



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

Máster en Ingeniería de Análisis de Datos, Mejora de Procesos y  
Toma de Decisiones

# Heurísticas inteligentes para el problema de reubicación de vehículos de emergencias sanitarias

Trabajo fin de Máster

Autor: Yulia Karpova Krylova

Tutoras: María Fulgencia Villa Juliá y Eva Vallada Regalado

# Agradecimientos

Me gustaría dar las gracias al Servicio de Atención Sanitaria a Urgencias y Emergencias (SASUE) de la Comunidad Valenciana por toda la información y los datos de emergencias proporcionados, sin los que no se hubiese podido conocer el funcionamiento del servicio y, tampoco podría haberse realizado este trabajo.

Igualmente quisiera agradecer a mis tutoras por la confianza y el apoyo en el desarrollo de este trabajo y sobre todo por los consejos que me han dado en los momentos en los que parecía imposible seguir.

Y gracias a mi familia por la paciencia.

## RESUMEN

El principal objetivo de los servicios de urgencias y emergencias extrahospitalarias es brindar una atención cualificada en el menor tiempo posible. Es esencial ubicar estratégicamente las bases donde se localizan los vehículos de emergencia, para poder cubrir el mayor número de puntos de demanda en un tiempo razonable. Aun en el caso de contar con la ubicación óptima de los vehículos, a medida que estos se mueven para atender emergencias, algunas zonas podrían quedarse sin cobertura, siendo difícil mantener un nivel de servicio adecuado. Con un mayor número de vehículos se podría resolver este problema, pero hay que tener en cuenta que esto implicaría una gran inversión inicial y unos costes operativos elevados, por ello, no es una opción conveniente. Una solución alternativa sería reubicar los vehículos disponibles para alcanzar la mayor cobertura posible. Obtener la solución óptima en un tiempo razonable no es viable para este problema. Por ello, en este trabajo se aborda el problema de reubicación de ambulancias mediante el diseño y desarrollo de herramientas heurísticas inteligentes. Se resuelve un caso real, del Servicio de Emergencias Sanitarias de la provincia de Valencia, con un previo análisis estadístico de los datos históricos de las emergencias, con la finalidad de obtener información relevante, que posteriormente se utiliza para desarrollar las heurísticas.

**Palabras clave:** SES, SAMU, emergencia, reubicación, ambulancia, localización, cubrimiento, isócrona, tiempo de respuesta, escenario, heurística.

## RESUM

El principal objectiu dels servicis d'urgències i emergències extrahospitalàries és brindar una atenció qualificada en el menor temps possible. És essencial ubicar estratègicament les bases on es localitzen els vehicles d'emergència per a poder cobrir el nombre més gran de punts de demanda en un temps raonable. Encara en el cas de comptar amb la ubicació òptima dels vehicles, a mesura que estos es mouen per a atendre emergències, algunes zones podrien quedar-se sense cobertura, sent difícil mantindre un nivell de servici adequat. Amb un nombre més gran de vehicles es podria resoldre este problema, però cal tindre en compte que açò implicaria una gran inversió inicial i uns costos operatius elevats, per això, no és una opció convenient. Una solució alternativa seria reubicar els vehicles disponibles per a aconseguir la major cobertura possible. Obtindre la solució òptima en un temps raonable no és viable per a este problema. Per això, en este treball s'aborda el problema de reubicació d'ambulàncies per mitjà del disseny i desenrotllament de ferramentes heurístiques intel·ligents. Es resol un cas real, del Servici d'Emergències Sanitàries de la província de València, amb una prèvia anàlisi estadística de les dades històriques de les emergències, amb la finalitat d'obtindre informació rellevant, que posteriorment s'utilitza per a desenrotllar les heurístiques.

**Paraules clau:** SES, SAMU, emergència, reubicació, ambulància, localització, cubrimiento, isòcrona, temps de resposta, escenari, heurística.

## **ABSTRACT**

The main objective of the emergency services and out-of-hospital emergencies is to provide qualified care in the shortest possible time. It is essential to strategically locate the bases where emergency vehicles are located in order to cover the greatest number of demand points in a reasonable time. Even in the case of having the optimal location of the vehicles, as they move to attend to emergencies, some areas could be left without coverage, making it difficult to maintain an adequate level of service. With a greater number of vehicles, this problem could be solved, but it must be considered that this would imply a large initial investment and high operating costs, therefore, it is not a suitable option. Relocating the available vehicles to achieve the highest possible coverage would be an alternative solution. Obtaining the optimal solution in a reasonable time is not feasible in this case. For this reason, this work addresses the problem of ambulance relocation through the design and development of intelligent heuristic tools. A real case is solved, from the Health Emergencies Service of the province of Valencia, with a previous statistical analysis of the historical data of the emergencies, in order to obtain relevant information, which is later used to develop the heuristics.

**Keywords:** SES, SAMU, emergency, relocation, ambulance, localization, coverage, isochronous, response times, scenery, heuristics.

# ÍNDICE

Índice de tablas .....	6
Índice de figuras .....	7
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>10</b>
1.1 Motivación .....	10
1.2 Objetivos .....	11
1.3 Software .....	12
1.4 Metodología .....	12
<b>2. LOS SERVICIOS DE EMERGENCIAS SANITARIAS EN LA PROVINCIA DE VALENCIA .....</b>	<b>13</b>
2.1 Estructura de los Servicios de Emergencias Sanitarias .....	13
2.2 Análisis de los datos históricos .....	19
2.2.1 Análisis de la demanda de emergencias sanitarias .....	19
2.2.2 Análisis de los servicios de emergencias sanitarias realizados por los departamentos de salud .....	31
2.2.3 Análisis de los servicios de emergencias sanitarias realizados por los SAMU....	33
2.2.4 Análisis de los servicios de emergencias sanitarias realizados por los Alfas.....	44
<b>3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>54</b>
3.1 Revisión de modelos de reubicación de vehículos de emergencias.....	54
3.2 Revisión de técnicas heurísticas de reubicación de vehículos de emergencias.....	63
3.3 Resumen de la revisión de modelos de reubicación de vehículos de emergencias.....	65
<b>4. TÉCNICA HEURÍSTICA PROPUESTA .....</b>	<b>67</b>
4.1 Descripción de los aspectos generales.....	67
4.2 Determinación de las Condiciones de la Reubicación .....	70
4.3 Determinación del Modo de la Reubicación .....	77
4.3.1 Determinar Base de Destino de la Reubicación .....	77
4.3.2 Determinar Punto de Origen de la Reubicación.....	78
4.3.3 Determinar Ambulancias Candidatas para ser reubicadas .....	80
4.4 Algoritmo Operativo y de Reubicación .....	84
4.4.1 Algoritmo de reubicación .....	84
4.4.2 Integración del Algoritmo de reubicación dentro del Algoritmo operativo.....	86
4.5 Validación de la técnica .....	91
4.5.1 Generación Instancias Test.....	91
4.5.2 Resultados .....	94
<b>5. CONCLUSIONES E INVESTIGACIÓN FUTURA .....</b>	<b>100</b>
5.1 Conclusiones .....	100

<b>5.2 Investigación futura .....</b>	<b>100</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>102</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>106</b>
<b>Anexo 1. Análisis de los desplazamientos de los Alfas con tiempo de respuesta hasta 10 minutos y mapas de isócronas de 7 minutos .....</b>	<b>106</b>
<b>Anexo 2. Análisis de los solapamientos entre cada par de mapas de isócronas de 7 minutos realizados desde las bases de los 10 Alfas .....</b>	<b>133</b>
<b>Anexo 3. Código del algoritmo sin reubicación .....</b>	<b>152</b>
<b>Anexo 4. Código del algoritmo con reubicación .....</b>	<b>158</b>
<b>Anexo 5. Municipios visitados por los Alfas en el año 2019 .....</b>	<b>171</b>
<b>Anexo 6. Municipios / barrios en cada instancia .....</b>	<b>172</b>

## Índice de tablas

Tabla 1. Actividades gestionadas por el CICU en la provincia de Valencia en el año 2018. ....	16
Tabla 2. Distribución de las emergencias sanitarias.....	19
Tabla 3. Variación porcentual de la demanda mensual media 2016 con y sin los meses 06-09. 23	
Tabla 4. Variación porcentual de la demanda mensual media 2019 con y sin los meses 06-09. 27	
Tabla 5. Número de llamadas de emergencias sanitarias por departamento.....	31
Tabla 6. Población SIP por departamento sanitario. ....	31
Tabla 7. Datos del padrón correspondientes al departamento sanitario de Sagunto. ....	32
Tabla 8. Desplazamientos por hora 2017-2019.....	36
Tabla 9. Tiempo (en horas) aproximado entre dos desplazamientos 2017-2019. ....	37
Tabla 10. Resumen de estadísticas para el tiempo de respuesta de los SAMU.....	43
Tabla 11. Desplazamientos de los Alfas en 2019.....	45
Tabla 12. Resumen de estadísticas para el tiempo de respuesta de los Alfas.....	46
Tabla 13. Posible sustitución entre los Alfas (versión preliminar). ....	51
Tabla 14. Posible sustitución entre los Alfas (versión definitiva). ....	53
Tabla 15. Resumen de las técnicas y de los métodos de resolución de los modelos de reubicación de ambulancias. ....	57
Tabla 16. Resumen de algunos aspectos más importantes de los modelos de reubicación de ambulancias.....	59
Tabla 17. Posible sustitución entre los Alfas. ....	71
Tabla 18. Bases candidatas y bases de destino para cada escenario. ....	78
Tabla 19. Tiempos de trayectos (en minutos) entre los hospitales y las bases de destino de la reubicación. ....	79
Tabla 20. Puntos de destino y de origen de la reubicación para cada escenario. ....	80
Tabla 21. Ambulancias candidatas para ser reubicadas. ....	83
Tabla 22. Ejemplo de una tabla de gestión.....	88
Tabla 23. Datos de emergencias para un ejemplo.....	93
Tabla 24. Tiempos de respuesta para las instancias de 10 y 15 emergencias obtenidos con los algoritmos sin reubicación y con reubicación. ....	95
Tabla 25. Tiempos de respuesta para las instancias de 20 y 25 emergencias obtenidos con los algoritmos sin reubicación y con reubicación. ....	96
Tabla 26. RPD para las instancias de 20 y 25 emergencias. ....	97
Tabla 27. RPD medio para las instancias de 20 y 25 emergencias. ....	97
Tabla 28. Tiempos de respuesta para las instancias de 40 emergencias, número de reubicaciones y la media de RPD.....	98
Tabla 29. RPD medio para las instancias de 40 emergencias.....	99

