficiencia y bienestar social o alivio del sufrimiento.

Otra línea futura de investigación es la consideración de flota heterogénea de vehículos propia y/o tercerizada para el despliegue de ayuda humanitaria hacia diversos puntos de atención, considerando diversos puntos de distribución o depósitos, decisiones de localización de puntos de distribución y preposicionamiento del inventario.

Dentro de las limitaciones de la investigación, se consideró un único modo de transporte, por lo tanto, como investigación futura adicional, se propone la consideración de estrategias de multimodalismo. Este aspecto se considera relevante ya que llegar hacia los puntos de atención o nodos de demanda, es necesario que se requiera el empleo de diferentes medios de transporte, incluso aquellos no convencionales como motocicletas, triciclos, lomo de caballo, botes, bicicletas y drones; especialmente para aquellas áreas rurales donde por su topografía irregular es difícil acceder un único tipo de vehículo.

Deben considerarse medidas alternativas para establecer prioridades en la programación de rutas, distintas al tiempo total de llegada, considerada en esta investigación. Por ejemplo, el porcentaje de niños, ancianos, mujeres, mascotas, discapacitados y heridos podría considerarse como una medida para establecer normas de prioridad.

Los modelos matemáticos formulados, dada la complejidad matemática, partieron de un enfoque determinístico. Del mismo modo, es importante analizar el impacto en la configuración de las rutas, teniendo en cuenta múltiples depósitos y decisiones de redistribución de ayuda humanitaria entre puntos de distribución.

En esta investigación se consideraron cuadrillas o equipos de reparación homogéneos. Luego, se sugiere considerar heterogeneidad de cuadrillas de reparación y decisiones de preposicionamiento de materiales para el despliegue de las operaciones de reparación de las vías, así como la consideración de dos o más cuadrillas para la atención de una vía afectada y la posibilidad de considerar diferentes puntos de salida de recursos. La identificación temprana de los enlaces críticos es clave para una mejor asignación y secuenciación de los recursos de reparación. Se debe considerar el impacto en la programación de las operaciones de reparación de las vías, con base en las características físicas o tipología de la red de carreteras.

Además, para investigaciones futuras se propone involucrar diferentes tipos de medidas de desempeño enmarcadas en las dimensiones identificadas. En esta investigación se asume que existe neutralidad en las relaciones de poder de los actores que participan en ambos procesos objeto de estudio,

por lo tanto, la consideración de las asimetrías que se pueden presentar entre los stakeholders involucrados en el proceso de toma de decisiones y su impacto en la propuesta de coordinación basada en la decisión conjunta de los procesos de distribución de ayuda y restauración del acceso, es una oportunidad de investigación futura relevante. También se sugiere analizar la propuesta de coordinación desarrollada bajo un enfoque estocástico. Sin embargo, dada la complejidad computacional del modelo matemático multiobjetivo formulado, se sugiere explorar técnicas de solución alternativas basadas en metaheurísticas.

La propuesta desarrollada se basa en las decisiones conjuntas o colectivas como mecanismo de coordinación de la distribución de ayuda humanitaria y la restauración del acceso de la malla vial, la cual operacionaliza aspectos colaborativos entre los actores que intervienen en ambos procesos. Empero, es importante evaluar diferentes mecanismos de coordinación adicionales que puedan ser aplicables en este contexto.

Por último, como futuras investigaciones se sugiere considerar aspectos asociados con el análisis de robustez de la infraestructura vial para el despliegue de las operaciones de distribución de ayuda humanitaria, el rol de las políticas públicas y el preposicionamiento de recursos en la distribución de ayuda y restauración de las vías, especialmente en aquellas zonas catalogadas de alto riesgo. De igual forma, se sugiere analizar el rol que tiene las asimetrías y relaciones de poder entre actores y el grado de madurez de las organizaciones en la decisión conjunta de ambos procesos.

6.5. Productos de investigación durante el periodo de estudios doctorales

Esta investigación se realizó como resultado de los estudios doctorales del autor. Como soporte de la actividad investigativa realizada durante la estancia y la producción intelectual agregada, se hace un resumen de la participación en eventos de divulgación de investigación y de la producción intelectual en el Anexo 14. A continuación, se presentan las referencias de los productos generados:

- Mahecha Peláez L.A. (2019). Propuesta de un modelo de localización de albergues temporales para la atención de damnificados en la fase de respuesta post desastre: caso inundación Roldanillo Valle. Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Industrial - Universidad del Valle. Sede Zarzal [Dirección trabajo de grado]
- Marín Gómez, K. V., Morales Corredor J.D, (2018). Propuesta de un modelo de localización de albergues temporales y ruteo de personal especializado, para la atención de una población vulnerable ante un desastre de la región. Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Industrial. Universidad del Valle. Sede Zarzal [Dirección trabajo de grado].
- Martínez López V.M., & Rojas Trejos, C. A. (2020). Propuesta de distribución de ayuda humanitaria considerando restricciones viales en desastres naturales súbitos. Caso de estudio: Roldanillo - Valle del Cauca Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Industrial. Universidad del Valle. Sede Zarzal. [Dirección trabajo de grado].

- Messa Mejía E., Sánchez Murilo T., Rojas Trejos, C. A., & González Velasco J. (2022) Propuesta de un modelo de distribución de vacunas considerando limitaciones de inventario en depósitos y puntos de entrega en el Valle del Cauca. Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Industrial. Universidad del Valle. Sede Zarzal. [Dirección trabajo de grado].
- Montoya Calleja V., Ruiz Aguirre M.A., Guerra Ospina P.A., & Rojas Trejos, C. A. (2022, 5 de septiembre). Propuesta de un modelo de programación matemática para la localización de albergues temporales ante eventos de desastre. Caso de estudio: Roldanillo, Valle del Cauca, Colombia. *Congreso Asociación Colombiana de Investigación Operativa - Institute of Industrial and Systems Engineers (ASOCIO-IISE)* [Ponencia]. Universidad de La Sabana, Universidad Sergio Arboleda, Universidad de los Andes. Bogotá D.C, Colombia.
- Parra Flórez L.A., Bolaños Carmona M.A., González Velasco J., & Rojas Trejos, C. A. (2020). Localización de un centro de distribución temporal de ayuda humanitaria en un municipio del norte del Valle del Cauca caso: inundaciones. Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Industrial. Universidad del Valle. Sede Zarzal. [Dirección trabajo de grado].
- Rodríguez Taborda J.D., Gómez Hernández J.M., & Rojas Trejos, C. A. (2022, 5 de septiembre). Propuesta de un modelo de programación de recursos de reparación para interrupciones viales transitorias por desastres naturales súbitos. *Congreso Asociación Colombiana de Investigación Operativa - Institute of Industrial and Systems Engineers (ASOCIO-IISE)* [Ponencia]. Universidad de La Sabana, Universidad Sergio Arboleda, Universidad de los Andes. Bogotá D.C, Colombia.
- Rojas Trejos, C. A., Meisel, J. D., & Adarme Jaimes, W. (2023a). Humanitarian aid distribution logistics with accessibility constraints: a systematic literature review. In *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management* (Vol. 13, Issue 1, pp. 26–41). Emerald Publishing. <https://doi.org/10.1108/JHLSCM-05-2021-0041>
- Rojas Trejos, C. A., Meisel, J. D., Adarme Jaimes, W., & Orejuela Cabrera J. P. (2023b, 30 de marzo). Distribución de ayuda humanitaria considerando interrupciones viales transitorias [Conferencia]. *XXVI – II Seminario de Logística. Grupo de Investigación, Sociedad, Economía y Productividad (SEPRO). Universidad Nacional de Colombia*. Bogotá D.C, Colombia.
- Rojas Trejos, C. A., Meisel, J. D., Adarme Jaimes, W., & Orejuela Cabrera J. P. (2022, 22 de noviembre). Programación de recursos de reparación para la atención de interrupciones viales transitorias en logística humanitaria [Conferencia]. *XXV - IV Seminario de Logística. Grupo de Investigación, Sociedad, Economía y Productividad (SEPRO). Universidad Nacional de Colombia*. Bogotá D.C, Colombia.
- Rojas Trejos, C. A., Meisel, J. D., & Adarme Jaimes, W. (2021, 22 de agosto). Assignment, location and routing in humanitarian logistics [Ponencia]. *22nd Conference of the International Federation of Operational Research Societies (IFORS)*. Seúl, Corea del Sur.
- Rojas Trejos, C. A., Meisel, J. D., & Adarme Jaimes, W. (2022). Enfoque integrado multicriterio para la medición del desempeño en redes de distribución de ayuda humanitaria [Ponencia]. *IX Congreso Internacional de Industria y Organizaciones. Universidad Nacional de Colombia*. Bogotá D.C, Colombia.
- Rojas Trejos, C. A., Meisel, J. D., & Adarme Jaimes, W. (2023c). X Congreso Internacional de Industria y Organizaciones. Universidad de la Costa, Universidad Nacional de Colombia [Ponencia]. *X Congreso Internacional de Industria y Organizaciones. Universidad Nacional de Colombia*. Barranquilla, Colombia.
- Rojas Trejos, C. A., Meisel, J. D., Adarme Jaimes, W., & Orejuela Cabrera J. P. (2023d). Distribution of humanitarian aid considering accessibility limitations due to transitory road disruptions [Artículo sometido]. *Computers & Operations Research*. Elsevier Publishing.
- Rojas Trejos, C. A., Meisel, J. D., Adarme Jaimes, W., & Orejuela Cabrera J. P. (2023e). Repair resources scheduling for attention of transitory road disruptions in humanitarian aid networks [Artículo sometido]. *Computers & Industrial Engineering*. Elsevier Publishing.
- Rojas Trejos, C. A., Marín Gómez, K. V., & Morales Corredor J.D, (2023f). “Model of location of temporary shelters and routing of specialized personnel for the attention of vulnerable population in case of a sudden natural disaster”. [Artículo sometido]. *Revista Scientia et Technica*.

