



**UNIVERSIDAD  
DE ANTIOQUIA**

**Implementación de un prototipo de soporte de  
decisiones logísticas de ruteo en atención médica  
domiciliaria en Medellín, Colombia**

Autor(es)

Jorge Iván Manrique Pulido

Elena Valentina Gutiérrez Gutiérrez

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Industrial

Medellín, Colombia

2019



Implementación de un prototipo de soporte de decisiones logísticas de ruteo en atención  
médica domiciliaria en Medellín, Colombia

**Jorge Iván Manrique Pulido**

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

**Ingeniero Industrial**

Asesores (a):

Elena Valentina Gutiérrez Gutiérrez, Ph.D.

Línea de Investigación:

Ingeniería y Salud

Grupo de Investigación:

Ingeniería y Sociedad

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Industrial

Medellín, Colombia

2019

## Resumen

El incremento de la población y de la expectativa de vida en Colombia han generado un aumento en las necesidades de prestación de servicios de salud, así como del desarrollo de nuevas herramientas para responder a dichos incrementos. Teniendo en cuenta estas necesidades en temas específicos de salud, la Atención Médica Domiciliaria (HHC por sus siglas en inglés *Home Health Care*) es un servicio que asigna personal médico asistencial capacitado a los hogares de los pacientes, según sus condiciones y necesidades, con el fin de aplicar procedimientos médicos teniendo siempre como base el cumplimiento de una prescripción establecida. Esto implica tomar decisiones relativas a la asignación y secuenciación del personal teniendo en cuenta las características del servicio, y asegurando que los pacientes sean atendidos en las condiciones definidas dentro de sus propios hogares. Dichas decisiones han sido estudiadas haciendo uso de métodos matemáticos para el problema de ruteo de vehículos, así como de asignación y secuenciación de personal médico asistencial. El problema radica en el uso adecuado del personal disponible con diferentes fines ya sean de maximizar el número de pacientes atendidos por profesional o haciendo uso de la distancia más corta dentro del trazado del recorrido. Algunas de las condiciones que deben considerarse son el tipo de personal, el tipo de paciente, la distancia de recorrido, entre otras, con el objetivo de diseñar la mejor ruta para tener un buen servicio y cumplir con dichas condiciones. Con el objetivo de dar soporte a la toma de decisiones logísticas de ruteo en HHC en el contexto de Medellín, Antioquia, en este trabajo se presenta un prototipo computacional que, basado en métodos aproximados, permite mejorar las métricas de desempeño del sistema, y agiliza el proceso de toma de decisiones en asignación y secuenciación de personal médico asistencial en el marco de HHC.

## 1. Introducción

La atención médica domiciliaria es un servicio que permite proveer asistencia a aquellos pacientes que deben recibir cuidado hospitalario en sus propios hogares (Suarez, 2012). Dicha asistencia se diferencia de la hospitalización domiciliaria principalmente en el punto en el que la atención médica domiciliaria no pretende sustituir una hospitalización en el hogar sino más bien prevenirla o mitigarla (Suarez, 2012). Aunque en Colombia aún no hay una definición de resultados de la atención médica domiciliaria en términos de indicadores de eficiencia, utilidad y beneficio (Antonio, Paola, & Berm, 2016), se espera que el servicio se desarrolle con miras al fortalecimiento de la asistencia médica en el hogar y la prevención de hospitalización en centros asistenciales. Lo anterior ha significado un reto para los encargados de tomar las decisiones de la asignación y secuenciación del personal médico asistencial, el cual es un problema que se vive en el día a día, debido, en gran parte, a la complejidad de definir el tipo de profesional que debe atender a cada paciente, teniendo en cuenta su condición específica de salud así como el lugar de residencia y los turnos laborales de los empleados (Vásquez & Gutierrez, 2018). Las decisiones de asignación y secuenciación suelen ser tomadas de forma empírica y, regularmente, no hay un procedimiento estandarizado ni sistematizado que, mediante la ayuda de herramientas cuantitativas, apoye las decisiones logísticas de ruteo en HHC (Gutiérrez, Cortés, & Jaen, 2018). Debido a la necesidad de prestar un servicio de calidad, se han desarrollado diferentes técnicas que ayudan a agilizar los principales procesos de la atención médica domiciliaria (Antonio et al., 2016). Dado lo anterior y teniendo en cuenta el aporte que la tecnología ha hecho a la toma de decisiones, se presenta un Prototipo Computacional de Soporte, dividido en dos fases, la primera hace referencia a la solución del problema de asignación de personal médico asistencial y la segunda fase hace referencia a la solución al problema de secuenciación de los pacientes una vez han sido asignados. Buscando facilitar la toma de decisiones de Asignación y Secuenciación de Personal Médico Asistencial con un método de solución para la asignación propuesto por Vásquez & Gutierrez, 2018 y dos métodos de solución propuestos para la parte de asignación. Con lo anterior se pudieron observar resultados que son acordes a la realidad con mejoras en términos de tiempos de recorrido del personal médico asistencial, de igual forma, este trabajo fue realizado cumpliendo con los objetivos propuestos.

## 2. Objetivos

### Objetivo General

- Implementar un prototipo para dar soporte a las decisiones logísticas de ruteo en atención médica domiciliaria en Medellín, Colombia.

### Objetivos Específicos:

- Seleccionar, con base en la literatura disponible, el método de solución del problema de asignación y secuenciación del personal asistencial en atención médica domiciliaria.
- Desarrollar un prototipo que, mediante la implementación de los métodos de solución y captura de datos, brinde apoyo a las decisiones logísticas de ruteo en atención médica domiciliaria.
- Documentar en reporte científico y técnico la selección del método, el diseño del prototipo y su implementación para facilitar los procesos de toma de decisiones en atención médica domiciliaria.

## 3. Marco Teórico

Se llevó a cabo una revisión de la literatura mediante el uso de la base de datos *Scopus*, debido a su alta capacidad de búsqueda de citas científicas. De forma general, se analiza el número de publicaciones por año según las palabras clave “*Home Health Care*” y se obtiene la siguiente figura que relaciona el número de documentos y los años de publicación:

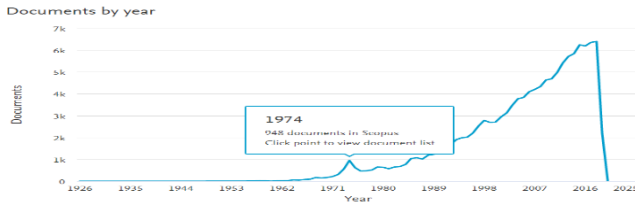


Figura 1: Cantidad de documentos por año. Fuente: *Scopus* (2019)

Se puede apreciar que a partir de 1974 hubo un aumento en la investigación del tema de atención médica domiciliaria (*HHC*), sin embargo, dada la importancia de la implementación de métodos cuantitativos a la solución del problema de ruteo de vehículos en *HHC*, se buscará en la literatura con una antigüedad de máximo 15 años.