## Índice de figuras

Figura 1. Proceso de respuesta a una emergencia. ....	10
Figura 2. Áreas de salud de la Comunidad Valenciana.....	14
Figura 3. Áreas de salud de la provincia de Valencia. ....	15
Figura 4. Diagrama funcional de los CICU.....	15
Figura 5. Distribución de los vehículos SAMU en la provincia de Valencia.....	17
Figura 6. Demanda mensual media 2016-2019 de los primeros 20 municipios. ....	19
Figura 7. Demanda mensual acumulada.....	20
Figura 8. Gráfico de T2 de Hotelling. ....	20
Figura 9. Gráfico de contribución de Estubeny para la media (cada barra representa un mes). ..	20
Figura 10. Resumen modelo PCA.....	21
Figura 11. Biplot componentes 1 y 3. ....	22
Figura 12. Gráfico de dispersión de las componentes 1 y 3.....	22
Figura 13. Trayectoria 2016 de la demanda de emergencias de Cullera & trayectoria media. ...	23
Figura 14. Trayectoria 2016 de la demanda de emergencias de Chulilla & trayectoria media. ...	23
Figura 15. Variación de la demanda mensual media 2016.....	24
Figura 16. Gráficos de barras de la demanda mensual del 2016 de algunos municipios cuya demanda de emergencias aumenta en los meses de verano. ....	24
Figura 17. Gráficos de barras de la demanda mensual del 2016 de algunos municipios cuya demanda de emergencias disminuye en los meses de verano. ....	24
Figura 18. Biplot componentes 1 y 3. ....	25
Figura 19. Gráfico de dispersión de las componentes 1 y 3.....	26
Figura 20. Trayectoria 2019 de la demanda de emergencias de Cullera & trayectoria media. ...	26
Figura 21. Trayectoria 2019 de la demanda de emergencias de Domeño & trayectoria media. ..	26
Figura 22. Variación de la demanda mensual media 2019.....	27
Figura 23. Gráficos de barras de la demanda mensual del 2019 de algunos municipios cuya demanda de emergencias aumenta en los meses de verano. ....	28
Figura 24. Gráficos de barras de la demanda mensual del 2019 de algunos municipios cuya demanda de emergencias disminuye en los meses de verano. ....	28
Figura 25. Trayectoria 2016-2019 de la demanda de emergencias de cada mes en Canet d'en Berenguer. ....	29
Figura 26. Trayectoria 2016-2019 de la demanda de emergencias de cada mes en Tavernes de la Valldigna. ....	29
Figura 27. Trayectoria 2016-2019 de la demanda de emergencias de cada mes en Gandía. ....	29
Figura 28. Trayectoria 2016-2019 de la demanda de emergencias de cada mes en Sueca. ....	29
Figura 29. Trayectoria 2016-2019 de la demanda de emergencias de cada mes en Mislata. ....	29
Figura 30. Trayectoria 2016-2019 de la demanda de emergencias de cada mes en Catarroja. ...	29
Figura 31. Mapa de puntos calientes Enero 2016. ....	30
Figura 32. Mapa de puntos calientes Agosto 2016. ....	30
Figura 33. Mapa de puntos calientes Enero 2019. ....	30
Figura 34. Mapa de puntos calientes Agosto 2019. ....	30
Figura 35. Departamento de Sagunto y su parte de la provincia de Valencia.....	32
Figura 36. Gráfico de dispersión de N.º de llamadas de emergencia en 2017 & Población SIP. 32	
Figura 37. Gráfico de dispersión de N.º de llamadas de emergencia en 2018 & Población SIP. 33	
Figura 38. Mapa de puntos calientes Enero 2019 y ubicación de los SAMU.....	34
Figura 39. Desplazamientos del Alfa 10 Torrent en 2017. ....	34
Figura 40. Desplazamientos del Alfa 4 Hospital general en 2018. ....	35

Figura 41. Desplazamientos del Alfa 4 Hospital General en 2019. ....	35
Figura 42. Desplazamientos del Delta 7 Ontinyent en 2018. ....	35
Figura 43. Desplazamientos del Delta 7 Ontinyent en 2019. ....	35
Figura 44. Desplazamientos del Alfa 3 Campanar en 2019. ....	36
Figura 45. Desplazamientos del Delta 2 Liria en 2019. ....	36
Figura 46. Desplazamientos SAMU 2017-2019 por hora. ....	37
Figura 47. Gráfico de Caja y Bigotes de los tiempos de respuesta 2017. ....	38
Figura 48. Gráfico de Caja y Bigotes de los tiempos de respuesta 2018. ....	38
Figura 49. Gráfico de Caja y Bigotes de los tiempos de respuesta 2019. ....	39
Figura 50. Histograma de los tiempos de respuesta 2017. ....	39
Figura 51. Histograma de los tiempos de respuesta 2018. ....	40
Figura 52. Histograma de los tiempos de respuesta 2019. ....	40
Figura 53. Gráfico de intervalos LSD para tiempo de respuesta 2017. ....	41
Figura 54. Gráfico de intervalos LSD para tiempo de respuesta 2018. ....	41
Figura 55. Gráfico de intervalos LSD para tiempo de respuesta 2019. ....	42
Figura 56. Gráfico de intervalos LSD para tiempo de respuesta de Alfa 1 Manises. ....	42
Figura 57. Gráfico de intervalos LSD para tiempo de respuesta de Delta 6 Requena. ....	42
Figura 58. Gráfico de intervalos LSD para tiempo de respuesta de Delta 1 Sagunto. ....	43
Figura 59. Gráfico de intervalos LSD para tiempo de respuesta de Delta 2 Liria. ....	43
Figura 60. Distribución de los vehículos SAMU en la provincia de Valencia. ....	44
Figura 61. Mapa de isócronas de 7 minutos desde la base del Alfa 10 Torrent. ....	45
Figura 62. Desplazamientos del Alfa 1 Manises con tiempo de respuesta superior a 10 minutos. ....	46
Figura 63. Desplazamientos del Alfa 5 Silla con tiempo de respuesta superior a 10 minutos. ....	47
Figura 64. Desplazamientos del Alfa 2 Alfahuir con tiempo de respuesta superior a 10 minutos. ....	48
Figura 65. Desplazamientos del Alfa 8 Paterna con tiempo de respuesta superior a 10 minutos. ....	48
Figura 66. Desplazamientos del Alfa 10 Torrente con tiempo de respuesta superior a 10 minutos. ....	49
Figura 67. Desplazamientos del Alfa 11 Buñol con tiempo de respuesta superior a 10 minutos. ....	49
Figura 68. Desplazamientos del Alfa 1 Manises con tiempo de respuesta hasta 10 minutos e Isócrona de 7 minutos desde la base del Alfa 4 Hospital General. ....	50
Figura 69. Desplazamientos del Alfa 1 Manises con tiempo de respuesta hasta 10 minutos e isócrona de 7 minutos desde la base del Alfa 5 Silla. ....	51
Figura 70. Solapamiento entre el mapa de isócrona del Alfa 1 Manises y el del Alfa 2 Alfahuir. ....	52
Figura 71. % de solapamiento entre el mapa de isócrona del Alfa 1 Manises y el del Alfa 2 Alfahuir. ....	52
Figura 72. % de solapamiento entre el mapa de isócrona del Alfa 2 Alfahuir y el del Alfa 1 Manises. ....	52
Figura 73. Ubicación de los Alfas en la ciudad de Valencia y alrededores. ....	67
Figura 74. El mapa de isócrona del Alfa 2 Alfahuir y su población cubierta. ....	69
Figura 75. Cobertura inicial, cuando todos los Alfas están en sus bases habituales. ....	71
Figura 76. Escenario 1. Campanar II y Hospital General están libres. ....	73
Figura 77. Escenario 2. Campanar I y Hospital General están libres. ....	74
Figura 78. Escenario 3. Campanar I y Campanar II están libres. ....	75

Figura 79. Escenario 4. Alfahuir y Malvarrosa están libres. ....	76
Figura 80. Escenario 5. Paterna y Manises están libres. ....	76
Figura 81. Hospitales y bases de destino de la reubicación. ....	79
Figura 82. Mapa de isócronas de 7 minutos desde la Base 8 Paterna y la Base 1 Manises. ....	81
Figura 83. Diagrama de pasos del Algoritmo de reubicación. ....	85
Figura 84. Diagrama de pasos del Algoritmo “Asignar Base de Regreso” ....	86
Figura 85. Diagrama de pasos del Algoritmo operativo. ....	88
Figura 86. Municipios más visitados por los Alfas y los puntos aleatorios en los municipios/ barrios más poblados. ....	92
Figura 87. Ventana emergente de la función de generación de puntos aleatorios en QGIS. ....	92
Figura 88. La media de los tiempos de respuesta con y sin reubicación. ....	99

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Motivación

La principal función de Los Servicios de Emergencias Sanitarias (SES) es proporcionar atención médica en todas las situaciones de emergencia para evitar la muerte y/o disminuir las posibles secuelas del trauma. El pronóstico de las patologías que se clasifican como emergencias (paro cardíaco, fallo respiratorio severo, trauma severo, accidente cerebrovascular, etc.) está directamente relacionado con el tiempo transcurrido desde que se producen hasta que son atendidas. El tiempo de respuesta tiene tal relevancia que en algunos países está explícitamente definido en la normativa legal (en Estados Unidos, Canadá, Reino Unido, Países Bajos, Alemania se estipula entre 8 y 15 minutos). La Unión Europea recomienda cinco indicadores clave para monitorear y evaluar la atención de emergencias prehospitalarias, entre las cuales está el tiempo de respuesta a una emergencia dentro de 480 segundos.

El tiempo de respuesta es un término compuesto, que engloba tres acciones diferentes. La primera, llamada triaje, se produce desde el momento en que entra una llamada de emergencia hasta que una ambulancia esté asignada. En este período los despachadores de emergencias desempeñan un papel crucial. Tienen que recopilar información relacionada con el problema, averiguar su naturaleza y cualquier circunstancia especial, clasificar la llamada y determinar el tipo de recurso de respuesta más apropiado. El segundo período es un breve tiempo de preparación del equipo, desde que se asigna la ambulancia hasta que se pone en marcha. Y, por último, es el tiempo de trayecto del vehículo asignado hasta el lugar de emergencia (Figura 1).

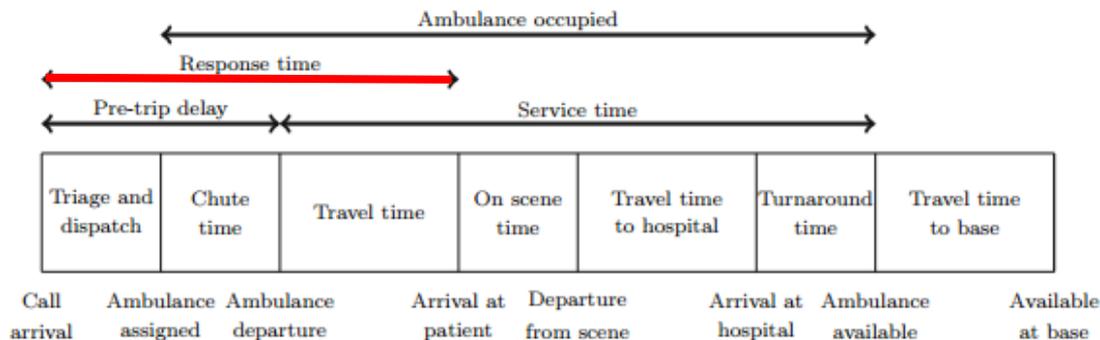


Figura 1. Proceso de respuesta a una emergencia.  
Fuente: Reuter et al. 2017 Logistics for Emergency Medical Service systems.

Hay muchos factores que tienen un impacto directo en la probabilidad de llegar a una emergencia a tiempo:

- Ubicación de las bases (distancia entre ambulancia y emergencia);
- Cantidad y calidad de recursos (personal y ambulancias disponibles);
- Políticas de despacho;
- Velocidad media de una ambulancia;
- Densidad de población;
- Frecuencia de llamadas de emergencia;
- Factores socioeconómicos como el número de escuelas, jardines de infancia y hogares para ancianos.

En este trabajo nos vamos a centrar en el primer factor mencionado, que es la ubicación de las bases de los vehículos.

El problema de ubicación de las ambulancias se puede analizar desde tres niveles diferentes: estratégico, táctico y operativo. En el nivel estratégico, la determinación de la ubicación se puede considerar como un modelo estático, es decir, encontrar una cantidad óptima de sitios (bases) donde se colocarán las ambulancias mientras esperan que se las envíe para responder a las llamadas de emergencia y donde cada ambulancia volverá después de completar una misión. Suelen ser hospitales o centros de salud, donde las ambulancias pueden ser desinfectadas o donde pueden reponer material necesario. Las decisiones a este nivel no se suelen tomar de manera frecuente. En la vida real las ubicaciones ya están determinadas, pero se pueden realizar revisiones y algunos ajustes, sobre todo cuando hay movimiento de población a causa de periodo vacacional, lo cual puede modificar la demanda de este servicio.

Aún en el caso de contar con la ubicación óptima de los vehículos, a medida que éstos se mueven para atender emergencias, algunas zonas podrían quedarse sin cobertura, siendo difícil mantener un nivel de servicio adecuado. Con un mayor número de vehículos se podría resolver este problema, pero hay que tener en cuenta que es un recurso escaso. Una solución alternativa sería reubicar los vehículos disponibles para alcanzar la mayor cobertura posible.