7. Bibliografía

- Agarwal, S., Kant, R., & Shankar, R. (2019). Humanitarian supply chain management frameworks: A critical literature review and framework for future development. *Benchmarking*, 26(6), 1749–1780. <https://doi.org/10.1108/BIJ-08-2018-0245>
- Ahmadi, M., Seifi, A., & Tootooni, B. (2015a). A humanitarian logistics model for disaster relief operation considering network failure and standard relief time: A case study on San Francisco district. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 75, 145–163. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2015.01.008>
- Akbari, V., & Salman, F. S. (2017a). Multi-vehicle prize collecting arc routing for connectivity problem. *Computers and Operations Research*, 82, 52–68. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.01.007>
- Akbari, V., & Salman, F. S. (2017b). Multi-vehicle synchronized arc routing problem to restore post-disaster network connectivity. *European Journal of Operational Research*, 257(2), 625–640. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.07.043>
- Akbari, V., Hesam, M., Kiam, R. (2021). A decomposition-based heuristic for a multicrew coordinated road restoration problem. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 95, 1–35. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102854>
- Akbari, V., Hesam, Sayarshad, H. (2022). Integrated and coordinated relief logistics and road recovery planning problem. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 111, 1–50. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103433>
- Akhtar, P., Marr, N. E., & Garnevskaya, E. V. (2012a). Coordination in humanitarian relief chains: chain coordinators. *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*, 2(1), 85–103. <https://doi.org/10.1108/20426741211226019>
- Akin, D., & Kara, D. (2020). Multicriteria analysis of planned intercity bus terminals in the metropolitan city of Istanbul, Turkey. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 132, 465–489. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.12.003>
- Aksu, D. T., & Ozdamar, L. (2014a). A mathematical model for post-disaster road restoration: Enabling accessibility and evacuation. *Transportation Research Part E-Logistics and Transportation Review*, 61, 56–67. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2013.10.009>
- Al Theeb, N., & Murray, C. (2017). Vehicle routing and resource distribution in postdisaster humanitarian relief operations. *International Transactions in Operational Research*, 24(6), 1253–1284. <https://doi.org/10.1111/itor.12308>
- Aldunate, R. G., Pena-Mora, F., & Robinson, G. E. (2005). Collaborative distributed decision making for large scale disaster relief operations: Drawing analogies from robust natural systems. *Complexity*, 11(2), 28–38. <https://doi.org/10.1002/cplx.20106>
- Alinaghian, M., Aghaie, M., & Sabbagh, M. S. (2019). A mathematical model for location of temporary relief centers and dynamic routing of aerial rescue vehicles. *Computers and Industrial Engineering*, 131(17), 227–241. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.03.002>
- Altay, N., Prasad, S., & Tata, J. (2013). A dynamic model for costing disaster mitigation policies. *Disasters*, 37(3), 357–373. <https://doi.org/10.1111/disa.12004>
- Alumur, S. A., Kara, B. Y., & Karasan, O. E. (2012). Multimodal hub location and hub network design. *Omega*, 40(6), 927–939. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2012.02.005>
- Anaya-Arenas, A. M., Renaud, J., & Ruiz, A. (2014a). Relief distribution networks: a systematic review. *Annals of Operations Research*, 223(1), 53–79. <https://doi.org/10.1007/s10479-014-1581-y>
- Anjomshoae, A., Hassan, A., & Wong, K. Y. (2019). An integrated AHP-based scheme for performance measurement in humanitarian supply chains. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 68(5), 938–957. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-04-2018-0132>
- Aranda Pinilla, J. A., & Orjuela Castro, J. A. (2015). Optimización multiobjetivo en la gestión de cadenas de suministro de biocombustibles. Una revisión de la literatura. *Ingeniería*, 20(1). <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.reving.2015.1.a03>

- Arif, A., Wang, Z., Chen, C., & Chen, B. (2020a). A Stochastic Multi-Commodity Logistic Model for Disaster Preparation in Distribution Systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, *11*(1), 565–576. <https://doi.org/10.1109/TSG.2019.2925620>
- Aros, S. K., & Gibbons, D. E. (2018). Exploring communication media options in an inter-organizational disaster response coordination network using agent-based simulation. *European Journal of Operational Research*, *269*(2), 451–465. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.02.013>
- Aslan, E., & Celik, M. (2019). Pre-positioning of relief items under road/facility vulnerability with concurrent restoration and relief transportation. *Iise Transactions*, *51*(8), 847–868. <https://doi.org/10.1080/24725854.2018.1540900>
- Averbakh, I. (2012). Emergency path restoration problems. *Discrete Optimization*, *9*(1), 58–64. <https://doi.org/10.1016/j.disopt.2012.01.001>
- Baharmand, H., Comes, T., & Lauras, M. (2020). Supporting group decision makers to locate temporary relief distribution centres after sudden-onset disasters: A case study of the 2015 Nepal earthquake. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, *45*(December 2019), 101455. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101455>
- Bai, X., Gao, J., & Liu, Y. (2018). Prepositioning emergency supplies under uncertainty. parametric optimization method. *Engineering Optimization*, *50*(7), 1114–1133. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2017.1328508>
- Balcik, B. (2016). Special issue in humanitarian operations. *Surveys in Operations Research and Management Science*, *21*(2), 29–30. <https://doi.org/10.1016/j.sorms.2017.02.001>
- Balcik, B., & Beamon, B. M. (2008). Facility location in humanitarian relief. *International Journal of Logistics Research and Applications*, *11*(2), 101–121. <https://doi.org/10.1080/13675560701561789>
- Balcik, B., Beamon, B. M., Krejci, C. C., Muramatsu, K. M., & Ramirez, M. (2010). Coordination in humanitarian relief chains: Practices, challenges and opportunities. *International Journal of Production Economics*, *126*(1), 22–34. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.09.008>
- Balcik, B., Silvestri, S., Rancourt, M. E., & Laporte, G. (2019). Collaborative Prepositioning Network Design for Regional Disaster Response. *Production and Operations Management*, *28*(10), 2431–2455. <https://doi.org/10.1111/poms.13053>
- Banomyong, R., & Sopadang, A. (2010). Using Monte Carlo simulation to refine emergency logistics response models: a case study. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, *40*(8–9), 709–721. <https://doi.org/10.1108/09600031011079346>
- Barrera, D., Velasco, N., & Amaya, C. A. (2012). A network-based approach to the multi-activity combined timetabling and crew scheduling problem: Workforce scheduling for public health policy implementation. *Computers and Industrial Engineering*, *63*(4), 802–812. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2012.05.002>
- Baxter, A. E., Wilborn Lagerman, H. E., & Keskinocak, P. (2020). Quantitative modeling in disaster management: A literature review. *IBM Journal of Research and Development*, *64*(1–2). <https://doi.org/10.1147/JRD.2019.2960356>
- Baykasoğlu, A., Subulan, K., Taşan, A. S., & Dudaklı, N. (2019). A review of fleet planning problems in single and multimodal transportation systems. *Transportmetrica A: Transport Science* *15* (2), 631–697.
- Bealt, J., Fernández Barrera, J. C., & Mansouri, S. A. (2016). Collaborative relationships between logistics service providers and humanitarian organizations during disaster relief operations. *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*, *6*(2), 118–144. <https://doi.org/10.1108/JHLSCM-02-2015-0008>
- Berariu, R., Fikar, C., Gronalt, M., & Hirsch, P. (2015). Understanding the impact of cascade effects of natural disasters on disaster relief operations. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, *12*, 350–356. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2015.03.005>
- Berumen, S. a, & Llamazares, F. (2007). La utilidad de los métodos de decisión multicriterio (como el AHP) en un entorno de competitividad creciente. *Cuadernos de Administración*, *20*(34), 65–87.