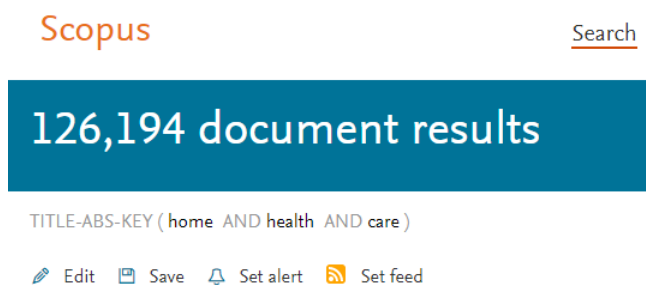


Figura 2: Búsqueda de *Home Health Care* en *Scopus*. Fuente: *Scopus* (2019)

Hasta la fecha, según *Scopus*, hay 126.194 documentos, según la figura 2, que contienen “*Home Health Care*” dentro de su información desde 1926. Se procede a limitar la búsqueda a partir del 2005 en adelante debido a la cantidad de documentos e información reciente presentada.

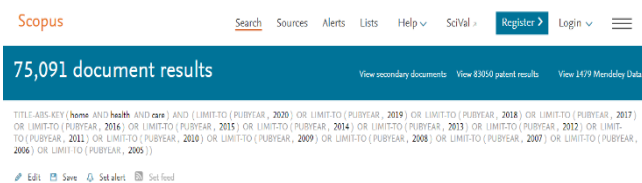


Figura 3: Cantidad de documentos publicados de Home Health Care desde el 2005 hasta el 2019. Fuente: Scopus (2019)

A partir de la restricción de búsqueda por año, se obtuvieron 75.091 resultados como se ve en la figura 3, sin haber segmentado el tipo de documento, así como el estado de publicación o el área de estudio. Se analizarán los documentos más relevantes cuyos temas apliquen para la investigación, dados los criterios de ruteo de vehículos y asignación y secuenciación de personal médico asistencial en el marco de HHC. Se procede, entonces, a identificar sus objetivos, los métodos de cada trabajo y las soluciones propuestas y empleadas, realizando una clasificación por tipo de información en cada documento.

Continuando con la revisión, se segmentó la búsqueda por las siguientes palabras clave: “VRP Home Health Care”, “Home Health Care Services”, “Home Health Care Routing Problem”, “Home Health Care Solution Routing Problem”.

Se obtuvieron los siguientes resultados a partir de las búsquedas realizadas por palabras clave:

“VRP Home Health Care”:

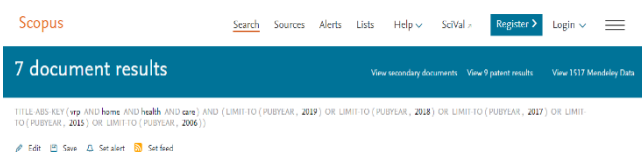


Figura 4: Resultado de la búsqueda de VRP Home Health Care. Fuente: Scopus (2019)

Se obtuvieron siete (7) resultados para esta búsqueda, como se ve en la figura 4. Se procedió a analizar el contenido de cada documento y validar su relevancia en esta investigación.

“Home Health Care Services”



Figura 5: Resultado de la búsqueda de Home Health Care Services. Fuente: Scopus (2019)

Se obtuvieron 35.961 documentos en esta búsqueda, como se ve en la figura 5. Debido al tamaño del resultado, se procedió a limitarlo aún más de acuerdo con el área de investigación y se obtuvieron los siguientes resultados:



Figura 6: Resultados de búsqueda de Home Health Care Services con limitación de área de investigación. Fuente: Scopus (2019)

Se obtuvieron 34.415 resultados una vez implementada la segmentación por el área de investigación, como se ve en la figura 6. Se pudo llegar a la conclusión que el área de estudio en donde más se publican documentos referentes a este servicio de salud es en medicina y enfermería, esto se debe a que la búsqueda que se realizó

no segmenta explícitamente el problema de ruteo de vehículos y, por lo tanto, la información allí suministrada pertenece a la generalización de los servicios en *HHC* en la literatura.

#### Documents by subject area

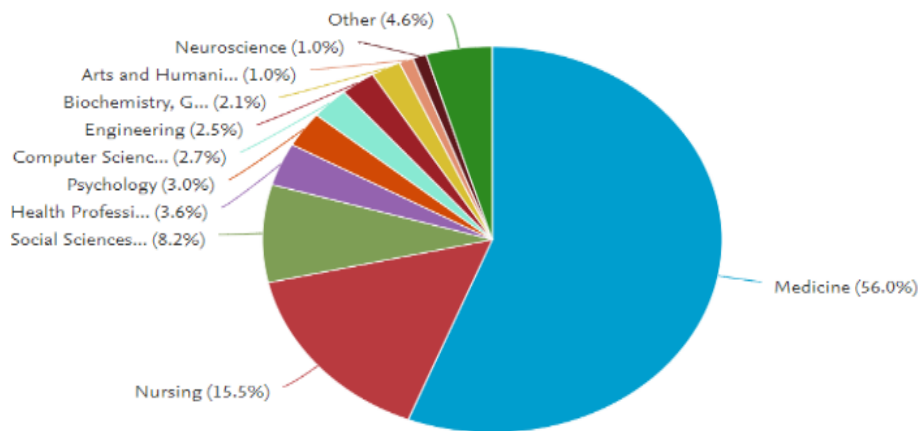


Figura 7: Participación de cada área de investigación en el resultado de la búsqueda de Home Health Care Services. Fuente: Scopus (2019)

La figura 7 muestra la participación de cada área de investigación en el resultado de la búsqueda Home Health Care Services y se puede notar que medicina es el área de conocimiento donde mayor número de resultados hay, habiendo un 56% de documentos con esta temática.

Se procedió a verificar si esta información es relevante para el trabajo en cuestión.

#### “Home Health Care Routing Problem”

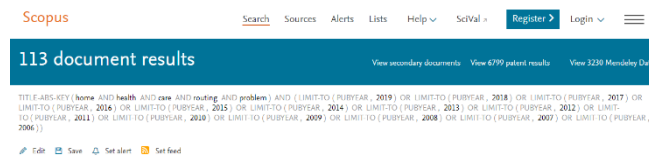


Figura 8: Resultados de la búsqueda de Home Health Care Routing Problem. Fuente: Scopus (2019)

Se obtuvieron 113 resultados como se ve en la figura 8, por lo que se procedió a verificar la relación de estos documentos, los cuales tienen temáticas similares al objeto de estudio, con el problema de investigación propio.

#### “Home Health Care Solution Routing Problem”

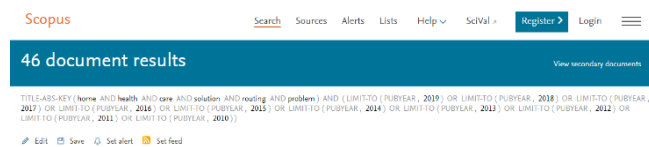


Figura 9: Resultados de la búsqueda de Home Health Care Solution Routing Problem. Fuente: Scopus (2019)

Se encontraron 46 resultados relacionados con el problema de ruteo en HHC y sus posibles soluciones. Todos los documentos están dentro de un periodo de no más de nueve años de antigüedad como se puede apreciar en la figura 9.