Hay dos tipos de reubicaciones:

- Reubicaciones multi-período (corresponden al segundo nivel de ubicaciones, el táctico). Se deben a los cambios en el patrón de la demanda (movimientos de las personas de las zonas periféricas a la zona del centro o al revés según la hora del día, o día de la semana). Las decisiones a nivel táctico se suelen tomar con mayor frecuencia que las estratégicas, pero no tan a menudo como las operativas.
- Reubicaciones dinámicas (tercer nivel de ubicaciones, el operativo). Se deben a las variaciones del estado del sistema. Cuando algunos vehículos responden a demandas de emergencia, el sistema tiene que operar con una flota reducida de vehículos, pero debe mantener su capacidad para atender las emergencia en el menor tiempo posible. En este caso puede ser muy beneficioso reubicar las ambulancias. Las decisiones de este tipo se hacen a diario o incluso en tiempo real.

Nuestro principal objetivo es desarrollar un algoritmo que pueda servir como base de un soporte operativo para ayudar a los servicios de atención prehospitalaria en la toma de decisiones de reubicación dinámica de ambulancias (ubicaciones a nivel operativo). Dado que obtener la solución óptima en un tiempo razonable no es viable para este problema, se va a realizar mediante el diseño y desarrollo de herramientas heurísticas inteligentes.

En los siguientes apartados de este punto se definen los objetivos del trabajo y la metodología y se hace una breve descripción de los software que se van a utilizar.

## 1.2 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar un algoritmo que sirva como base de un sistema de gestión de emergencias para ayudar al SES en la reubicación dinámica de los vehículos. La idea es que cada vez que una ambulancia finalice un servicio, antes de enviarla a su base, el sistema revise si hay alguna opción de mejora en la configuración del sistema (si hay otra base que proporcionaría mejor cobertura) y avise, pero la decisión final de reubicar o no un vehículo la tomaría un despachador.

Los objetivos secundarios que se plantean en este trabajo son los siguientes:

1. Estudiar los aspectos funcionales de los SES, su estructura y el marco legislativo.
2. Basándose en los datos históricos realizar un análisis de componentes principales para descubrir si hay algunos patrones de la demanda.
3. Realizar un análisis de los servicios de emergencias sanitarias para descubrir sus áreas de atención, su eficiencia y el nivel de sustitución entre ellos para tenerlos en cuenta a la hora de desarrollar nuestra técnica.
4. Analizar diferentes métodos de reubicación de ambulancias y apoyándose en ellos definir los aspectos clave para el desarrollo de nuestro algoritmo heurístico.

## 1.3 Software

En este estudio se van a utilizar los siguientes software:

- Statgraphics XVII para realizar análisis estadísticos de los datos históricos.
- AspenProMV para análisis de componentes principales.
- Excel para cálculos, tablas y gráficos.
- Bizagi Modeler para realizar diagramas de flujo.
- QGIS para realizar diversos mapas.
- Jupyter Notebook (Python 3.7) para programar el algoritmo.

## 1.4 Metodología

Este trabajo afronta la resolución del problema de reubicación dinámica de vehículos de emergencias sanitarias. Es un problema real, del Servicio de Emergencias Sanitarias de la provincia de Valencia, y su particularidad está en que hasta ahora no se había abordado en la Comunidad Valenciana.

Para resolver el problema se ha seguido una serie de pasos basados en el método científico. Cada uno de ellos corresponde a los cinco capítulos que integran esta memoria.

El capítulo 2 está dedicado a la descripción y el análisis de los datos históricos del SES de la provincia de Valencia a nivel departamental y por cada unidad de SAMU.

En el capítulo 3 presentamos la revisión bibliográfica de diferentes modelos de reubicación de ambulancias y un resumen de los puntos más importantes para tenerlos en cuenta a la hora de desarrollar nuestra técnica.

En el capítulo 4 desarrollamos y validamos nuestro algoritmo heurístico y finalizamos con conclusiones y trabajo futuro en el capítulo 5.

## **2. LOS SERVICIOS DE EMERGENCIAS SANITARIAS EN LA PROVINCIA DE VALENCIA**

### **2.1 Estructura de los Servicios de Emergencias Sanitarias**

Los Servicios de Emergencias Sanitarias (SES) forman parte integral de todo el sistema público de salud. Las urgencias y emergencias<sup>1</sup> sanitarias tienen dos ámbitos principales de asistencia, el hospitalario y el extrahospitalario. Los servicios de emergencias sanitarias extrahospitalarias son un eslabón en la cadena asistencial iniciada en el momento en el que se detecta la emergencia sanitaria. Tras analizar las necesidades, se asignan recursos necesarios para una actuación rápida in situ y/o se realiza transporte sanitario del paciente al centro de tratamiento. El modelo español de emergencias sanitarias extrahospitalarias se ha desarrollado fundamentalmente a partir de los años 80 y 90 del siglo pasado, cuando se detectan las altas cifras de mortalidad extrahospitalaria, sobre todo producidas por patologías cardíacas y los accidentes de tráfico. El tiempo transcurrido desde el primer evento hasta la aplicación de los primeros tratamientos críticos en las UCI era demasiado largo para lograr una recuperación adecuada de estos enfermos. Por ello, se vio necesario dar una respuesta lo más rápida posible en el lugar del suceso. Se crean secciones sanitarias en diversos cuerpos, como Bomberos y Salvamento, dedicados a la emergencia sanitaria extrahospitalaria y se realiza la inversión en parques de unidades móviles medicalizadas.

Con el traspaso de las competencias sanitarias a las Comunidades Autónomas, los Servicios de Urgencias y Emergencias Sanitarias se han integrado en diferentes dispositivos asistenciales de urgencias en el sistema público autonómico.

A mediados de los años 90, en base a la transposición de la directiva europea, se regula el acceso al servicio de urgencias y emergencias sanitarias a través de los centros 112 con otros servicios de emergencia no propiamente sanitarios como los de salvamento y rescate. Se garantiza la accesibilidad y la coordinación de los recursos disponibles para este tipo de atención las 24 horas al día.

En el anexo IV del real decreto de 2006 sobre la Cartera de Servicios comunes del Sistema Nacional de Salud, se especifica la cartera de servicios comunes de la atención de urgencia, que comprende, entre otros:

- La atención telefónica, a través de los centros coordinadores de urgencias sanitarias.
- La evaluación inicial e inmediata de los pacientes para determinar los riesgos para su salud y su vida.
- La realización de los procedimientos diagnósticos precisos y de los procedimientos terapéuticos médico-quirúrgicos necesarios para atender adecuadamente cada situación de urgencia sanitaria.
- El transporte sanitario, asistido o no asistido, según lo requiera la situación clínica de los pacientes.

El RD 619/1998, establece las características técnicas, equipamiento y dotación de personal de los vehículos de transporte sanitario por carretera. El RD 903/1997 regula el acceso al servicio de urgencias y emergencias a través del 112. Las diferentes Comunidades Autónomas han desarrollado a su vez la legislación que regula la constitución de los organismos correspondientes a la gestión de estos servicios. En la Comunidad Valenciana tenemos el Decreto 122/1984, de 12

---

<sup>1</sup> Las características más importantes para diferenciar las urgencias y emergencias son el riesgo vital a corto plazo y la necesidad de respuesta inmediata.

de noviembre, del Consell de la Generalitat, por el que se aprueba el Plan de Información y Coordinación de Orden de 11 de julio de 2000 de la Conselleria de Sanitat, por la que se regulan los Centros de Información y Coordinación de Urgencias (CICU) y los Servicios de Ayuda Médica Urgente (SAMU). También el Decreto 149/2002, de 10 de septiembre, del Gobierno Valenciano, por el que se crean las categorías de Médico SAMU, ATS/DUE SAMU, conductor camillero y locutor de los Centros de Información y Coordinación de Urgencias (CICU).

La gestión de emergencias sanitarias en la Comunidad Valenciana es competencia de la Conselleria de Sanitat a través de la Subdirección General de Actividad Asistencial en el Servicio de Atención Sanitaria a Urgencias y Emergencias (SASUE). La Comunidad Valenciana delimita y constituye en su territorio las denominadas áreas o departamentos de salud (Figura 2). Según la Ley 14/1986, son “las estructuras fundamentales del sistema sanitario, responsabilizadas de la gestión unitaria de los centros y los establecimientos del servicio de salud de la comunidad autónoma en la demarcación territorial correspondiente, y de las prestaciones y los programas sanitarios que aquellos han de desempeñar”.



Figura 2. Áreas de salud de la Comunidad Valenciana.  
Fuente: Conselleria de Sanidad.

A nivel provincial se encuentran los Servicios de Emergencias Sanitarias (SES) provinciales de los que dependen los Centros de Información y Coordinación de Urgencias (CICU) y los recursos específicos de emergencias sanitarias. Los tres Servicios de Emergencias Sanitarias, ubicados en Castellón, Valencia y Alicante, tienen un director asistencial al frente de cada uno de ellos y un

director de gestión al frente de la estructura administrativa. Son los encargados de la gestión provincial de las urgencias y emergencias extrahospitalarias. El SES de la Provincia de Valencia gestiona la actuación de los servicios de emergencias sanitarias en las 11 áreas de salud que no coinciden con la demarcación comarcal (Figura 3). Además, el área de Sagunto está compartida con la provincia de Castellón.



Figura 3. Áreas de salud de la provincia de Valencia.  
Fuente: Conselleria de Sanidad.

Los Centros de Información y Coordinación de Urgencias son los centros responsables de la gestión y coordinación permanente, 24 horas al día, de los recursos asistenciales que participan en la respuesta a las urgencias y emergencias sanitarias en un ámbito territorial de la provincia.

En los CICU se atiende telefónicamente la emergencia y según sus características o gravedad se decide la actuación a seguir: resolución telefónica, movilización de recursos, o derivación del paciente por sus propios medios a un centro determinado (Figura 4).

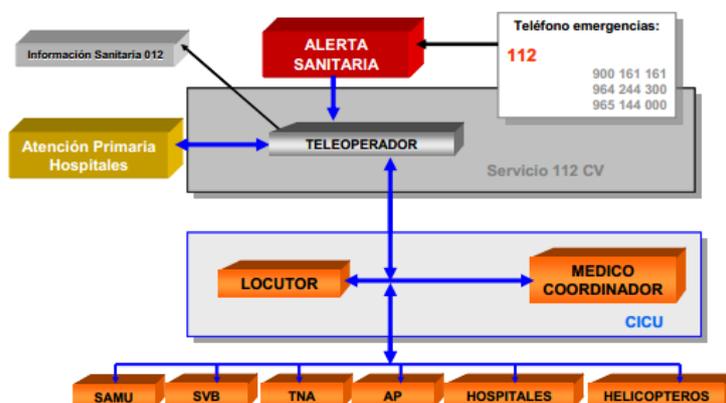


Figura 4. Diagrama funcional de los CICU.  
Fuente: Agencia Valenciana de Salud.

En los CICU hay 2 categorías profesionales con las siguientes funciones:

- Locutor CICU: Asignación y movilización de los recursos sanitarios, seguimiento de los recursos y comunicaciones.
- Médico coordinador: Respuestas no protocolizadas, consulta médica, coordinación y control de los servicios y personal de CICU.

El acceso telefónico a los CICU se realizará a través de los operadores de la sala 112. Estos operadores realizan la clasificación de la demanda sanitaria con la ayuda de la aplicación informática destinada a tal fin. Según la tipificación obtenida, traspasan el requerimiento de asistencia al sistema sanitario. Se consideran cinco prioridades:

- Prioridad 1. Proceso con riesgo vital inminente. Movilización y asistencia inmediata (Emergencia sanitaria).
- Prioridad 2. Proceso con riesgo vital no inminente. Proceso grave o de actuación urgente sin riesgo vital inmediato (Emergencia sanitaria).
- Prioridad 3. Proceso no vital, pero con atención sin demora (Urgencia sanitaria)
- Prioridad 4. Proceso no vital, precisa asistencia aunque ésta puede ser demorada (Urgencia sanitaria).
- Prioridad 5. Proceso no urgente. Proceso leve sin riesgo vital, no precisa asistencia urgente (Urgencia sanitaria).

La clasificación de la demanda conlleva la asignación, por parte del centro coordinador, de una respuesta para su resolución:

- Con movilización de recursos: emergencia sanitaria, transporte sanitario, urgencia sanitaria.
- Sin movilización de recursos: consulta médica, información sobre servicios.

En la Tabla 1 podemos observar el resumen de las actividades gestionadas por el CICU en la provincia de Valencia en el año 2018.