- Bhamidipati, S. (2015). Simulation Framework for Asset Management in Climate-change Adaptation of Transportation Infrastructure. *Transportation Research Procedia*, 8, 17–28. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trpro.2015.06.038>
- Boonmee, C., Arimura, M., & Asada, T. (2017). Facility location optimization model for emergency humanitarian logistics. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 24, 485–498. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2017.01.017>
- Botti, L., Bragatto, P. A., Duraccio, V., Gnoni, M. G., & Mora, C. (2016). Adopting IOT technologies to control risks in confined space: A multi-criteria decision tool. *Chemical Engineering Transactions*, 53, 127–132. <https://doi.org/10.3303/CET1653022>
- Braekers, K., Caris, A., & Janssens, G. K. (2014). Bi-objective optimization of drayage operations in the service area of intermodal terminals. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 65, 50–69. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2013.12.012>
- Braekers, K., Hartl, R. F., Parragh, S. N., & Tricoire, F. (2016). A bi-objective home care scheduling problem: Analyzing the trade-off between costs and client inconvenience. *European Journal of Operational Research*, 248(2), 428–443. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.07.028>
- Brower, R. S., Choi, S. O., Jeong, H. S., & Dilling, J. (2009). Forms of Inter-Organizational Learning in Emergency Management Networks. *Journal of Homeland Security and Emergency Management*, 6(1). %3CGo
- Cailloux, O., Mayag, B., Meyer, P., & Mousseau, V. (2013). Operational tools to build a multicriteria territorial risk scale with multiple stakeholders. *Reliability Engineering & System Safety*, 120, 88–97. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2013.06.004>
- Caunhye, A. M., Nie, X., & Pokharel, S. (2012). Optimization models in emergency logistics: A literature review. *Socio-Economic Planning Sciences*, 46(1), 4–13.
- Çelik, M. (2016). Network restoration and recovery in humanitarian operations: Framework, literature review, and research directions. *Surveys in Operations Research and Management Science*, 21(2), 47–61. <https://doi.org/10.1016/j.sorms.2016.12.001>
- Çelik, M., Ergun, Ö., & Keskinocak, P. (2015). The post-disaster debris clearance problem under incomplete information. *Operations Research*, 63(1), 65–85. <https://doi.org/10.1287/opre.2014.1342>
- Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED). (2020). EM-DAT: The Emergency Events.
- Chang, F.-S., Wu, J.-S., Lee, C.-N., & Shen, H.-C. (2014). Greedy-search-based multi-objective genetic algorithm for emergency logistics scheduling. *Expert Systems with Applications*, 41(6), 2947–2956. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.10.026>
- Chen, X., Kong, Y., Dang, L., Hou, Y., & Ye, X. (2016). Exact and metaheuristic approaches for a bi-objective school bus scheduling problem. *PLoS ONE*, 11(4), 1–20. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0132600>
- Chen, Y. xin, Tadikamalla, P. R., Shang, J., & Song, Y. (2020). Supply allocation: bi-level programming and differential evolution algorithm for Natural Disaster Relief. *Cluster Computing*, 23(1), 203–217. <https://doi.org/10.1007/s10586-017-1366-6>
- Christ, A., & Niles, M. (2018). The role of community social capital for food security following an extreme weather event. *Journal of Rural Studies*, 64, 80–90. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2018.09.019>
- Cinelli, M., Coles, S. R., & Kirwan, K. (2014). Analysis of the potentials of multi criteria decision analysis methods to conduct sustainability assessment. *Ecological Indicators*, 46, 138–148. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.06.011>
- Coco, A. A., Duhamel, C., & Santos, A. C. (2020). Modeling and solving the multi-period disruptions scheduling problem on urban networks. *Annals of Operations Research*, 285(1–2), 427–443. <https://doi.org/10.1007/s10479-019-03248-5>
- Coello Coello, C. a, & Lamont, G. B. (2004). An introduction to multi-objective evolutionary algorithms and their applications. In C. A. C. Coello & G. B. Lamont (Eds.), *Applications of Multi-Objective Evolutionary Algorithms: Advances in Natural Computation* (Vol. 1, Issue 1, p. 792). World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. <https://doi.org/10.1142/5712>

- Comité municipal para la gestión de riesgos y desastres de Roldanillo. (2020). Plan Municipal de Gestión del Riesgo - PMGR.
- Contreras, D., Blaschke, T., Kienberger, S., & Zeil, P. (2014). Myths and realities about the recovery of L'Aquila after the earthquake. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 8, 125–142. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2014.02.001>
- Cozzolino, A., Rossi, S., & Conforti, A. (2012a). Agile and lean principles in the humanitarian supply chain: The case of the United Nations World Food Programme. *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*, 2(1), 16–33. <https://doi.org/10.1108/20426741211225984>
- De Keyser, W., & Peeters, P. (1996). A note on the use of PROMETHEE multicriteria methods. *European Journal of Operational Research*, 89(3), 457–461. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(94\)00307-6](https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)00307-6)
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II. In *IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION* (Vol. 6, Issue 2).
- Delgado-Antequera, L., Caballero, R., Sánchez-Oro, J., Colmenar, J. M., & Martí, R. (2020). Iterated greedy with variable neighborhood search for a multiobjective waste collection problem. *Expert Systems with Applications*, 145, 113101. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.113101>
- Donnini, M., Napolitano, E., Salvati, P., Ardizzone, F., Bucci, F., Fiorucci, F., Santangelo, M., Cardinali, M., & Guzzetti, F. (2017). Impact of event landslides on road networks: a statistical analysis of two Italian case studies. *Landslides*, 14(4), 1521–1535. <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0829-4>
- Dubey, R., Gunasekaran, A., & Papadopoulos, T. (2019). Disaster relief operations: past, present and future. *Annals of Operations Research*, 283, 1–8.
- Duque, P. A. M., Dolinskaya, I. S., & Sorensen, K. (2016). Network repair crew scheduling and routing for emergency relief distribution problem. *European Journal of Operational Research*, 248(1), 272–285. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.06.026>
- Edrissi, A., Nourinejad, M., & Roorda, M. J. (2015). Transportation network reliability in emergency response. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 80, 56–73. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2015.05.005>
- Edwards, W., & Barron, F. H. (1994). Smarts and smarter: Improved simple methods for multiattribute utility measurement. In *Organizational Behavior and Human Decision Processes* (Vol. 60, Issue 3, pp. 306–325). <https://doi.org/10.1006/obhd.1994.1087>
- Enrique, J., & Herrera, P. (2016). *Estrategias de coordinación en operaciones de cargue y descargue de mercancías*. Trabajo de grado de maestría. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C.
- Ergu, D., & Kou, G. (2012). Questionnaire design improvement and missing item scores estimation for rapid and efficient decision making. *Annals of Operations Research*, 197(1), 5–23. <https://doi.org/10.1007/s10479-011-0922-3>
- Faiz, T. I., Vogiatzis, C., & Noor-E-Alam, M. (2019). A column generation algorithm for vehicle scheduling and routing problems. *Computers and Industrial Engineering*, 130(August 2018), 222–236. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.02.032>
- Fazel Zarandi, M. H., Davari, S., & Haddad Sisakht, S. A. (2012). The -coverage multiple allocation hub covering problem with mandatory dispersion. *Scientia Iranica*, 19(3), 902–911. <https://doi.org/10.1016/j.scient.2012.03.007>
- Fikar, C., Gronalt, M., & Hirsch, P. (2016). A decision support system for coordinated disaster relief distribution. *Expert Systems with Applications*, 57, 104–116. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.03.039>
- Frachtenberg, E. (2019). Practical Drone Delivery. *Computer*, 52(12), 53–57. <https://doi.org/10.1109/MC.2019.2942290>
- García-Alviz, J., Galindo, G., Arellana, J., & Yie-Pinedo, R. (2021). Planning road network restoration and relief distribution under heterogeneous road disruptions. *OR Spectrum*, 43(4), 941–981. <https://doi.org/10.1007/s00291-021-00644-x>

