

FORTALECIMIENTO DEL SISTEMA DE ATENCIÓN PREHOSPITALARIA MEDIANTE
LA LOCALIZACIÓN Y ASIGNACIÓN DE AMBULANCIAS EN UNA ENTIDAD DE LA
CIUDAD DE PEREIRA

JUAN DIEGO MUÑOZ VARGAS

FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
UNIVERSIDAD DEL VALLE
2021

FORTALECIMIENTO DEL SISTEMA DE ATENCIÓN PREHOSPITALARIA MEDIANTE
LA LOCALIZACIÓN Y ASIGNACIÓN DE AMBULANCIAS EN UNA ENTIDAD DE LA
CIUDAD DE PEREIRA

JUAN DIEGO MUÑOZ VARGAS

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO INDUSTRIAL

DIRECTOR

Msc.

CARLOS ALBERTO ROJAS TREJOS

FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
UNIVERSIDAD DEL VALLE
2021

Nota de aceptación:

Firma del jurado

Firma del jurado

Zarzal, 2021

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de grado a mi familia, a mis padres y en especial a mis abuelos por su dedicación, apoyo y motivación a lo largo de mi carrera universitaria, estoy eternamente agradecido ya que fueron esenciales para la culminación de este proyecto.

Dios me los cuide y me los bendiga siempre, los amo.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por permitirme disfrutar de este camino junto a mi familia que me apoyo incondicionalmente en todo momento, a la universidad por haberme acogido con los brazos abiertos, a cada uno de mis profesores por sus enseñanzas, por su empeño y entrega para formar profesionales, agradezco a mis compañeros y a las amistades que nacieron en esta etapa de mi vida y aportaron para mi crecimiento como persona y fueron incondicionales para lograr esta meta.

Les agradezco de corazón a cada uno de ustedes y les expreso mi afecto en especial a mi familia.

RESUMEN

Este trabajo propone un modelo matemático de localización y asignación de ambulancias en la ciudad de Pereira, Risaralda, con el fin de minimizar la distancia total ponderada en la atención a los pacientes de los diferentes hospitales que atiende la entidad caso de estudio.

Para dar solución a la problemática de localización y asignación de ambulancias, se programó el modelo matemático en lenguaje AMPL (A Mathematical Programming Language), se utilizó el solver GUROBI bajo la plataforma de NEOS SOLVER OPTIMIZATION. El tiempo computacional de solución del solver fue de 4 segundos, arrojando una solución óptima de mejora en la distancia total ponderada y tiempos de traslado de pacientes, evidenciándose una disminución aproximada del 63% de cada una de estos parámetros. Este trabajo pretende demostrar como la optimización de parámetros a través de la Investigación de Operaciones, puede contribuir con la mejora de problemáticas enfocadas a la atención prehospitolaria.

Palabras Claves: Localización, Asignación, Programación Matemática, Optimización, Investigación de Operaciones, Atención Prehospitolaria.

ABSTRACT

This work proposes a mathematical model for the location and allocation of ambulances in the city of Pereira, Risaralda, in order to minimize the total weighted distance in the care of patients in the different hospitals served by the entity under study.

To solve the ambulance location and allocation problem, the mathematical model was programmed in AMPL language (A Mathematical Programming Language), using the GUROBI solver under the NEOS SOLVER OPTIMIZATION platform. The computational time of the solver solution was 4 seconds, yielding an optimal solution to improve total distance weighted and patient transfer times, showing a decrease of approximately 63% of each of these parameters.

This study aims to demonstrate how the optimization of parameters through Operations Research can contribute to the improvement of problems focused on prehospital care.

Keywords: Localization, Allocation, Mathematical Programming, Optimization, Operations Research, Prehospital Care.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	12
2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	14
2.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	16
2.3 DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA.....	16
3 OBJETIVOS.....	17
3.1 GENERAL	17
3.2 ESPECÍFICOS	17
4 MARCO DE REFERENCIA	18
4.1 MARCO TEÓRICO.....	18
4.1.1 Gestión de Emergencias:.....	18
4.1.2 Modelos de Localización de Recursos de Emergencia:.....	19
4.1.3 Componentes de entrada de los Modelos de Localización de Recursos de Emergencia:	19
4.1.4 Componentes de decisión de los Modelos de Localización de Recursos de Emergencia:	20
4.1.5 Restricciones de los Modelos de Localización de Recursos de Emergencia:	20
4.1.6 Tiempos de Arribo de Recursos:.....	20
4.2 ESTADO DEL ARTE	21
5 DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL.....	24
5.1 DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA.....	24
5.2 SERVICIOS.....	25
5.2.1 Servicios Generales:	25
5.2.2 Traslado Básico:	25
5.2.3 Traslado Medicalizado:	25
5.3 AMBULANCIAS	25
5.4 ZONAS ATENDIDAS Y HOSPITALES.....	27
5.5 NÚMERO DE LLAMADAS	28
5.6 DISTANCIAS ENTRE COMUNAS Y HOSPITALES	29

5.7	TIEMPOS DE RECORRIDO ENTRE COMUNAS Y HOSPITALES	32
5.8	DESCRIPCIÓN SISTEMA ACTUAL DE LA EMPRESA CASO DE ESTUDIO ..	33
6	DEFINICIÓN DEL MODELO	37
7	ANÁLISIS DE RESULTADOS	40
7.1	RESULTADOS DEL MODELO PROPUESTO	40
7.2	COMPARACIÓN CON EL SISTEMA ACTUAL DE LOCALIZACIÓN Y ASIGNACIÓN DE AMBULANCIAS	47
7.3	ANÁLISIS DE ESCENARIOS	49
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	60
	BIBLIOGRAFÍA	62
	ANEXOS	64

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación Geográfica Entidad Caso de Estudio.....	24
Figura 2. Ambulancia Nissan.....	26
Figura 3. Coordenadas de los Barrios.	29
Figura 4. Matriz de Distancias entre Comunas.....	31
Figura 5. Matriz de Distancias entre Comunas y Hospitales.	32
Figura 6. Matriz de Tiempos entre Comunas.	32
Figura 7. Matriz de Tiempos entre Comunas y Hospitales.	33
Figura 8. Función Objetivo.	40
Figura 9. Localización de Ambulancias.	41
Figura 10. Asignación de Ambulancias.	41
Figura 11. Comparativo de Distancia Total Ponderada.	48
Figura 12. Comparativo de Tiempos de Traslado.	48
Figura 13. Función Objetivo - Escenario 1.	49
Figura 14. Localización de Ambulancias - Escenario 1.....	49
Figura 15. Asignación de Ambulancias - Escenario 1.	50
Figura 16. Localización y Asignación de Ambulancias Escenario 1.	50
Figura 17. Localización y Asignación de Ambulancias Escenario 1 (Continuación).....	51
Figura 18. Función Objetivo - Escenario 2.	52
Figura 19. Localización de Ambulancias - Escenario 2.	52
Figura 20. Asignación de Ambulancias - Escenario 2.	53
Figura 21. Localización y Asignación de Ambulancias Escenario 2.	53
Figura 22. Localización y Asignación de Ambulancias Escenario 2 (Continuación).....	54
Figura 23. Función Objetivo - Escenario 3.	55
Figura 24. Localización de Ambulancias - Escenario 3.	55
Figura 25. Asignación de Ambulancias - Escenario 3.	56
Figura 26. Función Objetivo - Escenario 4.	56
Figura 27. Localización de Ambulancias - Escenario 4.	57
Figura 28. Asignación de Ambulancias - Escenario 4.	57
Figura 29. Función Objetivo - Escenario 5.	58
Figura 30. Localización de Ambulancias - Escenario 5.	58
Figura 31. Asignación de Ambulancias - Escenario 5.	59

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Ranking 100 Ciudades Fatales	12
Tabla 2. Dotación Básica de Ambulancias.	26
Tabla 3. Comunas ciudad de Pereira.	27
Tabla 4. Hospitales ciudad de Pereira.....	28
Tabla 5. Resumen de Llamadas por Comuna.	28
Tabla 6. Centro de Gravedad Comunas.....	30
Tabla 7. Coordenada de los Hospitales.	31
Tabla 8. Localización y Asignación de Ambulancias Sistema Actual.	34
Tabla 9. Distancia Total Ponderada del Sistema Actual.....	35
Tabla 10. Tiempo de Traslado de Pacientes Sistema Actual.	36
Tabla 11. Resumen de Asignación de Ambulancias.	43
Tabla 12. Ruta Ambulancia Número 1.	43
Tabla 13. Ruta Ambulancia Número 2.	44
Tabla 14. Ruta Ambulancia Número 3.	44
Tabla 15. Ruta Ambulancia Número 3 (Continuación).	45
Tabla 16. Ruta Ambulancia Número 4.	45
Tabla 17. Ruta Ambulancia Número 5.	46
Tabla 18. Ruta Ambulancia Número 6.	46
Tabla 19. Ruta Ambulancia Número 7.	47
Tabla 20. Resumen Escenario 1 y 2	55

INTRODUCCIÓN

Diariamente se presentan emergencias que demandan de la atención de los SEM¹ (Sistema de Emergencias Médicas), siendo una de las más comunes los traumatismos generados por accidentes de tránsito, en los cuales resulta ser determinante el tiempo de respuesta a estos incidentes. En el 2018 los accidentes viales en Colombia dejaron 5.332 fallecidos y 30.936 heridos. La cifra representó un aumento del 0,53% con respecto al año 2017, para el caso de las personas muertas en accidente y de un 1,32% para el caso de personas heridas tras los siniestros (secretaria de Salud Distrital de Bogotá, 2018).

Para el caso particular de la ciudad de Pereira, en el ranking hecho por LA Networks en el 2018, se determinó que está en el noveno lugar según la estadística de muertes en accidentes en comparación con la cantidad de habitantes. Los cuatro puntos donde hay más accidentes son Cerritos, Punto 30, avenida del Río y Ciudadela del Café (Silvestre, 2019).

A continuación, se presenta el ranking de las 10 ciudades con más muertes por accidentes de tránsito.

Tabla 1. Ranking 100 Ciudades Fatales

	CIUDAD	PAÍS	POBLACIÓN	MUERTES 2016	TASA POR 100MIL
1	San Salvador	El Salvador	247.959	186	75,0
2	Campina Grande	Brasil	407.754	246	60,3
3	João Pessoa	Brasil	801.718	221	27,6
4	Montería	Colombia	447.716	102	22,8
5	Teresina	Brasil	847.430	191	22,5
6	Villavicencio	Colombia	495.200	102	20,6
7	Campos dos Goytacazes	Brasil	487.186	92	18,9
8	Uberlândia	Brasil	669.672	115	17,2
9	Pereira	Colombia	472.023	80	16,9
10	Ibagué	Colombia	558.815	94	16,8

Fuente: LA Network, (2019). Ranking Latinoamericano de ciudades fatales.

Recuperado de: <http://seguridadvial.org.ve/wp-content/uploads/2018/01/CIUDADES-FATALES-FINAL.pdf>

Un sistema de atención de emergencias tiene dos decisiones críticas que tomar con respecto a las ambulancias, por un lado, están las políticas de despacho de los servidores y por otro la localización de éstos para cumplir con los requerimientos propios del caso particular. Ambas decisiones son críticas para el éxito del sistema de emergencias y a

¹ SEM es el servicio encargado de dar respuesta asistencial a las urgencias y emergencias sanitarias extrahospitalarias de forma rápida y eficiente, las 24 horas del día, los 365 días del año

pesar de que a primera vista parecen elecciones que ocurren en tiempo dinámico, requieren de una cuidadosa planeación para garantizar la agilidad en la prestación del servicio (Villegas y otros, 2012).

Lo descrito anteriormente, evidencia la importancia de fortalecer los sistemas de atención de emergencias, tanto en su parte operativa como estratégica, en aras de proteger la vida de los ciudadanos y de garantizar una adecuada atención en medio de la escasez de recursos. Para esto se hace necesario contar con una adecuada localización y/o relocalización de los vehículos que asisten en los traslados de pacientes con emergencias médicas, determinando las variables relacionadas con el tiempo de respuesta de atención en dichos pacientes y la influencia de los tiempos de respuesta de los SEM.

