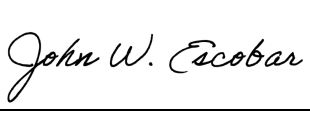
Nota de Aceptación:

Proyecto de Diseño Aprobado, en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Pontificia Universidad Javeriana Cali para optar el título de Ingeniero Industrial.

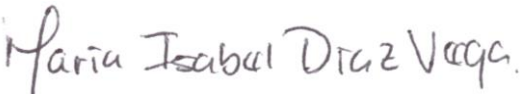
HERNÁN CAMILO ROCHA NIÑO
Decano de la Facultad de Ingeniería y Ciencias

JORGE ENRIQUE ÁLVAREZ PATIÑO
Director Carrera Ingeniería Industrial

FABIÁN ANDRÉS CASTAÑO GIRALDO
Director(a) Proyecto de Diseño



JOHN WILMER ESCOBAR VELÁSQUEZ
Jurado 1



MARÍA ISABEL DIAZ VEGA
Jurado 2

Pontificia Universidad Javeriana
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Departamento de Ingeniería Civil e Industrial
Proyecto de Diseño 2

Santiago de Cali, miércoles 9 de diciembre del 2020

Buenas tardes profesor Álvaro Figueroa.

El grupo 2020105 cuenta con mi ával para presentar su trabajo.

Cordial saludo.

Fabián Castaño

Diseño de una metodología de solución para ruteo de vehículos y asignación de personal para atención médica domiciliaria en Bogotá

Daniela Arias Castillo[a,c] , Yamily Gissela Escobar Cortez[a,c] , María Camila López Itas[a,c], Juan Felipe Riaños Ledesma[a,c]

Fabian Castaño Giraldo[b,c], Hector Fabio Bonilla[d]

[a]*Estudiante de Ingeniería Industrial*
[b]*Profesor, Director del Proyecto de Grado, Departamento de Ingeniería Civil e Industrial*
[c]*Pontificia Universidad Javeriana, Cali, Colombia*
[d]*Entidad y área donde realizó el estudio*

Resumen en español

El problema de ruteo de vehículos VRP (Vehicle Routing Problem), constituye un problema de optimización importante de transporte que determina las rutas que deben seguir los vehículos para visitar a un conjunto de clientes o nodos de interés. El objetivo principal del VRP es minimizar los costos de transporte o la distancia total de desplazamiento de los vehículos. Cuando las características y restricciones varían, se abre paso a las diferentes variantes del VRP. Este proyecto busca diseñar una metodología de solución para el ruteo y asignación de personal para la atención médica a domicilio, para la que se tuvo en cuenta variantes como OVRP, en que los vehículos no tienen que regresar al depósito una vez culminado todo su recorrido y VRPTW, en la que los clientes tienen la posibilidad de elegir el horario para sus visitas. Adicional a esto se hace una comparación del modelo inicial determinístico que es un modelo donde las mismas entradas o condiciones iniciales producirán invariablemente las mismas salidas o resultados, sin embargo, este modelo no tiene en cuenta la hora del día por lo que no es muy asertivo, a diferencia del modelo propuesto que tiene en cuenta el promedio de los tiempos de desplazamiento y a su vez tiene en cuenta la hora del día.

Palabras claves: *VRP, VRPTW, OVRP, modelo determinístico.*

Abstract (in English)

The vehicle routing problem VRP (Vehicle Routing Problem) constitutes an important transport optimization problem that determines the routes that vehicles must follow to visit a set of clients or nodes of interest. The main objective of the VRP is to minimize transportation costs or the total travel distance of vehicles. When features and restrictions vary, it makes way for different variants of the VRP. This project seeks to design a solution methodology for routing and assigning personnel for home health care, for which variants such as OVRP were taken into account, in which vehicles do not have to return to the depot after completing their entire journey and VRPTW, in which customers have the possibility to choose the time for their visits. In addition to this, a comparison of the initial deterministic model is made, which is a model where the same inputs or initial conditions will invariably produce the same outputs or results, however, this model does not take into account the time of day so it is not very assertive., unlike the proposed model that takes into account the average of travel times and in turn takes into account the time of day.

Keywords: VRP, VRPTW, OVRP, deterministic model

Tabla de contenido

I. PROJECT CHARTER 4
II. DEFINIR 6
A. Contexto y Justificación 6

B. Grupos de interés 7
C. Requerimientos 10
III. MEDIR 12
A. Casos de Prueba 12
1) Instancias 12
B. Demostrar aplicabilidad del problema en el mercado 13
C. KPI´s del proyecto. 21
IV. ANALIZAR 22
A. Análisis de oportunidad 22
B. Revisión de literatura 24
C. Exploración de ideas y selección de alternativas 27
D. Objetivos 30
E. Plan de trabajo (PdT) 31
V. DISEÑAR 31
A. Desarrollo del diseño de la solución 31
B. Validación del diseño propuesto 34
VI. VERIFICAR 36
A. Medición de los impactos 36
B. Estandarización de la solución – POE'S (plan de control) 39
C. Conclusiones 39
D. Recomendaciones 39
VII. GLOSARIO 40
VIII. REFERENCIAS 40

Índice de Tablas

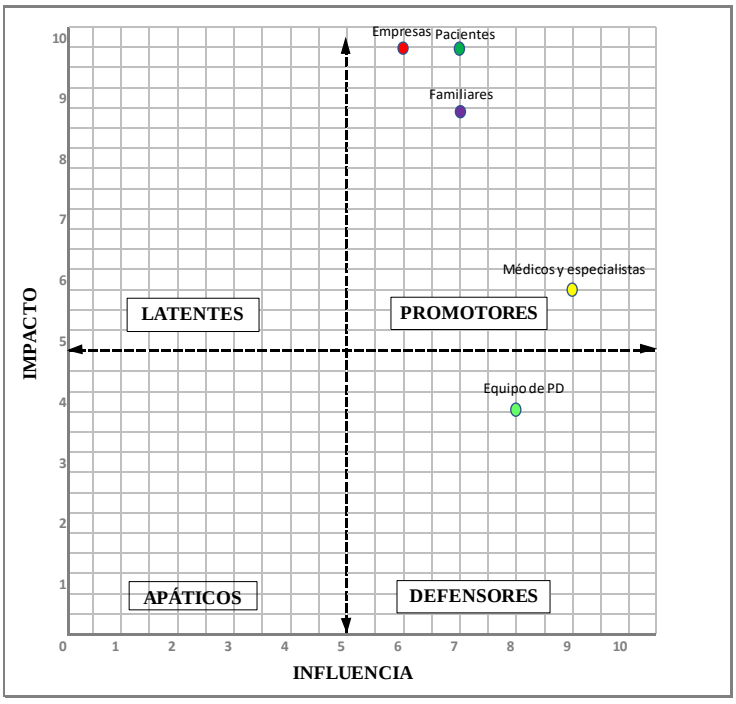
TABLA I 8
TABLA II 10
TABLA III 12
TABLA IV. 22
TABLA V 23
TABLA VI. 23
TABLA VII. 25
TABLA VIII 27
TABLA IX. 27
TABLA X 29
TABLA XI. 29
TABLA XII. PLAN DE TRABAJO 31
TABLA XIII 35
TABLA XV. TABLA DE ANEXOS 44

Índice de Figuras

Fig. 1. Distribución de la población por grupos de edad 2018 [10] 7

Fig. 2. Matriz impacto vs influencia 9
Fig. 3. Solución óptima caso de prueba 13
Fig. 4. Literatura problemas de AMD de un solo periodo [15]. 14
Fig. 5. Objetivos problemas de AMD de un solo periodo [15] 15
Fig. 6. Restricciones problemas de AMD de un solo periodo [16] 16
Fig. 7. Resultados de los métodos TS-SPBS y TS-GT [16] 17
Fig. 8. Cálculo de los tiempos de viaje en instancias de tamaño pequeño [17] 18
Fig. 9. Cálculo de los tiempos de viaje en instancias de tamaño mediano y grande [17] 19
Fig. 10. Análisis PESTEL 20
Fig. 11. Matriz DOFA 21
Fig. 12. Función lineal por partes tiempo de viaje 32

I. PROJECT CHARTER

<table>
<tr><th colspan="2">Descripción (Business case)</th><th colspan="2">Planteamiento del problema (Problem statement)</th></tr>
<tr><td colspan="2">La atención médica domiciliaria, si bien disminuye los costos por inversión en infraestructura, puede verlos incrementados como consecuencia del traslado de equipos y, particularmente el transporte del personal. Una incorrecta planeación podría implicar sobrecostos ocasionados como consecuencia de los largos desplazamientos, y en general, el tiempo no operativo. Por lo que, si no se minimiza estos tiempos de viaje, puede verse profundamente impactada la eficiencia en estas empresas. Adicionalmente, se observa que en algunas ciudades los tiempos de traslados son tan altos, que, de no considerarse apropiadamente en la logística, pueden conllevar a mucho tiempo ocioso y menos servicios por parte del personal prestador de servicios.</td><td colspan="2">Maximizar la demanda atendida, teniendo en cuenta la asignación de horarios del personal, distancias y tiempos de los desplazamientos, es de vital importancia. Por este motivo, este proyecto está dirigido para aquellas empresas prestadoras del servicio médico a domicilio, que actualmente presentan problemas con respecto a la asignación de personal médico, a los altos tiempos de desplazamiento y en el diseño de la red logística debido al aumento de la demanda por la pandemia y las restricciones que se deben de tener en cuenta para coordinar horarios de diferentes personas, distancias y tiempos entre los puntos de origen y destino.</td></tr>
<tr><th>Impacto de los actores (Stakeholder's business needs)</th><th>Restricciones</th><th>Especificaciones</th><th>Marco legal</th></tr>
<tr>
<td>Matriz Impacto vs Influencia de los grupos de interés
 
</td>
<td>- Congestión vehicular, método de transporte y demanda del personal médico.

- Comportamiento autónomo del personal médico pese a que no está siendo supervisado en una clínica u hospital

- Alta demanda de médicos y especialistas en la época de pandemia que atraviesa el país

- Depende del plan de salud con el que cuente el paciente

- Alta carga laboral

- Cantidad de médicos (generales y especialistas), enfermeros/as y auxiliares, que se tiene para ofrecer el servicio.

- Dificultad en la movilización por causa de la pandemia</td>
<td>- Asignación de horarios y recursos del personal médico, teniendo en cuenta las distancias entre el punto de partida y el destino, y tiempo de los desplazamientos en los diferentes tipos de transporte.

- Cumplimiento de los lineamientos y protocolos de la atención domiciliaria.

- Contar con personal calificado para la atención y cuidado de los pacientes.

- Dedicar el tiempo necesario para realizar un bien diagnóstico, a su vez un tratamiento oportuno y adecuado dependiendo de la necesidad de cada paciente.

- Amplia cobertura para todas las zonas de determinada localidad</td>
<td>Resolución 6408 de 2016. Artículo 26: Atención domiciliaria

Resolución 13437 de 1991. Por la cual se constituyen los comités de Ética Hospitalaria y se adoptan el Decálogo de los Derechos de los Pacientes.

Resolución 5592 de 2015. Artículos 8, 27, 68, 82: Atención domiciliaria, atención paliativa, atención para recuperación de la salud.

Resolución 6408 de 2016. Artículo 68: Atención paliativa.

Código nacional de tránsito.

Código Sustantivo del Trabajo.

Políticas privadas de la empresa restadora de servicio</td>
</tr>
<tr><th colspan="4">Indicadores de Desempeño (KPI's)</th></tr>
</table>

Variable	Actualidad	Meta
Utilización del personal médico	87,02%	>87,02%
Nivel del Servicio	100%	100%
Tiempo de Viaje	1:02	<1:02

Objetivo general (*Goal statement*)

Diseñar una metodología de solución para el problema de programación enrutamiento de personal médico con tiempos de viaje dependientes del horario, con el fin de minimizar los tiempos de viaje, tiempos ociosos y balancear la carga laboral del personal.

Objetivos específicos (*Project scope*)

1. Establecer las restricciones del problema de programación de personal y enrutamiento de vehículos con tiempos de viaje dependientes del horario mediante un estudio del estado del arte de estos problemas.
2. Seleccionar una alternativa de solución para el problema de enrutamiento de vehículos con tiempos de viaje dependientes del horario que permita cuantificar el valor de la función objetivo teniendo en cuenta las asignaciones del personal médico de acuerdo con un análisis multicriterio.
3. Desarrollar la metodología de solución en el lenguaje de programación Python soportada por softwares de optimización de alto rendimiento para el problema de programación de personal y enrutamiento de vehículos con tiempos de viaje dependientes del horario.
4. Validar los resultados de la metodología de solución por medio del cálculo de los indicadores de desempeño y comparándolos con los obtenidos con anterioridad.

Plan de Trabajo (*Project Plan*)				Equipo de trabajo (*Team members*)	
Actividad	**Fecha Inicio**	**Fecha Fin**	**Área IISE**	**Nombre**	**Rol**
Recolectar y organizar la información	27/07/2020	07/08/2020	11. Information engineering	Yamily Escobar	Information seeker
Establecer las restricciones del sistema.	03/08/2020		11. Information engineering	Camila López	Initiator
Determinar los criterios a evaluar teniendo en cuenta la literatura del TRSP.	30/05/2020	07/06/2020	11. Information engineering	Juan Felipe Riaños	Elaborator
Realizar una revisión de literatura en programación y optimización, con el fin de determinar los valores de los criterios de decisión	24/05/2020		11. Information engineering	Daniela Arias	Evaluator
Realizar el análisis multicriterio para determinar cuál es la mejor alternativa de solución.	03/06/2020		11. Information engineering	Juan Felipe Riaños	Evaluator
Identificar todos los componentes para el desarrollo de la alternativa de solución seleccionada.	08/09/2020	30/10/2020	2. Operations research and analysis	Todo el equipo	Information giver
Desarrollar la metodología de solución seleccionada teniendo en cuentas todas las restricciones del sistema.	10/09/2020		2. Operations research and analysis	Todo el equipo	Elaborators
Evaluar la metodología de solución con las instancias propuestas.	15/11/2020	23/11/2020	11. Information Engineering	Todo el equipo	Evaluators
Comparar los indicadores de desempeños obtenidos con los obtenidos en la etapa medir	18/11/2020		12. Related Topics	Todo el equipo	Evaluators

II. DEFINIR

A. Contexto y Justificación

La asignación de personal y el ruteo de vehículos es una de las actividades más importantes en la mayoría de las áreas industriales, como lo son por ejemplo el transporte, la producción y la salud [1]. Cuando estas dos actividades se unen, hacen el problema mucho más complicado, ya que no solo se debe de tomar en cuenta las restricciones para las asignaciones de personal, sino también las restricciones relacionadas con la programación de la tripulación de vehículos, las distancias y los tiempos de desplazamiento, los horarios impuestos por los clientes, entre otras. Todo lo anterior ocasiona que la toma de decisiones efectivas se torne más difícil. Lo anterior, además, se ve agravado por la limitada disponibilidad de métodos de planeación y/o modelos matemáticos que ofrezcan soluciones aceptables en términos de su aplicabilidad y costos, y que además cumplan con todas las restricciones requeridas.

Una correcta programación y asignación de actividades les permite a las empresas no solo aumentar su productividad, sino mejorar la calidad de servicio ofrecido a los clientes [2]. Un estudio realizado por TechNavio muestra que una buena programación del personal, es decir, poner a las personas en el puesto correcto, a la hora correcta y, más importante aún, realizando la tarea correcta, genera un aumento del 20% en el tiempo de atención al cliente, reduce un 6% los errores en el pago de nómina e incrementa hasta en un 5% la productividad [3].

Impulsado por las actuales transiciones demográficas, y la limitada capacidad de atención de los centros hospitalarios, en los años recientes se ha observado un creciente interés por la prestación de servicios de atención médica domiciliaria (AMD). Entre los programas de AMD hay múltiples esquemas que constituyen una estrategia efectiva y eficaz para abordar la débil cobertura del sistema de salud. La AMD sirve para evitar la estadía en el hospital que constituye una buena opción cuando las instalaciones y los equipos del hospital deben priorizarse para la atención de emergencias, pacientes con enfermedades graves o necesidades quirúrgicas. El objetivo principal de estos es proporcionar los servicios requeridos en el hogar de los pacientes, con la ventaja de permitirles continuar viviendo en su propio entorno. También se puede ver una ventaja adicional en el contexto financiero, lo que permite a las instituciones de atención médica utilizar de manera más eficiente los recursos.

En Colombia existen empresas consolidadas en la prestación de diversas modalidades del servicio de AMD. Como ejemplo, la compañía ADOM (servicios ADOM y CÍA LTDA), la cual está especializada en atención médica domiciliaria con modalidad hospitalización en casa, prestando servicios integrales de enfermería, nutrición, terapias, suministro de insumos, medicamentos y otros para la atención de pacientes crónicos, terminales y con patologías agudas. Otra empresa es ENFETER S.A, que brinda apoyo extramural de medicina, enfermería y asistencia terapéutica [4].

En el contexto actual, con fecha en octubre de 2020, la propagación del nuevo virus, SARS CoV2, que apareció por primera vez en una provincia de Hubei, ubicado en el centro de China [5], ha traído consigo un nuevo reto para estas empresas prestadoras del servicio médico a domicilio. El SARS CoV2, es una infección respiratoria que empieza con fiebre y tos seca, la cual al pasar el tiempo provoca falta de aire; en el mundo, con fecha 24 octubre de 2020, se han confirmado 42.425.115 casos y 1.147.062 muertes[6]. Según los expertos, en Colombia, habrá entre 200.000 y 400.000 muertes por COVID-19. Se espera que el número de infectados en el país sea de diez millones [7]; tomando estos datos como base, el 14% de personas podrían ser internadas en la UCI. Dada ésta situación empresas que prestan servicios de salud a domicilio, como EMERMÉDICA, entre otras, han empezado a invertir más tiempo y dinero preparándose para la crisis que asecha al país; EMERMÉDICA ha reforzado su equipo médico y asistencial para así poder atender a la creciente demanda de servicios médicos, manteniendo los estándares en los protocolos de seguridad [8].

Otro punto que se tiene en cuenta es la pirámide poblacional en la actualidad; en la Fig. 1 se puede evidenciar cómo el grueso de la población se encuentra ente los 15 y los 65 años, tanto para mujeres como para los hombres, esto evidencia que para un futuro toda esa población se concentrará en el rango de edad superior, lo que causará un aumento significativo en la demanda de los servicios de salud por aquellos adultos mayores a los que se les limitan las salidas y buscan asistencia médica en sus hogares.