- Giron, X., & Madrid, D. (2008). *Comparación de Dos Métodos de Toma de Decisiones Multicriterio: MACBETH y PROMETHÉE (Spanish Version)*. Departament d'Enginyeria Informàtica i Matemàtiques.
- Gossler, T., Wakolbinger, T., & Burkart, C. (2020). Outsourcing in humanitarian logistics – status quo and future directions. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 50(4), 403–438. <https://doi.org/10.1108/IJPDLM-12-2018-0400>
- Gossler, T., Wakolbinger, T., Nagurney, A., & Daniele, P. (2019). How to increase the impact of disaster relief: A study of transportation rates, framework agreements and product distribution. *European Journal of Operational Research*, 274(1), 126–141. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.09.045>
- Grass, E., & Fischer, K. (2016). Two-stage stochastic programming in disaster management: A literature survey. *Surveys in Operations Research and Management Science*, 21(2), 85–100. <https://doi.org/10.1016/j.sorms.2016.11.002>
- Grinberger, A. Y., & Felsenstein, D. (2016). Dynamic agent based simulation of welfare effects of urban disasters. *Computers Environment and Urban Systems*, 59, 129–141. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2016.06.005>
- Groenendaal, J., Helsloot, I., & Scholtens, A. (2013). A Critical Examination of the Assumptions Regarding Centralized Coordination in Large-Scale Emergency Situations. *Journal of Homeland Security and Emergency Management*, 10(1). <https://doi.org/10.1515/jhsem-2012-0053>
- Gschwind, T., Irnich, S., Tilk, C., & Emde, S. (2019). Branch-cut-and-price for scheduling deliveries with time windows in a direct shipping network. *Journal of Scheduling*. <https://doi.org/10.1007/s10951-019-00620-y>
- Guan, G., Lin, Z., Gong, Y., & Jiang, Z. (2020). Modeling and Simulation of Collaborative Dispatching of Disaster Relief Materials Based on Urgency. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 1DUMMMY. <https://doi.org/10.1155/2020/4274106>
- Guo, L., Li, Y. P., Huang, G. H., Wang, X. W., & Dai, C. (2012). Development of an Interval-Based Evacuation Management Model in Response to Nuclear-Power Plant Accident. *Journal of Environmental Informatics*, 20(2), 58–66. <https://doi.org/10.3808/jei.201200220>
- Gutjahr, W. J., & Nolz, P. C. (2016). Multicriteria optimization in humanitarian aid. *European Journal of Operational Research*, 252(2), 351–366. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.12.035>
- Guzmán Cortés, D. C., & Guerrero, W. J. (2018). Inventory routing models for humanitarian relief. In *The 9th International Conference on Production Research – Americas 2018* (Vol. 1).
- Habib, M. S., Lee, Y. H., & Memon, M. S. (2016). Mathematical Models in Humanitarian Supply Chain Management: A Systematic Literature Review. *Mathematical Problems in Engineering*, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/3212095>
- Hammontree, E., Barrows, R., & Allen, B. (2000). *Western federal lands highway division responds to northwest emergencies*.
- Hasani, A., & Mokhtari, H. (2019). An integrated relief network design model under uncertainty: A case of Iran. *Safety Science*, 111, 22–36. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.09.004>
- Helderop, E., & Grubestic, T. H. (2019). Flood evacuation and rescue: The identification of critical road segments using whole-landscape features. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 3, 100022. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2019.100022>
- Henao, D., López, F., Chud Pantoja, V. L., & Osorio, J. C. (2019). Priorización multicriterio para la afiliación a un banco de alimentos en Colombia. *Revista Logos, Ciencia & Tecnología*, 12(1), 58–70. <https://doi.org/10.22335/rlct.v12i1.1024>
- Holguin-Veras, J., Jaller, M., Van Wassenhove, L. N., Perez, N., & Wachtendorf, T. (2012). On the unique features of post-disaster humanitarian logistics. *Journal of Operations Management*, 30(7–8), 494–506. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2012.08.003>
- Hosseini, S. M. A., de la Fuente, A., & Pons, O. (2016). Multicriteria Decision-Making Method for Sustainable Site Location of Post-Disaster Temporary Housing in Urban Areas. *Journal of Construction Engineering and Management*, 142(9). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0001137](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0001137)

- Hu, F.-H., Feng, X., Zhao, M.-H., & Chen, Y.-R. (2015). Research on emergency supplies dispatching problem based on genetic algorithm. *Open Cybernetics and Systemics Journal*, 9(1), 62–68.
- Hu, H., He, J., He, X., Yang, W., Nie, J., & Ran, B. (2019). Emergency material scheduling optimization model and algorithms: A review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 6(5), 441–454. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2019.07.001>
- Huang, M., Smilowitz, K., & Balcik, B. (2012). Models for relief routing: Equity, efficiency and efficacy. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48(1), 2–18. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2011.05.004>
- Huizing, D., Schäfer, G., van der Mei, R. D., & Bhulai, S. (2020). The median routing problem for simultaneous planning of emergency response and non-emergency jobs. *European Journal of Operational Research*.
- Hwang, G., Han, J. H., & Chang, T. W. (2020). An integrated key performance measurement for manufacturing operations management. *Sustainability (Switzerland)*, 12(13), 1–15. <https://doi.org/10.3390/su12135260>
- Ibarra-Rojas, O. J., Hernandez, L., & Ozuna, L. (2018). The Accessibility Vehicle Routing Problem. *Journal of Cleaner Production*, 172, 1514–1528. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.249>
- Ibn Faiz, T., Vogiatzis, C., & Noor-E-Alam, M. (2019). A column generation algorithm for vehicle scheduling and routing problems. *Computers & Industrial Engineering*, 130, 222–236. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.02.032>
- Iloglu, S., & Albert, L. A. (2018). An integrated network design and scheduling problem for network recovery and emergency response. *Operations Research Perspectives*, 5(August), 218–231. <https://doi.org/10.1016/j.orp.2018.08.001>
- Iloglu, S., & Albert, L. A. (2020). A maximal multiple coverage and network restoration problem for disaster recovery. *Operations Research Perspectives*.
- Immawan, T., Pratiwi, A. I., & Cahyo, W. N. (2019). The proposed dashboard model for measuring performance of Small-Medium Enterprises (SME). *International Journal of Integrated Engineering*, 11(5), 167–173. <https://doi.org/10.30880/ijie.2019.11.05.021>
- Instituto Nacional de Vías (INVIAS) (2016). Manual de mantenimiento de carreteras. URL: <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/7714-manual-de-mantenimiento-de-carreteras-2016-v2>
- Jahre, M., & Jensen, L. M. (2010). Coordination in humanitarian logistics through clusters. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 40(8), 657–674. <https://doi.org/10.1108/09600031011079319>
- Janiak, M. K., & Zak, J. (2014). Multiple criteria evaluation of different redesign variants of the public tram system. *Transportation Research Procedia*, 3(July), 690–699. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2014.10.048>
- Jiang, J. P., Wang, P., Lung, W. S., Guo, L., & Li, M. (2012). A GIS-based generic real-time risk assessment framework and decision tools for chemical spills in the river basin. *Journal of Hazardous Materials*, 227, 280–291. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.05.051>
- Jiang, Y. P., & Yuan, Y. F. (2019). Emergency Logistics in a Large-Scale Disaster Context: Achievements and Challenges. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(5). <https://doi.org/10.3390/ijerph16050779>
- Kalinowski, T., Matsypura, D., & Savelsbergh, M. W. P. (2015). Incremental network design with maximum flows. *European Journal of Operational Research*, 242(1), 51–62. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.10.003>
- Kalkman, J. P., & de Waard, E. J. (2017). Inter-organizational disaster management projects: Finding the middle way between trust and control. *International Journal of Project Management*, 35(5), 889–899. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2016.09.013>
- Karakoc, D. B., Almoghathawi, Y., Barker, K., González, A. D., & Mohebbi, S. (2019). Community resilience-driven restoration model for interdependent infrastructure networks. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 38(June), 101228. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101228>

- Karakoc, D. B., Barker, K., Zobel, C. W., & Almoghathawi, Y. (2020). Social vulnerability and equity perspectives on interdependent infrastructure network component importance. *Sustainable Cities and Society*, 57(March 2019), 102072. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102072>
- Khademi, N., Balaei, B., Shahri, M., Mirzaei, M., Sarrafi, B., Zahabiun, M., & Mohaymany, A. S. (2015). Transportation network vulnerability analysis for the case of a catastrophic earthquake. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 12, 234–254. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2015.01.009>
- Khan, M. U., Mesbah, M., Ferreira, L., & Williams, D. J. (2014). Development of road deterioration models incorporating flooding for optimum maintenance and rehabilitation strategies. *Road & Transport Research*, 23(1), 3–24.
- Kim, S., Shin, Y., Lee, G. M., & Moon, I. (2018). Network repair crew scheduling for short-term disasters. *Applied Mathematical Modelling*, 64, 510–523. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2018.07.047>
- Kovacs, G., & Moshtari, M. (2019). A roadmap for higher research quality in humanitarian operations: A methodological perspective. *European Journal of Operational Research*, 276(2), 395–408. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.07.052>
- Kovacs, G., & Spens, K. (2009). Identifying challenges in humanitarian logistics. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 39(6), 506–528. <https://doi.org/10.1108/09600030910985848>
- Kumar, B., & Bhaduri, S. (2018). Disaster risk in the urban villages of Delhi. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 31, 1309–1325. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2018.04.022>
- Laguna-Salvado, L., Lauras, M., Okongwu, U., & Comes, T. (2019). A multicriteria Master Planning DSS for a sustainable humanitarian supply chain. *Annals of Operations Research*, 283(1–2), 1303–1343. <https://doi.org/10.1007/s10479-018-2882-3>
- Lamos Díaz, H., Aguilar Imitola, K., & Acosta Amado, R. J. (2019). Perspectivas de investigación en OR/MS en la gestión de operaciones de desastres: una revisión de la literatura. *Revista Facultad De Ingeniería Universidad De Antioquia*, (91), 43–59. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.n91a05>
- Larichev, O. I., & Moshkovich, H. M. (1995a). ZAPROS-LM - A method and system for ordering multiattribute alternatives. *European Journal of Operational Research*, 82(3), 503–521. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(93\)E0143-L](https://doi.org/10.1016/0377-2217(93)E0143-L)
- Leiras, A., de Brito Jr., I., Queiroz Peres, E., Rejane Bertazzo, T., & Yoshida Yoshizaki, H. (2014). Literature review of humanitarian logistics research: Trends and challenges. *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*, 4(1), 95–130. Disponible en: <https://doi.org/10.1108/JHLSCM-04-2012-0008>
- Li, M. Y., Zhao, X. J., Fan, Z. P., Cao, P. P., & Qu, X. N. (2019). A model for assignment of rescuers considering multiple disaster areas. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 38(June), 101201. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2019.101201>
- Li, P., Lan, H., & Saldanha-Da-Gama, F. (2019). A Bi-objective capacitated location-routing problem for multiple perishable commodities. *IEEE Access*.
- Lin, Y.-H., Batta, R., Rogerson, P. A., Blatt, A., & Flanigan, M. (2011). A logistics model for emergency supply of critical items in the aftermath of a disaster. *Socio-Economic Planning Sciences*, 45(4), 132–145. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seps.2011.04.003>
- Liu, B., Sheu, J.-B., Zhao, X., Chen, Y., & Zhang, W. (2020). Decision Making on Post-Disaster Rescue Routing Problems from the Rescue Efficiency Perspective. *European Journal of Operational Research*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.03.017>
- Liu, C., Kou, G., Peng, Y., & Alsaadi, F. E. (2019). Location-routing problem for relief distribution in the early post-earthquake stage from the perspective of fairness. *Sustainability (Switzerland)*, 11(12). <https://doi.org/10.3390/SU11123420>
- Liu, M., & Liang, J. (2013). Dynamic optimization model for allocating medical resources in epidemic controlling. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 6(1), 73–88. <http://dx.doi.org/10.3926/jiem.663>