Tipo de actividad	Valencia	
	Núm.	Media al día
Llamadas atendidas 112	298.654	818
Emergencias sanitarias	80.193	220
Urgencias médicas	54.171	148
Consultas médicas	24.835	68
Transporte secundario	6.686	18
Transporte urgente no asistido	66.845	183
Alertas	7.301	20
Llamadas asociadas	27.575	76
Información/Multidisciplinar	19.296	53

*Tabla 1. Actividades gestionadas por el CICU en la provincia de Valencia en el año 2018.  
Fuente: Sistema de Información Corporativa del Servicio 112 CV.*

La asistencia con movilidad de recursos se realiza mediante las siguientes unidades:

- Unidades de Soporte Vital Avanzado (Servicio de Ayuda Médica Urgente **SAMU**). Es un servicio extrahospitalario que presta asistencia sanitaria en las situaciones de urgencia y emergencia con la capacidad de proporcionar in situ un Soporte Vital Avanzado (en especial cardiocirculatorio y traumatológico). Estabilizan al paciente y, si es necesario, lo trasladan al hospital de referencia. El equipo está integrado por personal médico, enfermería, técnico sanitario y/o conductor. También pueden prestar asistencia sanitaria en traslados interhospitalarios en los que se requieren condiciones especiales de soporte y mantenimiento.
- Unidades de Soporte Vital Básico (**SVB**): prestan su servicio en situaciones de urgencia que requieren atención sanitaria inmediata con posible traslado de los pacientes al

hospital de referencia más próximo. Cuentan con un técnico de transporte sanitario y un conductor.

- Ambulancias convencionales (**TNA**): Las ambulancias convencionales son vehículos destinados al traslado individual y no asistido de pacientes. Disponen de equipamiento técnico y material sanitario básico. Cuentan con un conductor.
- Equipos de emergencias aéreas (helicópteros). El equipo está integrado por personal médico, enfermería y tripulación.
- Vehículos de intervención rápida (**VIR**): Vehículos para prestar asistencia in situ, sin transporte de pacientes.
- Otros vehículos (vehículos de apoyo logístico para aportar los elementos necesarios en la gestión de una emergencia colectiva o catástrofe, ambulancias psiquiátricas, vehículos logísticos de trasplante, vehículos logísticos para transporte neonatal, etc.)

La provincia de Valencia cuenta con la siguiente flota:

- Vehículos SAMU	20
- Vehículos SVB	46
- Vehículos TNA	180
- Vehículos VIR	1
- Otros	27

La planificación de los recursos, en concreto su distribución territorial, se realiza en razón a la población a atender (por cada 100.000 habitantes debe haber un SAMU) y en razón a los objetivos marcados en cuanto al tiempo máximo desde el dispositivo asistencial al núcleo de población (entre el 50-65 % de la población debe estar cubierta en menos de 15 minutos por equipos móviles terrestres de tipo SAMU y/o SVB).

A efectos de este estudio, nos vamos a centrar en el primer tipo de vehículos, los SAMU, que se denominan Alfas o Deltas (según si se encuentran o no en pueblos de la periferia). De los 20 vehículos SAMU (Figura 5) 14 prestan un servicio de 24 horas al día y 6 están disponibles 12 horas al día.



Figura 5. Distribución de los vehículos SAMU en la provincia de Valencia.  
Fuente: Elaboración propia.

11 de los vehículos se localizan en los Hospitales:

- Alfa 1 Hospital de Manises
- Alfa 3 Hospital de La Fe Antigua
- Alfa 4 Hospital General Universitario
- Alfa 6 Hospital de la Malvarrosa
- Alfa 7 Hospital de la Fe Antigua
- Delta 2 Hospital de Lliria
- Delta 3 Hospital Público en Alzira
- Delta 5 Hospital Comarcal en Gandía
- Delta 6 Hospital de Requena
- Delta 7 Hospital de Ontinyent
- Delta 8 Hospital Público de Xàtiva

8 en Centros de Salud:

- Alfa 2 Centro de Salud de Alfahuir
- Alfa 5 Centro de Salud de Silla
- Alfa 10 Centro de Salud de Torrent
- Alfa 11 Centro de Salud de Buñol
- Delta 1 Centro de Salud de Sagunto
- Delta 4 Centro de Salud de Sueca
- Delta 9 Centro de Salud de Oliva
- Delta 10 Centro de Salud de Utiel

1 en un Polígono Industrial (por tener una buena salida a la autovía):

- Alfa 8: Polígono Industrial de Paterna

Las bases de las ambulancias son puntos estratégicos no solamente para cubrir la demanda, sino también para proporcionar material y servicio de desinfección necesarios después de los servicios realizados.

Una vez atendido el paciente en el lugar de la emergencia, se realiza el traslado de este (si es necesario) al centro asignado. La tripulación de la ambulancia permanece con el paciente hasta que sea atendido por el equipo médico y esté entregada toda la documentación pertinente. Al terminar el servicio, la ambulancia vuelve a su base o se asigna a otra llamada. Actualmente no se realiza la reubicación de los vehículos.

## 2.2 Análisis de los datos históricos

### 2.2.1 Análisis de la demanda de emergencias sanitarias

El problema de la reubicación de ambulancias es un problema estocástico. No se sabe dónde y cuándo puede surgir una emergencia. Aun así, los datos históricos pueden ser de gran ayuda porque pueden revelar patrones de demanda.

Hemos tenido acceso a las emergencias sanitarias producidas en los años 2016-2019 en cada área de salud de la provincia de Valencia. El Servicio de Atención Sanitaria a Urgencias y Emergencias (SASUE) nos ha proporcionado el total mensual de las llamadas de Prioridad 1 y 2 atendidas en diferentes municipios valencianos. La Tabla 2 muestra la distribución de las emergencias sanitarias (la media mensual de los años 2016-2019 y el número de municipios correspondientes).

N.º de emergencias	N.º de municipios
3007	1
241	1
187	1
153	1
137	1
entre 51 y 100	14
entre 31 y 50	18
entre 11 y 30	32
entre 6 y 10	22
entre 2 y 5	91
1 o ninguna	84

Tabla 2. Distribución de las emergencias sanitarias.  
Fuente: Elaboración propia.

La mayor parte de la demanda se concentra en la ciudad de Valencia (3007 llamadas). Los primeros 20 municipios con mayor número de llamadas de emergencias acumulan más del 73% de todas las llamadas (Figuras 6 y 7).

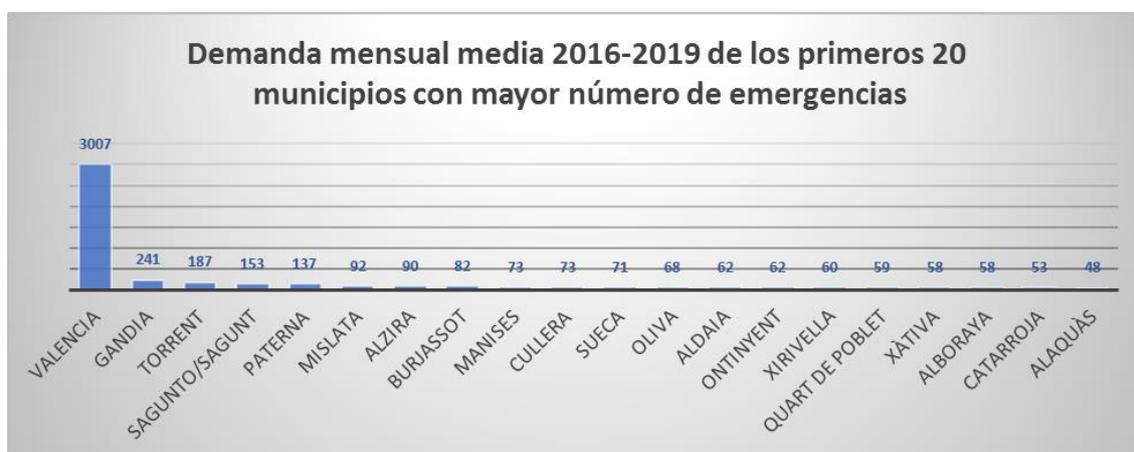


Figura 6. Demanda mensual media 2016-2019 de los primeros 20 municipios.  
Fuente: Elaboración propia.

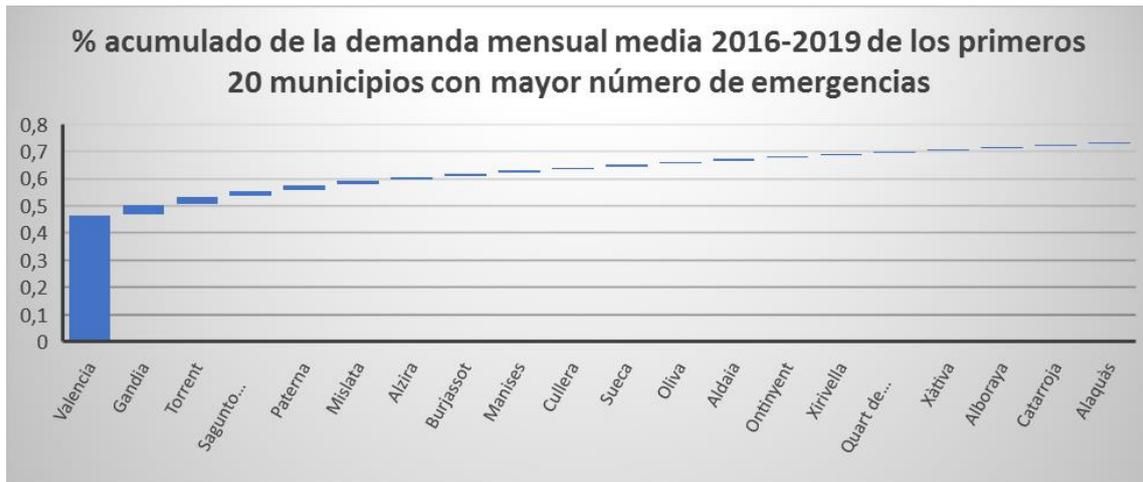


Figura 7. Demanda mensual acumulada.  
Fuente: Elaboración propia.

Para conocer la demanda, se ha realizado un análisis de componentes principales (PCA) con el software AspenProMV que estima la estructura de correlación entre diferentes variables y condensa la información en una cantidad reducida de variables latentes (no observadas directamente). En nuestro caso representamos cada municipio como un individuo (en la matriz de datos se ubican en filas) y los meses del año en los que se atienden las emergencias en estos municipios se representan como variables (columnas). El PCA permite reducir nuestras 12 variables (meses) en una cantidad menor, en base a la correlación que hay entre estos meses. La enorme ventaja de este método es que no se necesita cumplimiento de hipótesis previas.

Dado que los datos absolutos no son comparables (hay municipios con 1 o 2 emergencias atendidas al mes y otros con más de 3000 emergencias), se ha realizado una ponderación de los valores con la población media anual de cada municipio (Fuente INE). Se ha hecho un análisis PCA para cada uno de los 4 años aunque aquí solamente presentamos resultados de los años 2016 y 2019.

Los primeros resultados (2016) muestran que en abril, en el municipio Estubeny hubo una cantidad de emergencias excesivamente alta en términos porcentuales según la población (2 para una población de 118 personas) (Figuras 8 y 9).

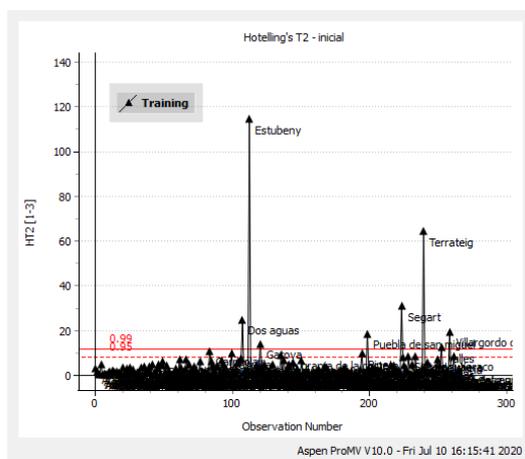


Figura 8. Gráfico de T2 de Hotelling.  
Fuente: Elaboración propia.