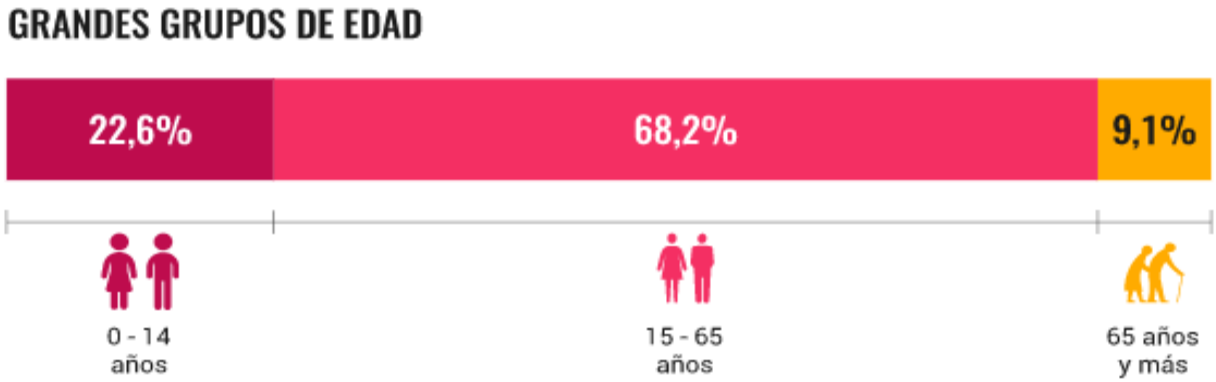


Fig. 1. Distribución de la población por grupos de edad 2018 [9]

Ahora bien, la atención médica domiciliaria puede disminuir los costos por inversión en infraestructura, pero también se pueden ver incrementados como consecuencia del traslado de equipos y el transporte del personal, esto implica que una incorrecta planeación podría ocasionar sobrecostos dados por los largos desplazamientos, y en general, el tiempo no operativo, por lo que, si no se minimiza el tiempo de viaje puede verse afectada la eficiencia en las empresas prestadoras del servicio. Adicionalmente, se observa que estos problemas se presentan en mayor proporción en ciudades en las que su parque automotor es mayor, por ejemplo; la capital colombiana registra 2’238.623 vehículos de los cuales 466.079 son motocicletas y 1’772.544 son automóviles [10], la gran cantidad de vehículos circulando en las calles ocasiona que la movilidad sea más difícil ya que se generan grandes embotellamientos.

A grandes rasgos, es un Problema de Ruteo de Vehículos (VRP) que de manera general consiste en, dado un conjunto de depósitos y clientes dispersos geográficamente y una flota de vehículos, se determina un conjunto de rutas de costo mínimo que comiencen y terminen en depósitos, para que los vehículos visiten a los clientes. Las características de los clientes, depósitos y vehículos, así como diferentes restricciones operativas sobre las rutas, dan lugar a diferentes variantes del problema [11].

Teniendo en cuenta la naturaleza y las variantes del problema que estamos considerando, se abre espacio para mencionar el Open VRP, en el que un vehículo no regresa al depósito después de terminar el servicio al último cliente en una ruta. El OVRP se encuentra actualmente en la práctica en servicios tales como la entrega a domicilio de paquetes y periódicos; en los cuales los empleados utilizan sus propios vehículos y no regresan al depósito [12].

Por este motivo, este proyecto está dirigido para aquellas empresas prestadoras del servicio médico a domicilio, que actualmente presentan problemas con respecto a la asignación de personal médico, a los altos tiempos de desplazamiento y en el diseño de la red logística debido al aumento de la demanda por la pandemia y las restricciones que se deben de tener en cuenta para coordinar horarios de diferentes personas, distancias y tiempos entre los puntos de origen y destino. Entre las principales dificultades se encuentra el diseño del ruteo, decidir la secuencia en la cual los clientes se deben visitar teniendo en cuenta las ubicaciones, las programaciones de las citas y el personal disponible y requerido. Por tal motivo es de gran importancia desarrollar un modelo capaz de diseñar de manera óptima una red, con el fin de maximizar la demanda satisfecha. Se espera que el modelo matemático propuesto funcione bajo la situación actual del país, comprobando así que su funcionamiento no se ve afectado bajo ninguna medida extrema y que funcionará bajo cualquier circunstancia y en cualquier momento que sea utilizado.

B. Grupos de interés

Los grupos de interés son personas u organizaciones que se ven afectadas o están interesadas en el desarrollo del proyecto, como el gerente, empleados, clientes, etc., de este modo, es importante identificar, describir y priorizar los grupos de interés durante el desarrollo, principalmente antes de proponer una solución a la oportunidad o necesidad para atender a los requerimientos de todos. Inicialmente se debe identificar los actores, para esto se realizó una lluvia de ideas y a partir de allí se clasificaron los grupos de interés.

Para ello se tienen en cuenta características de impacto e influencia definiendo la siguiente lista de interesados:

- Pacientes

- Familiares de los pacientes
- Médicos y especialistas
- Empresas prestadoras del servicio
- Equipo de PD1

Con la identificación de las partes interesadas, se realiza una clasificación, mediante la matriz *impacto vs influencia*, que se basa en la capacidad para efectuar cambios al planteamiento o ejecución del proyecto vs el involucramiento activo, de esta manera se establecen cuatro clasificaciones: promotores, defensores, latentes y apáticos, dependiendo del nivel de influencia e impacto que tenga sobre el proyecto, por lo tanto los promotores son quienes tienen alto impacto y alta influencia en el proyecto, de manera que se debe trabajar para ellos, los defensores tienen alto impacto pero baja influencia en el proyecto, por lo tanto se debe trabajar en conjunto con esta categoría, los latentes tienen un bajo impacto y alta influencia, a quien se debe mantener informados y no ignorarlos, finalmente la última categoría son los apáticos, quienes tienen bajo impacto y baja influencia, son a quienes se debe mantener informados con mínimo esfuerzo.

Para la asignación de puntaje en la evaluación de impacto vs influencia se tuvo en cuenta la siguiente clasificación, de acuerdo con el nivel de importancia. Estas clasificaciones fueron asignadas por el equipo de trabajo:

- 1 – 2: Muy bajo
- 3 – 4: Bajo
- 5 – 6: Medio
- 7- 8: Alto
- 9 – 10: Muy alto

A partir de la clasificación anterior en la Tabla I se presenta las partes de interés con su respectiva descripción, el efecto que tendría el proyecto en cada grupo de interés y su ponderación de acuerdo con el nivel de importancia mencionado anteriormente.

TABLA I

DESCRIPCIÓN DE PARTES DE INTERÉS Y PONDERACIÓN IMPACTO VS INFLUENCIA

PARTES INTERESADAS	DESCRIPCIÓN	EFECTO (del proyecto hacia grupos interesados)	IMPACTO	INFLUENCIA
Pacientes	Persona que sufre de dolor o malestar (enferma) que recibe los servicios de un médico u otro profesional de la salud.	Cumplimiento de los requerimientos implantados, mayor calidad en el servicio de atención, disminución de tiempo de atención.	10	7
Familiares de los pacientes	Personas que tienen lazo parental con el paciente.	Mayor calidad en el servicio de atención.	9	7
Médicos (generales y especialistas), enfermeros/as y auxiliares	Forma parte del equipo interdisciplinario que examina al paciente de manera integral.	Mejorar la calidad de atención y eficiencia	6	9
Empresas prestadoras del servicio	Compañías de salud prestadoras de servicios de atención médica a domicilio.	Aumento en las licitaciones, mayor control de las operaciones del servicio, mayor satisfacción de los clientes (pacientes).	10	6
Equipo de PD1	Estudiantes encargados de realizar el proyecto.	Mayor aprendizaje, resultados positivos.	4	8

A partir de la tabla anterior se ubicó las partes interesadas en la matriz impacto vs influencia de acuerdo con su ponderación como se muestra en la Fig. 2.

Matriz Impacto vs Influencia de los grupos de interés

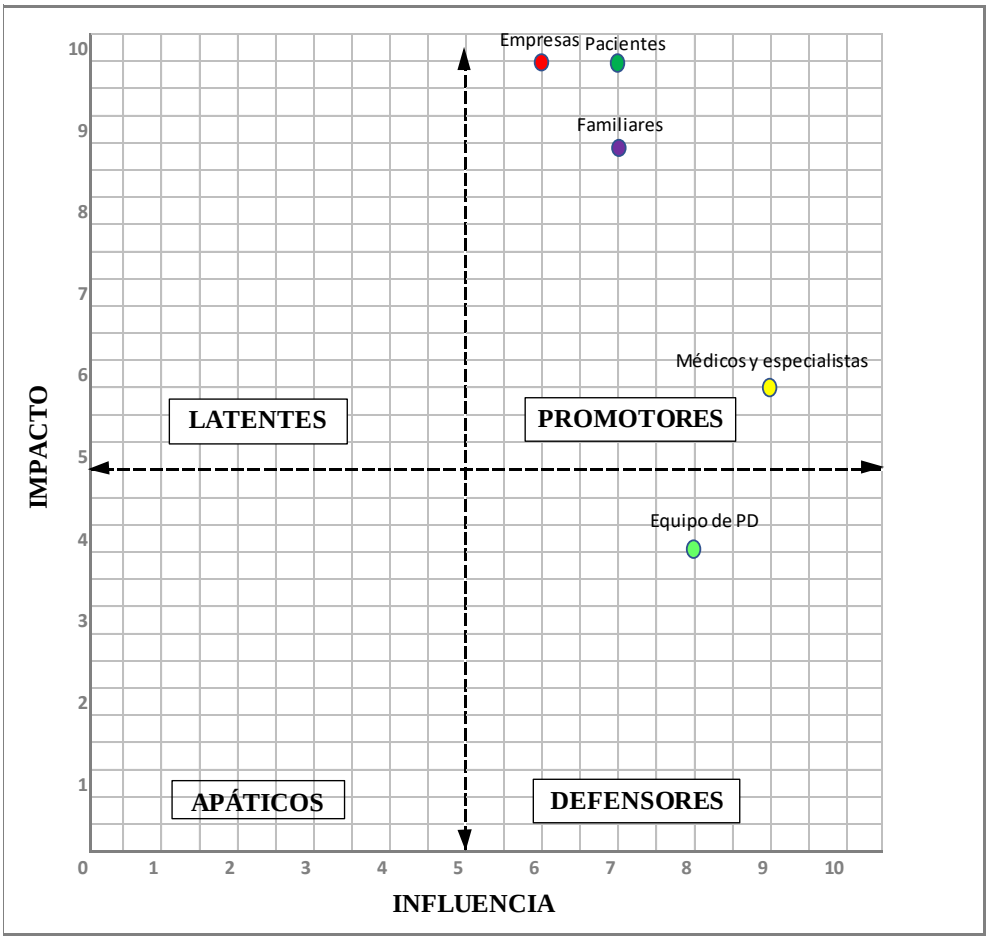


Fig. 2. Matriz impacto vs influencia

A partir de la figura anterior se concluye que es importante reportar información sobre este proyecto a:

- Empresas prestadoras del servicio
- Pacientes
- Familiares de los pacientes
- Médicos y especialistas

Así mismo, se debe trabajar en conjunto con el equipo de proyecto de diseño.

C. Requerimientos

TABLA II

REQUERIMIENTOS DE LOS ACTORES DE INTERES

GRUPOS DE INTERES	REQUISITOS DEL CLIENTE (Expectativas)	RESTRICCIONES DE DISEÑO	ESPECIFICACIONES DE DISEÑO	LEYES, NORMAS Y ESTÁNDARES	
				Legislación y requisitos aplicables	**Importancia o efecto**
Pacientes y familiares	Disponibilidad de médicos (generales y especialistas) en caso de solicitud del servicio ya sea de urgencia o por cita previa.	Congestión vehicular, método de transporte y demanda del personal médico.	Asignación de horarios y recursos del personal médico, teniendo en cuenta las distancias entre el punto de partida y el destino, y tiempo de los desplazamientos en los diferentes tipos de transporte.	**N/A**	**N/A**
	Puntualidad con las citas programadas.			**N/A**	**N/A**
	Recibir un servicio de alta calidad	Comportamiento autónomo del personal médico pese a que no está siendo supervisado en una clínica u hospital	Cumplimiento de los lineamientos y protocolos de la atención domiciliaria.	Resolución 6408 de 2016. Artículo 26: Atención domiciliaria.[13]	"La atención en la modalidad domiciliaria como alternativa a la atención hospitalaria institucional está cubierta en los casos que considere pertinente el profesional tratante, bajo las normas de calidad vigentes. Esta cobertura está dada sólo para el ámbito de la salud. En sustitución de la hospitalización institucional, conforme a la recomendación médica, las Entidades Promotoras de Salud - EPS- o las entidades que hagan sus veces, serán responsables de garantizar que las condiciones en el domicilio para esta modalidad de atención sean las adecuadas según lo dispuesto en las normas vigentes."
			Trato digno del personal médico hacia los pacientes	Resolución 13437 de 1991. Por la cual se constituyen los comités de Ética Hospitalaria y se adoptan el Decálogo de los Derechos de los Pacientes.	Mediante esta resolución se pretende priorizar la humanización en la atención a los pacientes con el fin de garantizar el mejoramiento de la calidad en la prestación del servicio de salud en las IH públicas y privadas, además, busca garantizar que todos los pacientes puedan ejercer estos derechos sin restricciones tales como: raza, sexo, edad, idioma, religión, opiniones políticas o de cualquier índole, origen social, posición económica o condición social.
		Alta demanda de médicos y especialistas en la época de pandemia que atraviesa el país	Dedicar el tiempo necesario para realizar un bien diagnóstico, a su vez un tratamiento oportuno y adecuado dependiendo de la necesidad de cada paciente.	Resolución 5592 de 2015. Artículos 8, 27, 68, 82: Atención domiciliaria, atención paliativa, atención para recuperación de la salud.	Los objetivos de los artículos mencionados de la resolución comprenden los términos y calidad de la atención domiciliaria, el cuidado especial para personas que presenten un estado de salud muy vulnerable, y por último los aspectos puntuales que se deben implementar para la recuperación de la salud.
			Contar con personal calificado para la atención y cuidado de los pacientes.		

	Precio del servicio adecuado a cada necesidad	Depende del plan de salud con el que cuente el paciente	El precio o tarifa del servicio sea adecuada dependiendo de las características de los pacientes incluyendo: tipo de servicio requerido, posición económica y condición social.	Resolución 6408 de 2016. Artículo 68: Atención paliativa.[13]	" El Plan de Beneficios en Salud con cargo a la UPC, cubre los cuidados paliativos en la modalidad ambulatoria, con internación o atención domiciliaria del enfermo en fase terminal y de pacientes con enfermedad crónica, degenerativa e irreversible de alto impacto en la calidad de vida, de conformidad con lo establecido en la Ley 1733 de 2014, con las tecnologías en salud contenidas en este Plan de Beneficios, según criterio del profesional tratante, salvo lo dispuesto en el parágrafo 4 del artículo 25 del presente acto administrativo."
				Resolución 6408 de 2016. Artículo 82: Atención para la recuperación de la salud. [13]	"El Plan de Beneficios en Salud con cargo a la UPC cubre los servicios y tecnologías para el diagnóstico, tratamiento, rehabilitación o paliación, requeridas en la atención de cualquier contingencia de salud que se presente, en la modalidad ambulatoria, hospitalaria o domiciliaria, según el criterio del profesional tratante, articulado con el enfoque de Atención Primaria en Salud —APS, según los lineamientos del Modelo Integral de Atención en Salud —MIAS- y la Política de Atención Integral en Salud —PAIS-."
Médicos (generales y especialistas), enfermeros/as y auxiliares.	Llegar a tiempo a las citas programadas	Problemas de movilización pública y/o particular	N/A	Código nacional de tránsito.	Conjunto de normas que componen el código que dan a conocer los lineamientos obligatorios que se deben seguir para el transporte y movilización vehicular seguro y legal, para así evitar amonestaciones, accidentes o algún percance dentro de las vías.
		Tráfico que se pueda presentar por congestión vehicular dado por accidentes, construcción u otros, sin ser previstas	Asignación correcta de rutas con el objetivo de evitar el tráfico vehicular y reducir la distancia que se debe recorrer	N/A	N/A
	Reducir el estrés durante el viaje para que éste no interfiera en la calidad del servicio	Clima	N/A	N/A	N/A
		Alta carga laboral	No exceder los turnos y/o horas laborares asignados	Código sustantivo de trabajo.	Conjunto de artículos cuyo principal objetivo es lograr la justicia en las relaciones que surgen entre empleadores y trabajadores, dentro de un espíritu de coordinación económica y equilibrio social.
Empresas prestadoras del servicio	Cumplir con la demanda	Cantidad de médicos (generales y especialistas), enfermeros/as y auxiliares, que se tiene para ofrecer el servicio.	Asignación correcta del personal médico a los clientes que solicitan el servicio	N/A	N/A
		Costo por nuevas tecnologías	Capacidad de un software especializado	N/A	N/A
		Política de la empresa para determinadas áreas	Amplia cobertura para todas las zonas de determinada localidad	Políticas privadas de la empresa restadora de servicio	Estas políticas definen la cobertura que tendrá la empresa para ofrecer el servicio en diferentes sectores o localidades.
	Minimizar costos	Presupuesto	Minimizar costos en la adquisición por nuevas tecnologías, flota de transporte y pago de nómina al personal médico contratado adicionalmente	N/A	N/A

Equipo de PD1	Concluir satisfactoriamente el proyecto de grado	Dificultad en la movilización por causa de la pandemia	Cumplir con los objetivos del proyecto y fechas de entrega propuestas inicialmente	N/A	N/A
		Dificultad para la comunicación entre los integrantes del grupo y el director del proyecto		N/A	N/A

III. MEDIR

A. Casos de Prueba

1) Instancias

Debido a la novedad de concepto tanto en lo académico como en lo práctico, la disponibilidad de instancias de prueba es limitada. Además, debido a las características propias de la naturaleza del problema que se desea abordar, las características de aquellas disponibles pueden diferir con respecto a las condiciones consideradas en el alcance de este proyecto. Para sobrellevar esta situación, se plantea la posibilidad de generar una base de datos de prueba simulada sobre la base de datos reales obtenidos a partir de los requerimientos del sector de la ciudad de Bogotá. El procedimiento que se utilizará consiste en obtener muestras aleatorias dentro de la base de datos, que cuenta con más de 1000 clientes, para generar conjuntos de prueba de diferentes tamaños (entre 50 y 200 clientes) que respeten las condiciones de atención establecidas. En todos los casos se asumirá que el personal de atención inicia su ruta desde una ubicación central y, posteriormente, tras realizar su recorrido, finalizan su ruta con la atención del último cliente, en otras palabras, no es necesario regresar al nodo de origen. En cada una de las instancias de prueba se utiliza un modelo predictivo para determinar los tiempos de desplazamiento entre las ubicaciones, alimentado a partir de la información consolidada en la base de datos abierta propuesta por Uber Movement [14]. La Tabla III muestra las características de las variables de entrada y de salida.