- Liu, M., & Xiao, Y. (2015). Optimal scheduling of logistical support for medical resource with demand information updating. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/765098>
- Liu, M., & Zhao, L. (2012). An integrated and dynamic optimisation model for the multi-level emergency logistics network in anti-bioterrorism system. *International Journal of Systems Science*, 43(8), 1464–1478. <https://doi.org/10.1080/00207721.2010.547629>
- Liubartseva, S., Coppini, G., Pinardi, N., De Dominicis, M., Lecci, R., Turrisi, G., Cret, S., Martinelli, S., Agostini, P., Marra, P., & Palermo, F. (2016). Decision support system for emergency management of oil spill accidents in the Mediterranean Sea. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(8), 2009–2020. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-2009-2016>
- López-Ramírez, M. A., Rojas-Trejos, C. A., González-Velasco, J., Valle, U., & Industrial, E. D. I. (2017). Inventory control model using the Two - Bin System methodology in the hospital network of the City of Cali, Colombia. *International Journal of Combinatorial Optimization Problems and Informatics*, 8(2), 19–24.
- López-Vargas, J. C., & Cárdenas-Aguirre, D. M. (2018). Factores de influencia en la coordinación logística para la preparación y atención de desastres – Una revisión de literatura. *Revista EIA*, 15(30), 41–56. <https://doi.org/10.24050/reia.v15i30.1146>
- Lorca, A., Celik, M., Ergun, O., & Keskinocak, P. (2017). An Optimization-Based Decision-Support Tool for Post-Disaster Debris Operations. *Production and Operations Management*, 26(6), 1076–1091. <https://doi.org/10.1111/poms.12643>
- Loree, N., & Aros-Vera, F. (2018). Points of distribution location and inventory management model for Post-Disaster Humanitarian Logistics. *Transportation Research Part E-Logistics and Transportation Review*, 116, 1–24. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2018.05.003>
- Lozano, R., Naghavi, M., Foreman, K., Lim, S., Shibuya, K., Aboyans, V., Abraham, J., Adair, T., Aggarwal, R., Ahn, S. Y., AlMazroa, M. A., Alvarado, M., Anderson, H. R., Anderson, L. M., Andrews, K. G., Atkinson, C., Baddour, L. M., Barker-Collo, S., Bartels, D. H., ... Murray, C. J. L. (2012). Global and regional mortality from 235 causes of death for 20 age groups in 1990 and 2010: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010. *The Lancet*, 380(9859), 2095–2128. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(12\)61728-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(12)61728-0)
- Lu, G., Xiong, Y., Ding, C., & Wang, Y. (2016a). An optimal schedule for urban road network repair based on the greedy algorithm. *PLoS ONE*.
- Macea, L. F., Amaya, J., Cantillo, V., & Holguín-Veras, J. (2018). Evaluating economic impacts of water deprivation in humanitarian relief distribution using stated choice experiments. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 28(July 2017), 427–438. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2018.03.029>
- Mahecha Peláez L.A., & Rojas Trejos, C. A. (2019). Propuesta de un modelo de localización de albergues temporales para la atención de damnificados en la fase de respuesta post desastre: caso inundación Roldanillo Valle Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Industrial - Universidad del Valle. Sede Zarzal.
- Maghsoudi, A., & Pazirandeh, A. (2016). Visibility, resource sharing and performance in supply chain relationships: insights from humanitarian practitioners. *Supply Chain Management*, 21(1), 125–139. <https://doi.org/10.1108/SCM-03-2015-0102>
- Malone, T. W. (1987). Modeling Coordination in Organizations and Markets. *Management Science*, 33(10), 1317–1332. <https://doi.org/10.1287/mnsc.33.10.1317>
- Manopiniwes, W., & Irohara, T. (2014). A review of relief supply chain optimization. *Industrial Engineering and Management Systems*, 13(1), 1-14.
- Mansoori, S., Bozorgi-Amiri, A., & Pishvaei, M. S. (2020). A robust multi-objective humanitarian relief chain network design for earthquake response, with evacuation assumption under uncertainties. *Neural Computing and Applications*.
- Mardani, A., Zavadskas, E. K., Govindan, K., Senin, A. A., & Jusoh, A. (2016a). VIKOR technique: A systematic review of the state of the art literature on methodologies and applications. *Sustainability (Switzerland)*, 8(1), 1–38. <https://doi.org/10.3390/su8010037>

- Marín Gómez, K. V., Morales Corredor J.D., & Rojas Trejos, C. A. (2018). Propuesta de un modelo de localización de albergues temporales y ruteo de personal especializado, para la atención de una población vulnerable ante un desastre de la región. Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Industrial. Universidad del Valle. Sede Zarzal.
- Martínez López V.M., & Rojas Trejos, C. A. (2020). Propuesta de distribución de ayuda humanitaria considerando restricciones viales en desastres naturales súbitos. Caso de estudio: Roldanillo - Valle del Cauca Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Industrial. Universidad del Valle. Sede Zarzal.
- Matsumaru, R., Nagami, K., & Takeya, K. (2012). Reconstruction of the Aceh Region following the 2004 Indian Ocean tsunami disaster: A transportation perspective. *IATSS Research*, 36(1), 11–19. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.iatssr.2012.07.001>
- Maya Duque, P. A., Coene, S., Goos, P., Sörensen, K., & Spieksma, F. (2013). The accessibility arc upgrading problem. *European Journal of Operational Research*, 224(3), 458–465. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.09.005>
- Maya Duque, P. A., Dolinskaya, I. S., & Sörensen, K. (2016). Network repair crew scheduling and routing for emergency relief distribution problem. *European Journal of Operational Research*, 248(1), 272–285. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.06.026>
- Mendoza Patiño, D., Betancourt Cortez, F. J., Leguizamón Sierra, G., Dajles Lenis, D. E., Gámez Araújo, W. G., & Rojas Trejos, C. A. (2018a). Determination of the relevant factors in the outsourcing decision-making process in global supply chains applying the AHP methodology. *Espacios*, 39(41).
- Messa Mejía E., Sánchez Murilo T., Rojas Trejos, C. A., & González Velasco J. (2022) Propuesta de un modelo de distribución de vacunas considerando limitaciones de inventario en depósitos y puntos de entrega en el Valle del Cauca. Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Industrial. Universidad del Valle. Sede Zarzal.
- Minas, J. P., Simpson, N. C., & Tacheva, Z. Y. (2020). Modeling emergency response operations: A theory building survey. *Computers and Operations Research*, 119, 104921. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.104921>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2012). Ley 1523: Sistema Nacional de Gestión del Riesgo. *Instituto Distrital de Gestión Del Riesgo - IDIGER*, 58.
- Manterola, C., Astudillo, P., Arias, E., & Claros, N. (2013). Systematic reviews of the literature: what should be known about them. *Cirugía Española*, 149-155.
- Mohammad, A., Rezapour, S, Baghaian, A. (2023). An integrative framework for coordination of damage assessment, road restoration, and relief distribution in disasters. *Omega-International Journal of Management Science*. <https://doi.org/115 10.1016/j.omega.2022.102748>
- Montoya Calleja V., Ruiz Aguirre M.A., Guerra Ospina P.A., & Rojas Trejos, C. A. (2022, 5 de septiembre). Propuesta de un modelo de programación matemática para la localización de albergues temporales ante eventos de desastre. Caso de estudio: Roldanillo, Valle del Cauca, Colombia. *Congreso Asociación Colombiana de Investigación Operativa - Institute of Industrial and Systems Engineers (ASOCIO-IISE)* [Ponencia]. Universidad de La Sabana, Universidad Sergio Arboleda, Universidad de los Andes. Bogotá D.C, Colombia.
- Moreno, A., Alem, D., Gendreau, M., & Munari, P. (2020). The heterogeneous multicrew scheduling and routing problem in road restoration. *Transportation Research Part B: Methodological*, 141, 24–58. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2020.09.002>
- Moreno, A., Munari, P., & Alem, D. (2019). A branch-and-Benders-cut algorithm for the Crew Scheduling and Routing Problem in road restoration. *European Journal of Operational Research*, 275(1), 16–34. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.11.004>
- Morshedlou, N., González, A. D., & Barker, K. (2018). Work crew routing problem for infrastructure network restoration. *Transportation Research Part B: Methodological*, 118, 66–89. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2018.10.001>
- Mostajabdaveh, M., Gutjahr, W. J., & Salman, F. S. (2019). Inequity-averse shelter location for disaster preparedness. *Iise Transactions*, 51(8), 809–829. <https://doi.org/10.1080/24725854.2018.1496372>