La localización consiste en la ubicación de un vehículo en un punto fijo, de tal manera que se encargue de una zona de atención, y al cual debe volver al finalizar la prestación de un servicio. La relocalización, por otro lado, se da cuando se cambia la ubicación asignada a un vehículo con el propósito de mejorar en tiempo real la cobertura del Servicio de Emergencias Médicas. Mientras que los problemas de localización suelen ser resueltos a nivel estratégico, los problemas de relocalización son principalmente de nivel operativo y deben ser resueltos en un corto periodo de tiempo. Esto último, hace que generalmente los problemas de relocalización sean más complejos que los de localización (Rodríguez & Otros, 2015).

Por lo tanto, en este trabajo se describe el desarrollo de un modelo matemático que contribuye a determinar la cantidad de ambulancias de atención prehospitalaria necesarias para atender las emergencias reportadas a la entidad de salud Objeto de estudio ubicada en la ciudad de Pereira, Risaralda, y su adecuada localización geográfica de manera que se logre minimizar la distancia total ponderada recorrida para el servicio de atención poblacional de acuerdo con la identificación de los puntos determinados de mayor demanda de servicios de ambulancia y ubicación de centros de asistencia hospitalaria. Para efectos de esta investigación, se analiza el tiempo que la entidad se demora en llegar al lugar de la emergencia, considerando solo aquellos eventos que deben ser atendidos con ambulancias.

En primera instancia se realiza un diagnóstico del SEM de la entidad objeto de estudio. Posteriormente, se identifican las variables y/o factores que afectan el tiempo de respuesta, algunas de ellas por ejemplo son las ubicaciones potenciales de las ambulancias, la disponibilidad de recursos o vehículos y la limitación del tiempo total operativo para cada recurso. Estas decisiones a nivel estratégico son tomadas por los administradores o funcionarios de este servicio vital, dado que poseen un efecto directo en los tiempos de respuesta y desplazamientos hacia la población usuaria.

2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Los Servicios de Emergencias Médicas-SEM son sistemas responsables de la estabilización y transporte prehospitalario de pacientes con urgencia y emergencia médicas. Una de las constantes preocupaciones de los SEM es mejorar el tiempo de respuesta ante la ocurrencia de un evento, debido a que este es una medida de desempeño muy importante para determinar la calidad de atención prehospitalaria de los SEM y para preservar la vida y la salud de los pacientes (Rodríguez & Otros, 2015).

El tiempo de respuesta, se define como el lapso transcurrido entre el momento en que se recibe la solicitud del servicio hasta el momento en que el vehículo del SEM llega al lugar del incidente. Por lo tanto, es un factor crítico para la salud de los usuarios; debido a que las consecuencias de una urgencia no atendida oportunamente pueden tener una grave repercusión para el paciente y su familia, influyendo en el tiempo de reacción factores externos como el tráfico en las vías, obras viales y demora en la recepción de pacientes en las salas de urgencia.

Independiente del SEM que se analice las actividades se clasifican en dos grandes grupos: actividades centrales y actividades externas. En primer lugar, se encuentran las actividades centrales, las cuales tienen como objetivo realizar la recepción de la llamada y tomar las decisiones para dar una apropiada respuesta a cada evento. Estas actividades generalmente son realizadas por un operador o despachador y se realizan en una instalación fija o centro de comunicación. En segundo lugar, están las actividades externas las cuales tienen como objetivo dar una adecuada atención prehospitalaria a los pacientes que solicitan los servicios del SEM y son realizadas por la tripulación de los vehículos (Rodríguez & Otros, 2015). Durante el año 2008, la Organización Mundial de la Salud en su informe “Emergency Medical Services Systems in the European Union”, indica que los centros de emergencia son los encargados de recibir las llamadas de emergencia y proporcionar asesoramiento médico a la persona que llama, y que en muchos casos, deben enviar unidades móviles de atención médica donde se presenta la situación ya sean ambulancias, barcos, helicópteros o aviones, y que en la mayoría de situaciones, son las ambulancias son el medio de transporte más utilizado para atender las emergencias médicas (Organización Mundial de la Salud, 2008). Debido a esto, es importante recalcar la importancia que tiene la atención oportuna y eficiente de las ambulancias en los casos donde se presenten emergencias médicas, ya que deben de prestar los servicios en el menor tiempo posible desde que se recibe una llamada.

De acuerdo a un estudio realizado por la Dirección General de Tráfico en España sobre la mortalidad de personas, el 10% fallece al instante o en los primeros minutos, el 15% fallece muere varias horas o días después, y el 75% de personas fallecen durante la primera y segunda hora del accidente, con estas cifras, la oportunidad que se tiene de reducir el porcentaje de muertes del 75%, es a través de una asistencia inmediata y eficaz con la adecuada localización de ambulancias (DGTE, 2011).

A nivel Latinoamericano, en Perú, de acuerdo un informe realizado por el Instituto Nacional de Estadística e Informática, el porcentaje de fallecimiento de personas durante la primer hora de accidente, es del 75%, con cifras totales de muerte de 2597 personas, las personas que pudieron haber sobrevivido si la atención de las ambulancias fuera rápida y eficaz sería de 909 personas, un total de vidas que se pudieron haber salvado, si el sistema de emergencias de este país fuera el adecuado (INEI, 2012).

En Colombia, el proceso de localización de los vehículos de los SEM generalmente se realiza en forma empírica, es decir, el despachador de acuerdo a su experiencia informa a las ambulancias cuál debe ser su nueva ubicación (Rodríguez & Otros, 2015). Sin embargo, al revisar la literatura se encuentra que aspectos como los cambios de turno, el agotamiento, la reducción de la habilidad mental que se puede presentar en días de alta demanda y los acelerados cambios de los entornos hacen necesario que los SEM se apoyen en metodologías que les permitan crear, evaluar y optimizar reglas o políticas de relocalización que garanticen una óptima atención de los pacientes que soliciten el servicio (Rodríguez, 2016).

Por esta razón, la entidad de salud objeto de estudio se interesa en establecer el mejor escenario para la localización de ambulancia en el sistema de atención prehospitalaria dado que la organización presenta congestión de llamadas, quejas y reclamos, y costos por la pérdida del valor de su “buen nombre”.

2.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

En consecuencia, con la problemática nombrada en el numeral 1.1 de la descripción del problema, este proyecto genera la siguiente pregunta: ¿Cómo minimizar la distancia total ponderada en la respuesta de atención prehospitalaria de la entidad caso de estudio, ubicada en la ciudad de Pereira, Risaralda?

2.3 DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

El presente proyecto abarca el sistema de atención prehospitalaria, con el fin de localizar y asignar ambulancias de la entidad caso de estudio en la ciudad de Pereira, Risaralda.

3 OBJETIVOS

3.1 GENERAL

Formular una propuesta de mejoramiento para la localización y asignación de ambulancias de una entidad prestadora de servicios de salud que contribuya a minimizar la distancia total ponderada de atención prehospitalaria en la ciudad de Pereira.

3.2 ESPECÍFICOS

- Realizar un diagnóstico del sistema actual de atención prehospitalaria de ambulancias en la entidad caso de estudio.
- Definir un modelo matemático que considere los factores más relevantes que inciden en la localización y asignación de ambulancias.
- Realizar un análisis de escenarios del modelo mediante la variación de parámetros de interés y su impacto en la función de desempeño.

4 MARCO DE REFERENCIA

4.1 MARCO TEÓRICO

El campo de la logística empresarial tiene un concepto importante de logística hospitalaria, en la cual, la problemática de transporte asocia a la distribución geográfica de recursos desplegados en un territorio, que tiene como objetivo la atención oportuna y efectiva de los servicios demandados (Ballou & de Lemus, 1991).

La logística hospitalaria maneja términos de oferta y demanda, los cuales deben de ser considerado en los dimensionamientos de los servicios en función de mejorar la prestación de los organismos de respuesta, teniendo en cuenta que la atención de la demanda es considerada como crítica, ya que decisiones no oportunas pueden tener consecuencias negativas en la salud de los usuarios.

4.1.1 Gestión de Emergencias:

Las diferentes estrategias de gestión de emergencias, se basan en el principio de trabajo coordinado, con el fin de brindar eficacia en la gestión de emergencias, donde se establecen aspectos de productividad de los operadores, explotación racional de la inversión de infraestructura de emergencias, y el despacho de manera oportuna y coordinada de recursos de respuesta, teniendo como objetivo la reducción de la distancia y/o tiempo de respuesta, a través del uso racional de los recursos móviles (Atterberg, 1992).

El procedimiento de gestión de emergencias coordinado, indica que este proceso actúa como interfaz entre todas las unidades que interactúan en la gestión de emergencias, superando las dificultades al tratarse de distintas dependencias administrativas, tecnológicas, comunicaciones y logísticas, creando un vínculo de coordinación entre las unidades de respuestas.

4.1.2 Modelos de Localización de Recursos de Emergencia:

Cuando se trata de atención de emergencias, uno de los aspectos más relevantes es la ubicación de los vehículos especializados para atención pre hospitalaria o ambulancias. La localización posibilita que se puedan hallar las mejores ubicaciones de hospitales o unidades de respuesta según sea el caso (Anton, 2005).

Dentro de los modelos de localización, se consideran una gran variedad de aspectos y características que determinan el modelado de acuerdo al problema a ser resuelto.

Entre la clasificación de los modelos para equipamiento deseable, como es el caso de atención de emergencias a través de la localización de ambulancias, la teoría plantea varios modelos de localización, entre los cuales se encuentra:

- **MODELO P-MEDIANA:** Es fundamental para gran parte de la teoría de localización discreta, está motivado por una serie de situaciones reales, como la ubicación de diferentes hospitales en una ciudad para que la mayor parte de su población quede cubierta en caso de necesitar uno. El problema de la p-mediana, trata de localizar p instalaciones dentro de una red de manera que se minimice la distancia total ponderada entre los puntos de demanda y la instalación abierta más cercana.
- **MODELO P-CENTER:** Pertenece a los modelos de máxima distancia, el objetivo de este modelo es minimizar la máxima distancia entre un nodo de demanda y su facilidad más cercana, dado que tiene un número predeterminado de facilidades para instalar. Este modelo se conoce como problema mínimax y como un problema punto objetivo, ya que minimiza la distancia desde cada localización de demanda al sitio de la facilidad como un objetivo separado, por lo tanto, hay un objetivo para cada localización de demanda.

MODELO DE MÁXIMA COBERTURA: Uno de los principales problemas asociados con el modelo de cobertura es que el número de instalaciones o servidores que se necesitan para cubrir todos los nodos de demanda supera el número que en realidad se puede construir. El objetivo de este tipo de problemas es maximizar la población cubierta por un determinado número de servidores, dentro de una distancia o tiempo crítico.

4.1.3 Componentes de entrada de los Modelos de Localización de Recursos de Emergencia:

Los componentes de entrada dentro de los modelos de localización de vehículos de emergencia, hacen referencia a parámetros o variables relacionadas con la demanda de los Servicios de Atención Prehospitalaria en relación a la jurisdicción geográfica planeada.

$$a_i$$

$$i(1 \dots n)$$

Dónde:

a_i = Es la proporción total de la demanda.

i = Son los circuitos de demanda de servicios de despacho de ambulancias

4.1.4 Componentes de decisión de los Modelos de Localización de Recursos de Emergencia:

Las variables de decisión corresponden a las locaciones de las estaciones base de las ambulancias destinadas para atención de servicios de emergencia, así como también el número de ambulancias que deben ser localizadas en cada estación base:

$$j(1 \dots n)$$

$$S(1 \dots n)$$

Dónde:

j = Es el número de estaciones base de ambulancias.

S = Es el número de ambulancias por estación base.

4.1.5 Restricciones de los Modelos de Localización de Recursos de Emergencia:

La disponibilidad de ambulancias P_j es un factor crítico para el problema de transporte, donde la disponibilidad es calculada por el tiempo de operación sobre el tiempo total.

Donde P_j es la probabilidad que una ambulancia esté disponible en el momento que se necesite un despacho. Esta probabilidad está dada por el tiempo de operación efectiva del vehículo dividido por el tiempo total en un periodo dado.

4.1.6 Tiempos de Arribo de Recursos:

Se han determinado varios aspectos que establecen la eficiencia del servicio, tanto operativa como administrativa, dentro de la clasificación de aspectos operativos, se puntualiza el desempeño individual y colectivo de los proveedores de salud, por otro lado, los prolongados tiempos de traslado del paciente hacia un hospital determinan desde el punto de vista del paciente y del sistema prehospitalario una oportunidad de mejora de los indicadores de eficiencia de la gestión de emergencias (Pinet, 2005).