TABLA III

VARIABLES DE ENTRADAS Y SALIDAS

TIPO DE VARIABLE	VARIABLE	UTILIDAD PARA EL PROYECTO	PRESENTACIÓN
Entrada	**Cantidad de personas que solicitan el servicio j (Pj)**	Es necesaria para estimar la cantidad de personal médico que se deben contratar para suplir la demanda diaria.	[Unidades/día]
	Localización del Paciente (xy)	Requerida para la asignación del personal médico dependiendo de la ubicación del paciente, la hora de salida del especialista y hora de llegada son factores claves para la satisfacción del paciente y la estabilidad del especialista.	[Ubicación geográfica del paciente] (Coordenadas)
	TW	Como su nombre lo indica es una ventana de tiempo en la que se le permite al especialista llegar a las coordenadas dadas para prestar un determinado servicio, esto se hace con el fin de organizar la ruta que debe seguir a lo largo del día y así minimizar tanto el tiempo del recorrido como la distancia total.	Franja horaria establecida con base al requerimiento del paciente
	Cantidad de vehículos (Mj)	Se debe conocer la cantidad de vehículos disponible para el desplazamiento del personal médico.	[Unidades disponibles]
	Localización del personal médico (xy) (Depot)	Se debe conocer la ubicación en la que se encuentra el personal médico para poder programar la ruta que minimice el tiempo de transporte hasta su posible próximo nodo.	[Ubicación geográfica del paciente] (Coordenadas)
Salida	**Tiempo de servicio (TSj)**	Estimando el tiempo que un especialista se demora en prestar el servicio j se calcula la cantidad de tiempo de viaje vs el tiempo de servicio para así tener un resultado de la utilización de cada especialista.	[Hora/Paciente]

	Tiempo de viaje (TV)	El ruteo en el modelo matemático busca encontrar la ruta óptima dependiendo de la congestión vehicular a ciertas horas del día, por lo tanto, se prefiere que el tiempo de trayecto sea menor y que cumpla con los horarios establecidos.	[Tiempo recorrido]
	Hora de llegada (Hll)	La hora de llegada te debe tener en cuenta para poder calcular el tiempo de demora que tuvo el especialista (atraso).	[Hora de visita]
	Hora de salida (Hs)	Se requiere para calcular el tiempo de viaje.	[Hora en la que comienza el recorrido o termina la visita]

Para el procesamiento los datos se empleó un solucionador de hojas de cálculo de código abierto para la solución de problemas de enrutamiento de vehículos diseñado por Günes Erdogan [15]. Dicho solucionador trabaja con una metaheurística conocida bajo el nombre de *Large Neihborhood Search* (LNS) propuesta originalmente Pisinger y Ropke [16]. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla IV "Resumen del diseño de rutas para 100 clientes" (Ver en el Anexo 6)

La Fig. 3 muestra el mapa de Bogotá con las rutas obtenidas con un solucionador de hojas de cálculo de código abierto

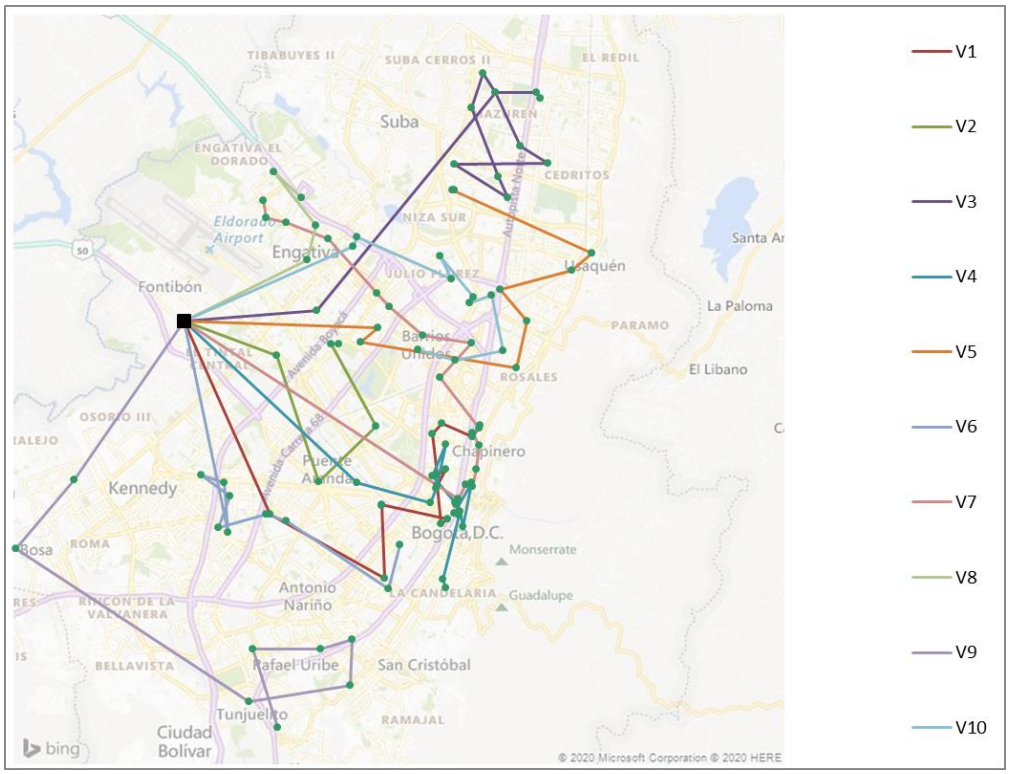


Fig. 3. Solución óptima caso de prueba

B. Demostrar aplicabilidad del problema en el mercado

Para mostrar un resumen de casos de estudios reales, se tomará como base un artículo en el cual realizan una revisión de los estudios más relevantes que se han realizado sobre el ruteo y la programación de horarios para el área de atención médica domiciliaria (ADM) alrededor del mundo.

C. Fikar and P. Hirsch [17] dividen todos los casos de estudio en dos grandes grupos, para los cuales revisan los objetivos, las restricciones y los métodos de solución para cada problema planteado.

1. Problemas de atención médica domiciliaria de un solo periodo

En los cuales el horizonte de planeación es tan solo un día laboral, en total se estudiaron 25 casos de estudio, la mayoría de los casos utilizan información suministrada por empresas prestadoras de este servicio, por lo cual la formulación de los problemas varía drásticamente, debido a las regulaciones nacionales donde se ubica cada caso. En la Fig. 4. Muestra un resumen de los

autores de cada artículo, de donde proviene la información y en qué país está ubicado para el caso particular de cada empresa; si se quiere revisar la referencia de cada autor se debe revisar las referencias del artículo de *C. Fikar and P. Hirsch* [17].

Caso	Fuente de información	País [1]
Akjiratikarl *et al.* .	Empresa ADM	UK
Allaoua *et al.* .	Generado aleatoriamente	-
Bachouch *et al.* .	Generado aleatoriamente	-
Bertels and Fahle	Generado aleatoriamente	-
Braekers *et al.*	Empresa ADM	AT
Bräysy *et al.* .	Empresa ADM	FI
Bredström and Rönnqvist	Generado aleatoriamente	-
Dohn *et al.* .	Operador aeroportuario	n.s
Eveborn *et al.*	Empresa ADM	SE
Fernandez *et al.*	Empresa ADM	UK
Fikar and Hirsch	Empresa ADM	AT
Hiermann *et al.*	Empresa ADM	AT
Hindle *et al.* .	Empresa ADM	UK
Hindle *et al.* .	Empresa ADM	UK
Lanzarone and Matta	Empresa ADM	IT
Mankowska *et al.*	Generado aleatoriamente	-
Misir *et al.* .	Empresa ADM	DK
Mutingi and Mbohwa	Generado aleatoriamente	-
Rasmussen *et al.*	Empresa ADM	DK
Redjem and Marcon	Empresa ADM	n.s
Rest and Hirsch	Empresa ADM	AT
Trautsamwieser and Hirsch	Empresa ADM	AT
Trautsamwieser *et al.*	Empresa ADM	AT
Yalçındağ.	Empresa ADM + PRV[2]	IT
Yuan *et al.* .	PRVVT	-

Fig. 4. Literatura problemas de AMD de un solo periodo [17].

La mayoría de estos problemas asumen un solo modo de transporte para que el personal médico viaje a los clientes, mientras que otros consideran la opción adicional de tomar transporte público (Hiermann et al y Rest and Hirsch). Por otro lado, Fikar and Hirsch para reducir el número de vehículos requeridos para la AMD desarrollan método metaheurístico para el sistema de transporte. En lugar de cada especialista se transporte en vehículos separados, los especialistas son transportados en un bus de la empresa prestadora del servicio ADM, esto también se puede combinar con la opción adicional de caminar si la distancia que se debe recorrer es relativamente corta, mostrando una reducción sustancial de la cantidad requerida de vehículos.

Adicionalmente, también hay autores, como Breakers et al, proponen una solución metaheurística para considerar dos o más objetivos potenciales que se encuentran en conflicto, como lo son el costo total del ruteo y el servicio al cliente. Como resultado, se le presentan múltiples soluciones a las personas que toman las decisiones de las cuales deben investigar cual es la que más se acerca a lo que busca cada uno.

Por otro lado, gran cantidad de los autores consideran información estática, es decir, toda la información se sabe de antemano, por lo tanto, no se considera la incertidumbre en la demanda o en los tiempos de servicio. Pero como en la realidad la demanda y los tiempos de servicios son estocásticos, Lanzarone y Matta, y Yuan et al. estudian cada una de estas variaciones respectivamente.

1.1. *Objetivos*

La Fig. 5. Muestra para cada caso de estudio su objetivo, donde TV es tiempo de viaje; CT costos de transporte; DV distancia del viaje; TE tiempo de espera; OT tiempo extraordinario; PR preferencia; N número de especialistas; RV violaciones de restricciones suaves; TB trabajo balanceado; T número de tareas.

Objetivo	TV	CT	DV	TE	OT	PR	N	RV	TB	T
Minimizar (min)/Maximizar (máx)	min	min	min	min	min	máx	min	min	máx	máx
Akjiratikarl *et al.* .	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-
Allaoua *et al.* .	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-
Bachouch *et al.* .	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-
Bertels and Fahle	-	X	-	-	-	X	-	X	-	-
Braekers *et al.*	-	X	-	-	X	X	-	X	-	-
Brãysy *et al.* .	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-
Bredström and Rönnqvist	X	-	-	-	-	X	-	-	X	-
Dohn *et al.* .	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X
Eveborn *et al.*	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-
Fernandez *et al.*	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-
Fikar and Hirsch	X	-	-	X	-	-	-	-	-	-
Hiermann *et al.*	X	-	-	-	X	X	-	X	-	-
Hindle *et al.* .	X	-	X	-	-	-	-	-	-	-
Hindle *et al.* .	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-
Lanzarone and Matta	-	-	-	-	X	-	-	-	X	-
Mankowska *et al.*	-	X	-	-	-	-	-	X	X	-
Mısır *et al.* .	X	-	-	X	X	X	-	X	-	-
Mutingi and Mbohwa	-	-	X	-	-	-	-	X	X	-
Rasmussen *et al.*	-	X	-	-	-	X	-	-	-	X
Redjem and Marcon	X	-	-	X	-	-	-	-	-	-
Rest and Hirsch	X	-	-	X	X	-	-	-	-	-
Trautsamwieser and Hirsch	X	-	-	X	X	X	-	X	-	-
Trautsamwieser *et al.*	X	-	-	X	X	X	-	X	-	-
Yalçındağ.	X	-	-	-	-	-	-	-	X	-
Yuan *et al.* .	-	X	-	-	-	-	X	X	-	-

Fig. 5. Objetivos problemas de AMD de un solo periodo [17]

1.2. *Restricciones*

En contraste con los objetivos, las restricciones defieren menos entre los casos revisados. Sobre a qué hora empieza el servicio, muchos autores consideran ventanas de tiempo trabajo muy estricta, es decir, no hay flexibilidad de tiempo por fuera de un tiempo especificado. Sin embargo, algunos sistemas son más flexibles en este tema, por tal motivo si se asigna una tarea por fuera de la franja horaria, el modelo penaliza la función objetivo.

La Fig. 6. Muestra para cada caso de estudio un resumen de las restricciones encontradas en cada modelo, donde FT es la franja horaria de trabajo; HR habilidades requeridas; RT regulación del tiempo trabajo; TD tiempos de descansos; PR precedencia;

SC sincronización (cuando se requiere más de un especialista); IC incertidumbre (cuando se considera la demanda y tiempos de servicios estocásticos).

Caso	FT	HR	RT	TD	PR	SC	IC
Akjiratikarl *et al.* .	X	-	X	-	-	-	-
Allaoua *et al.* .	X	X	-	-	-	-	-
Bachouch *et al.* .	X	X	X	X	-	X	-
Bertels and Fahle	X	X	X	X	-	-	-
Braekers *et al.*	X	X	X	-	-	-	-
Bräysy *et al.* .	X	-	X	-	-	-	-
Bredström and Rönnqvist	X	X	X	-	X	X	-
Dohn *et al.* .	X	X	-	-	-	X	-
Eveborn *et al.*	X	X	-	X	-	X	-
Fernandez *et al.*	-	-	-	-	-	-	X
Fikar and Hirsch	X	X	X	X	-	X	-
Hiermann *et al.*	X	X	-	-	-	-	-
Hindle *et al.* .	-	-	X	-	-	-	-
Hindle *et al.* .	-	-	X	-	-	-	-
Lanzarone and Matta	-	X	X	-	-	-	X
Mankowska *et al.*	X	X	-	-	X	X	-
Misir *et al.* .	X	X	X	-	-	-	-
Mutingi and Mbohwa	X	X	-	-	-	X	-
Rasmussen *et al.*	X	X	-	-	X	X	-
Redjem and Marcon	X	-	-	-	X	-	-
Rest and Hirsch	X	X	X	X	-	-	-
Trautsamwieser and Hirsch	X	X	X	X	-	-	-
Trautsamwieser *et al.*	X	X	X	X	-	-	-
Yalçındağ.	-	-	X	-	-	-	-
Yuan *et al.* .	X	X	X	-	-	-	X

Fig. 6. Restricciones problemas de AMD de un solo periodo [18]

Casos Mono periodo

1. **Minimización de tiempos de conducción y regulación del tiempo de trabajo** [18]

En este caso se considera la posibilidad de caminar hacia los clientes, las interdependencias, los pasos, las restricciones de asignación, así como el tiempo de trabajo obligatorio y las regulaciones de descanso. El proyecto se realizó en la Cruz Roja con un proveedor de atención médica domiciliaria en Austria, la mayoría de las enfermeras operan vehículos separados, lo que conduce a costos fijos operativos bajo uso del vehículo.

Se aplica un procedimiento para la planificación diaria de proveedores de ADM que operan múltiples vehículos para entregar enfermeros a los hogares de los clientes y recogerlos cuando finalice el servicio. El problema se define como DARP (Marcar un problema de viaje), el objetivo es minimizar el tiempo de conducción de los vehículos y el tiempo de trabajo de todas las enfermeras considerando las pautas obligatorias de descanso y tiempo de trabajo, también se debe considerar que todos los trabajadores tienen que ser atendidos y que las enfermeras pueden caminar entre trabajos, por esta razón no todos los trabajos deben ser visitados por el servicio de transporte.

Enfoque de solución → Creación de rutas a pie y optimización del sistema de transporte.

Para la optimización del sistema de transporte, se probaron tres heurísticas constructivas diferentes: orientada al tiempo, ahorro secuencial y ahorro paralelo (cada recorrido contiene una sola ruta a pie con una enfermera asignada individualmente). El procedimiento de solución se prueba con 30 instancias basadas en datos del mundo real proporcionadas por la cruz roja de Austria, las enfermeras tienen que visitar a los clientes para realizar servicios de tres requisitos de calificación que varían desde asistencia de limpieza hasta tratamientos médicos; además, se investigan dos distribuciones geográficas (urbana y suburbana) U y S respectivamente.

Las matrices de duración para caminar y conducir se calculan ArcGIS Network con Analyst y se basan en datos de OpenStreetMap, con una velocidad de caminata de 3.6 km/h. Todas las duraciones se dan en minutos y se redondean al siguiente valor entero. Para construir las soluciones iniciales cada subproceso ejecuta 75 ejecuciones de la heurística de ahorro sesgada al azar.

Resultados

Se comparan dos resultados del procedimiento de solución:

TS-SPBS: utiliza la participación y la modificación heurística de ahorro aleatorio sesgado. Este se construye agregando todas entregas y recogidas en un vehículo en un recorrido gigante ordenado por ei, que permite un procedimiento de búsqueda más amplio.

TS-GT: comienza únicamente con rutas de una sola parada, iniciando localmente en un área prometedora del espacio de solución.

A partir de la Fig. 7, se puede decir que TS-SPBS es mejor que TS-GT para este caso, ya que funciona con instancias amplias que permite encontrar un adecuado WR. Si los trabajos se agrupan por áreas urbanas se facilita la asignación de enfermeras que en lugar de conducir van a caminar. En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos a partir del estudio.

Computational results. Bold values indicate the lowest (best) values.

Instance	TS-SPBS		TS-GT		Min ± (%)[a]
	Min (min)	Mean (min)	Min (min)	Mean (min)	
U1-n75-k2-m12-8-4	**521**	538.2	551	574.3	−5.44
U2-n75-k2-m12-8-4	**532**	543.3	560	571.9	−5.00
U3-n75-k2-m12-8-4	**526**	539.4	551	570.1	−4.54
U4-n75-k2-m12-8-4	**539**	546.0	552	568.4	−2.36
U5-n75-k2-m12-8-4	**571**	582.5	593	607.0	−3.71
U1-n100-k2-m16-10-6	**702**	708.8	732	770.5	−4.10
U2-n100-k2-m16-10-6	**707**	717.8	734	771.0	−3.68
U3-n100-k2-m16-10-6	**700**	710.6	743	768.1	−5.79
U4-n100-k2-m16-10-6	**690**	698.4	725	744.3	−4.83
U5-n100-k2-m16-10-6	**736**	742.8	755	794.1	−2.52
U1-n125-k2-m20-12-8	**817**	828.1	885	910.0	−7.68
U2-n125-k2-m20-12-8	**834**	846.8	897	920.1	−7.02
U3-n125-k2-m20-12-8	**838**	846.7	896	945.5	−6.47
U4-n125-k2-m20-12-8	**817**	830.1	857	913.1	−4.67
U5-n125-k2-m20-12-8	**791**	804.7	876	920.9	−9.70
S1-n75-k2-m12-8-4	826	832.4	**825**	854.8	0.12
S2-n75-k2-m12-8-4	**755**	771.0	767	791.1	−1.56
S3-n75-k2-m12-8-4	**793**	806.7	799	827.9	−0.75
S4-n75-k2-m12-8-4	**792**	804.7	822	854.8	−3.65
S5-n75-k2-m12-8-4	**821**	839.9	857	872.7	−4.20
S1-n100-k2-m16-10-6	**1027**	1038.4	1080	1102.3	−4.91
S2-n100-k2-m16-10-6	**998**	1011.7	1064	1089.1	−6.20
S3-n100-k2-m16-10-6	**1039**	1055.2	1109	1132.3	−6.31
S4-n100-k2-m16-10-6	**983**	998.1	1045	1067.7	−5.93
S5-n100-k2-m16-10-6	**1096**	1110.1	1171	1205.9	−6.40
S1-n125-k2-m20-12-8	**1224**	1233.3	1304	1346.3	−6.13
S2-n125-k2-m20-12-8	**1185**	1209.7	1253	1300.0	−5.43
S3-n125-k2-m20-12-8	**1201**	1243.5	1321	1362.4	−9.08
S4-n125-k2-m20-12-8	**1225**	1244.5	1274	1324.5	−3.85
S5-n125-k2-m20-12-8	**1213**	1231.7	1326	1358.0	−8.52

Fig. 7. Resultados de los métodos TS-SPBS y TS-GT [18]

Conclusión

Los desafíos recientes a los que se enfrentan los proveedores de servicios a domicilio requieren conceptos de transporte innovadores para proporcionar altos niveles de servicio, se desarrolló una matemática para la planificación diaria de los sistemas de transporte de servicio a domicilio del mundo real, este procedimiento ayuda a los responsables de la toma de decisiones a investigar el impacto de implementación y que el número de vehículos puede reducirse sustancialmente.