- Mutebi, H., Muhwezi, M., Ntayi, J. M., & Munene, J. C. K. (2020). Organisation size, innovativeness, self-organisation and inter-organisational coordination. *International Journal of Emergency Services*, 9(3), 359–394. <https://doi.org/10.1108/IJES-05-2020-0024>
- Nassereddine, M., Azar, A., Rajabzadeh, A., & Afsar, A. (2019). Decision making application in collaborative emergency response: A new PROMETHEE preference function. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 38. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101221>
- Nurmala, N., de Leeuw, S., & Dullaert, W. (2017). Humanitarian–business partnerships in managing humanitarian logistics. *Supply Chain Management*, 22(1), 82–94. <https://doi.org/10.1108/SCM-07-2016-0262>
- Nurre, S. G., Cavdaroglu, B., Mitchell, J. E., Sharkey, T. C., & Wallace, W. A. (2012a). Restoring infrastructure systems: An integrated network design and scheduling (INDS) problem. *European Journal of Operational Research*, 223(3), 794–806. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.07.010>
- Osorio, A., Brailsford, S. & Smith, H. (2014). Un modelo de optimización bi-objetivo para la selección de tecnología y asignación de donantes en la cadena de suministro de sangre. *Revista S&T*, 12(30), 9-24
- Osorio, C.A. (2016). Mecanismos de coordinación para la optimización del desempeño de la cadena logística humanitaria mediante modelamiento estocástico. Caso colombiano. Tesis de doctorado. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C.
- Ozdamar, L., Aksu, D. T., Yasa, E., & Ergunes, B. (2018). Disaster relief routing in limited capacity road networks with heterogeneous flows. *Journal of Industrial and Management Optimization*.
- Özdamar, L., & Ertem, M. A. (2015). Models, solutions and enabling technologies in humanitarian logistics. *European Journal of Operational Research*, 244(1), 55–65. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.11.030>
- Özdamar, L., Tüzün Aksu, D., & Ergüneş, B. (2014). Coordinating debris cleanup operations in post disaster road networks. *Socio-Economic Planning Sciences*, 48(4), 249–262. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2014.08.001>
- Papamichail, K. N., & French, S. (2013). 25 Years of MCDA in nuclear emergency management. *Ima Journal of Management Mathematics*, 24(4), 481–503. <https://doi.org/10.1093/imaman/dps028>
- Paraskevopoulos, D. C., Laporte, G., Repoussis, P. P., & Tarantilis, C. D. (2017). Resource constrained routing and scheduling: Review and research prospects. *European Journal of Operational Research*.
- Paul, J. A., & MacDonald, L. (2016). Optimal location, capacity and timing of stockpiles for improved hurricane preparedness. *International Journal of Production Economics*, 174, 11–28. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.01.006>
- Perez-Rodriguez, N., & Holguin-Veras, J. (2016). Inventory-Allocation Distribution Models for Postdisaster Humanitarian Logistics with Explicit Consideration of Deprivation Costs. *Transportation Science*, 50(4), 1261–1285. <https://doi.org/10.1287/trsc.2014.0565>
- Podgórski, D. (2015). Measuring operational performance of OSH management system - A demonstration of AHP-based selection of leading key performance indicators. *Safety Science*, 73, 146–166. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2014.11.018>
- Prabawa, P., & Choi, D.-H. (2020). Multi-Agent Framework for Service Restoration in Distribution Systems with Distributed Generators and Static/Mobile Energy Storage Systems. *IEEE Access*, 8, 51736–51752. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2980544>
- Pradhananga, R., Mutlu, F., Pokharel, S., Holguin-Veras, J., & Seth, D. (2016). An integrated resource allocation and distribution model for pre-disaster planning. *Computers & Industrial Engineering*, 91, 229–238. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.11.010>
- Prakash, C., Besiou, M., Charan, P., & Gupta, S. (2020). Organization theory in humanitarian operations: a review and suggested research agenda. *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*, 10(2), 261–284. <https://doi.org/10.1108/JHLSCM-08-2019-0051>
- Rais, A., Alvelos, F., & Carvalho, M. S. (2014). New mixed integer-programming model for the pickup-and-delivery problem with transshipment. *European Journal of Operational Research*, 235(3), 530–539. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.10.038>

- Ramírez Drada, E., Chud Pantoja, V. L., & Orejuela Cabrera, J. P. (2019). Propuesta metodológica multicriterio para la distribución semicontinua de plantas. *Suma de Negocios*, 10(23), 132–145. <https://doi.org/10.14349/sumneg/2019.v10.n23.a6>
- Ransikarbum, K., & Mason, S. J. (2016). Goal programming-based post-disaster decision making for integrated relief distribution and early-stage network restoration. *International Journal of Production Economics*, 182, 324–341. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.08.030>
- Reddy, G. H., Chakrapani, P., Goswami, A. K., & Choudhury, N. B. D. (2017a). Fuzzy Based Approach for Restoration of Distribution System during Post Natural Disasters. *IEEE Access*, 6, 3448–3458. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2779823>
- Regis-Hernandez, F., Mora-Vargas, J., & Ruiz, A. (2017). A Multi-Criteria Vertical Coordination Framework for a Reliable Aid Distribution. *Journal of Industrial Engineering and Management-Jiem*, 10(4), 789–815. <https://doi.org/10.3926/jiem.2253>
- Resolución No. 1400 (8 de junio de 2004). Ministerio de Transporte. Colombia.
- Rezaei-Malek, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Cheikhrouhou, N., & Taheri-Moghaddam, A. (2016a). An approximation approach to a trade-off among efficiency, efficacy, and balance for relief pre-positioning in disaster management. *Transportation Research Part E-Logistics and Transportation Review*, 93, 485–509. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.07.003>
- Rezaei-Malek, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Zahiri, B., & Bozorgi-Amiri, A. (2016b). An interactive approach for designing a robust disaster relief logistics network with perishable commodities. *Computers and Industrial Engineering*, 94, 201–215. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.01.014>
- Ríos, R. C. G., Sánchez, C. N. G., & González, E. L. R. (2019). Application of the scoring method for integral customer classification. *Ingeniare*, 27(3), 375–382. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052019000300375>
- Rivera, J. G. (2010). *La comunicación del riesgo: hacia un modelo efectivo y situacional* (ITM, Ed.). ITM.
- Rodríguez-Espindola, Oscar, Albores, P., & Brewster, C. (2018). Dynamic formulation for humanitarian response operations incorporating multiple organisations. *International Journal of Production Economics*, 204(August), 83–98. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.07.023>
- Rodríguez Taborda J.D., Gómez Hernández J.M., & Rojas Trejos, C. A. (2022). Propuesta de un modelo de programación de recursos de reparación para disrupciones viales transitorias por desastres naturales súbitos. Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Industrial. Universidad del Valle. Sede Zarzal.
- Rojas Trejos, C. A., & González Velasco, J. (2018). A Multicriteria Location Model for a Solid Waste Disposal Center in Valle Del Cauca, Colombia. *Supply Chain Management and Logistics in Latin America*, 37–53. <https://doi.org/10.1108/978-1-78756-803-720181004>
- Rojas Trejos, C. A., Meisel, J. D., & Adarme Jaimes, W. (2023a). Humanitarian aid distribution logistics with accessibility constraints: a systematic literature review. In *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management* (Vol. 13, Issue 1, pp. 26–41). Emerald Publishing. <https://doi.org/10.1108/JHLSCM-05-2021-0041>
- Rojas Trejos, C. A., Meisel, J. D., Adarme Jaimes, W., & Orejuela Cabrera J. P. (2023b, 30 de marzo). Distribución de ayuda humanitaria considerando disrupciones viales transitorias [Conferencia]. XXVI – II Seminario de Logística. Grupo de Investigación, Sociedad, Economía y Productividad (SEPRO). Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D.C, Colombia.
- Rojas Trejos, C. A., Meisel, J. D., Adarme Jaimes, W., & Orejuela Cabrera J. P. (2022a, 22 de noviembre). Programación de recursos de reparación para la atención de disrupciones viales transitorias en logística humanitaria [Conferencia]. XXV - IV Seminario de Logística. Grupo de Investigación, Sociedad, Economía y Productividad (SEPRO). Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D.C, Colombia.
- Rojas Trejos, C. A., Meisel, J. D., & Adarme Jaimes, W. (2021, 22 de agosto). Assignment, location and routing in humanitarian logistics [Ponencia]. 22nd Conference of the International Federation of Operational Research Societies (IFORS). Seúl, Corea del Sur.