En la revisión de la literatura, se identificó que autores como Kergosien, Lente, & Billaut, 2009, tratan el problema de ruteo de vehículos en HHC como una extensión del tradicional problema del agente viajero (conocido como *Traveling Salesman Problem*; TPS por sus siglas en inglés), agregando más de un agente

viajero al modelo, volviéndolo en un MTSP (*Multiple Traveling Salesman Problem*), es decir, un problema de ruteo con múltiples vehículos o agentes que deben recorrer una red para atender a la totalidad de pacientes sin repetir ni devolverse.

Diferentes trabajos encontrados en la literatura, como el realizado por Allaoua, Sylvie, Létocart, & Wolfler, 2013, establecen que el problema de asignación de personal médico asistencial y el ruteo en HHC se basa en un MTSP con ventanas de tiempo, es decir un problema de ruteo donde hay varios agentes viajeros (personal médico asistencial) recorriendo nodos (pacientes) cuyo objetivo es construir rutas óptimas para estos agentes basados en la asignación y ruteo (Allaoua et al., 2013).

Para este problema se dan diferentes tipos de soluciones como lo propuesto por Martinez, Espinouse, & Di Mascolo, 2018, cuya solución se basa en la implementación de una heurística que combina una formulación de Programación Lineal Entera Mixta y un Algoritmo que permite la generación de asignación a los profesionales de los centros asistenciales.

En la revisión de la literatura se pudieron encontrar cuatro diferentes restricciones generalizables que se tienen en cuenta a la hora de modelar una solución para el problema de asignación de personal médico asistencial y ruteo de vehículos en el marco de HHC.

**Ventanas de tiempo:** Una de las restricciones más comunes; se entiende, dentro del HHC, como el tiempo en el que un profesional está atendiendo a un paciente en su hogar (Martinez et al., 2018). Sin embargo, para el análisis dentro del problema de investigación, no se tienen en cuenta ya que son descartables al no interferir en el enrutamiento de los vehículos en el modelo de solución.

**Tipo de personal médico asistencial:** Hace referencia a la capacidad de una persona que va a prestar el servicio de HHC. Se pueden clasificar según su capacidad (médico, enfermero, auxiliar), y dentro de cada tipo existen diferentes subtipos que permiten una mejor diferenciación de profesional por actividad (Gutierrez, 2010).

**Ubicación del personal:** Teniendo en cuenta la salida y llegada del personal médico asistencial desde y hasta un único “deposito”, el problema se modela como un MTSP con único depósito, es decir, la misma cantidad de agentes que salen, llegan al mismo lugar de salida una vez completen su ruta (Gutierrez, 2010).

**Horario laboral del personal:** Se entiende como la carga que tienen los empleados que prestan el servicio de HHC según el periodo de trabajo de cada profesional (Kergosien et al., 2009). Está definido por horas y cada empresa determina su valor según su normatividad.

La tabla 1 resume los principales autores encontrados que tienen alguna o varias de las restricciones mencionadas anteriormente en sus trabajos de investigación, entendiendo que las ventanas de tiempo son una de las restricciones más estudiadas según lo visto por la revisión de la literatura.

Tabla 1. Restricciones comunes en HHC. Fuente: elaboración propia

Restricción	Referencias
Ventanas de tiempo	(Martinez et al., 2018) (Tohidifard, Tavakkoli-Moghaddam, Navazi, & Partovi, 2018) (Tozlu, Daldal, Unluyurt, & Catay, 2015) (Kergosien et al., 2009)(Braekers, Hartl, Parragh, & Tricoire, 2016) (Decerle, Grunder, Hajjam El Hassani, & Barakat, 2017) (Zhi & Armin, 2015) (Masmoudi & Mellouli, 2014)

Tipo de personal médico asistencial	(Zhi & Armin, 2015) (Kergosien et al., 2009) (Braekers et al., 2016)
Ubicación del personal	(Kergosien et al., 2009) (Zhi & Armin, 2015) (Allaoua et al., 2013) (Masmoudi & Mellouli, 2014)
Horario laboral del personal	(Braekers et al., 2016) (Zhi & Armin, 2015) (Kergosien et al., 2009) (Akjiratikarl, Yenradee, & Drake, 2007)

En los problemas de asignación de personal médico asistencial y ruteo de vehículos en el marco de HHC es común encontrar funciones objetivo que pretendan minimizar o maximizar alguna variable dentro de los modelos de análisis (Gutierrez, 2010). A continuación, se describen las funciones objetivo más comúnmente utilizadas en la creación de modelos de asignación y ruteo en el marco de HHC:

**Minimización de la distancia recorrida:** Esta función objetivo es de las más comunes y se encuentra en la mayoría de los modelos basados en el problema de múltiples agentes viajeros (MTSP). Consiste en, dadas ciertas restricciones, encontrar la ruta óptima o la mejor dentro de un conjunto de soluciones que permita recorrer cada nodo (visitar cada paciente) y regresar al punto de partida. Esta función objetivo fue usada por Akjiratikarl et al., (2007), en un caso aplicado en Reino Unido, determinando las rutas óptimas que debía tener cada trabajador con el fin de que se minimice la distancia recorrida.

**Minimizar el tiempo de viaje:** Esto ocurre cuando se busca cumplir con tiempos estipulados dentro de una ventana de tiempo. Bredström & Rönnqvist, (2008), proponen el uso de esta restricción en su trabajo, combinando restricciones de sincronización y precedencia.

**Maximizar la carga de trabajo:** Hace referencia a la carga total que debe tener un profesional que prestar el servicio de HHC con el fin de maximizar su trabajo dentro del tiempo de labor.

**Combinación de varias funciones objetivo:** Se da cuando una sola función objetivo no satisface los requerimientos del modelo, con lo cual, se intenta darle un mayor rigor a la solución del problema. En el mismo trabajo de Bredström & Rönnqvist, (2008), ellos hacen uso de la combinación de dos funciones objetivo; minimizar el tiempo de recorrido y maximizar la carga de trabajo.

El análisis de la literatura en temas de HHC permite evidenciar la importancia de la acertada toma de decisiones logísticas en cuanto a la asignación de personal médico asistencial y el ruteo de los vehículos que prestan el servicio de HHC. Del estudio de los diferentes problemas que existen en la literatura sobre el modelamiento del ruteo y asignación en el marco de HHC se puede concluir que dichos problemas son complejos y sus soluciones no son únicas por lo que es necesario hacer uso de sistemas informáticos que permitan llevar a cabo los cálculos necesarios para la acertada toma de decisiones y más importante aún es que estos procedimientos estén al alcance de quienes diariamente deben asignar el personal médico asistencial y distribuir la flota de vehículos con el fin de cumplir con un nivel de servicio establecido como objetivo por cada institución de salud.