2. Técnica de regresión de Kernel [19]

Teniendo a consideración la minimización de los tiempos de viaje, esos autores usan una la técnica especificada como Regresión Kernel, que reconoce una solución óptima del problema de asignación del personal médico de acuerdo con los atributos del paciente, que bien se menciona en el documento. Muchos de los casos generan un impacto negativo en la asignación, ya que puede obligar al personal médico a realizar rutas más largas, lo que aumentaría su carga de trabajo asignada, y la idea principal de esta técnica es nivelar la carga para todos sus trabajadores. Pero considerar a nivel de asignación los tiempos de viaje del cuidador como resultado de un problema de minimización del tiempo de viaje (que incluye solo las ubicaciones geográficas) probablemente conduciría a decisiones no óptimas, por esta razón, no solo entra el factor "tiempos de viaje" a tomar relevancia, sino que, los tiempos de visita y las habilidades requeridas para brindar el servicio a un paciente específico se incluyen dentro del método para encontrar soluciones óptimas en un problema domiciliario mono período.

Para dar solución al problema, se parte de una cantidad finita de pacientes que se atienden en un día particular por medio de un método no paramétrico ya mencionado, que es la regresión del núcleo para calcular los tiempos de viaje reales teniendo como referencia una información histórica de ruteo de cada paciente. Lo que se busca en la solución a este problema es comparar el rendimiento del estimador propuesto y mostrar las mejoras logradas en comparación con el AV y las técnicas de regresión de kNN basadas en datos. En adición a esto, para la minimización de los tiempos de viaje por medio del método, se buscó establecer la comparación de dos modelos. El primero de ellos es un enfoque de dos etapas que resuelve secuencialmente los problemas de asignación y el enfoque simultáneo, que es teóricamente el más preciso para resolver la asignación y el enrutamiento, ya que se hace al tiempo y no de forma secuencial. El propósito es demostrar que el uso del método propuesto conduce a resultados tan buenos como el enfoque simultáneo.

Para la solución óptima al problema de ruteo de vehículos (VRP, por siglas en inglés), se tuvo en cuenta los resultados en la evaluación de instancias de menor tamaño, que en otras palabras incluye un modelo de 15-25 pacientes y de 3 a 8 cuidadores. En la Fig. 8 se presenta los resultados de las instancias de tamaño pequeño.

Resultados

Instance	Two-stage KR			Simultaneous (GA)			Simultaneous (CPLEX)		
	T(*KR*)	B(*KR*)	Z_{KR}	T(*VRP*)	B(*VRP*)	Z_{VRP}	T(*VRP*)	B(*VRP*)	Z_{VRP}
A.1	37.59	0.021	0.581 ± 0.0000	37.59	0.021	0.581 ± 0.0000	37.59	0.021	0.581
A.2	68.71	0.022	0.742 ± 0.0007	68.57	0.023	0.742 ± 0.0001	68.55	0.022	0.742
A.3	55.44	0.013	0.647 ± 0.0011	54.84	0.013	0.646 ± 0.0006	54.64	0.013	0.646
A.4	68.23	0.016	0.573 ± 0.0041	63.62	0.018	0.563 ± 0.0000	63.62	0.018	0.563
A.5	99.43	0.019	0.535 ± 0.0016	98.61	0.019	0.533 ± 0.0003	98.32	0.019	0.533
B.1	284.92	0.067	1.308 ± 0.0298	261.14	0.057	1.250 ± 0.0050	260.22	0.061	1.249
B.2	332.43	0.053	1.435 ± 0.0235	322.22	0.055	1.402 ± 0.0058	320.85	0.059	1.399
B.3	383.41	0.042	1.503 ± 0.0465	354.43	0.045	1.426 ± 0.0107	352.27	0.049	1.420
B.4	678.20	0.177	2.068 ± 0.0534	626.62	0.157	1.932 ± 0.0096	613.55	0.160	1.906
B.5	605.28	0.122	1.981 ± 0.0394	582.58	0.134	1.917 ± 0.0172	573.63	0.149	1.896

Fig. 8. Cálculo de los tiempos de viaje en instancias de tamaño pequeño [19]

e hizo la evaluación de instancias de tamaño medio y grande, que incluye 5 diferentes instancias medias (A.6-A.10), que tiene 56 pacientes y 7 cuidadores. Y, por otra parte, maneja instancias de tamaño grande (A.11-A.15), que está compuesta por 150 pacientes y 15 cuidadores. En la Fig. 9 se presenta los resultados de las instancias de tamaño mediano y grande.

Instance	Two-stage KR			Simultaneous (GA)		
	T(*KR*)	B(*KR*)	Z_{KR}	T(*VRP*)	B(*VRP*)	Z_{VRP}
A.6	70.86	0.020	0.851 ± 0.0031	66.05	0.022	0.845 ± 0.0014
A.7	81.50	0.017	0.865 ± 0.0058	77.83	0.010	0.857 ± 0.0026
A.8	79.07	0.018	0.862 ± 0.0044	74.52	0.014	0.854 ± 0.0016
A.9	73.13	0.024	0.857 ± 0.0052	66.17	0.021	0.845 ± 0.0016
A.10	72.19	0.022	0.853 ± 0.0035	68.20	0.025	0.848 ± 0.0018
A.11	214.52	0.028	1.192 ± 0.0090	181.57	0.029	1.157 ± 0.0064
A.12	206.95	0.026	1.184 ± 0.0098	165.34	0.027	1.138 ± 0.0065
A.13	207.51	0.026	1.183 ± 0.0105	166.90	0.029	1.140 ± 0.0085
A.14	207.71	0.022	1.183 ± 0.0105	162.87	0.026	1.134 ± 0.0049
A.15	209.35	0.025	1.185 ± 0.0075	171.35	0.028	1.144 ± 0.0079

Fig. 9. Cálculo de los tiempos de viaje en instancias de tamaño mediano y grande [19]

Conclusión

Sintetizando, el método es aplicado y trabaja de forma efectiva en la solución de un problema de asignación de AMD. El uso de la técnica KR es prometedor para las organizaciones de AMD donde el número de pacientes y cuidadores puede ser significativo y los problemas de asignación y enrutamiento tienen diferentes escalas de tiempo, en donde las listas de tareas de los cuidadores se recopilan semanalmente y las rutas se definen a diario. Como puede evidenciarse en las instancias de tamaño pequeño, mediano y grande, la minimización de los tiempos es muy aproximado en los modelos de dos etapas y de forma simultánea, teniendo en cuenta que, para el modelo de dos etapas, se usa el método de regresión de núcleo (KR, siglas en inglés) y para el modelo simultáneo es el método GA y CPLEX. Por ejemplo, si se observa la Fig. 9 que hace referencia al test de instancias de menor tamaño, específicamente la instancia A.2, observando los tiempos designados como T(KR) para el modelo de dos etapas, y los T(VRP) para el modelo simultáneo junto con los métodos GA y CPLEX son muy precisos; sus valores son 68.71, 68.57 y 68.55 respectivamente. Claramente el tiempo esta clarificado en minutos.

Con el fin de determinar el punto de partida del proyecto se realizó un análisis PESTEL, para así poder saber cómo el entorno afecta el proyecto directamente y cómo se debe reaccionar ante cualquier complicación. Los factores para estudiar son; político, económico, social, tecnológico, ecológico y legal.

A continuación, en la Fig. 10, se muestra el análisis PESTEL.

Fig. 10. Análisis PESTEL

Por otra parte, para verificar la existencia de una oportunidad de mercado se realizó un análisis DOFA, ya que esta herramienta sirve para mostrar las debilidades, oportunidades, fortalezas y amenazas que tiene el proyecto, permitiendo tener una visión global de la situación que se tiene para tomar decisiones correctas.

A continuación, en la Fig. 11. Se presentan la matriz DOFA.

	OPORTUNIDADES	AMENAZAS
	O1. Creciente apoyo político en el cuidado de la salud.	**A1.** Crisis económica debido al aislamiento por el virus.
	O2. Decretos que apoyan el trabajo de los profesionales en salud.	**A2.** Llegada de nuevos competidores.
	O3. Iniciativas por parte del gobierno para que las personas no salgan de sus casas.	**A3.** Saturación del mercado.
	O4. Necesidad del mercado de un método de asignación y ruteo para las citas médicas.	**A4.** Realización de un proyecto de diseño en poco tiempo para su ejecución.
	O5. Aumento en la demanda de los servicios médicos en casa.	**A5.** Limitaciones al acceso de datos necesarios.
	O6. Nuevos inversionistas.	
	O7. Aumento en el interés para mantener la salud.	
FORTALEZAS	**ESTRATEGIAS FO**	**ESTRATEGIAS FA**
F1. Docentes con conocimientos en investigación de operaciones que pueden brindar asesoría en el proyecto.	**F1O7:** Ampliar el conocimiento tanto matemático como científico por medio de la lectura, exploración y consultas con docentes o personas capacitadas en el campo de investigación.	**F1A4:** Realizar intervenciones grupales para así buscar y exponer posibles soluciones a los problemas que se puedan presentar.
F2. Conocimiento acerca de la problemática actual.	**F2O4:** Desarrollar las competencias necesarias para aumentar la capacidad de innovación con el fin de lograr la satisfacción de las personas que impactará el proyecto.	**F2A1:** Actualizar constantemente los conocimientos de manera que se puedan solventar exitosamente los obstáculos que se presenten.
DEBILIDADES	**ESTRATEGIAS DO**	**ESTRATEGIAS DA**
D1. Generación de inconformidades por parte de la comunidad (pacientes).	**D1O4:** Realizar constantes monitoreos para introducir las modificaciones o cambios necesarios antes de que se presenten inconvenientes en el proyecto.	**D1A5:** Tener un plan de recolección de información para así poder evitar ciertas actividades que no le agreguen valor al desarrollo del proyecto.
D2. Incumplimiento en la programación de citas.	**O4:** Tener retroalimentaciones constantes con el director del proyecto para controlar y optimizar el comportamiento de los procedimientos.	**D2A5:** Tener una comunicación constante y de manera asertiva con los pacientes por medio de un registro en plataforma online.
D3. Asignación manual de las citas médicas a los médicos.	**D3O5:** Tener una agenda de asignaciones que refleje la disponibilidad de los médicos, especialistas y enfermeras para los pacientes de acuerdo con sus necesidades.	**D2:** Tener información adicional a la mano de acompañante de los pacientes para su pronta asignación.
D4. Diseño manual de las rutas de cada médico.	**D4:** Diseñar un plan de recolección de información de pacientes con coordenadas similares de ubicación de tal forma que el ruteo se flexible y el tiempo de viaje se minimice.	**D4A3:** Tener un plan de gestión de cronograma efectivo para pacientes que se encuentren dentro de una franja horaria muy cercana y establecer un sistema de ruteo óptimo.

Fig. 11. Matriz DOFA

C. KPI´s del proyecto.

En la tabla V. "Resumen variables para el cálculo de KPI's (Ver en el anexo 7). Se presenta un resumen de las variables necesarias para calcular los KPI's del proyecto

A continuación, en la Tabla IV se definen los indicadores de desempeño (KPI's) que servirán para cuantificar los resultados del proyecto.

TABLA IV.

KPI's DEL PROYECTO

TIPO DE VARIABLE	VARIABLE	INDICADOR	UTILIDAD PARA EL PROYECTO	ACTUALIDAD	META
KPI	Utilización del personal médico	((8-TV) /8) *100% [Porcentaje %]	Provee información sobre el éxito del proyecto ya que representa el porcentaje que tiempo que el personal médico emplea para prestar el servicio con respecto al horario laboral.	87,02%	>87,02%
	Nivel de servicio Xj	∑(Xj/Pj) *100% [Porcentaje %]	Provee información sobre el éxito del proyecto ya que representa el porcentaje de personas que están siendo atendidas con respecto a las que solicitan el servicio.	100%	100%
	Tiempo de viaje (TV)	∑(Hll-Hs) [Horas]	El ruteo en el modelo matemático busca encontrar la ruta óptima dependiendo de la congestión vehicular a ciertas horas del día, por lo tanto, se prefiere que el tiempo de trayecto sea menor y que cumpla con los horarios establecidos.	1:02	<1:02

IV. ANALIZAR

A. Análisis de oportunidad

En esta sección, se pretende mostrar que existe un problema de decisión de alta complejidad en el proyecto ya que es un caso especial del problema de enrutamiento y programación de técnicos (TRSP por sus siglas en ingles), a su vez se encuentra estrechamente relacionado con problema del agente viajero (TSP por sus siglas en ingles), el problema de ruteo de vehículos (VRP por sus siglas en inglés, caso especial del VRP) el problema de ruteo abierto de vehículos (OVRP, sus siglas en inglés) [14] y el problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo abiertas (VRPTW).

Un problema de la optimización es el fenómeno llamado explosión combinatoria, el cual significa que cuando crece el número de variables de decisión de un problema, el número de decisiones factibles y el esfuerzo computacional crecen de forma exponencial [20]; dentro de estos problemas combinatorios se encuentra el problema TSP, y por extensión el VRP, ambos clasificados como NP-Hard (problemas no lineales, difíciles de solucionar) [20]. El TRSP corresponde a un caso especial del VRP con ventanas de tiempo en el cual no se considera la capacidad, aunque la atención por parte de un técnico a diferentes clientes se ve limitada por el tiempo consumido por los desplazamientos y la duración de los servicios ofrecidos. Para agravar la situación, las ventanas de entrega limitadas implican que quienes prestan los servicios necesita cubrir mayores distancias para la misma cantidad de visitas, como se demuestra en un fenómeno comúnmente conocido como el efecto ping-pong.

El primer problema planteado tipo VRP fue el del agente viajero o TSP introducido por Flood en 1956 [21], donde un agente debe visitar cierta cantidad de ciudades en un solo viaje, de tal manera que inicie y termine su recorrido en la ciudad "origen"; el agente debe determinar la ruta que debe seguir para visitar cada ciudad una sola vez y regresar de tal manera que la distancia total recorrida sea mínima.

En sus versiones clásicas, el TSP se puede plantear en general de dos formas: simétrico y asimétrico. - Dado un conjunto de ciudades, el caso simétrico es aquel para el cual la distancia entre la ciudad i y la j es igual a la distancia entre j y la i, para cualquier i, j de las n ciudades. En contraste, en el caso asimétrico las distancias son diferentes [22], como es común que ocurra cuando los desplazamientos se dan usando una red vial urbana. Teniendo en cuenta lo anterior, la complejidad computacional aumenta cuando se tiene un TSP simétrico a un TSP asimétrico, ya que para el asimétrico se tiene el doble de combinaciones posibles que, con el simétrico, es decir, ¡se tienen (n-1)! combinaciones posibles para visitar n ciudades. En la Tabla V se muestra las combinaciones posibles de diferentes valores de n; teniendo en cuenta el grupo de instancias evaluadas en la sección anterior, base de datos con 100 clientes ubicados en la ciudad de Bogotá, se tienen como máximo $9{,}3326 \times 10^{155}$ combinaciones posibles.

TABLA V.

NÚMERO DE COMBINACIONES POSIBLES PARA LOS DOS CASOS DE TSP

n	Número combinaciones asimétrico	Número combinaciones simétrico
5	24	12
10	362880	181440
50	6,08282E+62	3,04141E+62
100	9,3326E+155	4,6663E+155

El problema de ruteo VRP fue introducido por George Bernard Dantzig y por J.H Ramser en 1959 presentando el "problema de despacho de camiones" [23], este tiene como objetivo construir rutas para una flota de vehículos con el fin de servir a un conjunto de clientes minimizando la distancia recorrida [24]. Cuando el número de clientes aumenta, las posibilidades de ruta aumentan drásticamente, haciendo que la exploración del espacio de solución sea cada vez más compleja [25], lo cual dificulta la obtención de una solución óptima.

La diferencia entre el TSP y el VRP básico, radica en el número de rutas m, ya que en el TSP de basa en una única ruta (número de vehículos s = 1), mientras que el VRP en un número s > 1 de vehículos, es decir más de una ruta; por tal motivo el TSP se entiende como una extensión del TSP.

Ahora bien, el TDVRP (time-dependent vehicle routing problem) consiste en optimizar las rutas de una flota de vehículos de capacidad fija, como el VRP, pero con la diferencia de que los tiempos de viajes son dependientes del horario [26], al tener en cuenta esta consideración hace aún más complejo la obtención de la solución óptima.

Como se mencionó previamente el TRSP corresponde a un caso particular del VRPTW en el cual la demanda de cada cliente es unitaria y la capacidad del "vehículo" es irrelevante. Es posible demostrar que, por extensión, el TRSP también se encuentra clasificado como NP-Hard, con tiempos computacionales exponencial ($O(2^n)$) [20], por esta razón se buscan de otros métodos de solución para poder resolver este tipo de problemas. Teniendo en cuenta la referencia [20], el tiempo computacional en segundos de los valores de n anteriormente, se muestra en la Tabla VI.

TABLA VI.