El tiempo es considerado desde que una ambulancia es asignada despachada hacia el sitio donde ha sucedido determinado evento. Mediante el uso de la plataforma tecnológica, se establecen tiempos que son administrados por parte del despachador de salud, es un tiempo calculado mediante una resta entre el momento que el despachador registró la llegada del recurso al sitio de la emergencia y el momento en que el recurso fue asignado o despachado.

4.2 ESTADO DEL ARTE

Los sistemas de emergencias actúan como primer mecanismo de respuesta ante un incidente, siendo por tanto el tiempo de respuesta fundamental para preservar la vida del paciente. Por lo tanto, en este capítulo se presentan las diferentes investigaciones que giran en torno a este tema objeto de estudio.

Las ambulancias deben de estar ubicadas en lugares designados de tal manera que, en caso de emergencia, se pueda llegar a los pacientes de manera eficiente en el tiempo. Debido a las variaciones en la velocidad y los tiempos de viaje resultantes, no es suficiente para el problema de la ubicación de la ambulancia utilizar tiempos de viaje promedio fijos, ya que las áreas de cobertura cambian durante todo el día. Por lo tanto, se debe tener en cuenta áreas de cobertura variables en el tiempo, que permite reposicionar los vehículos para mantener un cierto estándar de cobertura en todo el horizonte de planificación. Doerner et al. (2005) resuelven el problema de ubicación de ambulancias metahurísticamente mediante la búsqueda de la vecindad variable, demostrando que es fundamental considerar la dependencia del tiempo, variaciones en los tiempos de viaje y cobertura.

En el año 2009 en la ciudad de Bogotá, se presenta una herramienta computacional con el fin de brindar soporte a la toma de decisiones de localización y relocalización de una flota de ambulancias, que a través de la metaheurística Búsqueda Tabú logran probar en 10 instancias generadas aleatoriamente, obtener resultado que en promedio las soluciones están al 3.94% del óptimo. Así mismo, los resultados obtenidos de la instancia real para el problema de localización muestran que 29.527 puntos de demanda se encuentran cubiertos en promedio en 8,49 minutos (Céspedes et al. 2009).

Igualmente, durante el año 2010 se genera un procedimiento de solución para abordar un problema de ubicación de ambulancias en Austria. Consideran un problema de localización de ambulancias de doble cobertura, utilizando una extensión de un modelo al introducir un límite en el número de habitantes atendidos por ambulancia. Para resolver el problema, implementan el algoritmo de búsqueda Tabú y un algoritmo de optimización de colonias de hormigas. Las pruebas computacionales se basan en sitios de ubicación reales, los datos del censo de la población y los datos reales de la red de carreteras de ocho provincias de Austria. Para las instancias más pequeñas, pudieron encontrar soluciones exactas y usarlas como medida para el desempeño de los dos algoritmos

metaheurísticos. Para las instancias más grandes, producen resultados de calidad (Schmid et al. 2010).

Dos años después, se presenta un modelo de asignación de rutas de ambulancias en la ciudad de Bogotá, con el fin de abordar la problemática que presentaba una organización en cuanto a la planeación de rutas, debido a que contaba con un sistema que no contemplaba la ubicación en tiempo real de los vehículos ni la asignación de rutas alternas en caso de situaciones imprevistas en la ciudad (Tráfico, manifestaciones públicas, construcción obras, etc.). Para dar solución al problema planteado se compararon tres modelos matemáticos (TSP, Algoritmo de Floyd Warshall y CVRP) lo cuales fueron modelados en un software para la modelación del problema de ruteo de vehículos conocido como grafos. Los resultados señalan la importancia de la planeación de rutas dentro de la planeación logística, puesto que se reducen los costos operativos en los que se incurre L proporcionar el servicio (Rio & Castañeda, 2012).

En el mismo año, se realiza un estudio sobre la mejor ubicación de los vehículos en una empresa privada de ambulancias, utilizando la herramienta AMPL para transformar los datos numéricos del problema en ficheros adecuados para su utilización por el paquete CPLEX, obtienen como resultados que la media del tiempo de trabajo para el problema de mejora en el primer intervalo de tiempo es de 2.90 horas, mientras que para el escenario real solo era de 0 .87 horas, además de que en la mejora se todas las ambulancias tienen un porcentaje de ocupación similar. (Gonzales, 2012).

En el año 2015, se realiza un proyecto en Logística Hospitalaria para la solución de problemas de localización, despacho y relocalización de vehículos en la ciudad de Cali, resolviéndose de forma determinística, modelando como un caso particular de MDVRPTW (Multi Depot Vehicle Routing Problem with Time Windows), modificando los parámetros y datos del problema cada vez que ocurriera algún cambio en el estado del sistema, tales como recepción de una nueva llamada, avería de un vehículo, etc. El MDVRPTW planteado se formula como un modelo de Programación Lineal Entera Mixta. Se generan soluciones del modelo para un intervalo de tiempo representativo de despacho, las cuales mejoran soluciones heurísticas obtenidas de diversas políticas de despacho actuales de dicha compañía (Rengifo et al, 2015).

Posteriormente, en el año 2016 se diseña una herramienta para el problema dinámico de localización y despacho de vehículos de emergencias médicas, que tiene como finalidad que los servicios de emergencias médicas pudieran desplazarse a un lugar de siniestro en un margen aceptable de tiempo de atención, además de determinar una estrategia de relocalización para los vehículos disponibles en el sistema en un determinado momento de tiempo, mitigando así la insuficiencia en la cobertura de algunas áreas de la zona objeto de estudio. Para esto, se empleó un enfoque heurístico, que contempla que una relocalización global de la flota solo es efectuada si el índice de preparación, de una zona de demanda, en algún momento del tiempo se encuentra por debajo de un nivel mínimo, además de un enfoque de vértices orientado a la maximización de cobertura y resuelto utilizando los algoritmos de optimización exacta del software comercial Cplex Optimización Studio. En síntesis, se encontró que la

herramienta propuesta es una base para el desarrollo de oportunidades de mejora en la prestación de los servicios de transporte médico y por consiguiente una oportunidad para mejorar el bienestar de los pacientes atendidos en estos sistemas (Paz, 2016).

Al siguiente año, se propone una herramienta metodológica cuantitativa, que busca determinar los mejores escenarios a fin de obtener una mejora en los tiempos de respuesta en la atención del servicio Prehospitalario. El modelo planteado operativita principalmente variables de demanda y disponibilidad de los recursos basados en su distribución de probabilidades, que, a través de simulaciones de Monte Carlo, determinarán el impacto en el tiempo de arribo del recurso, tomando como base las matrices de tiempos de traslado, desde los puntos de mayor densidad de la demanda de los circuitos estudiados, hacia los puntos de oferta de ambulancias del servicio prehospitalario desplegados en la provincia. El contraste de los cambios obtenidos por las variaciones de las ubicaciones de las ambulancias con los tiempos del grupo de control, fueron analizados mediante pruebas estadísticas para determinar la significancia de estas variaciones con referencia a los datos del grupo experimental (Núñez et al. 2017).

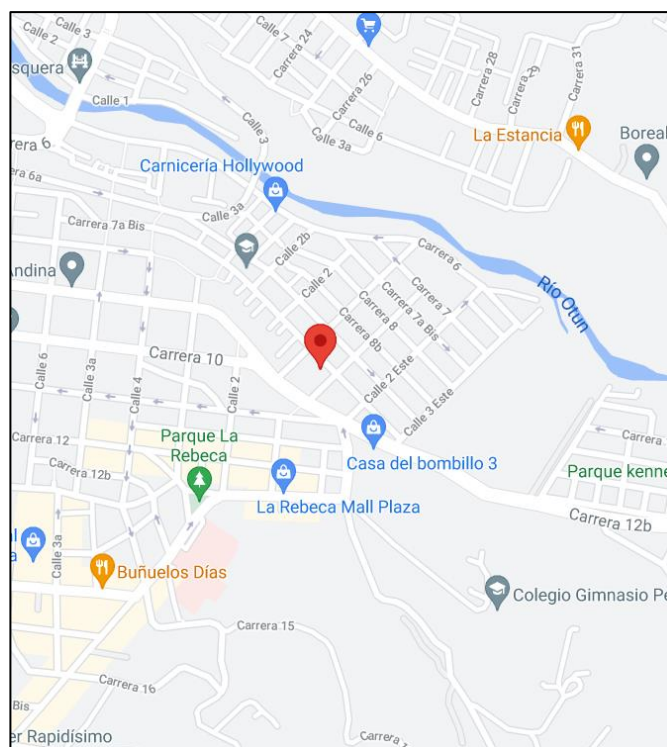
Por último, en el año 2018 se propone una metodología para la selección de hospitales destino y ubicación de ambulancias, La metodología presentada en esta sección está compuesta por dos fases: la primera se enfoca en la identificación de las dimensiones y sus factores, que componen la técnica de selección de hospital destino propuesta, y la segunda comprende la evaluación del impacto que genera esta técnica en el tiempo total de atención prehospitalaria. Se evalúa su desempeño por medio de una simulación de eventos discretos y se concluye que la técnica propuesta obtiene un mejor tiempo de APH en el 73% de los casos estudiados, con una reducción media entre 40 y 80 minutos, en comparación con la técnica más comúnmente usada (Rojas et al. 2018).

5 DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL

5.1 DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

La entidad caso de estudio se encuentra ubicada en la ciudad de Pereira, Risaralda, y ofrece los servicios de traslado de pacientes en los diferentes niveles de complejidad, que, a través de sus profesionales altamente capacitados, garantiza un servicio personalizado de alta calidad a los pacientes e instituciones de salud, lo que la destaca una entidad con amplio sentido de calidez humana.

Figura 1. Ubicación Geográfica Entidad Caso de Estudio.



Fuente: El Autor

5.2 SERVICIOS

La entidad caso de estudio cuenta con los siguientes servicios que ofrece en la ciudad de Pereira, Risaralda.

5.2.1 Servicios Generales:

- ✓ Traslado de pacientes en los niveles de asistencia básico, medicalizado y neonatal, a nivel local y regional.
- ✓ Traslado de pacientes en casos de urgencias vitales, traslados primarios y secundarios.
- ✓ Valoraciones y atención médica domiciliaria.
- ✓ Eventos especiales.

5.2.2 Traslado Básico:

Se presta cuando el paciente está estable y debido a su condición física, requiere el traslado a los diferentes servicios que necesite. Este servicio se presta con una tripulación compuesta por un conductor y auxiliar de enfermería.

5.2.3 Traslado Medicalizado:

Se presta cuando el paciente se encuentra en condición crítica y necesita soporte de vida, que requiere ser trasladado a los diferentes servicios que necesite. Este servicio se presta con una tripulación compuesta por un conductor y un auxiliar de enfermería.

5.3 AMBULANCIAS

La entidad caso de estudio, cuenta actualmente con una flota de 8 ambulancias Nissan tipo van homologadas en el país para el servicio de ambulancias, cumpliendo la reglamentación vigente en la NTC 3729 y la Resolución 2003 del 2014 del Ministerio de Salud y Protección Social.

Cada ambulancia está equipada con los siguientes elementos:

Tabla 2. Dotación Básica de Ambulancias.

Camilla Principal. Tensiómetro. Cánulas Orofaríngeas 2 – 4 y 5. Inmovilizador de Cabeza. Inmovilizador de pierna y brazo. Linterna de Examen. Manta aluminizada. Maletín Botiquín.	Camilla Secundaria. Fonendoscopio de doble servicio. Máscara de no reinhalación con reservorio para adulto y pediátrico. Riñonera. Pato Orinal. Pato Coprológico. Cánula nasal adulta y pediátrica.	Monitor signos vitales. Tijera de Trauma. Juego de Collares Cervicales. Termómetro. Tijera de Tejido. Perilla de Succión. Sistema Ventury adulto y pediátrico. Vendas Elásticas y de Algodón.
--	--	---

Fuente: El Autor

Figura 2. Ambulancia Nissan.