- Rojas Trejos, C. A., Meisel, J. D., & Adarme Jaimes, W. (2022b). Enfoque integrado multicriterio para la medición del desempeño en redes de distribución de ayuda humanitaria [Ponencia]. *IX Congreso Internacional de Industria y Organizaciones. Universidad Nacional de Colombia*. Bogotá D.C, Colombia.
- Rojas Trejos, C. A., Meisel, J. D., & Adarme Jaimes, W. (2023c). X Congreso Internacional de Industria y Organizaciones. Universidad de la Costa, Universidad Nacional de Colombia [Ponencia]. *X Congreso Internacional de Industria y Organizaciones. Universidad Nacional de Colombia*. Barranquilla, Colombia.
- Rojas Trejos, C. A., Saavedra Arango, L. F., & Orejuela Cabrera, J. P. (2017). Scheduling of internal materials supply operations in a pre-milling type concentrate food plant. *Producción + Limpia*, 12(2), 147–158. <https://doi.org/10.22507/pml.v12n2a12>
- Rojas-trejos, C. A., González-velasco, J., López-ramírez, M. A., Valle, U., & Industrial, E. D. I. (2017). Optimization Model for the Location of Prehospital Care Ambulances in the city of Cali Colombia. *International Journal of Combinatorial Optimization Problems and Informatics*, 8(3), 64–70.
- Roozbahani, A., Zahraie, B., & Tabesh, M. (2012a). PROMETHEE with Precedence Order in the Criteria (PPOC) as a New Group Decision Making Aid: An Application in Urban Water Supply Management. *Water Resources Management*, 26(12), 3581–3599. <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0091-4>
- Saaty, R. W. (1987). The analytic hierarchy process-what it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, 9(3–5), 161–176. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)
- Sabbaghtorkan, M., Batta, R., & He, Q. (2020). Prepositioning of assets and supplies in disaster operations management: Review and research gap identification. *European Journal of Operational Research*, 284(1), 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.06.029>
- Sabouhi, F., Bozorgi-Amiri, A., & Vaez, P. (2020). Stochastic optimization for transportation planning in disaster relief under disruption and uncertainty. *Kybernetes*, 50(9), 2632–2650. <https://doi.org/10.1108/K-10-2020-0632>
- Safarpour, H., Fooladlou, S., Safi-Keykaleh, M., Mousavipour, S., Pirani, D., Sahebi, A., Ghodsi, H., Farahi-Ashtiani, I., & Dehghani, A. (2020). Challenges and barriers of humanitarian aid management in 2017 Kermanshah earthquake: A qualitative study. *BMC Public Health*, 20(1), 1–10. <https://doi.org/10.1186/s12889-020-08722-5>
- Sahin, H., Kara, B. Y., & Karasan, O. E. (2016). Debris removal during disaster response: A case for Turkey. *Socio-Economic Planning Sciences*, 53, 49–59. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2015.10.003>
- Sakiani, R., Seifi, A., & Khorshiddoust, R. R. (2020). Inventory routing and dynamic redistribution of relief goods in post-disaster operations. *Computers and Industrial Engineering*, 140(December 2019), 106219. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106219>
- Sakuraba, C. S., Santos, A. C., & Prins, C. (2016a). Work-troop scheduling for road network accessibility after a major earthquake. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*.
- Sakuraba, C. S., Santos, A. C., Prins, C., Bouillot, L., Durand, A., & Allenbach, B. (2016b). Road network emergency accessibility planning after a major earthquake. *EURO Journal on Computational Optimization*.
- Sánchez Pedraza, R., & Jaramillo González, L. (2009). Methodology of Qualification and Summary of the Opinions in Formal Consensus. *Revista Colombiana de Psiquiatría*, 38(4), 777–786.
- Sanci, E., & Daskin, M. S. (2019). Integrating location and network restoration decisions in relief networks under uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 279(2), 335–350. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.06.012>
- Sarache, W. A., Cárdenas, D. M., & Giraldo, J. A. (2005). Procedimiento para la definición y jerarquización de prioridades competitivas de fabricación. Aplicaciones en las pymes de la industria metalmeccánica. *Ingeniería y Competitividad*, 7(2), 84–91.
- Sarkissian, R. Der, Zaninetti, J.-M., & Abdallah, C. (2019). The use of geospatial information as support for Disaster Risk Reduction; contextualization to Baalbek-Hermel Governorate/Lebanon. *Applied Geography*, 111, 102075. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2019.102075>

- Sc, A. M., Ramos, F., & Auxiliar, P. (2011). *Una aproximación a la toma de decisiones en el escenario azucarero mediante el método Delphi . Un estudio de caso . An approximation to the take of decision at the sugar scenario , using the method Delphi . A case study . Revista centro azúcar, 38(3), 39–45.*
- Shanshan, H., Wenhai, Z., & Chaofeng, W. (2015). Collaborative dynamic optimization on post-earthquake emergency supply and road rehabilitation based on road network connectivity. *Open Automation and Control Systems Journal*.
- Sharma, A., Singh, P. K., Sharma, A., & Kumar, R. (2019). An efficient architecture for the accurate detection and monitoring of an event through the sky. *Computer Communications, 148*, 115–128. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.comcom.2019.09.009>
- Shendarkar, A., Vasudevan, K., Lee, S., & Son, Y. J. (2008). Crowd simulation for emergency response using BDI agents based on immersive virtual reality. *Simulation Modelling Practice and Theory, 16(9)*, 1415–1429. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2008.07.004>
- Shin, Y., Kim, S., & Moon, I. (2019). Integrated optimal scheduling of repair crew and relief vehicle after disaster. *Computers and Operations Research, 105*, 237–247. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2019.01.015>
- Silva, L. de O., Bandeira, R. A. de M., & Campos, V. B. G. (2019a). Proposal to planning facility location using UAV and geographic information systems in a post-disaster scenario. *International Journal of Disaster Risk Reduction, 36*(December 2018), 101080. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101080>
- Sirikijpanichkul, A., Van Dam, Koen H., Ferreira, L., & Lukszo, Z. (2007). Optimizing the Location of Intermodal Freight Hubs: An Overview of the Agent Based Modelling Approach. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 7(4)*, 71–81. [https://doi.org/10.1016/S1570-6672\(07\)60031-2](https://doi.org/10.1016/S1570-6672(07)60031-2)
- Solmaz, G., & Turgut, D. (2017). Modeling pedestrian mobility in disaster areas. *Pervasive and Mobile Computing, 40*, 104–122. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pmcj.2017.05.005>
- Solomatin, A. (2018). The World Bank and Fragile States: Dynamics of cooperation and aid structure. *International Organisations Research Journal, 13(1)*, 114–132. <https://doi.org/10.17323/1996-7845-2018-01-07>
- Sörensen, K., & Vanovermeire, C. (2013). Bi-objective optimization of the intermodal terminal location problem as a policy-support tool. *Computers in Industry, 64(2)*, 128–135. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2012.10.012>
- Steenbergen, R., Mes, M., Heeswijk, W. (2023). Reinforcement learning for humanitarian relief distribution with trucks and UAVs under travel time uncertainty. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 157*, 1–28. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2023.104401>
- Tamima, U., & Chouinard, L. (2016). Development of evacuation models for moderate seismic zones: A case study of Montreal. *International Journal of Disaster Risk Reduction, 16*, 167–179. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2016.02.003>
- Tan, Y., Qiu, F., Das, A. K., Kirschen, D. S., Arabshahi, P., & Wang, J. (2019). Scheduling Post-Disaster Repairs in Electricity Distribution Networks. *IEEE Transactions on Power Systems*.
- Tatham, P., & Spens, K. (2011). Towards a humanitarian logistics knowledge management system. *Disaster Prevention and Management, 20(1)*, 6–26. <https://doi.org/10.1108/09653561111111054>
- Tatiana, F., & Duarte, M. (2017). *Mecanismo de coordinación entre actores públicos y privados del sistema de transporte de carga de Colombia*. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C.
- Tavana, M., Abtahi, A. R., Di Caprio, D., Hashemi, R., & Yousefi-Zenouz, R. (2018). An integrated location-inventory-routing humanitarian supply chain network with pre- and post-disaster management considerations. *Socio-Economic Planning Sciences, 64*(October 2017), 21–37. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2017.12.004>
- Turgut, B. T., Tas, G., Herekoglu, A., Tozan, H., & Vayvay, O. (2011). A fuzzy AHP based decision support system for disaster center location selection and a case study for Istanbul. *Disaster Prevention and Management, 20(5)*, 499–520. <https://doi.org/10.1108/09653561111178943>