TIEMPO COMPUTACIONAL PARA PROBLEMAS NP-HARD

n	Tiempo computacional exponencial
5	32
10	1024
50	1,1259E+15
100	1,26765E+30

Adicional a lo anterior, cabe mencionar que el caso de VRPTW también se presenta en la asignación de personal de este problema, siendo el VRPTW un problema NP-Hard, es poco probable llegar a una solución óptima en tiempo polinomial, para la construcción de rutas utiliza algoritmos secuenciales y paralelos, su aplicación se refleja en la distribución de piezas de repuesto, en el área de materia prima con combustible, gas natural, hormigón, etc., en salud con el reparto de medicamentos y prestación del servicio de atención médico domiciliario, entre otros [27]. Este problema es abordado con frecuencia en el área de logística en trabajos relacionados con la distribución de bienes y servicios [28], el principal objetivo es encontrar rutas que permitan minimizar el número de recorridos o la cantidad de vehículos y a su vez, minimizar el tiempo total del viaje, este problema es muy frecuente en la literatura. Existen diferentes métodos exactos y heurísticos para el VRPTW, entre los métodos exactos, el de Kohl es uno de los más eficientes, ya que logró resolver una serie de 100 casos de clientes, Kohl también considera instancias en las que el tiempo de viaje es el único objetivo, y entre los métodos heurísticos más exitosos está el de Taillard que son los programas de memoria adaptativa, estos incorporan búsqueda tabú, búsqueda local guiada y búsqueda de grandes vecindarios [29].

Otro caso relevante al problema comúnmente planteado del VRP, es la especialidad del OVRP, en el que una de las principales características es que los vehículos de transporte no necesariamente regresan al depósito de partida después de entregar el servicio al cliente, y si lo hacen, se encontrarán con los mismos clientes en la ruta de entrega. También, resalta que la búsqueda de este modelo es minimizar la cantidad de vehículos con el fin de reducir costos de gasolina por distancia recorrida, y que la capacidad de estos vehículos es homogénea. Resolver el OVRP significa optimizar el número de vehículos, la distancia de viaje y tiempo de viaje de un vehículo. En tiempo, varios algoritmos como la búsqueda tabú, determinista recocido y búsqueda de vecindario se utilizaron para resolver el OVRP. Por otra parte, OVRP es un problema NP-Hard, y su solución es un desafío científico para resolver, ya que, como otros modelos de ruteo, presenta soluciones óptimas locales; más no existe una global que pueda indicar la mejor ruta maximizando una cantidad considerable de clientes. Además, la demora que genera de la solución en computo se comporta también de forma exponencial, esto, se da a medida que aumenta la cantidad de clientes. Sin embargo, la velocidad de respuesta depende de la cantidad de rutas óptimas que se puedan presentar, ya que el objetivo del OVRP es diseñar un conjunto de caminos hamiltonianos (rutas abiertas) para atender la demanda de los clientes. La entrega de comidas escolares, rutas de autobuses escolares, entrega a domicilio de paquetes y trenes de periódicos son algunos de los problemas enfrenta este tipo de modelo. [30] [31]

La diferencia más importante entre OVRP y VRP es la existencia de rutas hamiltonianas y hamiltonianas cíclicas en estos problemas, respectivamente; Rutas hamiltonianas comienzan desde un punto y terminar en otro punto, mientras que los ciclos hamiltonianos regresan al punto de partida finalmente [30]

B. Revisión de literatura

El problema de ruteo de vehículos consiste en el cumplimiento de la demanda de los clientes por medio de la asignación de vehículos a unas rutas que comienzan desde un nodo inicial (deposito), pasan por cada cliente y al finalizar la ruta regresan a ese nodo. Dentro de este problema existen dos clasificaciones [32], VRP homogéneo y heterogéneo, en el primero todos los nodos (clientes) tienen las mismas características, mientras que en el segundo las características varían (capacidad y tipo de vehículo, ventanas de tiempo y depósitos); y es dentro de estas clasificaciones que se encuentran las variantes del problema.

Para la solución de los problemas relaciones con el VRP y sus variantes existen dos grandes enfoques los cuales son los métodos exactos, aproximados y algoritmos de aproximación con garantías, estos se emplean dependiendo de la complejidad del problema planteado en cada caso. Los métodos aproximados a su vez se dividen en tres categorías que son heurístico (Técnicas constructivas de mejora y relajación), metaheurístico (Algoritmos genéticos, colonia de hormigas, entre otros) y algoritmos híbridos; éstos arrojan resultados con buenas soluciones en tiempos computacionales bajos, pero no aseguran una optimalidad global. Por otra parte, están los métodos exactos, éstos parten de la formulación, es decir, programación entera ya sea mixta o lineal, programación dinámica y programación por restricciones, todos estos arrojan resultados enteros o factibles [26].

Con el fin de conocer las principales las principales ventajas y desventajas de las metodologías de solución implementadas para resolver la problemática del VRP y sus variantes se realizó el siguiente análisis que se presenta a continuación en la Tabla VII.

TABLA VII.

CASOS DE ESTUDIO

Autor	Problema	Instancias	Método de solución	Validación	Resultados
Fredy Alexander Guasmayan-Guasmayan, Eliana Mirledy Toro Ocampo, María Janeth Bravo Montenegro, Diego Hernan Peluffo Ordoñez. 2016 [26]	TDVRP	Augerat33k6 (36 clientes y 6 rutas) Augerat34k5 (34 clientes y 5 rutas) Augerat38k5 (38 clientes y 5 rutas) Augerat60k9 (60 clientes y 9 rutas)	Algoritmo genético híbrido con gerenciamiento de población donde se considera la congestión vehicular en las vías teniendo en cuenta diferentes escenarios de la congestión vehicular en las brechas horarias pico.	La metodología se valida en la empresa Colácteos de la ciudad de San Juan de Pasto.	Los resultados obtenidos en la metodología propuesta presentan un ahorro del 34% del costo de las rutas en comparación con el método de ruteo emperico que es el que utiliza actualmente la empresa.
Fabián Castaño, Andrés F. Gutiérrez, Nubia Velasco, Ciro Amayac. 2019 [14]	TRSPDTT	Instancias sintéticas creadas a partir de datos reales de Bogotá, las cuales se caracterizan por el número de nodos(n), su ventana de tiempo, tiempo de viaje y tiempo de servicio.	Modelo de programación entera mixta (MIP) basado en un esquema de discretización y MA.	La validación de las metodologías se realizó de manera computacional en una herramienta con un procesador Intel Core i5 CPU, reloj de 1.4 GHz velocidad y 4 GB de RAM.	Si objetivo es minimizar el número de técnicos, el método MIP puede resolver de manera óptima todas las instancias con hasta 100 clientes, mientras que el MA da resultados promedio que utilizan casi la misma cantidad de vehículos que el MIP con un BPA de solo el 2%. Si el objetivo en minimizar los tiempos de viaje, servicio e inactividad, el MA supera el MI. El MIP puede ser preferido para algunas instancias pequeñas (<50 clientes) debido a sus rápidos tiempos de cómputo, el MA toma ventaja cuando aumenta el tamaño de las instancias.
José Ruiz-Meza, Isaid Montes, Arnoldo Pérez, María Ramos Márquez.2020 [33]	VRPTW multiproducto y multidepósito	Prueba iniciales (N = 6, donde Ne = {1, 2}, vehículos k = 2 y productos m = 2) e instancias reales (capacidad de los vehículos, tiempos de llegada antes, las llegadas después, el tiempo máximo de ruta, el tiempo de servicio y las demandas).	Modelo de programación lineal entera mixta. El modelo se programó usando GAMS y se resolvió obteniendo soluciones óptimas a través de la biblioteca CPLEX.	El modelo se validó en un estudio de caso de una empresa que distribuye botellas de agua y pacas, en la que se programó una nueva distribución de cronogramas de entrega por análisis de Pareto aplicado por orden.	La solución obtenida tiene una distancia óptima de 4,33 km, cumpliendo con todas las entregas en cada nodo, en un tiempo total de 30 minutos para el vehículo k1 y 33 minutos para k2, con un GAP del 0%. Obteniendo así una ruta óptima con una minimización del 35.08% de la distancia recorrida, evidenciando que hay una mejora notable con el enrutamiento propuesto por el modelo diseñado.
Daniel Soto, Wilson Soto, Yoan Pinzón. 2008 [34]	CVRP MDVRP & PVRP	An32k5 y P07 respectivamente.	Algoritmo híbrido compuesto de un algoritmo genético como clasificador y un algoritmo de colonia de hormigas como optimizador local de cada subruta. Se desarrolló una aplicación empleando el lenguaje C++ sobre el IDE Borland Turbo C++ Explorer 2006 en la que se implementa la simulación del algoritmo híbrido.	La validación fue realizada sobre una máquina computacional con procesador Intel Core2 Duo de 2Ghz y 3Gb de memoria RAM.	Para el primer caso experimental con las instancias asociadas al CVRP, la mejor solución encontrada tiene un costo de 803,6 mientras que la solución óptima tiene un costo de 784. El segundo caso experimental con las instancias asociados a la combinación de MDVRP y PVRP se encontró que la mejor solución es 923,7 mientras que la óptima tiene un costo de 885,8.
Simona Mancini [35]	TDVRP	C101-25 (costo asociado a la ruta 101, 25 clientes) C201-25 (costo asociado a la ruta 101, 25 clientes) C101-50 (costo asociado a la ruta 101, 25 clientes) C201-50 (costo asociado a la ruta 101, 25 clientes)	Se propone un enfoque heurístico de dos fases. En la primera fase, las soluciones prometedoras son construidas por una Heurística Constructiva Aleatoria Multistart (MRCH), mientras que, en la segunda fase, las rutas proporcionadas por el MRCH se utilizan como columnas para una formulación basada en el Particionamiento del Conjunto.	La validación de la metodología se realizó de manera computacional, en la primera parte, fue la heurística constructiva con un procesador i7-5500U 2.4 GHz. Y en la segunda fase, que incluía la formulación basada en particiones, la herramienta computacional fue el Solver Xpress 7.9.	La función objetivo era de minimizar el tiempo total de viaje, teniendo en cuenta una capacidad finita de vehículos con múltiples rutas para instancias de tamaño, pequeño, mediano y grande. Estos resultados muestran que, teniendo en cuenta explícitamente la congestión, se puede obtener una reducción del 9.95% del tiempo total de viaje.

Ali Asghar Rahmani Hosseinabadi1, Javad Vahidi, Valentina Emilia Balas y Seyed Saeid Mirkamali. [30]	OVRP	A-n32-k5 A-n33-k5 A-n33-k6 A-n34-k5 A-n36-k5 A-n37-k5 F-n45-k4 F-n45-k4 P-n72-k4 P-n19-k2 P-n20-k2 P-n21-k2 P-n22-k2 P-n40-k5 P-n45-k5 P-n50-k7 (n=Clientes, k =Vehículos requeridos)	Se propone un método de solución basado en el algoritmo de búsqueda local de emulación gravitacional (GELS) como estrategia para resolver el OVRP. El objetivo es encontrar el camino más corto entre clientes, reduciendo el número de vehículos y tiempo de viaje de todos los vehículos. La base del algoritmo GELS no es proceder con soluciones aleatorias, sino que empieza examinando las soluciones actuales (CU) y proporciona distintas condiciones finales que pueden completar la dirección anterior para que una iteración específica continúe contando.	El problema se validó con el lenguaje de programación C # .NET, ya que se utiliza para implementar los programas, y también los programas se ejecutan en una computadora con CPU Pentium-IV de 2.06 GHz y 6GB de RAM.	Se selecciona un intervalo de 200 a 480 clientes y no se tiene en cuenta restricciones por distancia de viaje, generando 8 resultados. (n = 200, número mínimo de vehículos necesarios = 6038.585), (n = 240, número mínimo de vehículos necesarios = 4421.885), (n = 280, número mínimo de vehículos necesarios = 7206.972), (n = 320, número mínimo de vehículos necesarios = 7244.135), (n = 360, número mínimo de vehículos necesarios = 9267.282), (n = 400, número mínimo de vehículos necesarios = 9796.370), (n = 440, número mínimo de vehículos necesarios = 9929.649), (n = 480, número mínimo de vehículos necesarios = 12004.09)
Victor Pillac, Christelle Guéret, Andrés L. Medaglia [36]	TRSP	A36-n101-k25 A36-n102-k25 A36-n201-k25 A36-n202-k25	El enfoque propuesto se basa en un algoritmo paralelo de Búsqueda adaptativa de grandes vecindarios (*pALNS*, *Siglas en inglés*) que se utiliza primero para calcular una solución inicial y luego para volver a optimizar la solución cada vez que llega una nueva solicitud de cliente. Se diseña un conjunto de recorridos de duración total mínima de modo que cada solicitud se visite exactamente una vez.	Se valida el modelo mediante una metaheurística basada en el algoritmo ALNS paralelo.	Para generar una solución comparable, se establece dos resultados, la primera es el enfoque propuesto y la segunda, es una heurística de arrepentimiento-2, que consiste en insertar nuevas solicitudes en la mejor posición posible en la solución actual, y rechazar las solicitudes que no se pueden insertar, siendo la solución inicial la misma que la utilizada en el pALNS. El enfoque propuesto ´genera una mejor solución que la heurística de arrepentimiento equivalente al 1.55% siendo esta la calidad de ruteo y 0.42 la capacidad de hacer frente a nuevas solicitudes.

Después de haber hecho la respectiva revisión de los casos en los que se emplea una metodología para resolver un problema de VRP y algunas de sus variantes, se encontró que se usan tanto las metodologías exactas como las aproximadas en la misma proporción, siendo las metaheurísticas, hasta ahora, las grandes triunfadoras en términos de tiempo computacional y calidad de solución [37]. La aplicación de éstas depende de la complejidad del problema que se aborda, los objetivos a los que se quiere llegar y el enfoque que se le desea dar, por lo que es común encontrar que cada autor hace una propuesta con respecto a las características antes mencionadas. A continuación, se presenta la tabla VIII, clarificando los métodos de solución para el posterior planteamiento de las alternativas.

TABLA VIII.

MÉTODOS DE SOLUCIÓN

Métodos de solución	Definición general	Ejemplos
Método heurístico	Son procedimientos que proporciona soluciones de aceptable calidad mediante una exploración limitada del espacio de búsqueda, parten de rutas que contienen un único nodo para encontrar el mejor nodo que representa la mejor intersección [38].	◦ Algoritmo de los ahorros ◦ Método de asignación elemental ◦ Algoritmos de ramificación y acotamiento trincados ◦ Mejoras multiruta
Método metaheurístico	Son una familia de algoritmos, se caracteriza por ser un procedimiento de búsqueda para encontrar soluciones de aceptable calidad, mediante la aplicación de operadores independientes del dominio que modifican soluciones intermediarias guiadas por la idoneidad de su función objetivo [38].	◦Algoritmos genéticos ◦ Recocido simulado ◦ Algoritmos de hormigas ◦ Búsqueda tabú
Métodos de Solución exactos	Permiten resolver problemas de optimización discreta como modelos FURD, se pueden resolver por enumeración total (evaluando cada solución factible del problema y seleccionando la mejor) [38].	◦ Métodos de búsqueda directa de árbol ◦ Programación dinámica ◦ Programación lineal y entera
Método hibrido algorítmico	Este método es la unión de dos o más algoritmos, puede ser heurísticos o incluir una parte holística, se usan para mejorar métodos y mejorar la solución final [39].	◦ Metaheurística de optimización ◦ Decodificación

C. Exploración de ideas y selección de alternativas

La base para la exploración de ideas será lo estructurado y especificado en la sección anterior, ya que de forma detallada se compararán las metodologías más relevantes en una matriz AHP (Ver Anexo 8). En efecto, se tendrá como referencia, los siguientes criterios de evaluación para la elección de la mejor alternativa en base a autores de la literatura en [26]; se encuentra en la Tabla IX que se muestra a continuación.

TABLA IX.

CRITERIOS DE CALIFICACIÓN

	Calificación		
Criterio	**1**	**2**	**3**
Tiempo del solucionador	Mucho tiempo	Tiempo Aceptable	Muy poco Tiempo
Facilidad en el Diseño del modelo	Difícil	Regular	Fácil
Precisión de los resultados	Menor grado de precisión	Medianamente preciso	Mayor grado de precisión
Tamaño de las Instancias	Pequeña N = 30 K = 4 S = 3	Mediana N = 60 K = 9 S = 8	Grande N >= 100 K = 10 S = 15

Para la selección de las posibles alternativas de solución se han tenido en cuenta algunos procedimientos metaheurísticos que se encargan de solucionar problemas VRP. Entre estos, concretamente se consideran algoritmos bioinspirados tales como los algoritmos genéticos (GA, siglas en inglés) y algoritmos de colonia de hormigas. A continuación, se explicará la funcionalidad de cada uno de estos y su adaptación al VRP. Posteriormente con base a los criterios se elegirá aquella(s) alternativa que pueda adaptarse al problema actual del proyecto.

GA:

Los algoritmos genéticos están creados a partir de las teorías de Charles Darwin sobre la evolución por selección natural y sobre los resultados de la investigación de cruce genético de Gregory Mendel. Se divide en tres etapas fundamentales [26]:

Selección: se escogen a los individuos más aptos para resolver el problema tratado.

Cruce: tiene por objetivo mezclar la información genética de los padres escogidos para dar nacimiento a nuevos individuos más aptos para resolver el problema tratado.

Mutación: se busca cambiar aleatoriamente la información genética de un individuo para tratar de darle más habilidad en resolver el problema tratado.

Finalizando todas estas fases anteriores, se procede a encontrar una solución óptima por medio de dos métodos dentro del algoritmo genético de Darwin. La función de evaluación o fitness es uno de ellos, y en la que a partir de esta función el algoritmo genético da el indicador de adaptabilidad de cada individuo, es decir, aquí cada individuo demostrará su capacidad para resolver el problema tratado. El otro método de solución es la función de diversidad, ya que puede ser desarrollada para mejorar la exploración del espacio de búsqueda del problema particular. Esta función tiene por objetivo la identificación de cada individuo para no permitirle estar dentro de la población ni en la misma generación. Es decir, con la función de diversidad se va a garantizar la unicidad de todos los individuos presentes dentro de la población en una generación determinada [26].

Algoritmo de Colonia de Hormigas (ACO, siglas en inglés):

Los algoritmos de colonias de hormigas fueron creados por Marco Dorigo y están basados en el comportamiento de las hormigas naturales. el camino más corto entre el hormiguero y la fuente de alimento, este comportamiento ha sido estudiado y se ha encontrado que las hormigas mantienen una comunicación indirecta con una sustancia volátil llamada feromona [26]. El problema del agente viajero (TSP) que consiste en encontrar el camino más corto posible entre un número variable de villas o sitios que se deben visitar y por los cuales solamente se debe pasar una sola vez y con la condición de que al final del recorrido se debe retornar al punto de origen, son ejemplos claros de algoritmos de colonias de hormigas.

Los componentes de un algoritmo de colonia de hormigas son:

Hormigas: tienen por objetivo realizar un recorrido (Ciclo Completo Cerrado) dentro del problema dado por el usuario.