Fuente: [www. https://www.nissan.com.co/](https://www.nissan.com.co/)

5.4 ZONAS ATENDIDAS Y HOSPITALES

Actualmente la entidad caso de estudio atiende todos los barrios de la ciudad de Pereira, pero con el fin de poder localizar de una forma más adecuada las ambulancias, se dividió la ciudad en sus 19 comunas y los 8 hospitales con los que tiene convenio la compañía.

A continuación, se presenta las comunas y hospitales donde se localizan y asignan pacientes en la ciudad de Pereira.

Tabla 3. Comunas ciudad de Pereira.

MÚMERO COMUNA	COMUNA
COMUNA 1	BOSTÓN
COMUNA 2	CENTRO
COMUNA 3	CONSOTA
COMUNA 4	CUBA
COMUNA 5	DEL CAFÉ
COMUNA 6	EL JARDÍN
COMUNA 7	EL OSO
COMUNA 8	EL POBLADO
COMUNA 9	EL ROCÍO
COMUNA 10	FERROCARRIL
COMUNA 11	OLÍMPICA
COMUNA 12	ORIENTE
COMUNA 13	PERLA DEL OTÚN
COMUNA 14	RÍO OTÚN
COMUNA 15	SAN JOAQUÍN
COMUNA 16	SAN NICOLÁS
COMUNA 17	UNIVERSIDAD
COMUNA 18	VILLA SANTANA
COMUNA 19	VILLAVICENCIO

Fuente: El Autor

Tabla 4. Hospitales ciudad de Pereira.

NÚMERO HOSPITAL	HOSPITALES
HOSPITAL 1	Universitario San Jorge de Pereira
HOSPITAL 2	Salud Pereira - Hospital Centro
HOSPITAL 3	San Joaquín-Cuba
HOSPITAL 4	Kennedy Pereira
HOSPITAL 5	E.S.E. Hospital San Vicente de Paul
HOSPITAL 6	Clínica Comfandi
HOSPITAL 7	Clínica Los Rosales
HOSPITAL 8	Hospital San Camilo Av. 30 agosto

Fuente: El Autor

5.5 NÚMERO DE LLAMADAS

Con el fin de analizar el número de llamadas de cada uno de los barrios, se tomó el promedio de las llamadas que se realiza en un día, y luego se resumió en el número de llamada de cada uno de las comunas, en el **Anexo 1. CANTIDAD DE LLAMADAS POR COMUNA**, se detalla los números de llamadas.

Tabla 5. Resumen de Llamadas por Comuna.

COMUNA	PROMEDIO DE LLAMADAS
BOSTÓN	2
CENTRO	3
CONSOTA	2
CUBA	2
DEL CAFÉ	1
EL JARDÍN	2
EL OSO	2
EL POBLADO	2
EL ROCÍO	5
FERROCARRIL	2
OLÍMPICA	3
ORIENTE	2
PERLA DEL OTÚN	2
RÍO OTÚN	2
SAN JOAQUÍN	2
SAN NICOLÁS	1
UNIVERSIDAD	2
VILLA SANTANA	2
VILLAVICENCIO	2

Fuente: El Autor

5.6 DISTANCIAS ENTRE COMUNAS Y HOSPITALES

Con el fin de hallar las distancias entre las comunas, y luego entre las comunas y hospitales, se realizó el siguiente paso a paso.

Paso 1: En primer lugar, se encontró la Latitud y Longitud de cada uno de los barrios de las 19 comunas de la ciudad de Pereira con la ayuda de Google Maps, luego, se realizó la conversión de estos datos con una calculadora geodésica (UTM_ES) y se hallarán las coordenadas X e Y de los barrios. Los datos se pueden encontrar en el **Anexo 2. COORDENADAS DE BARRIOS PEREIRA**.

A continuación, se muestra los resultados obtenidos para dos barrios de la comuna Boston.

Figura 3. Coordenadas de los Barrios.

NOMBRE DEL BARRIO	LATITUD	LONGITUD	COORDENADA X	COORDENADA Y
Olaya Herrera	4.80753	-75.6961736	422802.1	531428.3
Centenario	4.80826	-75.7014603	422216	531509.6

Fuente: El Autor

Paso 2: En segundo lugar, una vez hallados las coordenadas X e Y de todos los barrios, se procede a encontrar los centros de gravedad de cada una de las 19 comunas de la ciudad de Pereira.

El centro de gravedad es una técnica matemática, que ayuda a encontrar una localización específica, de acuerdo a unas coordenadas en el eje X y en el eje Y, y un aporte específico que realiza cada par de coordenadas (Angarita, 2016).

Para este caso, se tiene como aporte específico de cada barrio el número de llamadas, el centro de gravedad se halla con las siguientes fórmulas:

$$C_x = \frac{\sum_i d_{ix} * Z_i}{\sum_i Z_i}$$

$$C_y = \frac{\sum_i d_{iy} * Z_i}{\sum_i Z_i}$$

Donde:

C_x = Coordenada X del centro de Gravedad.

C_y = Coordenada Y del centro de Gravedad.

d_{ix} = Coordenada X del Barrio i.

d_{iy} = Coordenada Y del Barrio i.

Z_i = Número de llamadas del Barrio i.

A continuación, se presenta el resumen de los centros de gravedad de cada una de las comunas, los datos y cálculos se pueden encontrar en el **Anexo 3. CENTRO DE GRAVEDAD COMUNAS**.

Tabla 6. Centro de Gravedad Comunas.

MÚMERO COMUNA	COMUNA	COORDENADA X	COORDENADA Y
COMUNA 1	BOSTÓN	422884.2053	530662.872
COMUNA 2	CENTRO	421474.612	531785.144
COMUNA 3	CONSOTA	417721.7164	524080.3855
COMUNA 4	CUBA	418247.7529	531006.0765
COMUNA 5	DEL CAFÉ	417311.4593	532607.4407
COMUNA 6	EL JARDÍN	420441.8016	531360.581
COMUNA 7	EL OSO	418142.8519	530543.6596
COMUNA 8	EL POBLADO	420735.5333	530992.5333
COMUNA 9	EL ROCÍO	422215.7111	530966.8556
COMUNA 10	FERROCARRIL	417987.9636	531885.9545
COMUNA 11	OLÍMPICA	416623.9566	531367.5717
COMUNA 12	ORIENTE	422705.1412	530920.5765
COMUNA 13	PERLA DEL OTÚN	419411.0763	530145.65
COMUNA 14	RÍO OTÚN	419558.2054	531807.0973
COMUNA 15	SAN JOAQUÍN	417496.5991	530568.9214
COMUNA 16	SAN NICOLÁS	421122.39	531503.53
COMUNA 17	UNIVERSIDAD	426313.2605	529628.8442
COMUNA 18	VILLA SANTANA	419629.1917	534355.3375
COMUNA 19	VILLAVICENCIO	422719.6833	531636.3333

Fuente: El Autor

Paso 4: Una vez hallados los centros de gravedad de cada una de las comunas de la ciudad de Pereira, se procede a realizar la matriz de distancia entre comunas, para esto, se utiliza la fórmula de la Distancia Euclidiana, que sirve para hallar la distancia entre dos puntos.

FÓRMULA DE LA DISTANCIA EUCLIDIANA:

$$\text{Distancia Euclidiana} = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2}$$

A continuación, se presenta un ejemplo de las distancias halladas, la matriz de distancia entre comunas y los cálculos realizados, se pueden encontrar en el **Anexo 4. MATRIZ DE DISTANCIA ENTRE COMUNAS**.

Figura 4. Matriz de Distancias entre Comunas.

DISTANCIAS (MTS)	COMUNA 1	COMUNA 2	COMUNA 3	COMUNA 4	COMUNA 5
COMUNA 1	0.00	1801.79	8365.43	4649.14	5902.27
COMUNA 2	1801.79	0.00	8570.15	3319.57	4243.58
COMUNA 3	8365.43	8570.15	0.00	6945.64	8536.92
COMUNA 4	4649.14	3319.57	6945.64	0.00	1855.00
COMUNA 5	5902.27	4243.58	8536.92	1855.00	0.00

Fuente: El Autor

Paso 5. Con el fin de hallar la distancia entre las 19 comunas y los 8 hospitales, se procede a encontrar las coordenadas X e Y de cada uno de los hospitales, se realizó de la misma forma que en el paso 1.

Tabla 7. Coordenada de los Hospitales.

NÚMERO HOSPITAL	HOSPITALES	LATITUD	LONGITUD	COORDENADA X	COORDENADA Y
HOSPITAL 1	Universitario San Jorge de Pereira	4.8180156	-75.7009997	422268,2	532588
HOSPITAL 2	Salud Pereira - Hospital Centro	4.8091567	-75.7287595	419188,7	531611,9
HOSPITAL 3	San Joaquín-Cuba	4.7977457	-75.7442923	417464,9	530352,3
HOSPITAL 4	Kennedy Pereira	4.8072033	-75.6731368	425356,8	531389,7
HOSPITAL 5	E.S.E. Hospital San Vicente de Paul	4.8071997	-75.7409889	417832,3	531397
HOSPITAL 6	Clínica Comfandi	4.8001013	-75.7410807	417821,3	530612,3
HOSPITAL 7	Clínica Los Rosales	4.8135005	-75.7017843	422180,6	532089
HOSPITAL 8	Hospital San Camilo Av. 30 agosto	4.798109	-75.7421344	417704,2	530392,2

Fuente: El Autor

Paso 6. Una vez halladas las coordenadas de los hospitales, se realiza la matriz de distancias entre comunas y hospitales, se presenta un ejemplo de cómo quedo la matriz, y se puede consultar en el **Anexo 5. MATRIZ DE DISTANCIAS ENTRE COMUNAS Y HOSPITALES**.

Figura 5. Matriz de Distancias entre Comunas y Hospitales.

DISTANCIAS (MTS)	HOSPITAL 1	HOSPITAL 2	HOSPITAL 3	HOSPITAL 4	HOSPITAL 5
COMUNA 1	2021.28	3815.42	5428.20	2577.21	5104.97
COMUNA 2	1128.88	2292.47	4258.03	3902.28	3662.93
COMUNA 3	9646.24	7673.05	6277.17	10569.80	7317.45
COMUNA 4	4320.47	1119.11	1019.94	7119.39	570.46
COMUNA 5	4956.78	2124.88	2260.35	8136.98	1317.74

Fuente: El Autor

5.7 TIEMPOS DE RECORRIDO ENTRE COMUNAS Y HOSPITALES

Una vez se hallaron las distancias entre comunas y hospitales, se procede a realizar la matriz de tiempos de recorrido de las ambulancias, para esto, se toma un supuesto de velocidad constante de 60 Km/Hr.

Para hallar el tiempo de recorrido, se divide la distancia que hay entre cada nodo por la velocidad de 60 Klm/Hr.

- ✓ Para el caso de la matriz de tiempo entre comunas se divide la distancia entre la comuna i y la comuna j, por la velocidad. Los tiempos se convierten a minutos.

$$Tiempo_{ij} = \frac{d_{ij}}{60} [hr]$$

La matriz de tiempos se puede consultar en el **Anexo 6. MATRIZ DE TIEMPOS ENTRE COMUNAS.**

Figura 6. Matriz de Tiempos entre Comunas.

TIEMPO (MIN)	COMUNA 1	COMUNA 2	COMUNA 3	COMUNA 4	COMUNA 5
COMUNA 1	0.00	1.80	8.37	4.65	5.90
COMUNA 2	1.80	0.00	8.57	3.32	4.24
COMUNA 3	8.37	8.57	0.00	6.95	8.54
COMUNA 4	4.65	3.32	6.95	0.00	1.85
COMUNA 5	5.90	4.24	8.54	1.85	0.00

Fuente: El Autor

- ✓ Para el caso de la matriz de tiempo entre comunas y hospitales, se divide la distancia entre la comuna j y el hospital k, por la velocidad. Los tiempos se convierten a minutos.

$$Tiempo_{jk} = \frac{d_{jk}}{60} [hr]$$

La matriz de tiempos se puede consultar en el **Anexo 7. MATRIZ DE TIEMPOS ENTRE COMUNAS Y HOSPITALES.**

Figura 7. Matriz de Tiempos entre Comunas y Hospitales.