Según Lenté & Matta, (2017), el problema de asignación y secuenciación de personal médico asistencial en el marco de HHC consiste en dividir el territorio de servicio en grupos de pacientes y asignar de manera agregada cada grupo con un conjunto de recursos disponibles desde la institución prestadora del servicio (Lenté & Matta, 2017).

Matta et al., (2017), presentan criterios de asignación por distancias entre pacientes así, cada profesional tendrá a su deber un número limitado de pacientes que requieran sus servicios sin tener la preocupación de visitar



personas en lugares lejanos y con la posibilidad de disminuir la distancia recorrida, así como el tiempo de viaje otorgando un servicio oportuno.

Las restricciones de asignación se presentan teniendo en cuenta las características del paciente y su necesidad de atención médica, así como de sus disgustos y preferencias y la continuidad de la atención, que consiste, en un principio, en otorgar un solo profesional por el tiempo que dure el tratamiento del paciente (Mascolo et al., 2017).

Mascolo et al., (2017), propone que las restricciones relacionadas a la secuenciación pueden ser divididas en tres clases, la primera son restricciones temporales (ventanas de tiempo, horario laboral), la segunda clase pertenece a las características propias de cada paciente y la forma en la que es prestado el servicio y, finalmente, la última clase está constituida por el aspecto geográfico y como están distribuidos los pacientes, teniendo en cuenta el punto de partida y el punto final.

El servicio de HHC se presenta en el nivel operativo de la organización en el proceso de planeación del cuidado asistencial (Healthcare Planning Process). La siguiente figura, adaptada de Lenté & Matta, (2017), presenta la estructura de la planeación en Health Care, separado por niveles (estratégico, táctico y operativo).

Tabla 4: Tomado y adaptado de ((Lenté & Matta, 2017)).

Healthcare Planning Process		Problemas
Districting (zonificación)	Nivel Estratégico	Partición Asignación Clasificación
Dimensionamiento del recurso	Nivel Táctico	Asignación Bin Packing
Localización de profesionales en HHC a distritos		
Asignación de profesionales a pacientes	Nivel Operativo	Asignación Transporte (multi)-TSP, VRP
Programación de personal médico asistencial		Secuenciación Timing

#### 4. Metodología

Para cumplir con los objetivos planteados, se realizaron tres fases diferentes para este trabajo de la siguiente forma:

La fase 1 se rige por el primer objetivo, con el cual se encontró, en la revisión de la literatura, aquellos métodos que puedan ser usados en la solución del problema de investigación. Según lo analizado en revisión de la literatura, el problema de investigación que se presenta en este documento corresponde a un *Traveling Salesman Problem* (Problema del Agente Viajero, TSP) debido, principalmente, a la forma en la que el personal médico asistencial visita los pacientes en sus turnos diarios.

El problema de secuenciación de personal médico asistencial puede ser fácilmente combinado con el TSP en el punto en el que cada persona que presta el servicio representa un agente viajero y cada paciente asignado representa el lugar que debe visitar el personal médico asistencial una vez definida su agenda.

Las principales características que se comparten con el TSP son:

- Existe un centro de distribución (espacio físico o lugar de inicio); varía según el inicio de cada profesional.
- Hay diferentes personas prestando el servicio (agentes heterogéneos) con diferentes características y habilidades previamente establecidas.

- Cada paciente (nodo) tiene necesidades diferentes definidas bajo una prescripción personal.
- El tipo de vehículo (se considera un solo tipo).
- El periodo de planeación es de un día (24h)
- Se espera minimizar el recorrido total por cada profesional que presta el servicio.

El problema de asignación radica en el hecho de distribuir los pacientes según los profesionales disponibles teniendo en cuenta las características propias del servicio para cada necesidad. La siguiente tabla muestra los principales procedimientos tenidos en cuenta en la ejecución de la asignación.

Tabla 2: Principales Procedimientos en HHC. Fuente: Adaptado de (Gutierrez & Vidal, 2015)

Procedimientos
Aplicación de medicamentos
Cuidados básicos de enfermería
Servicios de enfermería profesional
Visita médico general
Visita terapeuta
Visita psicólogo
Visita nutricionista
Visita especialista

Así pues, la *tabla 3* presenta las prioridades de atención concebidas en el trabajo de Gutierrez & Vidal, (2015)

Tabla 3: Tipos de prioridad de atención en HHC. Fuente: Adaptado de Gutierrez & Vidal, (2015)

Tipos de urgencia
1) Agudo a Corto Plazo (AST: <i>Acute Short-Term</i> )
2) Post-Hospitalización aguda (APH: <i>Acute Post-Hospitalization</i> )
3) Largo Plazo Crónico (CLT: <i>Chronic Long-Term</i> )
4) Pérdida Crónica de Autonomía (CLA: <i>Chronic Loss of Autonomy</i> )
5) Cuidados Pallativos (PAC: <i>Palliative Care</i> )

En su trabajo, Vásquez & Gutierrez, (2018), presentan tres modelos de asignación como solución para el problema de asignación del personal médico asistencial en el Valle de Aburrá, teniendo en cuenta las necesidades del servicio de HHC.

De este modo, la información suministrada y posteriormente analizada pertenece al Área Metropolitana del Valle de Aburrá, territorio que pertenece al Departamento de Antioquia en Colombia y, teniendo en cuenta las necesidades de los territorios aledaños al área, se puede extrapolar para presentar resultados para la totalidad del Valle de Aburrá que tiene 10 municipios, incluido el Área Metropolitana de Medellín, que es el foco principal del estudio,

En el modelo “*Paciente-Médico en función de la distancia*” se espera minimizar la distancia total recorrida de cada uno de los profesionales que prestan este servicio con la condición de que la agenda del médico se va formando desde cada paciente, es decir, se toma el punto de partida como el paciente y se decide el profesional más cercano a él para prestar el servicio, si este paciente es asignado a un profesional sale de las decisiones posteriores e itera con el siguiente paciente para el conjunto de profesionales .

El segundo modelo, llamado “*Médico-Paciente en función de la distancia*” es similar al primero, sin embargo, difiere en la estructura de la perspectiva de asignación, ya que no será cada paciente el que decide qué profesional es más cercano a él, sino que esta asignación se da desde la perspectiva del profesional iterando para todo el conjunto de pacientes y, si esta iteración termina, continúa con el siguiente profesional para la cantidad de pacientes restantes teniendo en cuenta siempre la distancia más corta de recorrido por profesional.

El tercer método presentado es el de “*Médico-Paciente en función de la carga de trabajo*”, en esta propuesta se tiene que la estructura es similar al segundo modelo con la peculiaridad de que la cantidad de pacientes asignados se espera sea equilibrada para cada profesional teniendo una carga de trabajo estable sacrificando la distancia de recorrido para cada profesional.

Dentro de los tres modelos presentados por Vásquez & Gutierrez, (2018). y teniendo en cuenta los resultados obtenidos de su trabajo, se decide utilizar un modelo de asignación de “*Paciente-Médico en función de la distancia*” ya que permite tener un control de la agenda de los profesionales desde la perspectiva de los pacientes siguiendo la condición de que se espera que la distancia de recorrido sea mínima para cada profesional, aunque se pueda presentar un desbalanceo de la carga de trabajo.