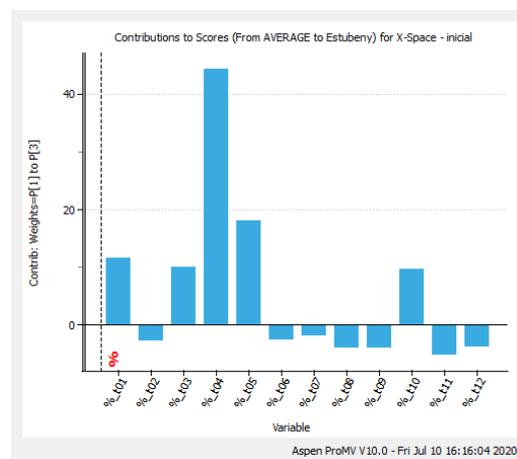


Figura 9. Gráfico de contribución de Estubeny para la media (cada barra representa un mes).  
Fuente: Elaboración propia.

Asimismo se detectan otros valores atípicos como: Terrateig, Carrícola y Beneixida en junio, Segart en mayo, Puebla de San Miguel en marzo, Cerdá y Vallés en octubre y diciembre, Gátova en enero, Villargordo del Cabriel en diciembre, Venta del Moro en abril, La Granja de la costera en julio y noviembre.

Una vez validado el modelo, observamos que 4 componentes explican el comportamiento de alrededor del 60 % de los datos (Figura 10). Es decir, en vez de 12 meses (nuestras variables), obtenemos 4 variables latentes.

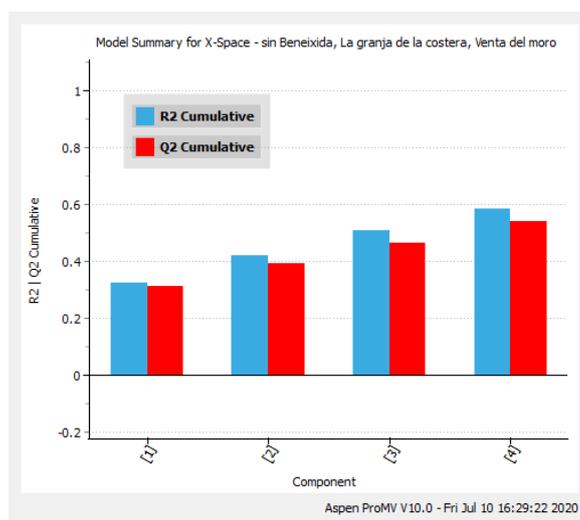


Figura 10. Resumen modelo PCA.  
Fuente: Elaboración propia.

El software AspenProMV permite ver no solamente la distribución de los 12 meses (variables) en el espacio de las variables latentes o distribución de los municipios (individuos) en el espacio de las variables latentes, sino también realiza biplot, es decir en el mismo espacio, representado por 2 componentes (variables latentes) cualesquiera, se puede observar a la vez tanto la distribución de las variables como la de los individuos.

En la Figura 11 el biplot de las componentes 1 y 3 (representamos la variable latente 1 en el eje de abscisas y la variable latente 3 en el eje de ordenadas) muestra con puntos negros la distribución de los meses del año y con triángulos azules la de los municipios. Las poblaciones que se localizan en la misma dirección que los meses, tienen valores altos de emergencias justamente en estos meses. En la parte inferior derecha de la figura vemos un grupo de meses (junio, julio, agosto y septiembre denominados como %\_t6, %\_t7, %\_t8 y %\_t9 respectivamente) que está alejado de los demás. En la misma dirección (si trazamos un vector desde el centro del gráfico (0,0) hacia este grupo de meses) y bastante alejados del centro, se encuentran los municipios que hemos marcado con una elipse verde. Estos municipios tienen valores de emergencias altos en estos cuatro meses de verano.



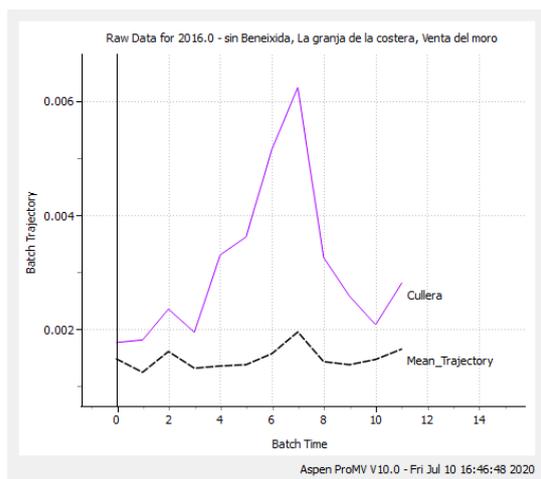


Figura 13. Trayectoria 2016 de la demanda de emergencias de Cullera & trayectoria media.  
Fuente: Elaboración propia.

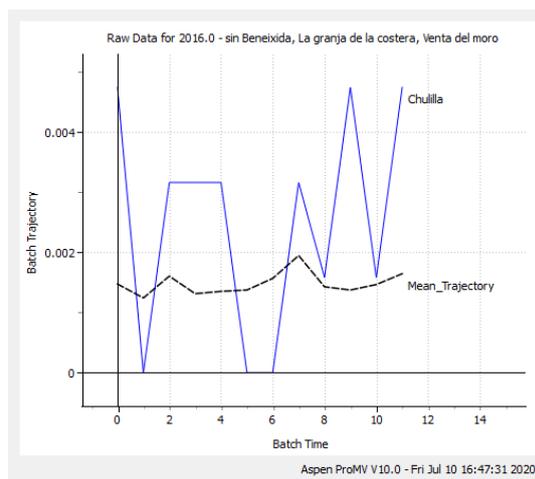


Figura 14. Trayectoria 2016 de la demanda de emergencias de Chullilla & trayectoria media.  
Fuente: Elaboración propia.

La elección de las componentes 1 y 3 no es casual. La primera componente explica mayor porcentaje de la variabilidad de los datos, mientras que la tercera componente discrimina muy bien los 4 meses más calurosos del año. Por lo tanto, hay una serie de municipios (mayoritariamente los de la costa) que tienen un patrón muy marcado de la demanda alta en los meses veraniegos. Esto se debe a los movimientos de la población a estas zonas en el período vacacional. Si analizamos la demanda media mensual del año 2016 con y sin los 4 meses mencionados (para los municipios con más de 5 emergencias al mes), vemos que hay municipios con una disminución porcentual importante del número mensual medio de llamadas de emergencias (Tabla 3 y Figura 15).

Municipio	Demanda mensual media 2016	Demanda mensual media 2016 sin los meses 06-09	Variación de la demanda media mensual 2016 con y sin los meses 06-09
Cullera	68	52	-0,243
Picassent	30	27	-0,097
Puig	23	20	-0,145
La pobla de Farnals	23	20	-0,135
Xeraco	19	16	-0,195
Canet d'en Berenguer	12	9	-0,277
Náquera	11	9	-0,163
Turís	9	8	-0,153
Bellreguard	9	7	-0,200
Daimús	9	6	-0,337
Sollana	8	7	-0,121
Serra	8	7	-0,117
Míramar	7	5	-0,296
Albaida	6	6	-0,143
Piles	6	5	-0,171
Simat de la Vall d'igna	6	5	-0,109

Tabla 3. Variación porcentual de la demanda mensual media 2016 con y sin los meses 06-09.  
Fuente: Elaboración propia.

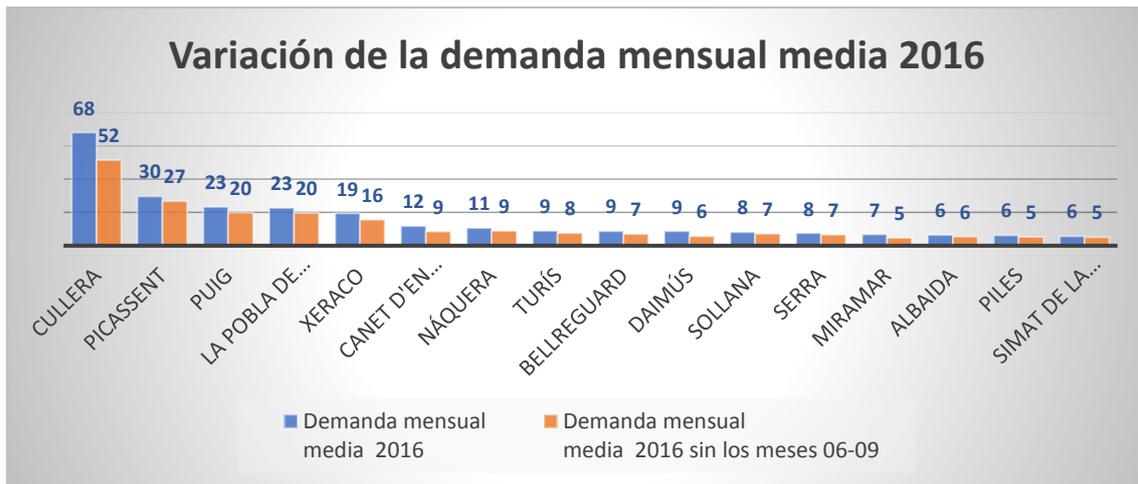


Figura 15. Variación de la demanda mensual media 2016.  
Fuente: Elaboración propia.

Si observamos los datos absolutos de las emergencias, confirmamos este hecho. Hay municipios cuya demanda crece en los meses de verano (Figura 16) y otros, cuya demanda disminuye en estos meses (Figura 17).

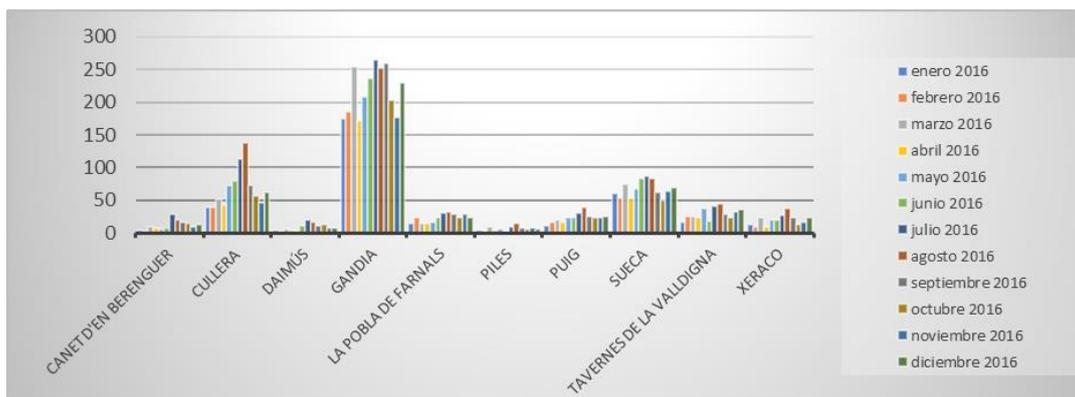


Figura 16. Gráficos de barras de la demanda mensual del 2016 de algunos municipios cuya demanda de emergencias aumenta en los meses de verano.  
Fuente: Elaboración propia.

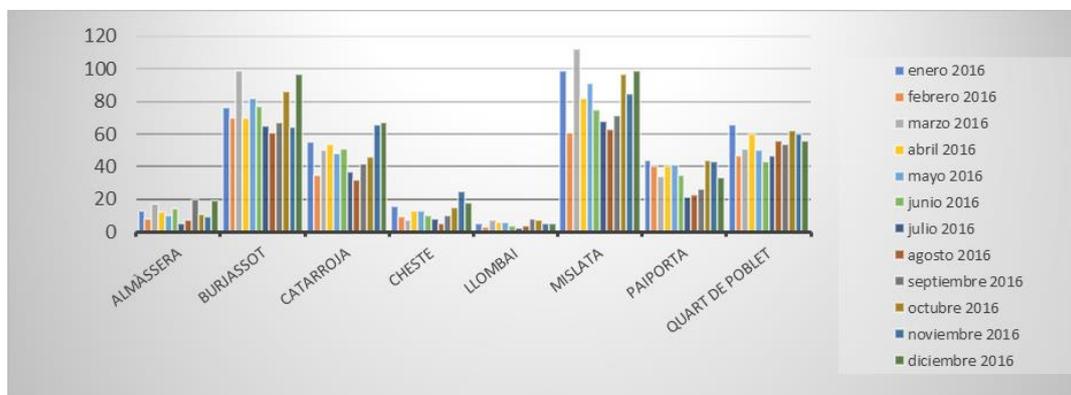


Figura 17. Gráficos de barras de la demanda mensual del 2016 de algunos municipios cuya demanda de emergencias disminuye en los meses de verano.  
Fuente: Elaboración propia.