TIEMPO (MIN)	HOSPITAL 1	HOSPITAL 2	HOSPITAL 3	HOSPITAL 4	HOSPITAL 5
COMUNA 1	2.02	3.82	5.43	2.58	5.10
COMUNA 2	1.13	2.29	4.26	3.90	3.66
COMUNA 3	9.65	7.67	6.28	10.57	7.32
COMUNA 4	4.32	1.12	1.02	7.12	0.57
COMUNA 5	4.96	2.12	2.26	8.14	1.32

Fuente: El Autor

5.8 DESCRIPCIÓN SISTEMA ACTUAL DE LA EMPRESA CASO DE ESTUDIO

Actualmente la entidad caso de estudio, presenta la siguiente localización y cubrimiento de las ambulancias a cada una de las comunas y hospitales, esta distribución la realiza una persona de la entidad, donde de manera empírica, localiza las ambulancias, les asigna las comunas que debe de atender, y los diferentes hospitales donde deben de trasladar a los pacientes.

A continuación, se presenta la localización y asignación de ambulancias, y posteriormente, los tiempos y distancia total ponderada de cada traslado.

El tiempo y distancia total ponderada del sistema actual de la entidad caso de estudio es de 148.66 min y 155188.87 mts respectivamente.

Tabla 8. Localización y Asignación de Ambulancias Sistema Actual.

NÚMERO DE AMBULANCIA	LOCALIZACIÓN DE AMBULANCIA (COMUNA)	ASIGNACIÓN DE PACIENTE (COMUNA)	TRASLADO DE PACIENTE (HOSPITAL)
1	Boston	Boston	San Joaquín
1	Boston	Centro	San Joaquín
1	Boston	El Jardín	Kennedy
2	Centro	El Poblado	Kennedy
2	Centro	El Rocío	Salud Pereira
2	Centro	Oriente	San Camilo Av. 30 de agosto
3	Consota	Consota	Universitario San Jorge
3	Consota	San Nicolas	Clínica Comfandi
3	Consota	Universidad	Universitario San Jorge
4	Cuba	Villa Santana	San Vicente de Paul
4	Cuba	Villavicencio	Clínica Los Rosales
5	Del Café	Cuba	Clínica Comfandi
5	Del Café	Del Café	San Joaquín
6	Universidad	El Oso	San Camilo Av. 30 de agosto
6	Universidad	Ferrocarril	San Joaquín
6	Universidad	Olímpica	Clínica Los Rosales
7	Villa Santana	Consota	Kennedy
8	Villavicencio	Perla del Otún	San Joaquín
8	Villavicencio	San Joaquín	San Joaquín

Fuente: El Autor

Tabla 9. Distancia Total Ponderada del Sistema Actual.

NÚMERO DE AMBULANCIA	DISTANCIA ENTRE LA COMUNA DONDE ESTÁ ASIGNADA HASTA DONDE RECOGE EL PACIENTE (mts.min)	DISTANCIA DESDE LA COMUNA DONDE RECOGE EL PACIENTE HASTA EL HOSPITAL ASIGNADO (mts.min)	DISTANCIA TOTAL PONDERADA DE TRASLADO (mts.min)
1	0	5428.2	5428.2
1	1801.79	4258.03	6059.82
1	2540.11	4915.08	7455.19
2	1083.73	4638.30	5722.03
2	1104.00	3094.98	4198.98
2	1503.89	5028.78	6532.67
3	0	9646.24	9646.24
3	8165.03	3419.28	11584.31
3	10227.42	5011.90	15239.32
4	3622.97	3461.30	7084.27
4	4516.13	703.93	5220.06
5	1855.00	580.45	2435.45
5	0	2046.91	2046.91
6	8221.46	464.06	8685.52
6	8625.84	1620.40	10246.24
6	9844.07	5603.28	15447.35
7	10450.51	10569.80	21020.31
8	3628.91	1957.12	5586.03
8	5331.04	218.93	5549.97
DISTANCIA TOTAL PONDERADA DEL SISTEMA ACTUAL			155188.87 mts.min

Fuente: El Autor

Tabla 10. Tiempo de Traslado de Pacientes Sistema Actual.

NÚMERO DE AMBULANCIA	TIEMPO ENTRE LA COMUNA DONDE ESTÁ ASIGNADA HASTA DONDE RECOGE EL PACIENTE (min)	TIEMPO DESDE LA COMUNA DONDE RECOGE EL PACIENTE HASTA EL HOSPITAL ASIGNADO (min)	TIEMPO TOTAL DE TRASLADO (min)
1	0	5.43	5.43
1	1.80	4.26	4.26
1	2.54	4.92	7.46
2	1.08	4.64	5.72
2	1.10	3.09	4.19
2	1.50	5.03	6.53
3	0	6.28	6.28
3	8.17	3.42	11.59
3	10.23	8.88	19.11
4	3.62	3.46	7.08
4	4.52	0.70	5.22
5	1.85	0.58	2.43
5	0	2.26	2.26
6	8.22	0.46	8.68
6	8.63	1.62	10.25
6	9.84	5.60	15.44
7	10.45	10.57	21.02
8	3.63	1.96	5.59
8	5.33	0.22	5.55
TIEMPO TOTAL DEL SISTEMA ACTUAL			148.66 min

Fuente: El Autor

6 DEFINICIÓN DEL MODELO

Una vez realizado el diagnóstico del sistema actual de localización y asignación de ambulancias de la entidad caso de estudio, y la revisión de la literatura la cual está contemplada en el estado del arte, se realiza la definición del modelo matemático, con el fin de dar solución a la problemática de la entidad.

Para el modelo propuesto, se consideran los siguientes supuestos:

- ✓ Los Números de Llamadas por comunas, se consideran determinísticos.
- ✓ No se consideran los tiempos por demora en el tráfico.
- ✓ No se consideran los tiempos de recogida de pacientes, ni de entrega en el hospital.
- ✓ Las distancias recorridas se consideran simétricas.
- ✓ Se considera una velocidad constante de las ambulancias de 60 Klm/Hr.
- ✓ Se considera un horizonte de planificación de 24 horas.

Para el modelo matemático, se define lo siguiente:

Conjuntos:

Potenciales $i = 1 \dots c$; donde i representa el lugar potencial donde se localiza la ambulancia.

Comunas $j = 1, \dots, c$; donde j representa la Comuna o zona potencial a atender.

Hospitales $k = 1, \dots, h$; donde k representa los Hospitales que se van asignar a cada paciente de la comuna.

Variables de Decisión:

$X_{ijk} = 1$: Si se asigna un paciente de la comuna j a la ambulancia asignada a la zona i , y se traslada a un hospital k ; 0 de lo contrario.

$Y_i = 1$: Si se ubica la ambulancia en el punto i ; 0 de lo contrario.

Parámetros:

T = Tiempo Total de trabajo de las ambulancias (minutos).

a = Total de Ambulancias.

w_j = Promedio de Llamadas de atención asociada a la comuna j .

d_{ijk} = Distancia en metros entre la comuna i y la comuna j, más la distancia de la comuna j al hospital k.

t_{ijk} = Tiempo en minutos de traslado de un paciente de la comuna i a la comuna j, más el tiempo de trasladar el paciente desde la comuna j al hospital k.

Función Objetivo:

(1) La función objetivo busca minimizar la distancia total ponderada de recorrido que realizan las ambulancias desde la comuna donde se encuentra ubicada i, hasta la comuna donde se debe atender el paciente j y el traslado del mismo hasta el hospital k.

$$\text{Minimizar} \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^c \sum_{k=1}^h (w_j * d_{ijk} * X_{ijk}) \quad (1)$$

Restricciones:

(2) Esta restricción garantiza que la cantidad total de ambulancias asignadas no supere su número máximo permitido.

$$\sum_{i=1}^c Y_i \leq n \quad (2)$$

(3) Esta restricción garantiza que cada ambulancia se asigna a un único paciente que se encuentra en determinada comuna.

$$\sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^h X_{ijk} = 1 \quad \forall j = 1..c \quad (3)$$

(4) Esta restricción garantiza que cada ambulancia asignada No exceda el tiempo total de trabajo.

$$\sum_{j=1}^c \sum_{k=1}^h t_{ijk} * X_{ijk} \leq T * Y_i \quad \forall i = 1..c \quad (4)$$

Las restricciones (5) y (6) representan la condición lógica o naturaleza de las variables de decisión.

$$X_{ijk} \in \{0, 1\} \quad \forall i = 1..c, j = 1..c, k = 1..h \quad (5)$$

$$Y_i \in \{0, 1\} \quad \forall i = 1..c \quad (6)$$

7 ANÁLISIS DE RESULTADOS

La solución del modelo matemático propuesto en el anterior capítulo, se programó en AMPL, y se corrió en la plataforma de NEOS bajo el solver GUROBI, se realizó una corrida donde se encontró el tiempo óptimo de los recorridos, las comunas donde se asignaron las ambulancias y sus respectivos recorridos.

El modelo se corrió en un computador portátil ASUS X509J, con un procesador INTEL® Core i5 de 10th generación, un disco duro de 1 Terabyte, 12 Gigabytes de Memoria RAM, y un sistema operativo Windows 10 Enterprise, versión 21H1 de 64 Bits.

Los resultados obtenidos del modelo propuesto, fortalece el sistema de atención prehospitalaria, mejorando la distancia total ponderada y tiempos de recorrido por las ambulancias cada vez que se requiere un servicio de traslado de pacientes a los hospitales, mejorando la eficiencia de los sistemas de emergencia de la ciudad y contribuyendo a la reducción de porcentaje de muertes.

7.1 RESULTADOS DEL MODELO PROPUESTO.

El modelo propuesto se solucionó en un tiempo computacional de 16 segundos, con un total de 2907 variables de tipo binarias, 39 restricciones lineales, de las cuales 19 restricciones son de igualdad y 20 restricciones de desigualdad.

Los resultados arrojados por el solver fueron los siguientes:

Figura 8. Función Objetivo.

***** RESULTADOS DEL PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN Y ASIGNACIÓN DE AMBULANCIAS EN LA CIUDAD DE PEREIRA - RISARALDA *****	
DISTANCIA TOTAL DE TRASLADO DE PACIENTES =	69352.1

Fuente: Neos Solver Optimization®

Figura 9. Localización de Ambulancias.

```
AMBULANCIA ASIGNADA A LA COMUNA i =  
  
Y [*] :=  
  2  1.0  
  3  1.0  
  4  1.0  
  6  1.0  
  9  1.0  
 11  1.0  
 17  1.0  
 18  1.0  
;
```

Fuente: Neos Solver Optimization®

Figura 10. Asignación de Ambulancias.

```
AMBULANCIAS ASIGNADAS A LA COMUNA i, QUE ATIENDE PACIENTES DE LA COMUNA j Y QUE LOS TRASLADA AL HOSPITAL k =  
  
X :=  
  2  2  7  1.0  
  2 16  7  1.0  
  3  3  3  1.0  
  4  4  5  1.0  
  4  7  6  1.0  
  4 10  5  1.0  
  4 13  2  1.0  
  4 15  3  1.0  
  6  6  2  1.0  
  6  8  2  1.0  
  6 14  2  1.0  
  9  9  7  1.0  
  9 12  7  1.0  
  9 19  7  1.0  
 11  5  5  1.0  
 11 11  5  1.0  
 17  1  5  1.0  
 17 17  4  1.0  
 18 18  2  1.0  
;
```

Fuente: Neos Solver Optimization®

Una vez analizados los resultados, se evidencia que la distancia total ponderada de recorrido de las ambulancias y traslado de pacientes es de 69.352,1 metros. minutos. De igual forma, se puede observar que el modelo propuesto sugiere la localización de 8 ambulancias asociadas a la entidad caso de estudio, en las comunas 2, 3, 4, 6, 9, 11, 17 y 18, cuya asignación de comunas de atención y configuración de traslado a hospitales se efectúa de la siguiente manera.

- ✓ La primera ambulancia asignada a la comuna 2, va atender los pacientes de la comuna 2 y 16, y los va a trasladar hacía el hospital número 7.
- ✓ La segunda ambulancia asignada a la comuna 3, va atender los pacientes de la comuna 3, y los va a trasladar hacía el hospital número 3.
- ✓ La tercera ambulancia asignada a la comuna 4, va atender los pacientes de la comuna 4, 7, 10, 13, 15, y los va a trasladar a los hospitales número 5, 6, 5, 2, 3, respectivamente.
- ✓ La cuarta ambulancia asignada a la comuna 6, va atender los pacientes de la comuna 6, 8, 14, y los va a trasladar al hospital número 2.
- ✓ La quinta ambulancia asignada a la comuna 9, atenderá los pacientes de la comuna 9, 12, 19, y los va a trasladar al hospital número 7.
- ✓ La sexta ambulancia asignada a la comuna 11, va atender los pacientes de la comuna 5, 11, y los va a trasladar al hospital número 5.
- ✓ La séptima ambulancia asignada a la comuna 17, atenderá los pacientes de la comuna 1, 17, y los va a trasladar a los hospitales número 5 y 4, respectivamente.
- ✓ La octava ambulancia asignada a la comuna 18, atenderá los pacientes de la comuna 18, y los va a trasladar al hospital número 2.