La siguiente figura resume el modelo Paciente-Médico en función de la distancia propuesto por Vásquez & Gutierrez, (2018) y seleccionado como método de solución para el problema de asignación de personal médico asistencial

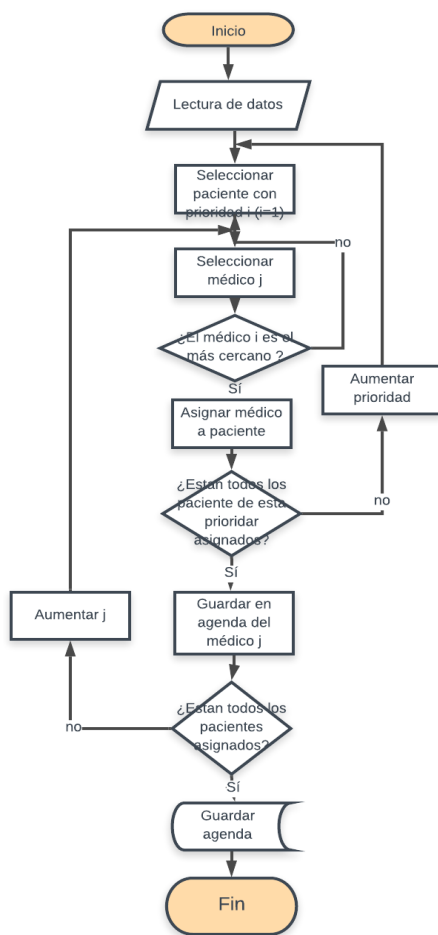


Figura 10: Modelo de solución Paciente-Médico para el problema de Asignación. Fuente: Adaptado de Vásquez & Gutierrez, (2018)

Para la secuenciación, se tiene en cuenta la forma en la que el TSP fue concebido; de acuerdo con su estructura, una vez los pacientes son asignados a cada profesional, se realiza una secuenciación para cada una de las agendas establecidas con el fin de determinar la forma en la que cada profesional debe visitar a sus pacientes.

Aunque las ventanas de tiempo son un tema recurrente en la literatura, para el caso de estudio no aplican, ya que en la prescripción del paciente no se tiene un horario de visita establecido.

La secuenciación, aunque no presente ventanas de tiempo, debe respetar la urgencia, presentada en la tabla 3, que tiene cada paciente para recibir el servicio solicitado, es por esto que aquellos pacientes que presenten urgencia del tipo 1 se les debe respetar esta restricción y secuenciar a partir de esta medida independientemente de si el siguiente paciente tiene urgencia del tipo 2 o superior (el tipo de urgencia representa la necesidad de recibir el servicio lo antes posible).

Las soluciones otorgadas para la asignación y secuenciación de personal médico asistencial difieren de los modelos ya existentes teniendo en cuenta los entornos nacionales y las regulaciones gubernamentales que limitan la prestación del servicio (Lenté & Matta, 2017).

Como se ve en la *Tabla 4*, los problemas de asignación y secuenciación de personal médico asistencial se dan en el nivel operativo, es decir, son decisiones de corto o muy corto plazo (horizonte de planeación de un día) con lo cual son repetitivas en el tiempo y dependen del encargado en el día de turno.

Para procesos repetitivos, el uso de software es una buena alternativa ya que elimina reprocesos en actividades operativas y optimiza el recurso temporal en actividades de planeación y toma de decisiones.

Teniendo en cuenta el horizonte de planeación (un día) que se da en la toma de decisiones de la asignación y secuenciación del personal médico asistencial en el contexto de HHC, es oportuna implementación de métodos matemáticos de fácil uso y, en este caso, software que facilite y mejore las condiciones de prestación del servicio.

La solución radica en otorgar un modelo que cumpla las siguientes condiciones y minimice la distancia recorrida:

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} X_{ij} \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} = 1, j = 1, \dots, n, \forall i \neq j \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} = 1, i = 1, \dots, n, \forall j \neq i \quad (3)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ij} \leq |S| - 1, \forall S \subseteq V, |S| \geq 2 \quad (4)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \forall (i,j) \in A \quad (5)$$

La ecuación (1) permite minimizar los costos de la función objetivo debido a un costo asociado (distancia  $c_{ij}$ ) al visitar el nodo (paciente)  $j$  desde el nodo  $i$ . La variable  $X_{ij}$  toma el valor de 1 si el arco  $(i, j)$  se usa y 0 en cualquier otro caso.

Las ecuaciones (2) y (3) restringen que todos los nodos sean visitados y que no se visite un mismo nodo.

La ecuación (4) restringe el número de visitas a cada nodo ya que solo pueden ser visitados una sola vez y cualquier nodo ya visitado no podrá volver a ser tenido en cuenta dentro de la misma ruta (Villegas, Lopera, & Sánchez, 2015).

Dentro de los modelos de solución se debe tener en cuenta, tanto para la asignación y secuenciación, la urgencia del paciente por tomar el servicio solicitado por lo tanto cualquier decisión debe contemplar la restricción de estructura en orden ascendente de los tipos de urgencia presentes en la *tabla 3*.

Debido a que es un problema combinatorio NP-Hard, es decir, entre mayor sea el número de pacientes mayor será el conjunto de soluciones posibles, resolver estos problemas de forma óptima es complicado computacionalmente y hallar la solución que garantice la mínima distancia de recorrido puede tardar más tiempo que el disponible en la toma diaria de decisiones de asignación y secuenciación de personal médico asistencial,

es por esto que se hace uso de modelos aproximados o heurísticas para estos dos problemas teniendo en cuenta que, aunque no se garantiza optimalidad en la solución, el tiempo de cómputo es mínimo con solución factible.

Dado lo anterior y teniendo en cuenta que el modelo de asignación ya fue seleccionado, se realizan dos modelos para la parte de secuenciación, el primero es tomado y adaptado de la heurística del “*Vecino más Cercano*” cuya finalidad es otorgar un conjunto de pacientes asignados acomodándolos teniendo en cuenta la minimización de la distancia para cada personal médico asistencial.