Los resultados del análisis de los datos del año 2019 también muestran una cantidad atípica de emergencias para algunos municipios: Estubeny en febrero, Torres Torres y Segart en marzo, Bufali en abril.

En el biplot de las componentes 1 y 3 vemos como los meses de mayo y agosto, julio y septiembre se encuentran en la parte superior derecha junto con los municipios que tienen valores altos de emergencias en estos meses (Figura 18). Para verlo mejor, observamos el gráfico de dispersión de las componentes 1 y 3 (Figura 19). Los municipios como Cullera, Calles, Alcublas, Miramar, Siete Aguas, Canet d'en Berenguer tienen la demanda de emergencias alta en los meses mencionados.

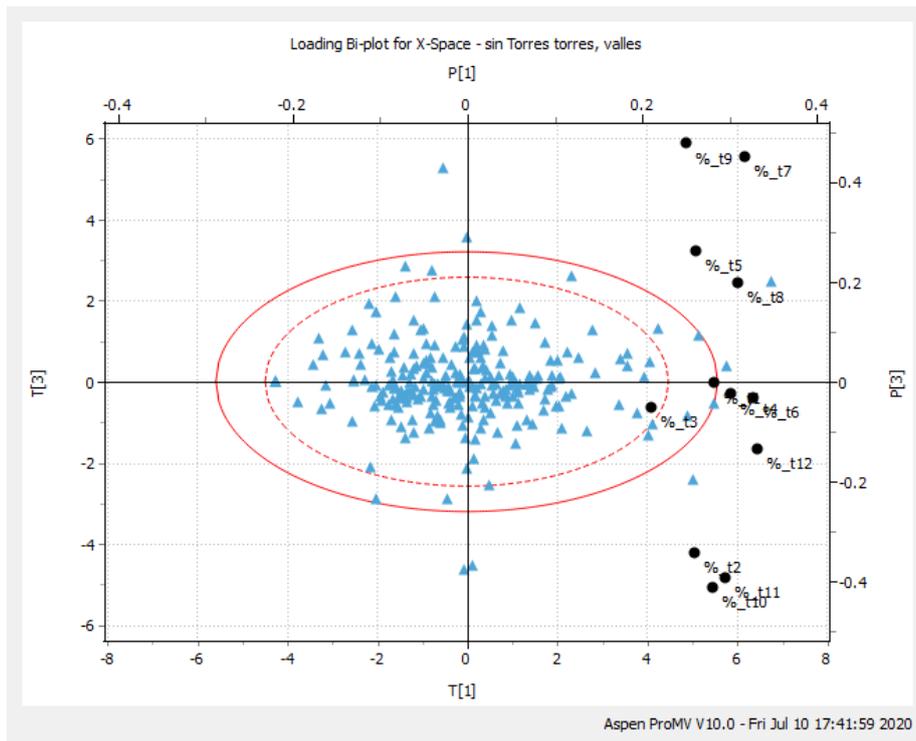


Figura 18. Biplot componentes 1 y 3.  
Fuente: Elaboración propia.

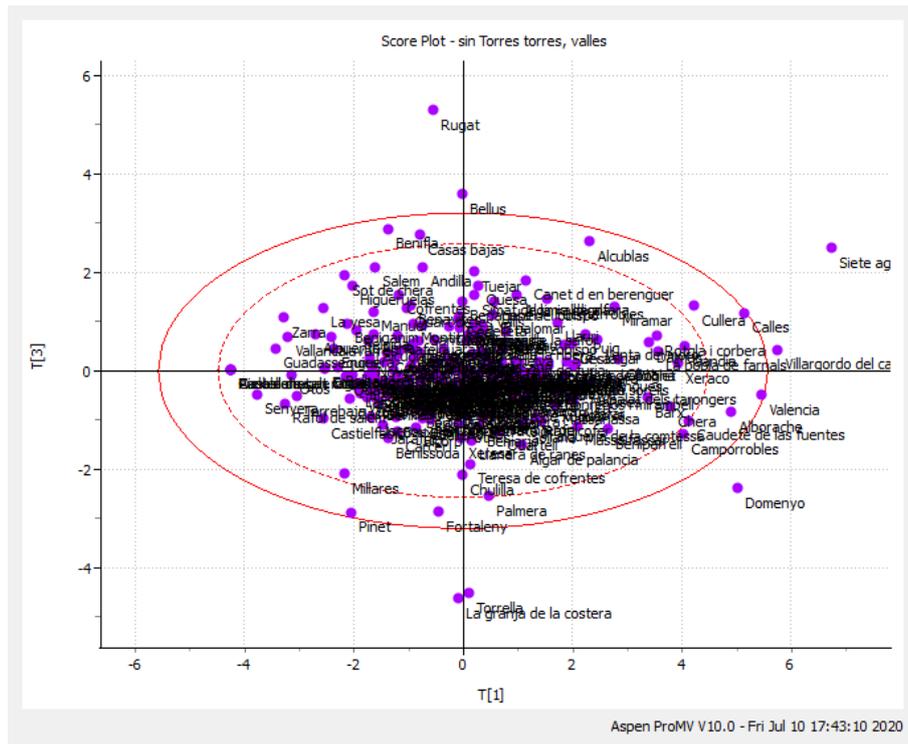


Figura 19. Gráfico de dispersión de las componentes 1 y 3.  
Fuente: Elaboración propia.

Si comparamos la trayectoria anual de Cullera con la trayectoria anual de, por ejemplo, Domeño<sup>3</sup> observamos que en los meses centrales del año la demanda de emergencias en Cullera sube, mientras que Domeño tiene la mayor demanda en enero y noviembre (Figuras 20 y 21).

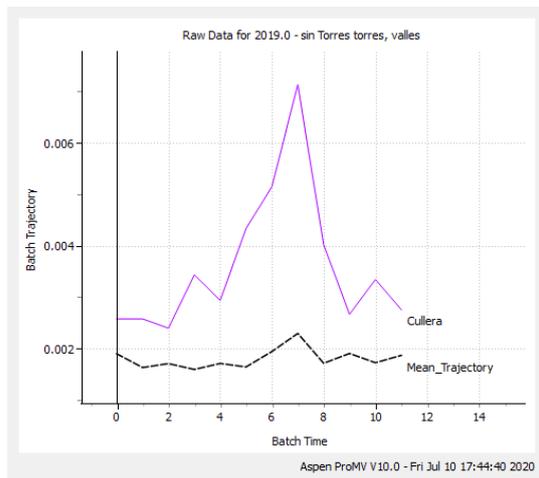


Figura 20. Trayectoria 2019 de la demanda de emergencias de Cullera & trayectoria media.  
Fuente: Elaboración propia.

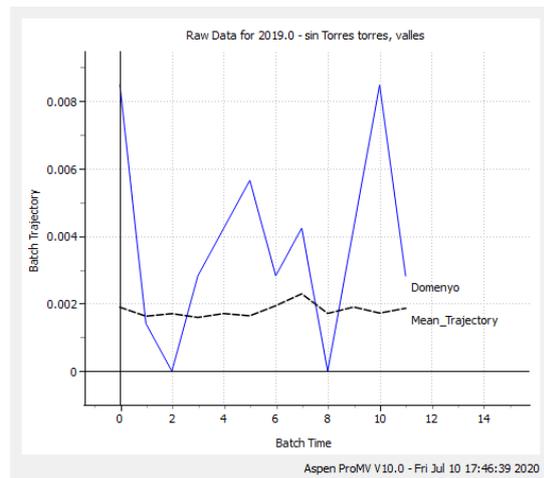


Figura 21. Trayectoria 2019 de la demanda de emergencias de Domeño & trayectoria media.  
Fuente: Elaboración propia.

<sup>3</sup> En la Figura 19 Domeño está en la parte inferior derecha.

Acorde al análisis de los datos del año 2016, si vemos la demanda media mensual del año 2019 con y sin los meses de junio, julio, agosto y septiembre (para los municipios con más de 5 emergencias al mes), igualmente vemos que hay municipios con una disminución porcentual importante del número mensual medio de llamadas de emergencias (Tabla 4 y Figura 22).

Municipio	Demanda mensual media 2019	Demanda mensual media 2019 sin los meses 06-09	Variación de la demanda media mensual 2019 con y sin los meses 06-09
Cullera	80	63	-0,215
Sueca	71	63	-0,115
Tavernes de la Valldigna	38	34	-0,108
Puig	24	22	-0,091
Benaguasil	16	15	-0,112
Canet d'en Berenguer	16	10	-0,354
Daimús	10	8	-0,244
Turís	10	9	-0,087
Miramar	8	6	-0,304
Villar del arzobispo	7	6	-0,085
Godolleta	6	6	-0,100
Serra	6	5	-0,128
Aielo de malferit	6	5	-0,134
Alfara del patriarca	6	5	-0,130
Siete aguas	6	4	-0,328
L'alcúdia de crespins	6	5	-0,182
Benigànim	5	4	-0,214
Montroy	5	4	-0,132
Gilet	5	4	-0,170

Tabla 4. Variación porcentual de la demanda mensual media 2019 con y sin los meses 06-09.  
Fuente: Elaboración propia.

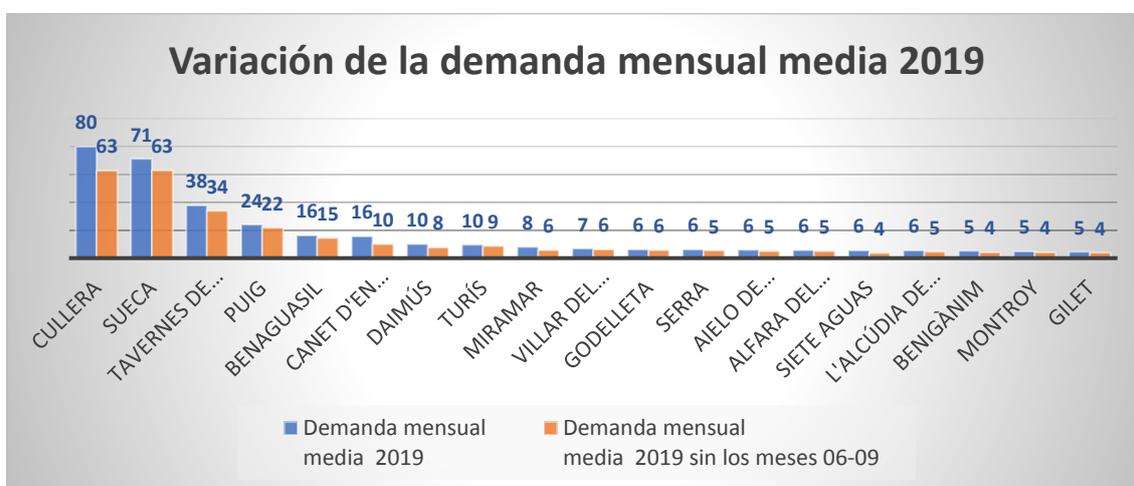


Figura 22. Variación de la demanda mensual media 2019.  
Fuente: Elaboración propia.

Y otra vez, si observamos los datos absolutos de las emergencias sanitarias del 2019, confirmamos el hecho de que hay algunas poblaciones, sobre todo costeras, que aumentan el número de llamadas de emergencias en los meses de verano (Figura 23) y otras, cuya demanda disminuye en estos meses (Figura 24).