En la tabla 11 se presenta cada una de las ambulancias asignadas, la cantidad de comunas que atiende, los hospitales que tiene asignado cada paciente, la distancia total ponderada y el tiempo total de traslado de los pacientes.

De igual forma, en el **Anexo 11. RESULTADOS**, se encuentra el resultado de la propuesta de Localización y Asignación de la entidad caso de estudio, con su respectiva distancia total ponderada y tiempo de traslado de pacientes.

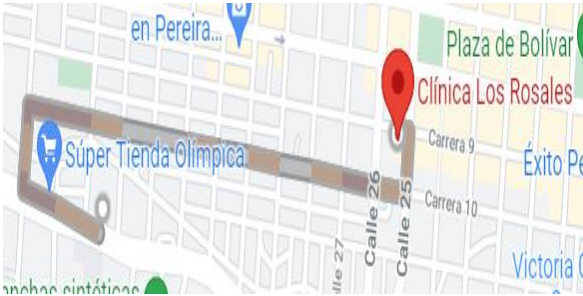
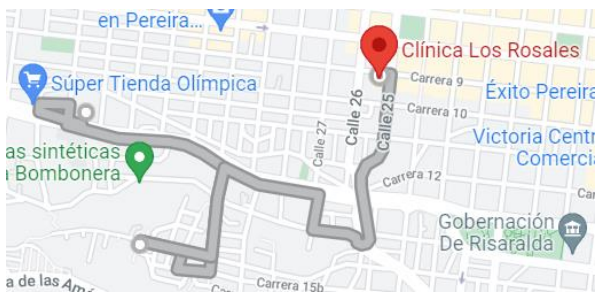
Tabla 11. Resumen de Asignación de Ambulancias.

NÚMERO DE AMBULANCIA	TOTAL, DE COMUNAS ATENDIDAS	TOTAL, DE HOSPITALES ASIGNADOS	DISTANCIA TOTAL PONDERADA (mts.min)	TIEMPO TOTAL (min)
1	2	1	2428.93	2.43
2	1	1	6277.17	6.28
3	5	4	6777.00	8.1
4	3	1	4823.08	4.83
5	3	1	4436.96	4.43
6	2	1	4153.18	3.95
7	2	2	10690.39	10.68
8	1	1	2778.58	2.78

Fuente: El Autor

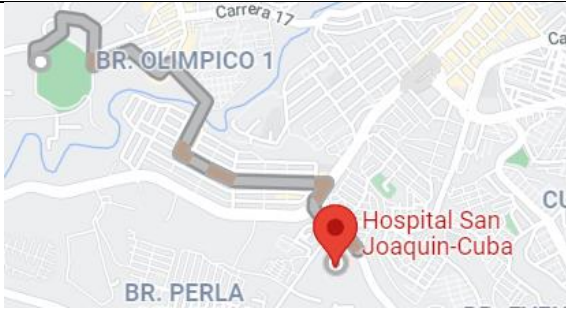
A continuación, se presenta el recorrido que debe de realizar las ambulancias, desde el lugar donde están ubicadas, hasta donde deben prestar el servicio y el traslado hasta el hospital asignado. Las rutas se presentan con ayuda de Google Maps ®.

Tabla 12. Ruta Ambulancia Número 1.

Ambulancia número 1 – Ubicación Comuna 2 - Comunas atendidas 2.	
Comuna 2	Comuna 16
	

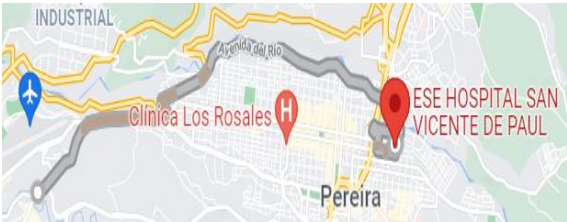
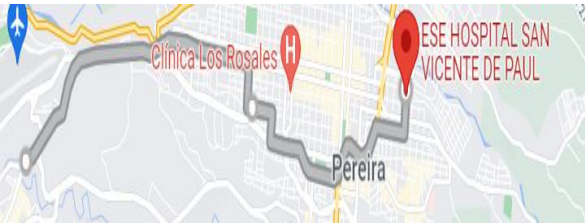
Fuente: El Autor

Tabla 13. Ruta Ambulancia Número 2.

Ambulancia número 2 – Ubicación Comuna 3 - Comunas atendidas 1.	
Comuna 3	
	

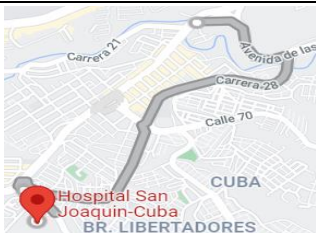
Fuente: El Autor

Tabla 14. Ruta Ambulancia Número 3.

Ambulancia número 3 – Ubicación Comuna 4 - Comunas atendidas 5.	
Comuna 4	Comuna 16
	
Comuna 10	Comuna 13
	

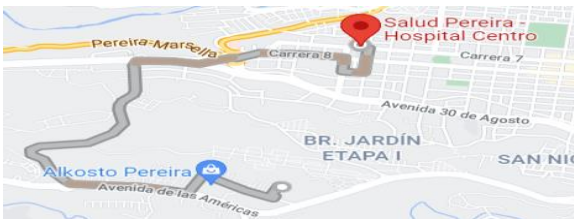
Fuente: El Autor

Tabla 15. Ruta Ambulancia Número 3 (Continuación).

Ambulancia número 3 – Ubicación Comuna 4 - Comunas atendidas 5.	
Comuna 3	
	

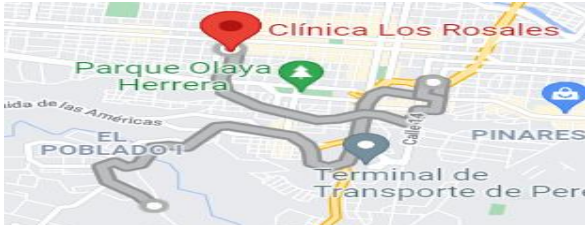
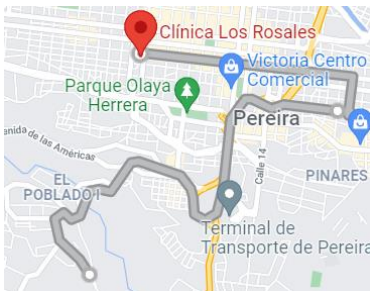
Fuente: El Autor

Tabla 16. Ruta Ambulancia Número 4.

Ambulancia número 4 – Ubicación Comuna 6 - Comunas atendidas 3.	
Comuna 6	Comuna 8
	
Comuna 14	
	

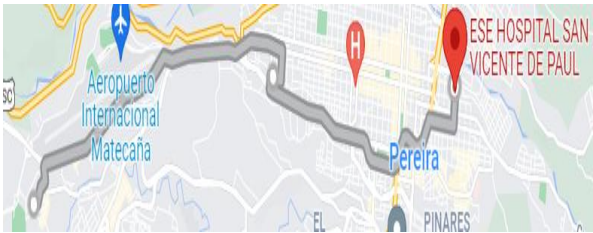
Fuente: El Autor

Tabla 17. Ruta Ambulancia Número 5.

Ambulancia número 5 – Ubicación Comuna 9 - Comunas atendidas 3.	
Comuna 9	Comuna 12
	
Comuna 19	
	

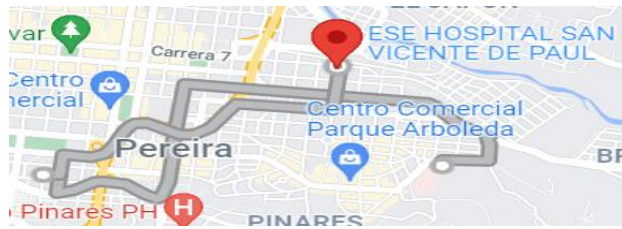
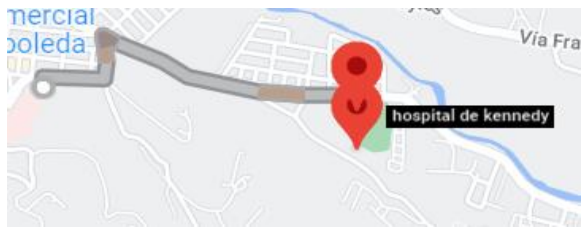
Fuente: El Autor

Tabla 18. Ruta Ambulancia Número 6.

Ambulancia número 6 – Ubicación Comuna 11 - Comunas atendidas 2.	
Comuna 5	Comuna 11
	

Fuente: El Autor

Tabla 19. Ruta Ambulancia Número 7.

Ambulancia número 7 – Ubicación Comuna 17 - Comunas atendidas 2.	
Comuna 1	Comuna 17
	

Fuente: El Autor

Ambulancia número 8 – Ubicación Comuna 18 - Comunas atendidas 1.
Comuna 18

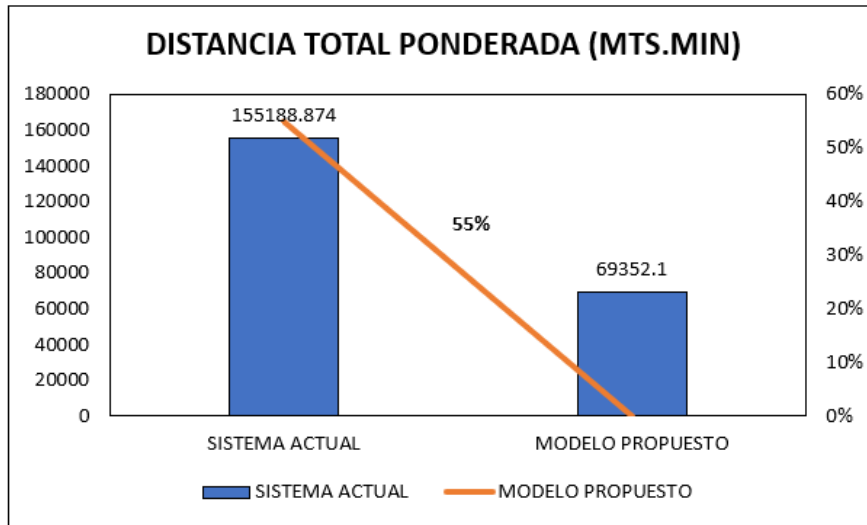

Fuente: El Autor

7.2 COMPARACIÓN CON EL SISTEMA ACTUAL DE LOCALIZACIÓN Y ASIGNACIÓN DE AMBULANCIAS.

Una vez analizado los resultados arrojados por el modelo propuesto, se procede a realizar el comparativo de la distancia total ponderada y tiempo total de traslado del sistema actual de localización y asignación de la entidad caso de estudio.

Para esto, se presenta los siguientes gráficos, donde se muestra la mejora en estas dos variables.

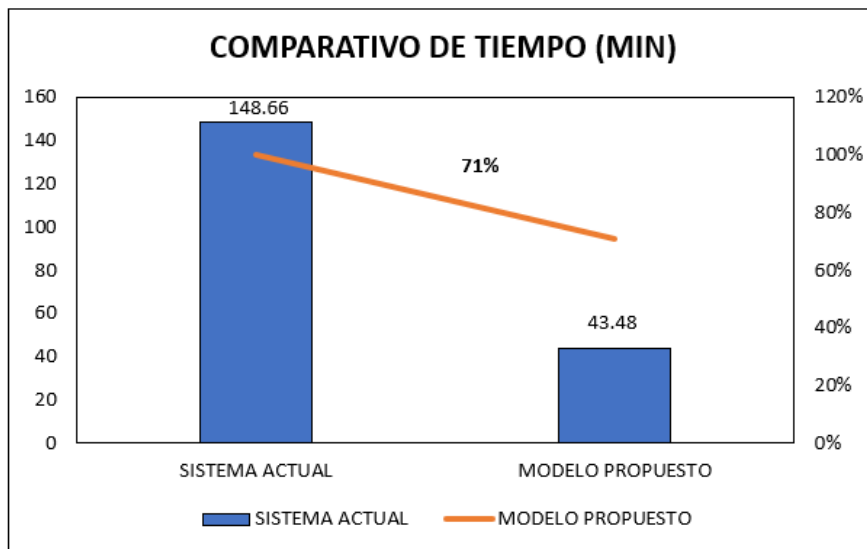
Figura 11. Comparativo de Distancia Total Ponderada.