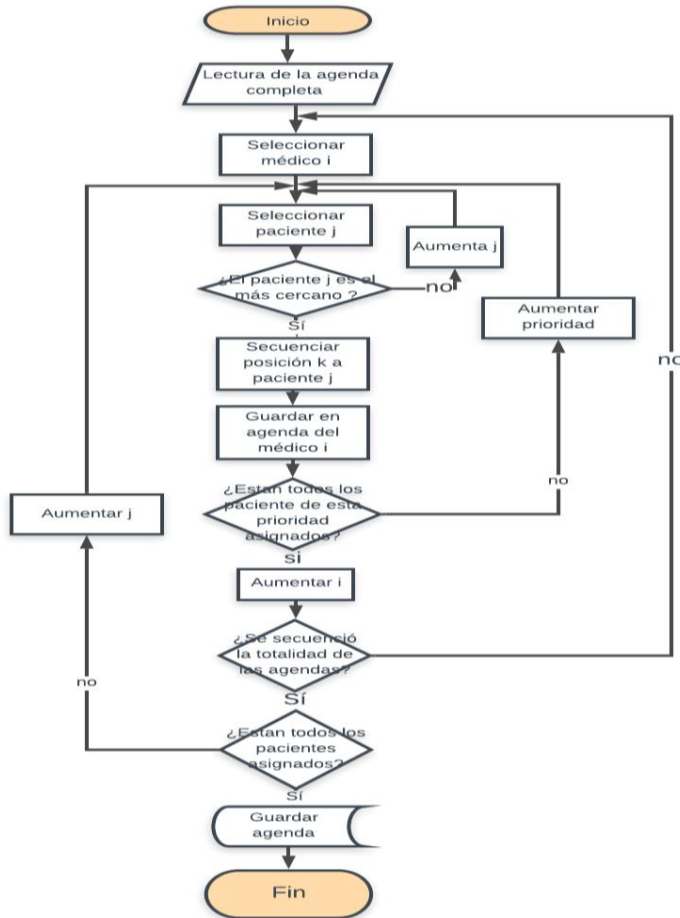


Figura 11: Método de solución para el problema de secuenciación (Vecino más cercano). Fuente: elaboración propia.

La figura 12 muestra de manera resumida el modelo de solución propuesto en este trabajo para el problema de secuenciación de personal médico asistencial una vez que se ha hecho una asignación total de los pacientes a cada uno de los profesionales, con el fin de presentar las rutas que tengan las distancias más cortas en un tiempo de cómputo razonable.

El segundo es una heurística mal llamada “*Vecino más Lejano*” que, en contraposición con el primer modelo, este pretende secuenciar cada paciente desde la perspectiva de la mayor distancia con el fin de romper subtuores que se puedan presentar, es decir, con el fin de que los recorridos de cada profesional no se crucen entre sí.

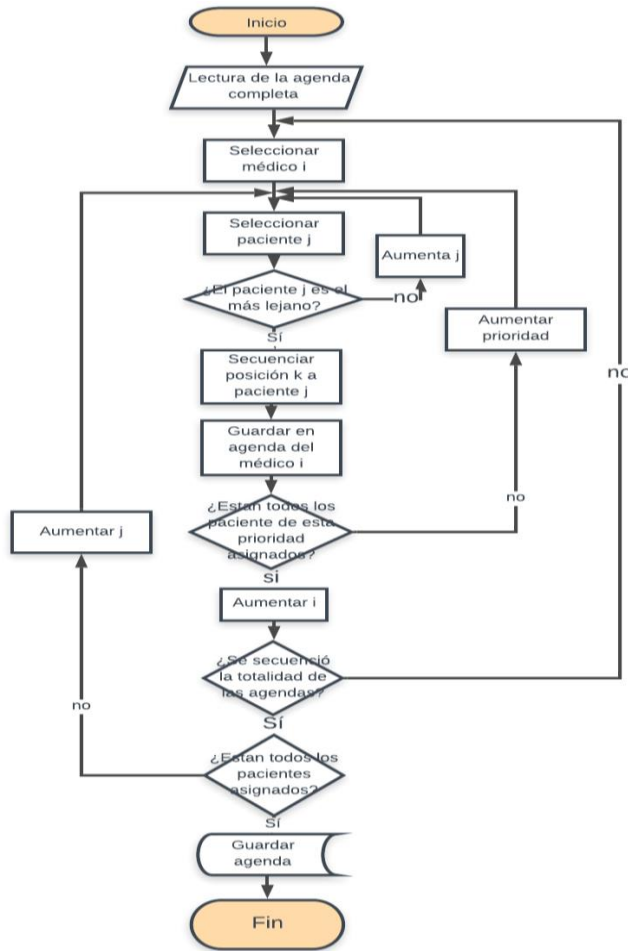


Figura 12: Método de solución para el problema de secuenciación (Vecino más lejano). Fuente: elaboración propia

En la figura 13 se resume el modelo de solución propuesto para el problema de secuenciación de personal médico asistencial una vez ha sido asignada la totalidad de pacientes a cada médico según sus requerimientos de servicio, teniendo en cuenta que este modelo lo que pretende, a diferencia del “Vecino más cercano” es encontrar las distancias más largas entre pacientes con el fin de romper los subtursos o cruces entre recorridos que se puedan dar, sin garantizar que esto pueda suceder el 100% de las veces. Se presenta este modelo como solución a la necesidad de evitar cruces en el recorrido de cada médico.

La fase 2 se rige por el segundo objetivo, el cual está haciendo al desarrollo de un aplicativo que use los modelos propuestos como métodos de solución y muestre en pantalla los resultados encontrados.

Para lo anterior, se hace una revisión de los lenguajes de programación más usados en el momento, entre ellos se encuentran, Java, JavaScript, C# y Python (Rodríguez García, 2017), sin embargo y dada la facilidad con la cual C# permite el desarrollo de aplicativos de escritorio, además del hecho de que hay una comunidad presente desarrollando y compartiendo información de este lenguaje de programación y teniendo en cuenta que C# fue creado como un lenguaje de programación orientado a objetos el cual es un paradigma de programación que permite la creación de objetos definidos gracias a una “molde” en el cual se especifican las características del objeto como lo pueden ser su nombre, identificación, lugar de residencia, entre otros, características presentes en el desarrollo del prototipo; se decide utilizar C# bajo el Framework de Visual Studio, el cual es el ambiente de desarrollo de C# con el que es posible la creación del prototipo e integración de los modelos propuestos a este.

Con el fin de cumplir el tercer objetivo específico, para la fase 3 se realiza una ponencia en el III Congreso Colombiano de Investigación de Operaciones – ASOCIO 2019, así como la creación en reporte técnico del desarrollo del trabajo de investigación.

## 5. Resultados y Análisis

El prototipo es una herramienta propuesta para facilitar la toma de decisiones del experto en asignación y secuenciación del personal médico asistencial, sin llegar a ser un remplazo de la experiencia y conocimiento de la persona en cuestión, siendo este desarrollo una de tantas alternativas de solución posibles.

La figura 13 muestra los datos de entrada que el usuario debe ingresar con el fin de ser utilizados por los modelos de solución propuestos en este trabajo. Estos son otorgados por política de cada institución o por necesidad del día a día.

The image shows a software window titled "General" with a standard Windows-style title bar (minimize, maximize, close). Inside the window, there are four input fields, each with a label to its left:

- Numero de pacientes: [input field]
- Numero de personal asistencial: [input field]
- Pausa para almorzar(minutos): [input field]
- Tiempo maximo de trabajo: [input field]

At the bottom of the window, there are three buttons: "Continuar", "Secuencia", and "Cerrar".

Figura 13: Datos necesarios de entrada para los métodos de solución propuestos. Fuente: Adaptado de Vásquez & Gutierrez, (2018).