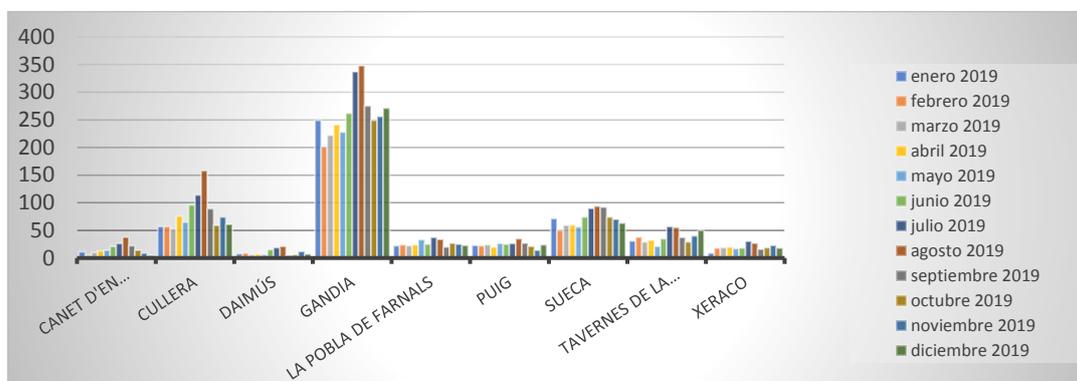


Figura 23. Gráficos de barras de la demanda mensual del 2019 de algunos municipios cuya demanda de emergencias aumenta en los meses de verano.  
Fuente: Elaboración propia.

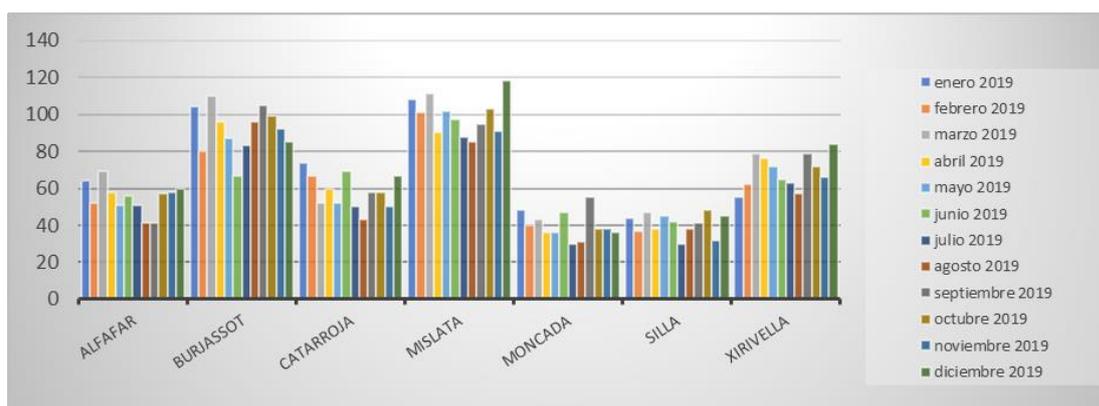


Figura 24. Gráficos de barras de la demanda mensual del 2019 de algunos municipios cuya demanda de emergencias disminuye en los meses de verano.  
Fuente: Elaboración propia.

Comparando las gráficas de las trayectorias de Cullera en el año 2016 y en el 2019 (Figuras 13 y 20), vemos que son muy parecidas. Sospechamos que algunos municipios tienen un patrón de la demanda parecido de un año para otro. Para contrastar este hecho realizamos un análisis de componentes principales teniendo en cuenta la correlación entre los mismos meses de diferentes años. Efectivamente, hay poblaciones donde de año a año la mayor demanda se produce en los meses de verano. Por ejemplo, en Canet d'en Berenguer el número de emergencias en los meses de julio y agosto es claramente superior que en el resto de los meses. Podemos ver esta variación de la demanda de año a año en la Figura 25. Lo mismo pasa en Tavernes de la Valligna (Figura 26) y en Gandía (Figura 27). En Sueca los meses de mayor demanda de año a año son agosto y septiembre (Figura 28). Es interesante comparar estos resultados con los municipios como Mislata y Catarroja, por ejemplo, donde se ve la disminución de la demanda en los meses veraniegos (Figuras 29 y 30).

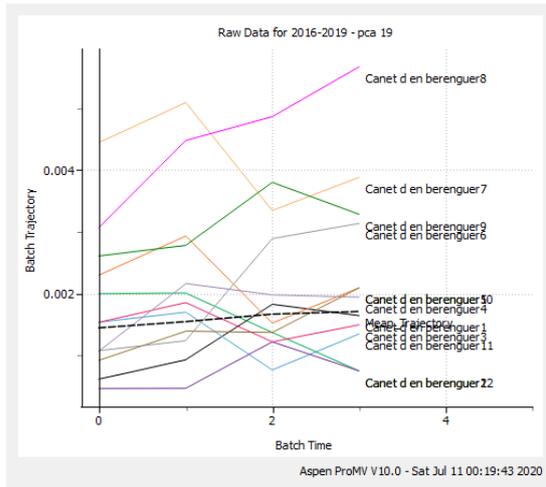


Figura 25. Trayectoria 2016-2019 de la demanda de emergencias de cada mes en Canet d'en Berenguer. Fuente: Elaboración propia.

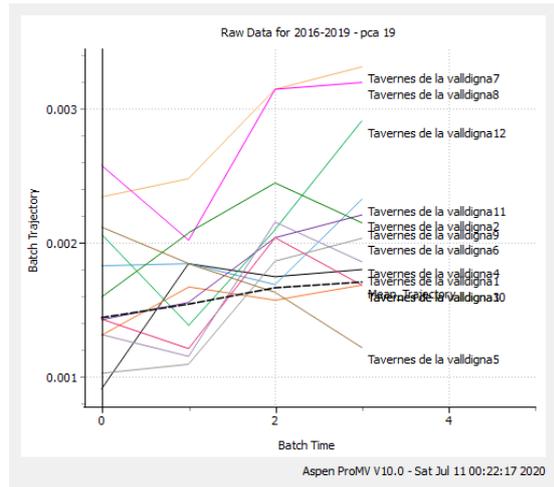


Figura 26. Trayectoria 2016-2019 de la demanda de emergencias de cada mes en Tavernes de la Valligna. Fuente: Elaboración propia.

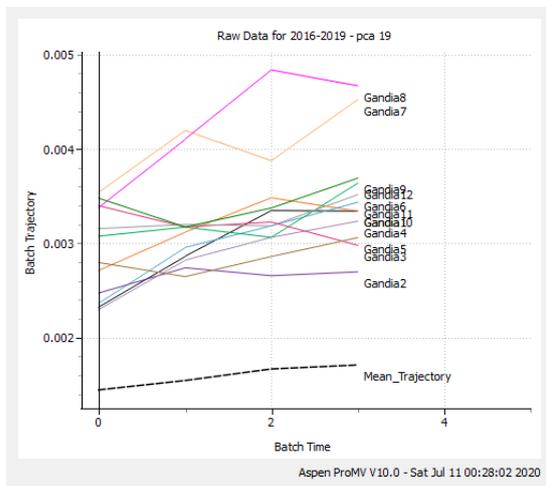


Figura 27. Trayectoria 2016-2019 de la demanda de emergencias de cada mes en Gandia. Fuente: Elaboración propia.

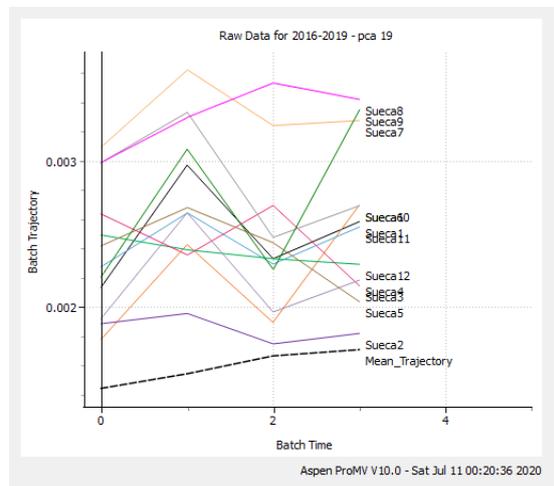


Figura 28. Trayectoria 2016-2019 de la demanda de emergencias de cada mes en Sueca. Fuente: Elaboración propia.

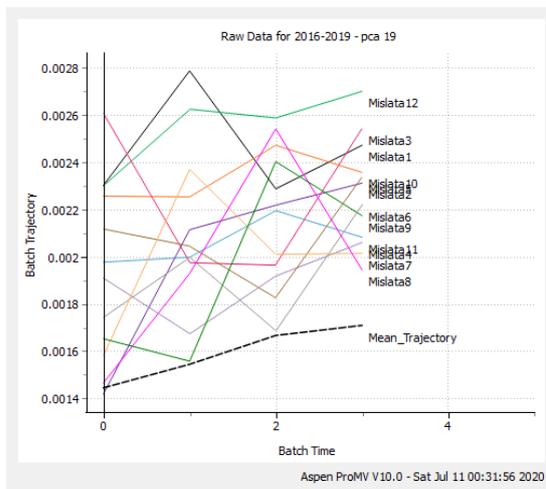


Figura 29. Trayectoria 2016-2019 de la demanda de emergencias de cada mes en Mislata. Fuente: Elaboración propia.

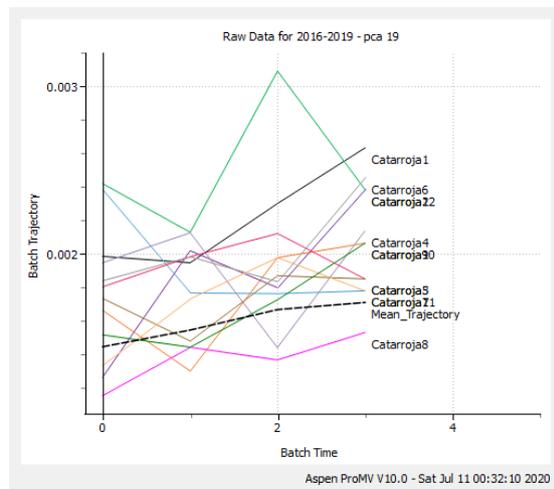


Figura 30. Trayectoria 2016-2019 de la demanda de emergencias de cada mes en Catarroja. Fuente: Elaboración propia.

Para una visualización general de cambios de la demanda de emergencias experimentados por los municipios, se ha realizado el mapa de puntos calientes para cada mes de los años 2016-2019 con el software QGIS<sup>4</sup>. Si comparamos los mapas de los meses enero y agosto, vemos mayor intensidad de color naranja especialmente en los municipios costeros en el mes de agosto (Figuras 31, 32, 33 y 34)<sup>5</sup>.

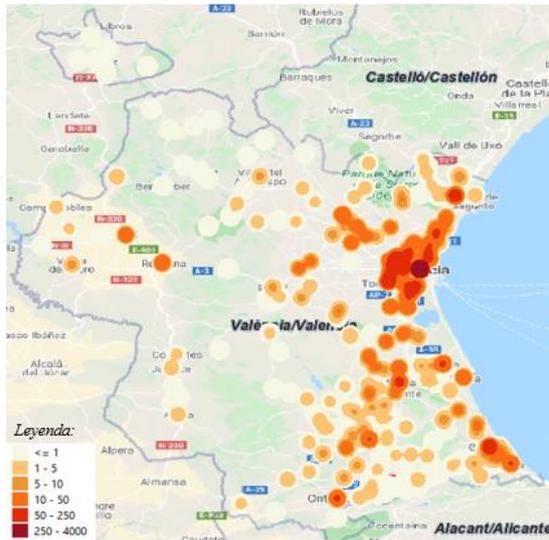


Figura 31. Mapa de puntos calientes Enero 2016.  
Fuente: Elaboración propia.

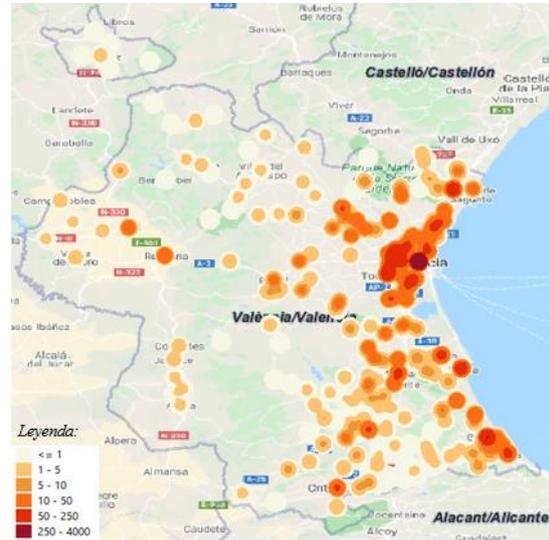


Figura 32. Mapa de puntos calientes Agosto 2016.  
Fuente: Elaboración propia.