Fuente: El Autor

La Figura 11 muestra, que la distancia total ponderada del sistema actual de localización y asignación de la entidad caso de estudio es de 155188.874 metros.minutos, con el modelo propuesto, la distancia total ponderada es de 69352.1 metros.minutos, presentando una mejora del 55%.

Figura 12. Comparativo de Tiempos de Traslado.



Fuente: El Autor

Por último, se puede analizar que la Figura 12, muestra el comparativo de tiempos de traslado de pacientes, donde se pasó de un total de 148.66 minutos del sistema actual de la entidad caso de estudio, a 43.48 minutos con el modelo propuesto, presentando una mejora del 71%.

7.3 ANÁLISIS DE ESCENARIOS.

Una vez realizado el comparativo del sistema actual de la entidad caso de estudio y los resultados obtenidos por el modelo propuesto, se procede a realizar un análisis de escenarios, con el fin de analizar el impacto de modelo con respecto a la variación de parámetros de interés. Para este caso, se sugirieron los siguientes escenarios:

Escenario 1: Para este primer escenario, se modifica el parámetro de la cantidad de ambulancias disponibles para la entidad caso de estudio, en este caso, se va a disminuir la cantidad de ambulancias en 2, dejando solo 6 en el modelo propuesto.

Para este primer escenario, el modelo arrojó los siguientes resultados.

Figura 13. Función Objetivo - Escenario 1.

```
*****
ESCENARIO 1 - NÚMERO DE AMBULANCIAS = 6
*****

DISTANCIA TOTAL DE TRASLADO DE PACIENTES =      78336.5
```

Fuente: El Autor

Figura 14. Localización de Ambulancias - Escenario 1.

```
AMBULANCIA ASIGNADA A LA COMUNA i =

Y [*] :=
3  1.0
4  1.0
6  1.0
9  1.0
17 1.0
18 1.0
;
```

Fuente: El Autor

Figura 15. Asignación de Ambulancias - Escenario 1.

AMBULANCIAS ASIGNADAS A LA COMUNA i, QUE ATIENDE PACIENTES DE LA COMUNA j Y QUE LOS TRASLADA AL HOSPITAL k =			
X :=			
3	3	3	1.0
4	4	5	1.0
4	5	5	1.0
4	7	6	1.0
4	10	5	1.0
4	11	5	1.0
4	13	2	1.0
4	15	3	1.0
6	6	2	1.0
6	8	2	1.0
6	14	2	1.0
6	16	7	1.0
9	2	7	1.0
9	9	7	1.0
9	12	7	1.0
9	19	7	1.0
17	1	5	1.0
17	17	4	1.0
18	18	2	1.0
;			

Fuente: El Autor

En este primer escenario, se puede analizar que la distancia total ponderada del traslado de pacientes pasó de 69352.1 a 78336.5 metros.minutos con respecto al modelo propuesto, localizando las ambulancias en las comunas número 3, 4, 6, 9, 17 y 18; donde la ambulancia ubicada en la comuna 3 y 18, atiende una comuna y un hospital, la ambulancia ubicada en la comuna 4, atiende 7 comunas y 4 hospitales, la ambulancia ubicada en la comuna 6, atiende 4 comunas y 2 hospitales, la ambulancia ubicada en la comuna 9, atiende 4 comunas y un hospital y por último, la ambulancia ubicada en la comuna 17, atiende 2 comunas 2 hospitales.

A continuación, se presenta de manera gráfica la localización y asignación de ambulancias en este escenario.

Figura 16. Localización y Asignación de Ambulancias Escenario 1.



Fuente: El Autor

Figura 17. Localización y Asignación de Ambulancias Escenario 1 (Continuación).

UBICACIÓN DE AMBULANCIAS COMUNA	ASIGNACIÓN COMUNA	TRASLADO HOSPITALES
CUBA	EL OSO	CLÍNICA COMFANDI
CUBA	FERROCARRIL	SAN VICENTE DE PAUL
CUBA	OLÍMPICA	SAN VICENTE DE PAUL
CUBA	PERLA DEL OTÚN	HOSPITAL CENTRO
CUBA	SAN JOAQUIN	HOSPITAL SAN JOAQUIN
EL JARDÍN	EL JARDÍN	HOSPITAL CENTRO
EL JARDÍN	EL POBLADO	HOSPITAL CENTRO
EL JARDÍN	RÍO OTÚN	HOSPITAL CENTRO
EL JARDÍN	SAN NICOLÁS	CLÍNICA LOS ROSALES
EL ROCÍO	CENTRO	CLÍNICA LOS ROSALES
EL ROCÍO	EL ROCÍO	CLÍNICA LOS ROSALES
EL ROCÍO	ORIENTE	CLÍNICA LOS ROSALES
EL ROCÍO	VILLAVICENCIO	CLÍNICA LOS ROSALES
UNIVERSIDAD	BOSTÓN	HOSPITAL KENNEDY
UNIVERSIDAD	UNIVERSIDAD	HOSPITAL KENNEDY
VILLA SANTANA	VILLA SANTANA	HOSPITAL CENTRO

Fuente: El Autor

Escenario 2: Para el segundo escenario, se aumenta la cantidad de ambulancias en 2, dejando un total de 10 ambulancias en el modelo propuesto.

Para este escenario, el modelo arrojó los siguientes resultados.

Figura 18. Función Objetivo - Escenario 2.

```
*****
ESCENARIO 2 - NÚMERO DE AMBULANCIAS = 10
*****

DISTANCIA TOTAL DE TRASLADO DE PACIENTES =      63750.0
```

Fuente: El Autor

Figura 19. Localización de Ambulancias - Escenario 2.

```
AMBULANCIA ASIGNADA A LA COMUNA i =

Y [*] :=
  2  1.0
  3  1.0
  6  1.0
  7  1.0
  9  1.0
 10  1.0
 11  1.0
 13  1.0
 17  1.0
 18  1.0
;
```

Fuente: El Autor

Figura 20. Asignación de Ambulancias - Escenario 2.

AMBULANCIAS ASIGNADAS A LA COMUNA i, QUE ATIENDE PACIENTES DE LA COMUNA j Y QUE LOS TRASLADA AL HOSPITAL k =			
X :=			
2	2	7	1.0
2	16	7	1.0
3	3	3	1.0
6	6	2	1.0
6	8	2	1.0
6	14	2	1.0
7	4	5	1.0
7	7	6	1.0
7	15	3	1.0
9	9	7	1.0
9	12	7	1.0
9	19	7	1.0
10	5	5	1.0
10	10	5	1.0
11	11	5	1.0
13	13	2	1.0
17	1	5	1.0
17	17	4	1.0
18	18	2	1.0
;			

Fuente: El Autor

En el segundo escenario, la distancia total ponderada de traslado de pacientes disminuyó de 69352.1 a 63750 metros.minutos con respecto al modelo propuesto, localizando las 10 ambulancias en las comunas 2, 3, 6, 7, 9, 10, 11, 13, 17, 18; donde las ambulancias ubicadas en las comunas 3, 11, 13 y 18, atienden solo una comuna y un hospital, las ambulancias asignadas a la comuna 2 y 10, atiende 2 comunas y un hospital, las ambulancias asignadas a las comunas 6 y 9, atienden 3 comunas y 3 hospitales, la ambulancia asignada a la comuna 7, atiende 3 comunas y 2 hospitales, y por último, la ambulancia asignada a la comuna 17, atiende 2 comunas y 2 hospitales.

Se presenta de manera gráfica la localización y asignación de ambulancias en este escenario.

Figura 21. Localización y Asignación de Ambulancias Escenario 2.



Fuente: El Autor

Figura 22. Localización y Asignación de Ambulancias Escenario 2 (Continuación).

UBICACIÓN DE AMBULANCIAS COMUNA	ASIGNACIÓN COMUNA	TRASLADO HOSPITALES
EL JARDÍN	EL JARDÍN	HOSPITAL CENTRO
CENTRO	EL POBLADO	HOSPITAL CENTRO
CENTRO	RÍO OTÚN	HOSPITAL CENTRO
EL OSO	CUBA	SAN VICENTE DE PAUL
EL OSO	EL OSO	CLÍNICA COMFANDI
EL OSO	SAN JOAQUÍN	SAN JOAQUÍN
EL ROCÍO	EL ROCÍO	CLÍNICA LOS ROSALES
EL ROCÍO	ORIENTE	CLÍNICA LOS ROSALES
EL ROCÍO	VILLAVICENCIO	CLÍNICA LOS ROSALES
FERROCARRIL	DEL CAFÉ	SAN VICENTE DE PAUL
FERROCARRIL	FERROCARRIL	SAN VICENTE DE PAUL
OLÍMPICA	OLÍMPICA	SAN VICENTE DE PAUL
PERLA DEL OTÚN	PERLA DEL OTÚN	HOSPITAL CENTRO
UNIVERSIDAD	BOSTÓN	SAN VICENTE DE PAUL
UNIVERSIDAD	UNIVERSIDAD	HOSPITAL KENNEDY
VILLA SANTANA	VILLA SANTANA	HOSPITAL CENTRO

Fuente: El Autor

A continuación, se presenta el resumen de los dos primeros escenarios, donde varía el número de ambulancias para el modelo propuesto.

Tabla 20. Resumen Escenario 1 y 2

NÚMERO DE ESCENARIO	CANTIDAD DE AMBULANCIAS	DISTANCIA TOTAL PONDERADA (mts.min)
1	6	78336.5
2	10	63750

Fuente: El Autor

Escenario 3: Para el tercer escenario, se disminuye a solo 16 horas de servicio de ambulancias por día en el modelo propuesto.

Para este escenario, el modelo arrojó los siguientes resultados.

Figura 23. Función Objetivo - Escenario 3.

```
*****
ESCENARIO 3 - TIEMPO TOTAL DE SERVICIO DE AMBULANCIAS = 16 HORAS
*****

DISTANCIA TOTAL DE TRASLADO DE PACIENTES =          69352.1
```

Fuente: El Autor

Figura 24. Localización de Ambulancias - Escenario 3.

```
AMBULANCIA ASIGNADA A LA COMUNA i =

Y [*] :=
  2  1.0
  3  1.0
  4  1.0
  6  1.0
  9  1.0
 11  1.0
 17  1.0
 18  1.0
;
```

Fuente: El Autor

Figura 25. Asignación de Ambulancias - Escenario 3.

AMBULANCIAS ASIGNADAS A LA COMUNA i, QUE ATIENDE PACIENTES DE LA COMUNA j Y QUE LOS TRASLADA AL HOSPITAL k =			
X :=			
2	2	7	1.0
2	16	7	1.0
3	3	3	1.0
4	4	5	1.0
4	7	6	1.0
4	10	5	1.0
4	13	2	1.0
4	15	3	1.0
6	6	2	1.0
6	8	2	1.0
6	14	2	1.0
9	9	7	1.0
9	12	7	1.0
9	19	7	1.0
11	5	5	1.0
11	11	5	1.0
17	1	5	1.0
17	17	4	1.0
18	18	2	1.0
;			

Fuente: El Autor

En este escenario, tanto la distancia total ponderada de traslado como la localización y asignación de ambulancias, son iguales a las del modelo propuesto.

Escenario 4: Para el cuarto escenario, se disminuye en un 50% el promedio de llamadas por día en el modelo propuesto.

Los resultados fueron los siguientes:

Figura 26. Función Objetivo - Escenario 4.