La figura 14 ilustra la forma en la que son presentados los datos de asignación de cada paciente según el médico más cercano que cumpla con sus requerimientos.

Resultado_Agenda		Resumen_Resultado	Vecino lejano	Vecino cercano
Informacion Personal asistencial	Medico	id paciente	Nombre completo	Tipo paciente
Nombre	ANTONIO VELEZ		ALEJANDRA LO...	1
			JULIETA REST...	1
			MARIANA HERN...	1
			ROBERTO MOR...	1
			SIMON COLOR...	1
			VERONICA MO...	1
			MARIA CARMONA	2
			ISABELA JIMEN...	4
ID	10839776			
Barrio Origen	EL TRIUNFO			
Nombre	LORENA ESTRA...		ALBARO VELEZ	1
			EMANUEL BEL...	1
			LEONARDO ME...	1
			LINA CARDONA	1
			YERALDIN AG...	1
			MARIA ANTONI...	2
ID	43001039			
Barrio Origen	ITA CENTRO			

Figura 14 Agenda del personal médico asistencial. Fuente: adaptado de (Vásquez & Gutierrez, 2018).

La *Figura 14* muestra el resultado de asignación propuesto por Vásquez & Gutiérrez, (2018), en el cual, por cada profesional, se presenta su agenda de pacientes cumpliendo con la restricción de que los pacientes tipo 1 deben ser atendidos primero y así consecutivamente.

La *Figura 15* muestra los resultados de secuenciación utilizando el modelo de “Vecino más lejano” a partir de lo obtenido en la parte de asignación propuesta por Vásquez & Gutiérrez, 2017. En esta se puede ver que el puesto de cada paciente dentro de la agenda cambio, sin embargo, se mantiene el cumplimiento de atención según el tipo de paciente.

Nombre medico	Distancia recorrida	Total	Id Paciente	Nombre paciente	Tipo Paciente
ANTONIO VELEZ	101,5426993404...	160,2648942286...		ROBERTO MOR...	1
				ALEJANDRA LO...	1
				VERONICA MO...	1
				MARIANA HERN...	1
				JULIETA REST...	1
				SIMON COLOR...	1
				MARIA CARMONA	2
				ISABELA JIMEN...	4
LORENA ESTRA...	60,42755296207...	120,15763723176		YERALDIN AG...	1
				ALBARO VELEZ	1
				EMANUEL BEL...	1
				LEONARDO ME...	1
				LINA CARDONA	1
				MARIA ANTONI...	2
JAIRO MORENO	34,10592506642...	100,0889720558...		ALEJANDRA BE...	1

*Figura 15 Resultados de Secuenciación con “Vecino más lejano”. Fuente: Elaboración propia.*

La *Figura 16* muestra los resultados de secuenciación utilizando el modelo de “Vecino más Cercano” a partir de lo obtenido en la parte de asignación propuesta por Vásquez & Gutiérrez, 2017. En esta se puede ver que el puesto de cada paciente dentro de la agenda cambio, sin embargo, se mantiene el cumplimiento de atención según el tipo de paciente.

Nombre medico	Distancia recorrida	Total	Id Paciente	Nombre paciente	Tipo Paciente
ANTONIO VELEZ	71,76802067599...	160,1872210863...		JULIETA REST...	1
				MARIANA HERN...	1
				SIMON COLOR...	1
				VERONICA MO...	1
				ROBERTO MOR...	1
				ALEJANDRA LO...	1
				MARIA CARMONA	2
				ISABELA JIMEN...	4
LORENA ESTRA...	52,69748653537...	120,1374718235...		EMANUEL BEL...	1
				LEONARDO ME...	1
				LINA CARDONA	1
				ALBARO VELEZ	1
				YERALDIN AG...	1
				MARIA ANTONI...	2
JAIRO MORENO	34,10592506642...	100,0889720558...		ALEJANDRA BE...	1

*Figura 16 Resultado de Secuenciación con "Vecino más cercano". Fuente: elaboración propia.*

Teniendo en cuenta la totalidad de los pacientes en las bases de datos analizadas y utilizando los métodos de solución, se nota que, entre los dos modelos propuestos para el problema de secuenciación, el “Vecino más cercano” presenta una mejoría cercana al 32% frente al modelo de “Vecino más lejano” siendo entendible debido a la naturaleza de cada modelo, siendo el segundo el que sacrifica distancia recorrida por evitar cruces de cada ruta. Lo anterior se da como una alternativa a los métodos de solución propuestos en la literatura, en los cuales no se pudo evidenciar que el cruce de rutas haya sido estudiado a profundidad.

Con relación a la asignación y secuenciación del personal médico asistencial, se encuentra una mejoría en la parte de secuenciación limitada a la forma en la que el modelo es concebido ya que se usa la asignación como



solución inicial y, si está llegare a ser la mejor (lo cual es poco probable debido a como el modelo Paciente-Médico toma los datos de los paciente pro barrio y no por localización puntual), el modelo de “Vecino más cercano” daría como resultado la misma secuencia presentada en la asignación.

#### **Ventajas:**

1. Permite agilizar la toma de decisiones.
2. Basado en métodos matemáticos, otorga una solución para la asignación y secuenciación de personal médico asistencial en el marco de HHC.
3. Interfaz intuitiva y de fácil uso.
4. No depende de la experiencia ni trabajo empírico de quien toma la decisión.
5. Permite hallar una solución rápida computacionalmente.
6. Lectura de base de datos desde Excel.

#### **Desventajas:**

1. Sigue una estructura de información definida, cualquier alteración a esta puede reproducir un error en el código.
2. Modelos definidos y no configurables.
3. Muestra la información necesaria sin posibilidad de modificación

#### **Asignación**

- Como modelo inicial se debe considerar que las distancias son tomadas por barrio en el que reside cada paciente por lo que, si dos pacientes viven en el mismo barrio, el modelo le otorga cualquier posición dentro de la agenda del médico solo siguiendo la urgencia de atención como prioridad.
- Se presenta desbalanceo en la carga laboral total, es decir, un médico puede atender 4 pacientes en un día mientras que otro, de similares características puede atender 10 en el mismo periodo.
- Cada médico inicia en una posición diferente por lo que este problema es del tipo Multi-Depot.
- La terminación del personal médico asistencial en su ronda de trabajo es indiferente.

#### **Secuenciación**

- Para el método de “Vecino más Cercano” se presenta una disminución en la distancia de recorrido cercana al 29.70% para el primer profesional.
- En ambos modelos se evidencia una secuenciación diferente de acuerdo con cada necesidad.
- De forma general, mediante la comparación total por el número de Personal Médico Asistencial para ambos métodos, se tiene que el “Vecino más cercano” presenta una mejora del 32% con respecto al método de “Vecino más Lejano”.