Memoria de feromonas: es utilizada para tener una historia de los recorridos efectuados por las hormigas y poder cambiar la intensidad de cada posible ruta a cada nueva iteración.

Probabilidad de selección de un camino: toma de decisión de cada hormiga al momento de escoger un camino para pasar de una villa a otra. La fórmula que define la probabilidad es llamada regla de transición de estados aleatorios o regla de Bonabeau.

Por último, la solución que genera el algoritmo es especificado en la regla de Bonabeau que determina el concepto de visibilidad (la visibilidad es el número inverso de la distancia entre dos villas), relacionado con la regla de intensificación, que explica, que después de haber completado los recorridos de todas las hormigas escogidas, es necesario dejar una cantidad de feromona sobre cada arco de cada recorrido en función de la calidad de la solución encontrada para cada recorrido [26].

Con base a la literatura expuesta anteriormente, existe modelos híbridos, como se destaca en [26], donde su metodología está enfocada en problemas denominado como ruteo de vehículos dependientes del tiempo, (TDVRP), consiste en optimizar las rutas de una flota de vehículos con capacidad fija cuando los tiempos de viaje son dependientes del horario. La consideración de los tiempos de viaje dependientes de la hora del día se constituye en una herramienta valiosa en el momento de realizar la planificación del ruteo, puesto que se puede mejorar la calidad de las respuestas obtenidas, disminuyendo el costo de operaciones en el transporte y distribución de productos en una ciudad. En el caso de [26], se resuelve el TDVRP, por medio de algoritmos genético, apoyados por heurísticas que generen la población inicial de soluciones, las cuales iterativamente se mejoran hasta llegar a una solución confiable aplicada al caso particular de los sectores a los que visitan los vehículos de la empresa.

Heurística constructiva en arranque múltiple (MHRC):

Las heurísticas de arranque múltiple utilizan una solución inicial a partir de la cual explorar el espacio de solución utilizando una o múltiples estructuras de vecindarios [40]. En el caso del TSP, por ejemplo, algunos procedimientos especializados han sido diseñados a la medida, explotando este tipo de ideas para alcanzar soluciones de buena calidad eficientemente. En el caso del TSP, por ejemplo, algunos procedimientos especializados han sido diseñados a la medida, explotando este tipo de ideas para alcanzar soluciones de buena calidad eficientemente [40]. Por ejemplo, Lin y Kernighan [41] introdujeron la optimización combinatoria con una heurística de arranque múltiple en 1973 [35]. La heurística constructiva aleatoria de múltiples etapas (MRHC) tiene como objetivo construir aleatoriamente soluciones factibles. En este tipo de algoritmo, todas las alternativas viables se evalúan y tienen una probabilidad de ser elegidas, sin construir un RCL. En el MHRC, las decisiones tomadas en cada paso, como en el caso determinista, no necesariamente proporcionan la mejor solución, porque se toman, cada vez, siguiendo una regla miope. Dentro del modelo [35], Se propone un enfoque heurístico de dos fases. En las soluciones prometedoras de la primera fase están construidas por una heurística constructiva aleatoria de múltiples etapas (MRCH), mientras que, en la segunda fase, las rutas

proporcionadas por el MRCH se utilizan como columnas para una formulación basada en la partición de conjuntos. Cabe resaltar, que el modelo propuesto hace claridad en la solución a escenarios TDVRP [35].

Una segunda gran línea de estrategias de solución para problemas de ruteo como el VRP, TSP, y TRSP es el seguimiento de métodos de solución exactos Siendo dentro de estos la programación lineal y entera la que se observa más frecuentemente en la literatura. En particular, es común observar que se exploren enfoques de descomposición que separen el problema en múltiples problemas más pequeños que se pueden resolver de manera más eficiente sin perder de vista la búsqueda de una solución con garantías de optimalidad. Dentro de estas categorías encontramos que la descomposición de Dantzig-Wolfe (que se resuelve generación de columnas) [42], la descomposición de Benders, mediante algoritmos de planos cortantes, y la relajación Lagrangeana son los que aparecen con más frecuencia en la literatura [43].

Haciendo seguimiento de las posibles alternativas dependiendo de los diferentes métodos de solución (Heurísticos, Metaheurísticos, Algoritmos Híbridos y Exactos), son las que entran a marcar un factor diferenciador, y se elegirá la que tenga mayores ventajas en cuanto a los criterios de evaluación planteados anteriormente. Posteriormente, se procede a clarificar las prioridades para cada criterio de evaluación que está relacionado con el proyecto. En primer lugar, se puede observar que los dos criterios con mayor prioridad es la facilidad en el diseño del modelo y la precisión de los resultados, ya que, en la primera, se busca la practicidad en el planteamiento para generar soluciones óptimas, y en la segunda, tener precisión en las variables de salida. En segundo lugar, se tiene el tiempo del solucionador, en el que el programa tarda en resolver y encontrar una solución óptima en base a las variables de salida mencionadas anteriormente. Finalmente, se tiene el tamaño de las instancias a considerar, ya que, pues bien, se ha hablado durante toda esta fase del proyecto, que este criterio puede tornarse complejo al aumentar el número de sus variantes, tales como N, K y S para la solución del problema de ruteo domiciliario de salud. A continuación, se presenta la Tabla X de prioridades en cuanto a los criterios de evaluación.

TABLA X.

PRIORIDADES DE LOS CRITERIOS DE EVALUACIÓN

Criterios	Prioridades
Tiempo del Solucionador	18,92%
Facilidad en el Diseño del modelo	35,07%
Precisión de los resultados	35,07%
Tamaño de las Instancias	10,93%

A continuación, se presentará en la Tabla XI, la mejor alternativa para la solución al problema VRP mono-periodo.

TABLA XI.

PONDERACIONES FINALES POR ALTERNATIVA

Alternativas	Ponderaciones
Metaheurística	26,09%
MIP	25,57%
Algoritmo Híbrido	27,95%
Heurística	20,38%

Se puede Observar en la tabla anterior, que con el método de AHP en base a 4 criterios y posibles alternativas que pueden ser óptimas en materia de solución de problemas VRP especificado en este proyecto, la alternativa que tuvo la ponderación más alta fue el método Híbrido que puede incluir otros algoritmos metaheurísticos y heurísticos con un porcentaje equivalente a 27.95%. Sin embargo, en términos cuantitativos, es la más alta, pero si se quiere tener flexibilidad en cuanto acotar el diseño del modelo, Puede optarse por basarse en el método Metaheurístico que un segundo ponderado más alto, equivalente a 26.09%. De forma particular, se resalta el método exacto (MIP) el tercero más alto, ya que, teniendo la prioridad de criterios de precisión de los resultados y la facilidad en el diseño, este método cumple con estas dos, por lo tanto, entra dentro de las alternativas altas a considerar en el posterior diseño del modelo matemático.

D. Objetivos

Objetivo general:

Diseñar una metodología de solución para el problema de programación enrutamiento de personal médico con tiempos de viaje dependientes del horario, con el fin de minimizar los tiempos de viaje, tiempos ociosos y balancear la carga laboral del personal.

Objetivos específicos:

1. Establecer las restricciones del problema de programación de personal y enrutamiento de vehículos con tiempos de viaje dependientes del horario mediante un estudio del estado del arte de estos problemas.
2. Seleccionar una alternativa de solución para el problema de enrutamiento de vehículos con tiempos de viaje dependientes del horario que permita cuantificar el valor de la función objetivo teniendo en cuenta las asignaciones del personal médico de acuerdo con un análisis multicriterio.
3. Desarrollar la metodología de solución en el lenguaje de programación Python soportada por softwares de optimización de alto rendimiento para el problema de programación de personal y enrutamiento de vehículos con tiempos de viaje dependientes del horario.
4. Validar los resultados de la metodología de solución por medio del cálculo de los indicadores de desempeño y comparándolos con los obtenidos con anterioridad.

E. Plan de trabajo (PdT)

En la Tabla XII se encuentran las diferentes actividades asociadas a cada uno de los objetivos específicos y los entregables que verifican el cumplimiento de cada una de las actividades. Cada entregable tiene una fecha máxima de entrega que deberá cumplirse.

TABLA XII.
PLAN DE TRABAJO

Objetivo General						
Diseñar una metodología de solución para el problema de programación de personal y enrutamiento de vehículos con tiempos de viaje dependientes del horario, con el fin de minimizar los tiempos de viaje del personal de trabajo para empresas prestadoras del servicio médico a domicilio.						
Objetivo específico	**Actividades**	**Área IISE**	**Herramienta**	**#**	**Entregable**	**Fecha entrega**
1. Establecer las restricciones del problema de programación de personal y enrutamiento de vehículos con tiempos de viaje dependientes del horario mediante un estudio del estado del arte de estos problemas.	1.1 Recolectar y organizar la información	11. information engineering	Clasificación de la información	C	Listado de restricciones del modelo	07/08/2020
	1.2 Establecer las restricciones del sistema.	11. information engineering	Operations requirements	C		
2. Seleccionar una alternativa de solución para el problema de enrutamiento de vehículos con tiempos de viaje dependientes del horario que permita cuantificar el valor de la función objetivo teniendo en cuenta las asignaciones del personal médico de acuerdo con un análisis multicriterio.	2.1 Determinar los criterios a evaluar teniendo en cuenta la literatura del TRSP.	11. information engineering	Decision making requirements	C	Matriz de selección AHP	07/06/2020
	2.2 Realizar una revisión de literatura en programación y optimización, con el fin de determinar los valores de los criterios de decisión.	11. information engineering	Preguntas	C		
	2.3 Realizar el análisis multicriterio para determinar cuál es la mejor alternativa de solución.	11. information engineering	Multi-criteria decisión making	J		
3. Desarrollar la metodología de solución en el lenguaje de programación Python soportada por softwares de optimización de alto rendimiento para el problema de programación de personal y enrutamiento de vehículos con tiempos de viaje dependientes del horario.	3.1 Identificar todos los componentes para el desarrollo de la alternativa de solución seleccionada.	2. operations research and analysis	Modeling approaches	A	Diseño de la alternativa de solución seleccionada	30/10/2020
	3.2 Desarrollar la metodología de solución seleccionada teniendo en cuentas todas las restricciones del sistema.	2. operations research and analysis	Constrained algorithms	H		
4. Validar los resultados de la metodología de solución por medio del cálculo de los indicadores de desempeño y comparándolos con los obtenidos con anterioridad.	4.1 Evaluar la metodología de solución con las instancias propuestas.	11. information engineering	Evaluation of proposals	M	Informe de desempeño de la metodología desarrollada	23/11/2020
	4.2 Comparar los indicares de desempeños obtenidos con los obtenidos en la etapa medir	12. Related Topics	Model vs actual system	I		

V.DISEÑAR

A. Desarrollo del diseño de la solución

Las empresas de servicio médico a domicilio cada día se enfrentan al desafío de programar las rutas que los médicos deben seguir además de programar cuantos; en el presente proyecto se desarrolló un algoritmo hibrido en lenguaje *Python*, para el desarrollo del modelo se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Solo se tuvieron en cuenta aquellas citas que son programadas con anticipación.
- Se asume que todos los médicos tienen las mismas habilidades.

- Se busca que la programación de las rutas se tenga en cuenta los tiempos de desplazamiento en la ciudad.

Para tener en cuenta los tiempos de desplazamientos se implementa el modelo para predecir el tiempo en ruta de un lugar a otro desarrollado en Castaño *et al. 2020* [44] para la ciudad de Bogotá.

Una función lineal por partes para el modelado del tiempo de viaje [44]**.**

Este modelo parte de la premisa de que los tiempos de viajes se pueden representar como una función lineal por partes que representa las variaciones en el tiempo de viaje para cada intervalo de tiempo de una hora teniendo en cuenta los tiempos históricos de viaje promedio obtenidos por la plataforma de *Uber Movement* en Bogotá. Se asume que los tiempos de viaje varían linealmente entre los sucesivos puntos de ruptura, definidos como la mitad de cada uno de los intervalos de tiempo considerados que representan cambios de comportamiento en las tendencias del tráfico.

Los datos tomados de la plataforma de *Uber Movement* contienen información parcial correspondiente al tiempo promedio (y la desviación estándar) requerido para viajar entre dos puntos, se propone estimar los datos de tiempo de viaje entre puntos faltantes basándose en el método de regresión del vecino más cercano. El modelo es usado para estimar tiempos de viaje por hora para pares de ubicaciones que tienen una conexión en un intervalo de tiempo determinado. Para la implementación de este método los datos de entrada son las coordenadas de los centroides de las ubicaciones de origen y destino junto con la hora del día en que la que empieza el viaje.

La Fig. 12 muestra el gráfico de la función lineal por partes utilizada para modelar el tiempo de viaje entre dos ubicaciones durante un lapso de 24 horas.

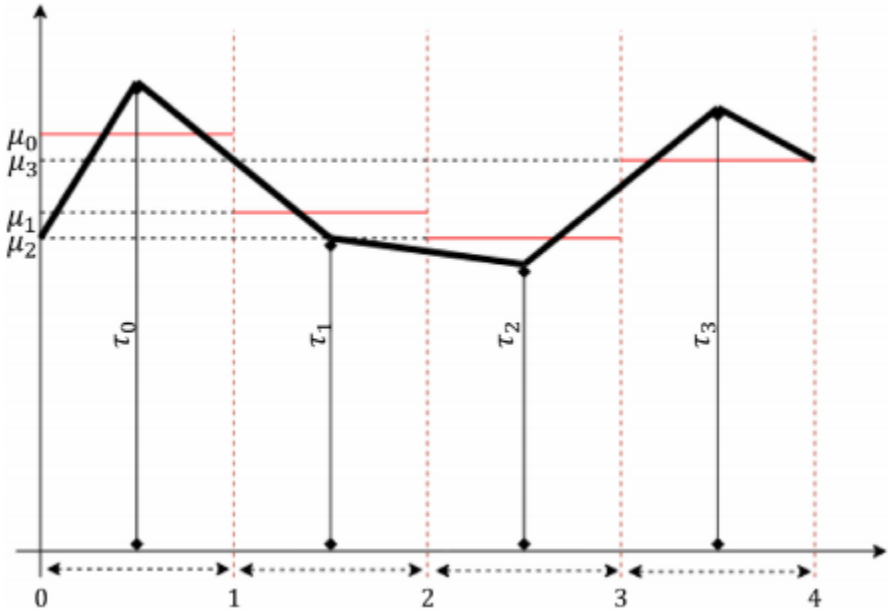


Fig. 12. Función lineal por partes tiempo de viaje [44]

.

Modelo para el ruteo propuesto

Considere un conjunto de pacientes $\mathcal{P}$ que solicitan un servicio, y son atendidos por trabajadores sanitarios. Para cada paciente, pueden estar disponibles varias opciones a ser atendidas, es decir, cada paciente propone un conjunto de fechas y períodos de tiempo en los que prefiere recibir las visitas de los trabajadores de atención. El conjunto $\mathcal{S}$ representa todas las opciones de solicitud de los pacientes (es decir, nodos), donde cada elemento $v_i\ in\mathcal{S}$ corresponde a una de las opciones propuestas por un paciente determinado. Luego, para cada paciente $p\epsilon\mathcal{P}$, $\mathcal{L}_p \subseteq \mathcal{S}$ denota el subconjunto de nodos correspondientes a los intervalos de tiempo en los que expresó estar disponible. Además, para cada nodo $v_i\ in\mathcal{S}$ hay información disponible, esto incluye ubicación geográfica $loc(v_i)$, tipo de servicio solicitado $tipo(v_i)$, fecha de solicitud $fecha(v_i)$, hora de inicio $s(v_i)$, duración $dur(v_i)$ y la información personal asociada al paciente a qué nodo v_i corresponde.

Para representar el problema, se introduce el Grafo acíclico dirigido (DAG) $G(V,\mathcal{A})$, donde $V = \mathcal{S} \cup o \cup d$ es un conjunto de nodos, o y d son nodos ficticios que imitan la función de un depósito en un problema de ruteo clásico y en este caso indican el inicio y el final del horizonte de planificación, y $\mathcal{A}$ corresponde al conjunto de arcos que representan movimientos factibles. Sea $a(v_1, v_2) \in \mathcal{A}$ un arco factible que indique que los trabajadores de cuidados del tipo $k \in calK$ pueden visitar v_1 y v_2. El arco $a(v_1, v_2)$ existe siempre que el tiempo de viaje estimado entre dos solicitudes a partir del tiempo $s(v_1) + dur(v_1)$, denotado $time(v_1, v_2, s(v_1) + dur(v_1))$, es menor que el tiempo entre ambas solicitudes $s(v_2) - (s(v_1) + dur(v_1))$.

Considere el grafo $G(V,\mathcal{A})$ generado por el algoritmo. Se usa una variable binaria x_{vivj} (5) para indicar si un trabajador sirve la solicitud v_i antes de v_j, donde $a(v_1, v_2) \in \mathcal{A}$. La variable binaria y_p (6) indica si un paciente ha sido o no visitado por una de las rutas planteadas, y sirve para establecer el Objetivo (1) que persigue maximizar el número de visitas, directamente relacionado con nivel de servicio alcanzado, considerando un número fijo de empleados $\mathcal{W}$. Luego, es posible determinar los cuidadores necesarios para satisfacer las demandas diarias mediante la adopción de un modelo entero que aprovecha la estructura de red propuesta anteriormente de la siguiente manera:

$$Maximize: \frac{1}{\mathcal{P}}\sum_{p\in\mathcal{P}} y_p \tag{1}$$

$$\sum_{v_i\in V|\exists a(v_i,v_j)} x_{v_iv_j} = \sum_{v_i\in V|\exists a(v_j,v_i)} x_{v_jv_i} \quad \forall v_j \in \mathcal{V} \setminus \{o \cup d\} \tag{2}$$

$$\sum_{v_i\in\mathcal{V}}\sum_{v_j\in\mathcal{L}_p|a(v_i,v_j)} x_{v_iv_i} = y_p \quad \forall p \in \mathcal{P} \tag{3}$$

$$\sum_{v_i\in V|\exists a(o,v_j)} x_{ov_i} \leq \mathcal{W} \tag{4}$$

$$x_{v_iv_j} \in \{0,1\}\ \forall v_i, v_j \in \mathcal{V}, k \in \mathcal{K}|\exists a^k(v_i, v_j) \tag{5}$$

$$y_p \in \{0,1\}\ \forall p \in \mathcal{P} \tag{6}$$

La ecuación (3) la restricción de integridad del viaje que asegura que el número de vehículos (trabajadores) que salen de una ubicación sea el mismo que el número que entró a esta ubicación. La ecuación (4) es la restricción que asegura que la cantidad de trabajadores que salen del nodo de partida sean menor o igual a la cantidad de trabajadores que se tienen disponibles.