ESCENARIO 4 - DISMINUCIÓN DEL PROMEDIO DE LLAMADAS EN UN 50 PORCIENTO	

DISTANCIA TOTAL DE TRASLADO DE PACIENTES =	34676.0

Fuente: El Autor

Figura 27. Localización de Ambulancias - Escenario 4.

```
AMBULANCIA ASIGNADA A LA COMUNA i =  
  
Y [*] :=  
2 1.0  
3 1.0  
4 1.0  
6 1.0  
9 1.0  
11 1.0  
17 1.0  
18 1.0  
;
```

Fuente: El Autor

Figura 28. Asignación de Ambulancias - Escenario 4.

```
AMBULANCIAS ASIGNADAS A LA COMUNA i, QUE ATIENDE PACIENTES DE LA COMUNA j Y QUE LOS TRASLADA AL HOSPITAL k =  
  
X :=  
2 2 7 1.0  
2 16 7 1.0  
3 3 3 1.0  
4 4 5 1.0  
4 7 6 1.0  
4 10 5 1.0  
4 13 2 1.0  
4 15 3 1.0  
6 6 2 1.0  
6 8 2 1.0  
6 14 2 1.0  
9 9 7 1.0  
9 12 7 1.0  
9 19 7 1.0  
11 5 5 1.0  
11 11 5 1.0  
17 1 5 1.0  
17 17 4 1.0  
18 18 2 1.0  
;
```

Fuente: El Autor

En este escenario, la distancia total ponderada disminuye con respecto del modelo propuesto de 69352.1 a 34676 metros.minutos, pero tanto la localización como asignación de ambulancias sigue igual.

Escenario 5: Para el quinto escenario, se aumenta en un 50% el promedio de llamadas por día en el modelo propuesto.

Los resultados fueron los siguientes:

Figura 29. Función Objetivo - Escenario 5.

```
*****
ESCENARIO 5 - AUMENTO DEL PROMEDIO DE LLAMADAS EN UN 50 PORCIENTO
*****

DISTANCIA TOTAL DE TRASLADO DE PACIENTES =      106226.0
```

Fuente: El Autor

Figura 30. Localización de Ambulancias - Escenario 5.

```
AMBULANCIA ASIGNADA A LA COMUNA i =

Y [*] :=
  2  1.0
  3  1.0
  4  1.0
  6  1.0
  9  1.0
 11  1.0
 17  1.0
 18  1.0
;
```

Fuente: El Autor

Figura 31. Asignación de Ambulancias - Escenario 5.

```
AMBULANCIAS ASIGNADAS A LA COMUNA i, QUE ATIENDE PACIENTES DE LA COMUNA j Y QUE LOS TRASLADA AL HOSPITAL k =  
X :=  
2 2 7 1.0  
2 16 7 1.0  
3 3 3 1.0  
4 4 5 1.0  
4 7 6 1.0  
4 10 5 1.0  
4 13 2 1.0  
4 15 3 1.0  
6 6 2 1.0  
6 8 2 1.0  
6 14 2 1.0  
9 9 7 1.0  
9 12 7 1.0  
9 19 7 1.0  
11 5 5 1.0  
11 11 5 1.0  
17 1 5 1.0  
17 17 4 1.0  
18 18 2 1.0  
;
```

Fuente: El Autor

En este escenario, la distancia total ponderada aumenta con respecto del modelo propuesto de 69352.1 a 106226 metros.minutos, pero tanto la localización como asignación de ambulancias sigue igual.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo, se abordó la problemática de asignación y localización de ambulancias en la ciudad de Pereira, Risaralda, considerando la minimización de la distancia total ponderada del traslado de pacientes a los diferentes hospitales que presta servicio la entidad caso de estudio. Además, se consideraron restricciones importantes como la cantidad de ambulancias disponibles y el tiempo total de servicio que presta la entidad cada día.

Con el fin de dar solución al problema de asignación y localización de ambulancias, en primer lugar, se realizó el diagnóstico del sistema de asignación y traslado de pacientes de la entidad caso de estudio, donde se determinó el número de llamadas que recibe la entidad cada día por la demanda de ambulancias, la ubicación de los hospitales y comunas a los cuales atiende cada una de las ambulancias y así realizar las respectivas matrices de distancias y tiempos de traslado de pacientes.

Una vez comprendido el funcionamiento de asignación y localización de la entidad caso de estudio y realizar el respectivo análisis de la literatura, se formuló un modelo matemático que minimiza la distancia total ponderada de atención de los pacientes, cumpliendo con el tiempo total de servicio y el número de ambulancias con las que cuenta la entidad caso de estudio.

Para la solución del problema, el modelo matemático se programó en el lenguaje de programación AMPL, y se corrió en la plataforma de NEOS bajo el solver GUROBI, obteniendo una solución óptima en un tiempo computacional de 4 segundos.

Una vez analizados los resultados arrojados por el modelo propuesto, se realizó el comparativo con la distancia total ponderada y tiempos totales de traslado de pacientes actuales de la entidad caso de estudio, evidenciando una mejora importante en estos dos parámetros. En la variable de la distancia total ponderada, pasó de un total de 155.188 metros.minutos a 69352 metros.minutos, presentando una mejora del 55%, y para el caso del tiempo, pasó de un total de 148.66 minutos a 43.48 minutos, con una mejora del 71%, comparativo que ratifica el buen desempeño del modelo propuesto frente a la problemática de la entidad caso de estudio.

Por último, se realizó el análisis de escenarios del modelo propuesto basado en 5 escenarios diferentes. El primero contempla solo una cantidad de 6 ambulancias disponibles, reflejándose un aumento de 69352.1 a 78336.5 metros.minutos en la distancia total ponderada, en el segundo escenario, se aumentó la cantidad de ambulancias a 6, observándose una disminución en la distancia total ponderada de 69352.1 a 63750 metros.minutos, para el tercer escenario, se disminuyó el tiempo total de servicio diario de las ambulancias a 16 horas, encontrando que no se modificaba ningún resultado con respecto al modelo propuesto, ya para el cuarto y quinto escenario, se disminuyó y aumento el promedio de número de llamadas por comuna en un 50%, analizando que la función objetivo aumentó y disminuyó respectivamente, pero no se

modificó la localización y asignación de ambulancias, con respecto a los resultados del modelo propuesto.

Con este tipo de trabajos, se busca fortalecer el sistema de atención prehospitalaria, disminuyendo las distancias y tiempos de recorrido por las ambulancias mejorando la eficiencia de los sistemas de emergencia de la ciudad y contribuir a la reducción de porcentaje de pérdida de vidas.

Se recomienda en investigaciones futuras, desarrollar estrategias de solución basadas en modelos de simulación y el análisis enmarcado en estrategias de relocalización y ruteo de ambulancia. Además, se sugiere contemplar dentro del modelo los tiempos de demora por tráfico y los tiempos de espera de las ambulancias. Finalmente, se sugiere para investigaciones futuras analizar el impacto en las decisiones de localización o relocalización de ambulancia considerando múltiples objetivos en conflicto y parámetros de naturaleza estocástica.

BIBLIOGRAFÍA

- Atterberg, A. (1992). Gestión coordinada de emergencias. España. Universidad Politécnica. 1992. Valencia. ES
- Antón, F. R. (2005). Logística del transporte (Vol. 10). Universidad Politécnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politécnica
- Angarita, F. (2016). Aplicación del modelo matemático de localización centro de gravedad en el área metropolitana de Bucaramanga para el plan de seguridad vial. Recuperado de: https://www.udi.edu.co/congreso/historial/congreso_2016/ponen.
- Ballou, R. H., & de Lemus, P. R. (1991). Logística empresarial: control y planificación (No. 658 B36y.). Díaz de Santos.
- Céspedes & Otros., (2009). Localización y relocalización de ambulancias del centro regulador de urgencias y emergencias de Bogotá. (Tesis de Maestría). Recuperado de: <https://www.worldcat.org/title/localizacion-y-relocalizacion-de-ambulancias-del-centro-regulador-de-urgencias-y-emergencias-de-bogota/oclc/710005037>, V. J. (2012).
- Dirección General de Tráfico en España (2011). Cuando el tiempo es vida". Tráfico y seguridad vial. España, Año XXVII, N 208, páginas 10-16.
- Doerner, K. et al. (2005). Heuristic solution of an extended double-coverage ambulance location problem for Austria. Central European Journal of Operations Research, 31.
- Gonzales., (2012). Estudio de la ubicación de vehículos en una empresa de ambulancias. (Trabajo de investigación). Recuperado de: <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/13239>
- Instituto Nacional de Estadísticas e Informática (2012). Estadísticas de Seguridad Ciudadana a marzo 2012, Perú, Página 21. <http://www.inei.gob.pe/web/BoletinFlotante.asp?file=14686.pdf>
- LA Network, (2019). Ranking Latinoamericano de ciudades fatales. Recuperado de: <http://seguridadvial.org.ve/wp-content/uploads/2018/01/CIUDADES-FATALES-FINAL.pdf>.
- Núñez et al., (2017). Modelo cuantitativo para la localización de Ambulancias de Gestión Sanitaria y su impacto en los tiempos de arribo, coordinadas por el Centro Local ECU911 Macas dentro de la provincia de Morona Santiago. (Trabajo de investigación). Ecuador. Recuperado de: <http://repo.uta.edu.ec/bitstream/123456789/26622/1/02%20GMC.pdf>
- Pinet, L. M. (2005). Atención prehospitalaria de urgencias en el Distrito Federal: las oportunidades del sistema de salud. Salud pública de México, 47(1), 64-71
- Paz., (2016). Diseño de una herramienta cuantitativa para el problema dinámico de

- localización y despacho de vehículos de emergencias médicas. (Trabajo de tesis). Santiago de Cali. Recuperado de: <http://vitela.javerianacali.edu.co/handle/11522/7832?locale-attribute=en>
- Rio et al., (2012). Modelo para la asignación de rutas de ambulancias de la empresa Health Society S.A para la prestación de servicios en Bogotá, D.C. (Trabajo de investigación). Bogotá. Recuperado de: <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/5916/EllejaldeDelRioCandyMelissa2010.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Rengifo et al., (2015). Diseño de un modelo matemático para el despacho de vehículos de emergencias médicas en Colombia. (Trabajo de investigación). Pontificia Bolivariana. Cali. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/267724805_Diseño_de_un_modelo_matemático_para_el_despacho_de_vehículos_de_emergencias_médicas_en_Colombia
- Rodríguez et al., (2015). Relocalización de vehículos de servicios de emergencias médicas. Ingeniería y Ciencia, 163-202.
- Rodríguez, (2016). Modelo de Simulación para analizar el problema de relocalización de las ambulancias de un servicio de emergencia médico (SEM). Medellín, Antioquia.
- Rojas et al., (2018). Selección de hospital destino para el traslado de urgencia de pacientes. (Artículo de investigación). Revista Gerencia y Políticas de Salud. Colombia. Recuperado de: <https://revistas.javeriana.edu.co/index.php/gerepolsal/article/view/24409/21506>
- Schmid, V., & Doerner, K. F. (2010). Ambulance location and relocation problems with time-dependent travel times. European Journal of Operational Research, 11.
- Secretaria de Salud Distrital de Bogotá (2018). (Proyecto de investigación). Recuperado de: http://www.saludcapital.gov.co/DPYS/Seguimiento%20Proyectos%202013/Proyectos_de_Inversi%C3%B3n_2018/1188_ficha_EBI_21012018.pdf
- Silvestre et al., (2019). Evaluación de la vulnerabilidad en vías con alto índice de accidentalidad. Pereira, Risaralda.
- Villegas et al., (2012). Mejoramiento de la Localización de ambulancias de atención prehospitalaria en Medellín (Colombia) con modelos de optimización. Medellín, Antioquia.

ANEXOS

Los anexos de este trabajo de grado se presentan de forma digital, y se pueden acceder con los siguientes links.

1. [CANTIDAD DE LLAMADAS POR COMUNA.](#)
2. [COORDENADAS DE BARRIOS DE PEREIRA.](#)
3. [CENTRO DE GRAVEDAD COMUNAS.](#)
4. [MATRIZ DE DISTANCIAS ENTRE COMUNAS.](#)
5. [MATRIZ DE DISTANCIAS ENTRE COMUNAS Y HOSPITALES.](#)
6. [MATRIZ DE TIEMPOS ENTRE COMUNAS.](#)
7. [MATRIZ DE TIEMPOS ENTRE COMUNAS Y HOSPITALES.](#)
8. [MODELO.](#)
9. [DATOS.](#)
10. [COMANDO – GUROBI.](#)
11. [RESULTADOS.](#)