- Tuzun Aksu, D., & Ozdamar, L. (2014). A mathematical model for post-disaster road restoration: Enabling accessibility and evacuation. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 61, 56–67. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2013.10.009>
- Tzeng, G. H., Cheng, H. J., & Huang, T. D. (2007). Multi-objective optimal planning for designing relief delivery systems. *Transportation Research Part E-Logistics and Transportation Review*, 43(6), 673–686. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2006.10.012>
- Unidad Nacional para la Gestión de Riesgos de Desastres, U. (2013). *Estandarización de ayuda humanitaria*.
- Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. (2020). *Consolidado Atención de Emergencias*. <http://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Paginas/Consolidado-Atencion-de-Emergencias.aspx>
- Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. (2021). *Consolidado Atención de Emergencias*. <http://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Paginas/Consolidado-Atencion-de-Emergencias.aspx>
- Upayokin, A., Mattingly, S. P., & Lugo-Serrato, S. A. (2008). Decision-making procedure for assessing performance measures of freeway operations. *Transportation Research Record*, 2046, 11–19. <https://doi.org/10.3141/2046-02>
- Usón, T. J., Klonner, C., & Höfle, B. (2016). Using participatory geographic approaches for urban flood risk in Santiago de Chile: Insights from a governance analysis. *Environmental Science & Policy*, 66, 62–72. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.08.002>
- Vahdani, B., Veysmoradi, D., Noori, F., & Mansour, F. (2018a). Two-stage multi-objective location-routing-inventory model for humanitarian logistics network design under uncertainty. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 27(October 2017), 290–306. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2017.10.015>
- Vahdani, B., Veysmoradi, D., Shekari, N., & Mousavi, S. M. (2018b). Multi-objective, multi-period location-routing model to distribute relief after earthquake by considering emergency roadway repair. *Neural Computing and Applications*, 30(3), 1–41. <https://doi.org/10.1007/s00521-016-2696-7>
- Vahdani, B., Veysmoradi, D., Shekari, N., & Amiri, M. (2022). Planning for relief distribution, victim evacuation, redistricting and service sharing under uncertainty. *Socio-Economic Planning Sciences*, 80, 835–854. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2021.101158>
- Vahdat, K., Smith, N. J., & Amiri, G. G. (2014). Fuzzy multicriteria for developing a risk management system in seismically prone areas. *Socio-Economic Planning Sciences*, 48(4), 235–248. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2014.05.002>
- Vega, D., & Roussat, C. (2015). Humanitarian logistics: The role of logistics service providers. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 45(4), 352–375. <https://doi.org/10.1108/IJPDLM-12-2014-0309>
- Velasquez, J. D., Yoon, S. W., & Nof, S. Y. (2010). Computer-based collaborative training for transportation security and emergency response. *Computers in Industry*, 61(4), 380–389. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2009.12.007>
- Venkatesh, V. G., Zhang, A., Deakins, E., Luthra, S., & Mangla, S. (2019a). A fuzzy AHP-TOPSIS approach to supply partner selection in continuous aid humanitarian supply chains. *Annals of Operations Research*, 283(1–2), 1517–1550. <https://doi.org/10.1007/s10479-018-2981-1>
- Veysmoradi, D., Vahdani, B., Farhadi Sartangi, M., & Mousavi, S. M. (2018). Multi-objective open location-routing model for relief distribution networks with split delivery and multi-mode transportation under uncertainty. *Scientia Iranica*, 25(6), 3635–3653.
- Victoria, J. F., Afsar, H. M., & Prins, C. (2016). Column Generation based heuristic for the Vehicle Routing Problem with Time-Dependent Demand. *IFAC-PapersOnLine*, 49(12), 526–531. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.684>
- Vodák, R., Bíl, M., & Křivánková, Z. (2018). A modified ant colony optimization algorithm to increase the speed of the road network recovery process after disasters. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 31(April), 1092–1106. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2018.04.004>

- Wang, J. W., Wang, H. F., Zhou, Y. M., Wang, Y., & Zhang, W. J. (2019). On an integrated approach to resilient transportation systems in emergency situations. *Natural Computing*, 18(4), 815–823. <https://doi.org/10.1007/s11047-016-9605-y>
- Wang, Y. N., Liang, Y. Z., & Sun, H. (2020). A Regret Theory-Based Decision-Making Method for Urban Rail Transit in Emergency Response of Rainstorm Disaster. *Journal of Advanced Transportation*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/3235429>
- Wijnmalen, D. J. D. (2007). Analysis of benefits, opportunities, costs, and risks (BOCR) with the AHP-ANP: A critical validation. *Mathematical and Computer Modelling*, 46(7–8), 892–905. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2007.03.020>
- Wohlgemuth, S., Oloruntoba, R., & Clausen, U. (2012). Dynamic vehicle routing with anticipation in disaster relief. *Socio-Economic Planning Sciences*, 46(4), 261–271. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2012.06.001>
- Wu, J., & Wang, P. (2020). Post-disruption performance recovery to enhance resilience of interconnected network systems. *Sustainable and Resilient Infrastructure*.
- Wu, P., Cheng, J., & Feng, C. (2019). Resource-Constrained Emergency Scheduling for Forest Fires with Priority Areas: An Efficient Integer-Programming Approach. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 14(2), 261–270. <https://doi.org/10.1002/tee.22805>
- Yan, J., Hu, B., Xie, K., Tai, H. M., & Li, W. (2020). Post-disaster power system restoration planning considering sequence dependent repairing period. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 117(August 2019). <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105612>
- Yan, S., Chu, J. C., & Shih, Y.-L. (2014). Optimal scheduling for highway emergency repairs under large-scale supply-demand perturbations. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*.
- Ye, Y., Liu, N., Hu, G. P., & Zhan, S. L. (2016). Scheduling algorithm based on follow-up sharing character for post-event response resource distribution in large-scal disasters. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 25(1), 77–101. <https://doi.org/10.1007/s11518-015-5284-y>
- Ye, Y., Liu, N., & Zhan, S.-L. (2013). Information update based sequential approach for emergency resources allocation planning. *Zhejiang Daxue Xuebao (Gongxue Ban)/Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*.
- Yilmaz, H., & Kabak, Ö. (2020). Prioritizing distribution centers in humanitarian logistics using type-2 fuzzy MCDM approach. *Journal of Enterprise Information Management*, 33(5), 1199–1232. <https://doi.org/10.1108/JEIM-09-2019-0310>
- Yoon, K. P., & Kim, W. K. (2017a). The behavioral TOPSIS. *Expert Systems with Applications*, 89(December), 266–272. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.07.045>
- YV, Y. H., & DA, D. W. (1971). On a bicriterion formation of the problems of integrated system identification and system optimization. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 296–297.
- Zafri, N. M., Sameen, I., Jahangir, A., Tabassum, N., & Hasan, M. M. U. (2020). A multi-criteria decision-making approach for quantification of accessibility to market facilities in rural areas: an application in Bangladesh. *GeoJournal*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s10708-020-10161-z>
- Zagorecki, A., Ko, K., & Comfort, L. K. (2010). Interorganizational Information Exchange and Efficiency: Organizational Performance in Emergency Environments. *Jasss-the Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 13(3). <https://doi.org/10.18564/jasss.1589>
- Zhan, S. L., Liu, N., & Ye, Y. (2014). Coordinating efficiency and equity in disaster relief logistics via information updates. *International Journal of Systems Science*, 45(8), 1607–1621. <https://doi.org/10.1080/00207721.2013.777490>
- Zhang, C., Liu, X., Jiang, Y., Fan, B., & Song, X. (2016). A two-stage resource allocation model for lifeline systems quick response with vulnerability analysis. *European Journal of Operational Research*, 250(3), 855–864. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.10.022>
- Zhang, M.-X., Zhang, B., & Zheng, Y.-J. (2014). Bio-inspired meta-heuristics for emergency transportation problems. *Algorithms*, 7(1), 15–31. <https://doi.org/10.3390/a7010015>

- Zhang, P. Y., Liu, Y. K., Yang, G. Q., & Zhang, G. Q. (2020). A distributionally robust optimization model for designing humanitarian relief network with resource reallocation. *Soft Computing*, 24(4), 2749–2767. <https://doi.org/10.1007/s00500-019-04362-z>
- Zhang, Z. K., Zhu, C. F., Wang, Q. R., & Yuan, J. S. (2019). Discrete Robustness Optimization on Emergency Transportation Network Based on Prospect Theory. *Journal of Advanced Transportation*, 2, 1-18. <https://doi.org/10.1155/2019/2728073>
- Zhou, Q., Huang, W. L., & Zhang, Y. (2011). Identifying critical success factors in emergency management using a fuzzy DEMATEL method. *Safety Science*, 49(2), 243–252. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2010.08.005>
- Zhou, Y., Liu, J., Zhang, Y., & Gan, X. (2017). A multi-objective evolutionary algorithm for multi-period dynamic emergency resource scheduling problems. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 99, 77–95. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.12.011>
- Zitzler, E., & Thiele, L. (1999). Multiobjective Evolutionary Algorithms: A Comparative Case Study and the Strength Pareto Approach. In *IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION* (Vol. 3, Issue 4).
- Zou, Q., & Chen, S. (2020). Resilience Modeling of Interdependent Traffic-Electric Power System Subject to Hurricanes. *Journal of Infrastructure Systems*, 26(1). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000524](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000524)
- Zyoud, S. H., & Fuchs-Hanusch, D. (2017). A bibliometric-based survey on AHP and TOPSIS techniques. *Expert Systems with Applications*, 78, 158–181. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.02.016>