B. Validación del diseño propuesto

El código se realizó y se corrió en la plataforma *Colaboratory* o "*Colab*" que ofrece *Google Research*. *Colab* permite que cualquier persona escriba y ejecute código *Python* arbitrario a través del navegador y es especialmente adecuado para el aprendizaje automático, el análisis de datos y la educación. Más técnicamente, *Colab* es un servicio de portátil *Jupyter* alojado que no requiere configuración para su uso, mientras que proporciona acceso gratuito a los recursos informáticos, incluidas las *GPU* [45].

El código recibe como parámetros de entrada:

- El archivo que contiene la información de los clientes (un número que los identifica, coordenadas de su ubicación, la duración del servicio, y las horas en las que pueden ser visitados)
- Cantidad de trabajadores
- Función lineal por partes para predecir los tiempos de viaje dentro de la ciudad de Bogotá.

En esta etapa del proyecto lo que se busca es garantizar que la propuesta de solución cumpla con los requerimientos del diseño. Esto se realiza validando el código con un grupo de 30 instancias (escenarios de demanda= cada uno con información de 100 clientes (ubicaciones y horarios de atención propuestos) para realizar las rutas para su atención. Si bien la composición de las instancias es aleatoria, construida a partir de una muestra que toma en cuenta las densidades de población de la ciudad de Bogotá, la elección 30 como total de instancias no es arbitraria. Para determinar el número de experimentos a realizar, se utilizó, inicialmente una muestra de tamaño 5 de cada una de las instancias y, a partir de esta, se determinó el tamaño de muestra deseado para alcanzar una precisión en el nivel de servicio de $\epsilon = 1\%$ en el semi-intervalo de confianza. Para esto, es necesario, que el número de replicas R cumpla la siguiente desigualdad.

$$R \geq \left(\frac{t_{1-\frac{\alpha}{2},R-1} S_0}{\epsilon}\right) \tag{7}$$

Donde S_0 corresponde a la desviación estándar para la muestra inicial.

No obstante, dado que el valor de S_0 no es constante, sino que cambia en la medida que se tienen nuevas observaciones, para cada escenario, se propone utilizar un procedimiento iterativo que se repite hasta que el intervalo de confianza alcanza la precisión especificada. Se encontró que, en la mayoría de los casos, es posible alcanzar el nivel de precisión deseado sobre las 30 réplicas. Este último valor se fijó para evaluar el nivel de servicio que se podría alcanzar con diferentes cantidades de empleados y, de paso, el tiempo en ruta de los empleados.

En la Fig. 13 se muestra el enfoque de la solución propuesta. Se sigue un procedimiento apoyado en Simulación Montecarlo, en donde se busca la cantidad de experimentos necesaria para tener un porcentaje de error determinado en las variables de salida.

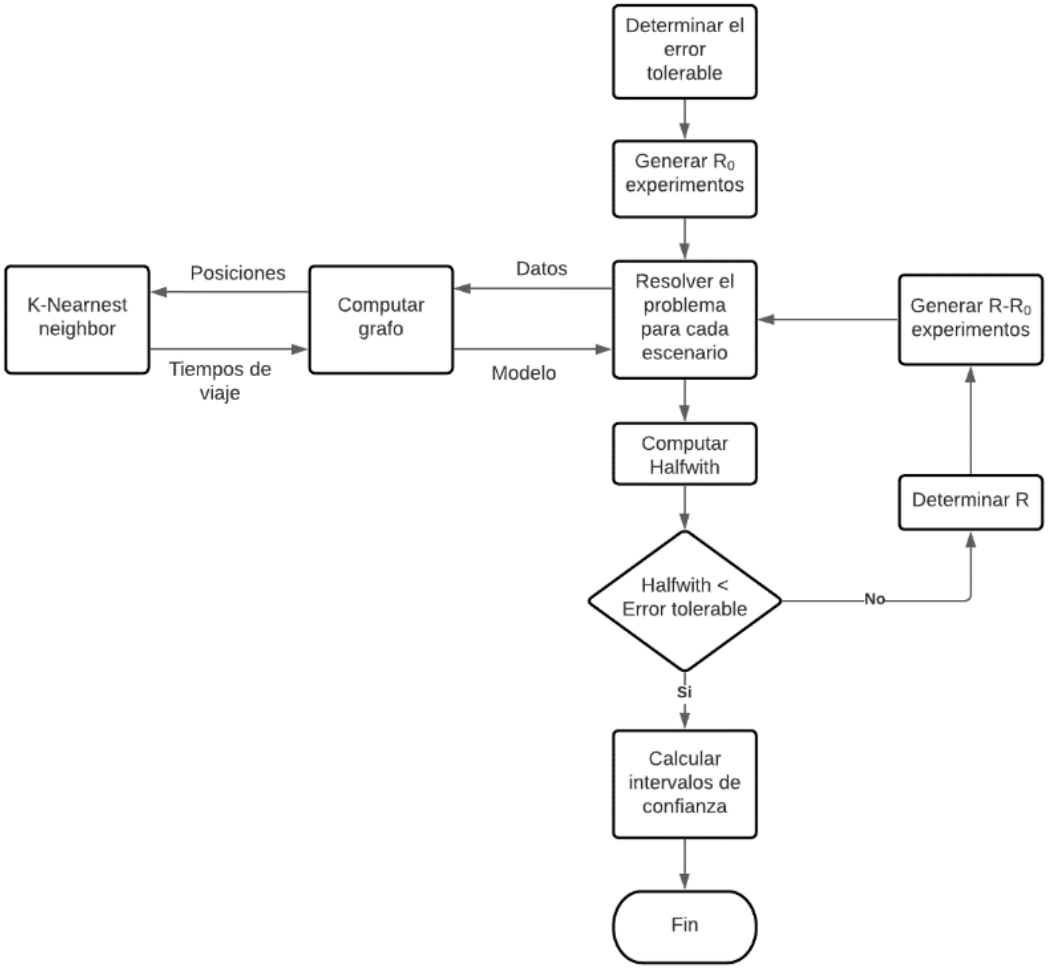


Fig. 13. Enfoque de la solución propuesta

En primer lugar, se corrió el código para determinar la cantidad de trabajadores para tener un nivel de servicio igual o superior a 95% y posteriormente se recolectó la demás información referente a los otros KPI's; los resultados obtenidos se muestran en la Tabla XIII.

TABLA XIII

RESULTADOS INTERVALOS DE CONFIANZA PARA KPI'S

KPI									
Número de trabajadores	**Intervalos de confianza para el nivel de servicio**			**Intervalos de confianza para el tiempo de viaje**			**Intervalos de confianza para utilización del personal médico**		
	Promedio	**Límite inferior**	**Límite superior**	**Promedio**	**Límite inferior**	**Límite superior**	**Promedio**	**Límite inferior**	**Límite superior**
8	87.43%	86.70%	88.16%	3:43	3:39	3:47	53,40%	52,62%	54,18%
9	94.39%	93.64%	95.14%	3:35	3:31	3:38	55,16%	54,41%	55,90%
10	99.71%	99.41%	100%	3:26	3:22	3:29	57,04%	56,38%	57,71%

De la tabla anteriores podemos concluir que con 10 trabajadores podemos conseguir con un 95% de confianza un nivel de servicio del 100%, con un tiempo promedio de viaje de aproximado tres (3) horas y veintiséis (26) minutos con un porcentaje de ocupación del 57,04%.

El tiempo de ejecución para 30 instancias cada una de 100 clientes es de 53,27 minutos, es decir que en promedio cada instancia toma alrededor de 4,0518 minutos en ejecutarse.

Los resultados obtenidos para los KPI's de tiempo de viaje y utilización del personal médico se logra concluir que las metas propuestas en la etapa medir no fueron cumplidas, esto se debe a que al procesar los datos la primera vez, el código calcula el tiempo de viaje de forma proporcional a la distancia recorrida y a una velocidad promedio, por el contrario el código propuesto en este proyecto calcula los tiempos de viaje teniendo en cuenta la hora en la que inicia el viaje, esto con el fin de tener en cuenta las congestiones que se dan a diferentes horas en la ciudad; debido a lo obtenido en el KPI del tiempo de viaje, la utilización del personar tampoco se cumplió ya que este valor se calcula a partir del tiempo en el que los trabajadores invierten en los traslados.

VI.VERIFICAR

A. Medición de los impactos

Impacto financiero y social

Para evaluar el impacto financiero generado por la implementación de la metodología de solución propuesta, se propone su comparación contra una solución que no tiene en cuenta las variaciones diarias en los tiempos de viaje, sino que los asume constantes (basados en el promedio de las horas laborables 7:00 – 18:00). El objetivo es determinar si al tomar en cuenta los tiempos de viajes dependiendo de la hora del día es posible obtener mejores resultados, se calcularon los beneficios teniendo en cuentas el precio menor y mayor de las siguientes empresas prestadoras del servicio médico a domicilio en la ciudad de Bogotá: MedicApp (***$31,179***) [46], DoctorAkí ($80,000) [47], Care24 ($75,000) [48] y Mediqugroup (***$160,000***) [49].

Con el objetivo de comparar la eficiencia de los dos métodos mencionados, se calculó el promedio de los beneficios obtenidos por la presentación del servicio para 29 instancias de 100 clientes y se utilizaron estos valores para los análisis de este apartado (ver TABLA XIV). Cabe resaltar que los beneficios promedio obtenidos para cada uno de los dos métodos son con respecto a un día de trabajo y a las personas atendidas con cada cantidad de trabajadores, es decir, el costo diario de la operación.

TABLA XIV

RESULTADOS PARA INSTANCIA DE 100 CLIENTES

Cantidad de trabajadores	**8**		**9**		**10**	
Método de solución	**Promedio de Valor mínimo**	**Promedio de Valor máximo**	**Promedio de Valor mínimo**	**Promedio de Valor máximo**	**Promedio de Valor mínimo**	**Promedio de Valor máximo**
propuesta	$ 2,726,567	$ 13,991,724	$ 2,943,746	$ 15,106,206	$ 3,109,318	$ 15,955,862
determinístico	$ 2,620,127	$ 13,445,517	$ 2,836,232	$ 14,554,482	$ 3,050,185	$ 15,652,413

Con el fin de realizar un análisis más detallado sobre los valores de los beneficios obtenidos, se calculó las diferencias, tanto numéricas como porcentuales entre los mejores resultados para una cantidad de 10 trabajadores entre el método propuesto y el determinístico mediante la ecuación (8). Con estos resultados, se logra evidenciar de manera más detallada la mejora al implementar la metodología propuesta.

$$PORCENTAJE\ DE\ VARIACIÓN = \left(\frac{beneficios\ método\ propuesto - beneficios\ método\ deterministico}{beneficios\ propuestos}\right) * 100 \quad (8)$$

Los valores obtenidos para las instancias de 100 clientes se registran en la TABLA XV.

TABLA XV

ANALISIS DE BENEFICIOS PARA UN DIA DE PLANEACIÓN

	Diferencia	**Porcentaje**	**Estado**
Propuesto - Determinístico	$ 303.448	1,90%	Mejoró

Considerando que el código se corre en la plataforma *Colaboratory* o "*Colab*", no es necesario hacer una inversión inicial para implementar la metodología propuesta, ya que es una plataforma gratuita que ofrece *Google Research*. las características del modelo permiten obtener una solución en un tiempo muy corto,

Al comparar el impacto económico de la solución propuesta contra el modelo determinístico, los valores se calculan sobre el nivel de servicio. Como consecuencia, es importante mostrar cual es la variación en este indicador entre los dos posibles modelos. La TABLA XVI muestra el nivel de servicio para cada método de solución para instancias de 100 clientes.

TABLA XVI

COMPARACIÓN NIVEL DE SERVICIO INSTANCIAS DE 100 CLIENTE

Número de trabajadores	Determinístico	Propuesto
8	84%	87%
9	91%	94%
10	98%	100%

El nivel de servicio nos permite medir el impacto social puesto que se presenta un porcentaje de mejora para 8, 9 y 10 trabajadores de 3%, 3% y 2% respectivamente. Tales resultados benefician a los pacientes puesto que los médicos pueden cumplir con el tiempo establecido de llegada a cada domicilio e incrementar la cobertura de este tipo de servicios, lo que significa que un mayor porcentaje de pacientes serán atendidos en el tiempo establecido y a su vez, los médicos podrán dedicar más tiempo a los pacientes. El sistema de salud, que tradicionalmente enfrenta déficit económico, o se considera subfinanciado, gozará de este tipo de estrategias que permitirán hacer un uso más eficiente de los recursos considerados.

Impacto ambiental

Según el Ministerio de Ambiente de Colombia, los gases de efecto invernadero (GEI) son compuestos químicos en estado gaseoso: vapor de agua, dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y dióxido nitroso (N_2O) que se acumulan en la atmósfera de la Tierra, éstos tienen la capacidad de absorber la radiación infrarroja del Sol reteniendo y aumentando el calor en la misma [50].

El dióxido de carbono (CO_2), es un gas que se produce de manera natural en cantidades normales, pero, también como producto de la combustión de biomasa mediante procesos que requieren el uso de combustibles fósiles (petróleo, gas y carbón). Desde la revolución industrial, el sector del transporte es uno de los que más hace uso de los combustibles fósiles, lo que hoy ya llevado a que sea uno de los que más aportan a la emisión de GEI a nivel nacional.

En la Fig. 14 se puede apreciar que el sector de transporte es de los que presentan mayor consumo de energía en el país, 37% E, siendo ésta mayormente proveniente de los derivados del petróleo, y su aporte a la emisión de GEI (gases de efecto invernadero) es del 12% a nivel nacional. Se presentan, también, los porcentajes de consumo de energía E y emisiones en términos de GEI (gases de efecto invernadero), de cada tipo de transporte existente en el país teniendo como mayor consumidor de energía y por consecuente emisor de GEI al subsector de transporte terrestre.

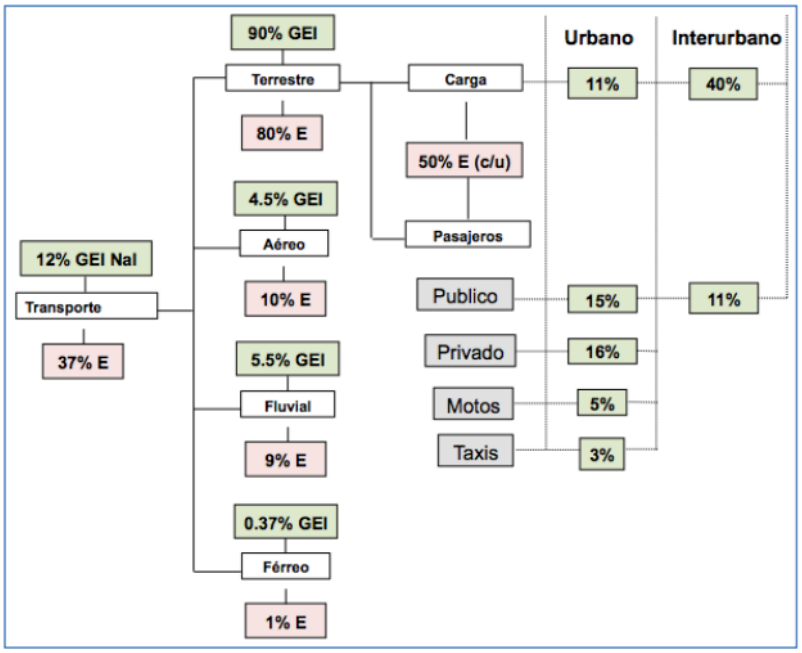


Fig. 14. Sector de transporte consumo de energía [51].

Para poder calcular la emisión promedio de CO_2 que emite un vehículo y medir la reducción del impacto negativo medioambiental gracias a la propuesta del proyecto, se utilizó la Tabla XVII que muestra la comparación entre el tiempo de viaje en horas que ocupa cada trabajador al día, y el siguiente dato: la velocidad promedio en la ciudad de Bogotá en el año 2017 fue de 21,60 km/h [52]. Adicionalmente se hicieron los siguientes supuestos: el combustible utilizado es gasolina; el consumo de gasolina de cada carro es de 0,1L/km y, por último, la emisión de CO_2 por litro consumido es 2300g CO_2/L.

TABLA XVII

COMPARACIÓN TIEMPO DE VIAJE EN HORAS INSTANCIAS DE 100 CLIENTES

Número de trabajadores (Carros)	Determinístico	Propuesto
8	3,974295462	3,728342912
9	4,262264583	3,587467007
10	4,589473264	3,44425

Después de aplicar el procedimiento para determinar el total de CO_2 emitido al día (Ver anexo 11) se llegó a los resultados que se proporcionan en la Tabla XVIII. Se observa que con la propuesta se logra reducir la emisión al día de CO_2 considerablemente, presentando la mayor reducción en el caso de diez trabajadores (carros).

TABLA XVIII

TOTAL DE CO_2 EMITIDO AL DIA

N trabajadores o carros	Tiempo de viaje en h		Disminución diaria de emisión gCO2/día	% de reducción
	Determinístico	Propuesto		
8	3,974295462	3,728342912	12.037,902	6,19%
9	4,262264583	3,587467007	37.155,704	15,83%
10	4,589473264	3,444250000	70.064,759	24,95%

B. Estandarización de la solución – POE'S (plan de control)

Teniendo en cuenta que la metodología propuesta se rige de unos pasos y acciones en específico, se decidió crear el Manual para el Ruteo de Vehículos y Asignación de personal para Atención Médica Domiciliaría para Bogotá y el formato CLIENTES (ver Anexo 18 y 20), con la finalidad de estandarizar el proceso. No obstante, se identificó una serie de acciones que se deben realizar por la empresa o el usuario que desee implementar esta metodología; teniendo en cuenta esto se creó el Manual Prerrequisitos para el Ruteo de Vehículos y Asignación de personal para Atención Médica Domiciliaría para Bogotá, el cual contiene el paso a paso los ajustes necesarios para implementar la metodología de solución. (Ver anexo 19)

C. Conclusiones

En una primera instancia, cabe resaltar que teniendo en cuenta los objetivos específicos del plan de trabajo propuesto inicialmente, se cumplió a cabalidad con todas las fechas previstas. Empezando con el primer listado de actividades, fue el establecimiento de las restricciones; este es un modelo basado en la solución a una metodología VRP, con la restricción de los tiempos dependientes de la franja horaria, en donde se encuentra la restricción de integridad del viaje que asegura que el número de vehículos (trabajadores) que salen de una ubicación sea el mismo que el número que entró a esta ubicación. Otra restricción especificada, asegura que la cantidad de trabajadores que salen del nodo de partida sean menor o igual a la cantidad de trabajadores que se tienen disponibles. Otras consideraciones que se tuvieron en cuenta fue aquellas citas que son programadas con anticipación para la estructuración de las rutas óptimas, son las que se iban a correr dentro del modelo. También, se asume en este panorama que todos los médicos tienen las mismas habilidades. Es importante mencionar, que esta metodología de solución no partía de la premisa de un modelo VRP tradicional con el objetivo de ir devuelta a su depósito o punto de partida inicial, más bien, se instaura un modelo OVRP, en la que su particularidad es no restringir el modelo a volver al punto de partida, más bien, el objetivo del OVRP es diseñar un conjunto de caminos hamiltonianos (rutas abiertas) para maximizar la demanda de los clientes.