## **6. Conclusiones y trabajo futuro**

El análisis de la literatura en temas de HHC permite evidenciar la importancia de la acertada toma de decisiones logísticas en cuanto a la asignación de personal médico asistencial y el ruteo de los vehículos que prestan el servicio de HHC. Del estudio de los diferentes problemas que existen en la literatura sobre el modelamiento del ruteo y asignación en el marco de HHC se puede concluir que dichos problemas son complejos y sus soluciones no son únicas por lo que es necesario hacer uso de sistemas informáticos que permitan llevar a cabo los cálculos necesarios para la acertada toma de decisiones y más importante aún es que estos procedimientos estén al alcance de quienes diariamente deben asignar el personal médico asistencial y distribuir la flota de vehículos con el fin de cumplir con un nivel de servicio establecido como objetivo por cada institución de salud.

Se debe tener en cuenta que los modelos matemáticos implementados permiten ayudar a la toma de decisiones de nivel operativo en el problema de Asignación y Secuenciación de personal médico asistencial.

La implementación de esta herramienta proporciona una base matemática que ayuda a la toma de decisiones sin pretender excluir la experiencia de la persona encargada de dar solución a estos problemas en el día a día.

El trabajo futuro tendrá retos de mejora en los métodos de solución propuestos teniendo en cuenta condiciones especiales del servicio entre otras características que puedan ser requeridas por el personal encargado de asignar y secuenciar al personal médico asistencial en el marco de HHC.

El principal beneficio que se espera obtener es el de permitir al usuario obtener resultados de asignación y secuenciación de forma rápida y con métodos matemáticos que permitan evidenciar la veracidad de la mejora en este tipo de toma de decisiones, facilitando este proceso y permitiendo ser replicado cada día solo con el hecho de modificar la información suministrada.

## Referencias

- Akjiratikar, C., Yenradee, P., & Drake, P. R. (2007). PSO-based algorithm for home care worker scheduling in the UK. *Computers & Industrial Engineering*, 53(4), 559–583. <https://doi.org/10.1016/J.CIE.2007.06.002>
- Allaoua, H., Sylvie, B., Létocart, L., & Wolfler, R. (2013). A matheuristic approach for solving a home health care problem. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 41, 471–478. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.endm.2013.05.127>
- Antonio, M., Paola, G., & Berm, F. (2016). Gestión clínica de programas de cuidado domiciliario.
- Braekers, K., Hartl, R. F., Parragh, S. N., & Tricoire, F. (2016). A bi-objective home care scheduling problem: Analyzing the trade-off between costs and client inconvenience. *European Journal of Operational Research*, 248(2), 428–443. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.07.028>
- Bredström, D., & Rönnqvist, M. (2008). Combined vehicle routing and scheduling with temporal precedence and synchronization constraints. *European Journal of Operational Research*, 191(1), 19–31. <https://doi.org/10.1016/J.EJOR.2007.07.033>
- Decerle, J., Grunder, O., Hajjam El Hassani, A., & Barakat, O. (2017). A general model for the home health care routing and scheduling problem with route balancing. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 14662–14667. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.1907>
- Gutierrez, E. V. (2010). *Combined routing and staff scheduling problems in health care logistics*. Nantes.
- Gutiérrez, E. V., Cortés, S., & Jaen, J. S. (2018). Diseño e implementación de un modelo de madurez de capacidades logísticas en servicios de atención médica domiciliaria. *Gerencia y Políticas de Salud*, 35(1657–7027), 1–19.
- Gutierrez, E. V., & Vidal, C. J. (2015). A Home Health Care Districting Problem in a Rapid-Growing City. *Ingeniería y Universidad*, 19(1), 87–113.
- Kergosien, Y., Lente, C., & Billaut, J.-C. (2009). Home health care problem: An extended multiple Traveling Salesman Problem. *Proceedings of the 4th Multidisciplinary International Scheduling Conference: Theory and Applications (MISTA 2009)*, (August), 85–92.
- Lenté, C., & Matta, A. (2017). OR problems related to Home Health Care : A review of relevant routing and scheduling problems. <https://doi.org/10.1016/j.orhc.2017.06.001>
- Martinez, C., Espinouse, M.-L., & Di Mascolo, M. (2018). Continuity of care in home services: a client-centered heuristic for the home health care routing and scheduling problem. In *2018 5th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*. <https://doi.org/10.1109/CoDIT.2018.8394968>
- Mascolo, M. Di, Hajri, Z. El, El, Z., Hajri, E., Lyon, I., & Care, H. (2017). ScienceDirect Planning in Home Health Care Structures : Planning in Home Health Care Structures : Planning in Home Health Care Structures : Structures : literature Planning in A Home Health review. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 4654–4659. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.689>
- Masmoudi, M., & Mellouli, R. (2014). MILP for synchronized-mTSPTW: Application to home healthcare scheduling. *Proceedings - 2014 International Conference on Control, Decision and Information Technologies, CoDIT 2014*, (December), 297–302. <https://doi.org/10.1109/CoDIT.2014.6996910>
- Rodriguez García, E. (2017). Estos son los lenguajes de programación más usados de 2017. Retrieved from [https://www.lespanol.com/omicron/tecnologia/20170719/lenguajes-programacion-usados/232477753\\_0.html](https://www.lespanol.com/omicron/tecnologia/20170719/lenguajes-programacion-usados/232477753_0.html)
- Suarez, M. (2012). Atención Integral a Domicilio. *Revista Médica La Paz*, 18(2), 52–58. Retrieved from [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1726-89582012000200010](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1726-89582012000200010)
- Tohidifard, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Navazi, F., & Partovi, M. (2018). A Multi-Depot Home Care Routing Problem with Time Windows and Fuzzy Demands Solving by Particle Swarm Optimization and Genetic

Algorithm. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 358–363. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.318>

Tozlu, B., Daldal, R., Unluyurt, T., & Catay, B. (2015). Crew constrained home care routing problem with time windows. *Proceedings - 2015 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence, SSCI 2015*, (May), 1751–1757. <https://doi.org/10.1109/SSCI.2015.244>

Vásquez, V., & Gutierrez, E. V. (2018). Diseño de una herramienta computacional para la programación de personal asistencial en atención médica domiciliaria. In *CIIO: V Congreso Internacional de Industria y Organizaciones* (p. 36). Bogotá, Colombia: , V Congreso Internacional Industria y Organizaciones.

Villegas, J., Lopera, D., & Sánchez, J. (2015). *Problemas de enrutamiento: variantes, aplicaciones y bibliografía básica*. Ekp. Medellín, Colombia.

Zhi, Y., & Armin, F. (2015). Home Health Care Scheduling : A Case Study *Angewandte Mathematik und Optimierung Schriftenreihe Applied Mathematics and Optimization Series Home Health Care Scheduling : A Case Study*, (July). Retrieved from [https://www.researchgate.net/profile/Armin\\_Fuegenschuh/publication/273155719\\_Home\\_Health\\_Care\\_Scheduling\\_A\\_Case\\_Study/links/54fae0190cf23e66f0333206.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Armin_Fuegenschuh/publication/273155719_Home_Health_Care_Scheduling_A_Case_Study/links/54fae0190cf23e66f0333206.pdf)