En segunda instancia, se seleccionó una alternativa de solución para el problema de enrutamiento de vehículos con tiempos de viaje dependientes del horario que permitió cuantificar el valor de la función objetivo teniendo en cuenta las asignaciones del personal médico de acuerdo con un análisis multicriterio. Esta alternativa ganadora en base a los criterios establecidos de tiempo del solucionador, facilidad en el diseño del modelo, precisión de los resultados y tamaño de las instancias fue el algoritmo híbrido, donde reúne soluciones exactas de programación lineal en conjunto a la heurística vecino más cercano.

Hay que precisar que, dentro del tercer objetivo específico se identificó todos los componentes para el desarrollo de la alternativa de solución seleccionada y se desarrolló la metodología de solución en el lenguaje de programación Python soportada por softwares de optimización de alto rendimiento para el problema de programación de personal y enrutamiento de vehículos. Este código se realizó y se corrió en la plataforma *Colaboratory* o "Colab" que ofrece *Google Research*. *Colab*, fue esencial el uso de esta plataforma ya que permitía tener soluciones rápidas cumpliendo los criterios de la rapidez del solucionador y la facilidad en el diseño. Por último, la validación de los resultados de la metodología de solución por medio del cálculo de los indicadores de desempeño y comparándolos con los obtenidos con anterioridad, se pudo observar que ninguno pudo cumplirse, esto debido a que los KPI'S calculados inicialmente, fueron calculados con un código abierto en Excel que no tenía en cuenta las congestiones de las rutas vehiculares ni los semáforos en la ciudad de Bogotá, por este motivo, la reducción del tiempo de viaje en ese panorama inicial fue equivalente a 1.03 horas (1 hora y 1.8 minutos). Todo lo contrario, sucede con el modelo propuesto, ya que el tiempo total de viaje es equivalente a 3 horas y 26 minutos, este resultado se genera por las franjas de tiempo donde está la disponibilidad de los trabajadores para atender a sus clientes dentro del horario laboral teniendo en cuenta que para cada cliente existe de una a tres opciones de horario de vita. Por otra parte, comparando el KPI del nivel de servicio, puede evidenciarse que, tanto el código abierto de Excel como la metodología propuesta, alcanzan un nivel de servicio del 100%, teniendo en cuenta que en cada solución se tenía la disponibilidad de 10 trabajadores (especialistas, médicos o enfermeras). Finalizando con este análisis, el paralelo entre el método de solución inicial y el propuesto con base al porcentaje de ocupación o utilización de los trabajadores es 87.02% y 57.04% respectivamente.

D. Recomendaciones

Este apartado debe proponer futuras mejoras o proyectos de diseño que puedan desarrollarse a partir de los resultados obtenidos.

- A partir de los resultados obtenidos, para futuras investigaciones relacionadas al ruteo se recomienda proponer un modelo que considere más opciones, tales como: solicitud de servicio a última hora y las especialidades de los médicos, con el fin de ofrecer mayor nivel de servicio.

- Se recomienda editar el código propuesto para que grafique las rutas en el mapa de Bogotá, ya que éste las arroja, pero no de manera visual, lo que sería una gran herramienta ya que facilitaría la ubicación a las personas (trabajadores).

- Para la implementación de la metodología en una ciudad diferente se debe alimentar el modelo con datos de las ciudades, por lo que se recomienda buscar datos verídicos de los tiempos de movilización para la localidad que se requiera y comprobar si la propuesta funciona para éstas.

VII.GLOSARIO

Ruteo: Hace referencia al proceso que permite que los paquetes IP enviados por el host origen lleguen al host destino de forma adecuada [53].

AMD: Atención Médica Domiciliaria.

Heurística: Son métodos que se utilizan para descubrir lo nuevo y para impartir enseñanza.

Metaheurística: familia de algoritmos que se caracteriza por ser un procedimiento de búsqueda para encontrar soluciones de aceptable calidad, aplicando operadores independientes del dominio que modifican soluciones [38].

VRP (Vehicle Route Problem): en español problema de ruteo vehicular.

Open VRP (Open Vehicle Routing Problem): en español problema de ruteo vehicular abierto.

VRP-TW (Vehicle Routing Problem Time Windows): en español problema de ruteo vehicular con ventanas de tiempo.

VIII. REFERENCIAS

[1] C. Cases and K. Hub, “Scheduling problems and how to solve them in di erent industries,” pp. 1–7, 2019, Accessed: May 03, 2020. [Online]. Available: https://www.quinyx.com/blog/scheduling-problems.

[2] “The secret to smarter scheduling.” https://www.quinyx.com/blog/the-secret-to-better-and-smarter-scheduling-0 (accessed May 03, 2020).

[3] “The Importance of a Good Schedule.” https://www.quinyx.com/blog/the-importance-of-a-good-schedule (accessed May 03, 2020).

[4] D. Sierra Bernal and M. Díaz Arias, “Plan de negocios atención domiciliaria en salud,” *Univ. la Sabana*, 2010.

[5] “Coronavirus: el mapa que muestra el número de infectados y muertos en el mundo por COVID-19 | Internacional | Noticias | El Universo.” https://www.eluniverso.com/noticias/2020/04/09/nota/7809315/coronavirus-mapa-que-muestra-numero-infectados-muertos-mundo-covid (accessed May 02, 2020).

[6] John Hopkins University and Medicine, “COVID-19 Map - Johns Hopkins Coronavirus Resource Center,” *John Hopkins Coronavirus Resource Center*. p. 1, 2020, Accessed: May 02, 2020. [Online]. Available: https://coronavirus.jhu.edu/map.html.

[7] N. Avilán, “Coronavirus en Colombia: la guerra será por las camas en cuidados intensivos,” *La República*, 2020.

[8] “Atención médica oportuna y sin salir de casa - Contenido Patrocinado - ELTIEMPO.COM.” https://www.eltiempo.com/contenido-comercial/atencion-medica-oportuna-y-sin-salir-de-casa-479710 (accessed May 02, 2020).

[9] E. C. Ceballos, L. S. Castellón, J. H. Vázquez, M. C. A. Gómez, and H. G. Ramírez, “Resultados Colombia,” *Un acercamiento a la metacognición y la comprensión lectora en Estud. Univ. México y Colomb.*, pp. 59–88, 2018, doi: 10.2307/j.ctt1zk0mhc.8.

[10] Redacción Negocios y Economía Elespectador.com, “El parque automotor colombiano supera los 12’600.000 unidades,” *Elespectador.com*, 2016. https://www.elespectador.com/noticias/economia/el-parque-automotor-colombiano-supera-los-12600000-unid-articulo-654036 (accessed May 02, 2020).

[11] A. Olivera, “Heuristicas para el Problema de Ruteo,” 2004, [Online]. Available: https://www.fing.edu.uy/inco/pedeciba/bibliote/reptec/TR0408.pdf.

[12] F. Li, B. Golden, and E. Wasil, “The open vehicle routing problem: Algorithms, large-scale test problems, and computational results,” *Comput. Oper. Res.*, vol. 34, pp. 2918–2930, 2007, doi: 10.1016/j.cor.2005.11.018.

[13] M. De Salud and Y. P. Social, “REPUBLICA BE CCI(,” 2016.

[14] F. Castaño, A. F. Gutierrez, N. Velasco, and C. Amaya, “Using open access data to model a technician routing and scheduling problem in a congested urban setting,” *Procedia Manuf.*, vol. 39, pp. 1129–1138, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2020.01.357.

[15] G. Erdoğan, “An open source Spreadsheet Solver for Vehicle Routing Problems,” *Comput. Oper. Res.*, vol. 84, pp. 62–72, 2017, doi: 10.1016/j.cor.2017.02.022.

[16] D. Pisinger and S. Ropke, “A general heuristic for vehicle routing problems,” *Comput. Oper. Res.*, vol. 34, no. 8, pp. 2403–2435, 2007, doi: 10.1016/j.cor.2005.09.012.

[17] C. Fikar and P. Hirsch, “Home health care routing and scheduling: A review,” *Computers and Operations Research*, vol. 77. Elsevier, pp. 86–95, 2017, doi: 10.1016/j.cor.2016.07.019.

[18] C. Fikar and P. Hirsch, “A matheuristic for routing real-world home service transport systems facilitating walking,” *J. Clean. Prod.*, vol. 105, pp. 300–310, 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.07.013.

[19] S. Yalçındağ, A. Matta, E. Şahin, and J. G. Shanthikumar, “The patient assignment problem in home health care: using a data-driven method to estimate the travel times of care givers,” *Flex. Serv. Manuf. J.*, vol. 28, no. 1–2, pp. 304–335, 2016, doi: 10.1007/s10696-015-9222-6.

[20] Stanford, “Stanford Encyclopedia of Philosophy: Computational Complexity Theory,” 2016, Accessed: Jun. 04, 2020. [Online]. Available: https://plato.stanford.edu/entries/computational-complexity/.

[21] F. A. Guasmayan Guasmayan, “Solución del problema de ruteo de vehículos dependientes del tiempo utilizando un algoritmo genético modificado,” no. c, pp. 1–43, 2014, doi: 10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2014.11.051.

[22] G. Gutin, A. Yeo, and A. Zverovitch, “Exponential Neighborhoods and Domination Analysis for the TSP,” pp. 223–256, 2007, doi: 10.1007/0-306-48213-4_6.

[23] K. Braekers, K. Ramaekers, and I. Van Nieuwenhuyse, “The vehicle routing problem: State of the art classification and review,” *Comput. Ind. Eng.*, vol. 99, pp. 300–313, 2016, doi: 10.1016/j.cie.2015.12.007.

[24] Ç. Koç and G. Laporte, “Vehicle routing with backhauls: Review and research perspectives,” *Comput. Oper. Res.*, vol. 91, pp. 79–91, 2018, doi: 10.1016/j.cor.2017.11.003.

[25] C. Lin, K. L. Choy, G. T. S. Ho, S. H. Chung, and H. Y. Lam, “Survey of Green Vehicle Routing Problem: Past and future trends,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 41, no. 4 PART 1, pp. 1118–1138, 2014, doi: 10.1016/j.eswa.2013.07.107.

[26] F. A. Guasmayan-guasmayan, E. Mirledy, T. María, and J. Bravo, “Solución del problema de ruteo de vehículos dependientes del tiempo, usando un algoritmo genético híbrido con gerenciamiento de población,” *Tesis Maest. Pereira Univ. Tecnológica Pereira.*, 2016.

[27] V. Yepes Piqueras, “Optimización heurística económica aplicada a las redes de transporte del tipo VRPTW,” *Tesis Dr.*, p. 352, 2002.

[28] K. Q. Zhu, “A new genetic algorithm for VRPTW,” in *Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence*, 2000, p. 311264, [Online]. Available: http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.35.1316.

[29] L. M. Gambardella, L. M. Gambardella, É. Taillard, and G. Agazzi, “MACS-VRPTW: A Multiple Colony System For Vehicle Routing Problems With Time Windows,” *NEW IDEAS Optim.*, pp. 63--76, 1999, Accessed: Nov. 07, 2020. [Online]. Available: http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.45.5381.

[30] A. A. R. Hosseinabadi, J. Vahidi, V. E. Balas, and S. S. Mirkamali, “OVRP_GELS: solving open vehicle routing problem using the gravitational emulation local search algorithm,” *Neural Comput. Appl.*, vol. 29, no. 10, pp. 955–968, May 2018, doi: 10.1007/s00521-016-2608-x.

[31] E. M. Toro O., A. H. Escobar Z., and M. Granada E., “LITERATURE REVIEW ON THE VEHICLE ROUTING PROBLEM IN THE GREEN TRANSPORTATION CONTEXT,” *Luna Azul*, no. 42, pp. 362–387, 2015, doi: 10.17151/luaz.2016.42.21.

[32] B. Eksioglu, A. V. Vural, and A. Reisman, “The vehicle routing problem: A taxonomic review,” *Comput. Ind. Eng.*, vol. 57, no. 4, pp. 1472–1483, 2009, doi: 10.1016/j.cie.2009.05.009.

[33] J. Ruiz-Meza, I. Montes, A. Pérez, and M. Ramos-Márquez, “VRP model with time window, multiproduct and multidepot,” *J. Appl. Sci. Eng.*, vol. 23, no. 2, pp. 239–247, 2020, doi: 10.6180/jase.202006_23(2).0008.

[34] D. Soto *et al.*, “Una metaheurística híbrida aplicada a un problema de planificación de rutas,” *Rev. Av. en Sist. e Informática*, vol. 5, no. 3, pp. 135–144, 2008.

[35] S. Mancini, “A combined multistart random constructive heuristic and set partitioning based formulation for the vehicle routing problem with time dependent travel times,” *Comput. Oper. Res.*, vol. 88, pp. 290–296, 2017, doi: 10.1016/j.cor.2017.06.021.

[36] P. Victor, “On the Dynamic Technician Routing and Scheduling Problem,” no. May, pp. 1–17, 2012.

[37] T. Vidal, T. G. Crainic, M. Gendreau, and C. Prins, “A hybrid genetic algorithm with adaptive diversity management for a large class of vehicle routing problems with time-windows,” *Comput. Oper. Res.*, vol. 40, no. 1, pp. 475–489, 2013, doi: 10.1016/j.cor.2012.07.018.

[38] L. B. Rocha Medina, E. C. González La Rota, and J. A. Orjuela Castro, “Una revisón al estado del arte problema de ruteo de vehículos: evolución histórica y métodos de solución,” *Ingeniería*, vol. 16, no. 2, pp. 35–55, 2011, doi: 10.1117/12.905506.

[39] B. Macias, “Algoritmo híbrido con inteligencia artificial, para el problema de ruteo de vehículos sobre arcos con nodos de iniciofin variables en su versión bi-objetivo (mo-ocarp),” 2014.

[40] T. A. Feo and M. G. C. Resende, “Greedy Randomized Adaptive Search Procedures,” *J. Glob. Optim.*, vol. 6, no. 2, pp. 109–133, 1995, doi: 10.1007/BF01096763.

[41] B. W. K. S. Lin, “An Effective Heuristic Algorithm for the Traveling-Salesman Problem.” 1973.

[42] G. B. Dantzig and P. Wolfe, “Decomposition Principle for Linear Programs,” *Oper. Res.*, vol. 8, no. 1, pp. 101–111, 1960, doi: 10.1287/opre.8.1.101.

[43] J. F. Benders, “Partitioning procedures for solving mixed-variables programming problems,” *Numer. Math.*, vol. 4, no. 1, pp. 238–252, 1962, doi: 10.1007/BF01386316.

[44] F. Castaño and N. Velasco, “A network flow-based model for operations planning in home health care delivery,” *Int. J. Logist. Manag.*, no. 1, 2020, doi: 10.1108/IJLM-02-2020-0073.

[45] GoogleResearch and JupyterNotebook, “Colaboratory – Google,” 2014. https://research.google.com/colaboratory/faq.html (accessed Nov. 07, 2020).

[46] “MedicApp | Médico a Domicilio.” https://www.medicapp.com.co/ (accessed Dec. 05, 2020).

[47] “Médico a Domicilio: 24 horas y sin afiliación en Bogotá | DoctorAkí.” https://www.doctoraki.com/medico-domicilio (accessed Dec. 05, 2020).

[48] “Comprar Todo En Servicio Visita Médica A Domicilio Care24 Colombia.” https://www.care24.com.co/visita-medica/9-visita-medica-domiciliaria.html (accessed Dec. 05, 2020).

[49] “Pagos - Medicos a Domicilio donde estes.” https://mediqugroup.com/pagos/ (accessed Dec. 05, 2020).

[50] “Gases Efecto Invernadero | Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.” https://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/462-plantilla-cambio-climatico-18 (accessed Dec. 08, 2020).

[51] Ministerio de Transporte, “Plan de Acción Sectorial de Mitigación (PAS): Sector Transporte,” *Minist. Transp. Repub. Colomb.*, pp. 1–20, 2014.

[52] “Velocidades promedio por modo (km/h) - Observatorio - Cámara de Comercio de Bogotá.” https://www.ccb.org.co/observatorio/Region/Region-ordenada-conectada-y-sostenible/Movilidad/Velocidades-promedio-por-modo-km-h (accessed Dec. 08, 2020).

[53] “3.1.3. Enrutamiento y sus características. - Redes de Computadoras.” https://sites.google.com/site/redesdecomputadorashamed/unidad-3-capas-inferiores-del-modelo-osi-y-tcp-ip/3-1-capa-de-red/3-1-3-enrutamiento-y-sus-caracteristicas (accessed Jun. 07, 2020).

IX. ANEXOS

TABLA XIX. TABLA DE ANEXOS

No. Anexo	Nombre	Desarrollo (propio o terceros)	Tipo de Archivo (PDF, HTLM, Excel, Word…)
1	Anexo #1. 2020105. Encuestas pacientes	Propio	PDF
2	Anexo #2. 2020105. Informe situación actual	Propio	PDF
3	Anexo #3. 2020105. Plan de recolección de datos	Propio	Excel
4	Anexo #4. 2020105. Base de datos clientes (variables de entrada)	Propio	Excel
5	Anexo #5. 2020105. VRP_Spreadsheet_Solver	Terceros	Excel
6	Anexo #6. 2020105. Resumen del diseño de rutas para 100 clientes	Propio	PDF
7	Anexo #7. 2020105. Resúmenes variables para el cálculo de KPI's	Propio	PDF
8	Anexo #8. 2020105 Matriz AHP del Proyecto	Propio	Excel
9	Anexo #9. 2020105 Cronograma del proyecto	Propio	Project
10	Anexo #10. 2020105 Cálculos impactos	Propio	Excel
11	Anexo #11. 2020105 Cálculos de la emisión de CO2	Propio	Excel
12	Anexo #12. 2020105 Código	Propio	.ipynb
13	Anexo #13. 2020105 Datos entrada código	Terceros	.geojson
14	Anexo #14. 2020105 Datos entrada código	Terceros	.CSV

15	Anexo #15. 2020105 Datos entrada código	Terceros	.CSV
16	Anexo #16. 2020105 Datos entrada código	Terceros	.json
17	Anexo #17. 2020105 Datos entrada código	Terceros	.geojson
18	Anexo #18. 2020105 Formatos datos clientes	Propio	Excel
19	Anexo #19. 2020105 Manual de Pre-requisitos	Propio	PDF
20	Anexo #20. 2020105 Manual usuario	Propio	PDF