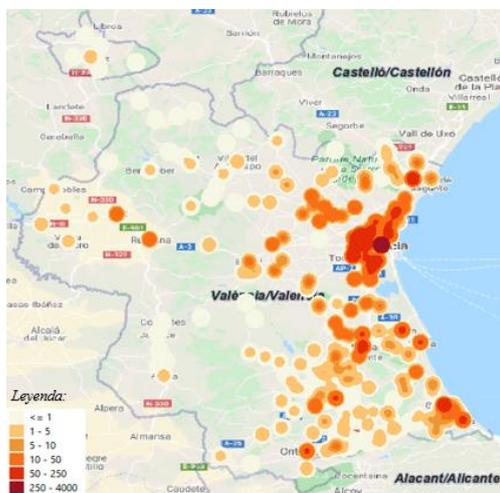


Figura 33. Mapa de puntos calientes Enero 2019.  
Fuente: Elaboración propia.

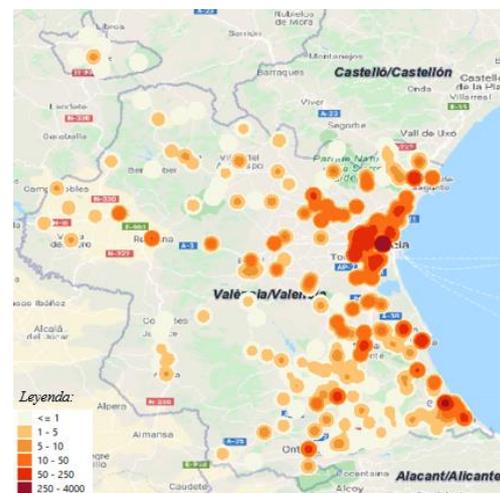


Figura 34. Mapa de puntos calientes Agosto 2019.  
Fuente: Elaboración propia.

En base a estos resultados, recomendaríamos a los responsables de la gestión de los equipos de emergencias sanitarias prehospitalarias de la Provincia de Valencia tener en cuenta los cambios en los patrones de demanda producidos en diferentes municipios en el período veraniego para una mayor eficiencia y calidad del servicio.

<sup>4</sup> Dado que se representan los datos agregados (no tenemos la ubicación exacta de cada emergencia), las coordenadas corresponden a los municipios. En caso de Valencia las coordenadas corresponden a la Plaza del Ayuntamiento.

<sup>5</sup> Es posible que a primera vista no se vea mucha diferencia entre cada par de gráficos representados en esta página, pero en el programa QGIS la diferencia se observa enseguida al pasar de un mapa al otro.

## 2.2.2 Análisis de los servicios de emergencias sanitarias realizados por los departamentos de salud

Como ya se ha comentado anteriormente, la unidad territorial de la gestión de servicios de salud son las áreas de salud, llamadas también departamentos sanitarios. Por falta de datos de dos SAMU en los años 2017 y 2018 (Alfa 2 Alfahuir y Alfa 6 Malvarrosa) no se ha podido realizar el análisis de las llamadas de emergencias en cada departamento sanitario atendidas por los SAMU, pero sí se ha realizado el análisis de las llamadas en cada departamento sanitario con los datos de los 46 SVB en los años 2017-2018<sup>6</sup> (Tabla 5).

DEPARTAMENTO SANITARIO	N.º DE LLAMADAS 2017	N.º DE LLAMADAS 2018
GANDIA	6184	5659
LA RIBERA	7363	6882
MANISES	7175	6354
REQUENA	1816	1538
SAGUNTO	4061	3978
VALENCIA - CLINICO	9354	9742
VALENCIA - DR. PESET	10982	11109
VALENCIA - LA FE	5666	5722
VALENCIA ARNAU LIRIA	7704	7330
VALENCIA HOSPITAL GENERAL	11766	11896
XATIVA - ONTINYENT	5285	4911
Total general	77356	75121

Tabla 5. Número de llamadas de emergencias sanitarias por departamento.  
Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, tenemos información de la población SIP de cada departamento en los años 2017 y 2018 que publica la Conselleria de Sanidad de la Comunidad Valenciana<sup>7</sup> (Tabla 6).

DEPARTAMENTO	POBL SIP 2017	POBL SIP 2018
GANDIA	176226	176957
LA RIBERA	257593	258394
MANISES	203234	205202
REQUENA	51671	51746
SAGUNTO	116780	116594
VALENCIA - CLINICO	341972	344538
VALENCIA - DR. PESET	276238	278345
VALENCIA - LA FE	281720	285066
VALENCIA ARNAU LIRIA	311907	316981
VALENCIA HOSPITAL GENERAL	356600	360488
XATIVA - ONTINYENT	194780	194740

Tabla 6. Población SIP por departamento sanitario.  
Fuente: Elaboración propia.

<sup>6</sup> Se ha asignado departamento de salud Valencia – Dr. Peset a Catarroja, Albal, Beniparrell, Silla, Alcasser, Massanassa (estos municipios no tenían asignado ningún departamento). Se han eliminado del análisis las llamadas sin localización y las que no se sabía de qué departamento eran (198 del 2017 y 44 del 2018).

<sup>7</sup> Los datos del año 2019 aún no están publicados, por lo tanto solo realizamos los análisis de los datos de los años 2017 y 2018.

El departamento sanitario de Sagunto es un departamento compartido con la provincia de Castellón. La población SIP de este departamento correspondiente a la provincia de Valencia se ha estimado en base a los datos del padrón (Figura 35 y Tabla 7).

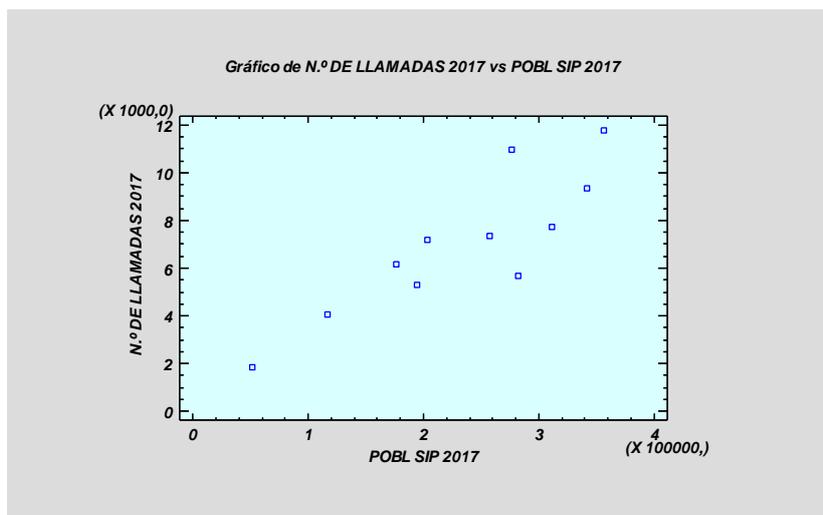


Figura 35. Departamento de Sagunto y su parte de la provincia de Valencia.  
Fuente: Conselleria de Sanidad.

Ajuste población SIP Departamento de Sagunto		
	2017	2018
Total Sagunto	152093	154178
Castellón	0,22	0,23
Valencia	0,78	0,77

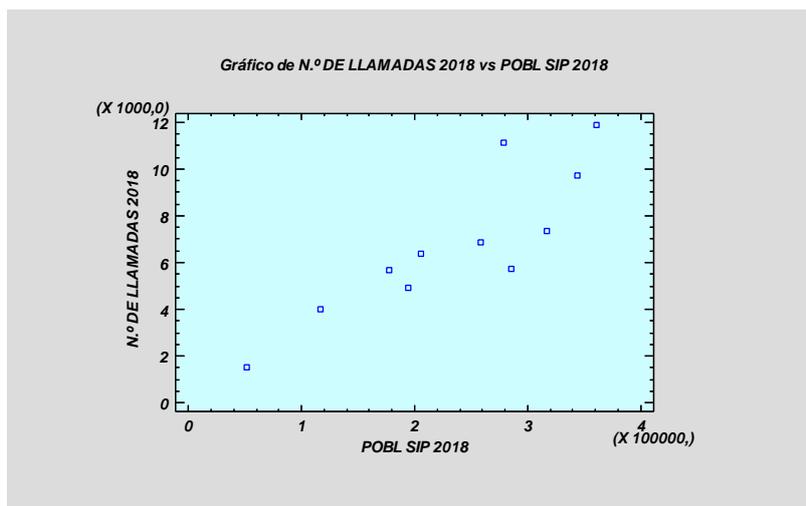
Tabla 7. Datos del padrón correspondientes al departamento sanitario de Sagunto.  
Fuente: Elaboración propia.

Los gráficos de dispersión y los coeficientes de correlación con la confianza del 95 % muestran una correlación lineal positiva entre la población SIP y la demanda de emergencias sanitarias (Figuras 36 y 37).



Coefficiente de Correlación = 0,865435

Figura 36. Gráfico de dispersión de N.º de llamadas de emergencia en 2017 & Población SIP.  
Fuente: Elaboración propia.



Coefficiente de Correlación = **0,871586**

Figura 37. Gráfico de dispersión de N.º de llamadas de emergencia en 2018 & Población SIP.  
Fuente: Elaboración propia.

Como resultado de este análisis podemos utilizar la población como un indicador de la demanda de las emergencias sanitarias a la hora de desarrollar la heurística para reubicación de ambulancias, porque hay un relación lineal directa entre la población SIP y la demanda de los servicios de emergencias sanitarias. Este hecho es muy importante porque la demanda es una variable aleatoria, mientras que la población es una variable determinista.

### 2.2.3 Análisis de los servicios de emergencias sanitarias realizados por los SAMU

Los mapas de puntos calientes realizados en el apartado 2.1.1 muestran ubicación e intensidad de la demanda de emergencias sanitarias en toda la provincia de Valencia. Si sobreponemos a este mapa (Figura 38) una capa con las coordenadas de las bases de los SAMU (estrella verde), nos damos cuenta de que los puntos más calientes coinciden con la ubicación de las ambulancias, pero esto no nos permite ver qué llamadas han sido atendidas por qué SAMU.

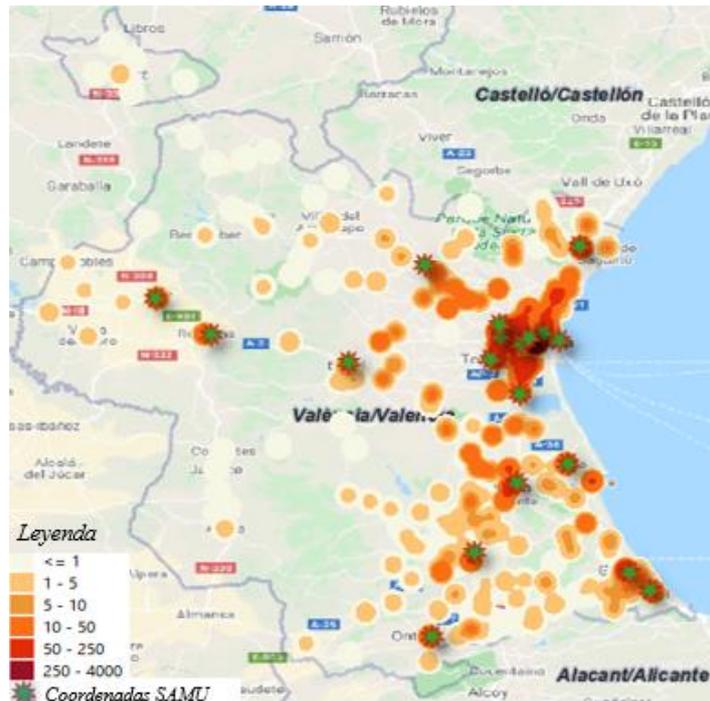


Figura 38. Mapa de puntos calientes Enero 2019 y ubicación de los SAMU.  
Fuente: Elaboración propia.

Para hacer el análisis de los servicios prestados por cada ambulancia se han realizado los mapas de puntos calientes individualmente para cada SAMU para todos los años (2017-2019)<sup>8</sup>. Cuanto más oscuro es el color, más visitas han sido realizadas por ese vehículo en esta localidad en un año (Figura 39).

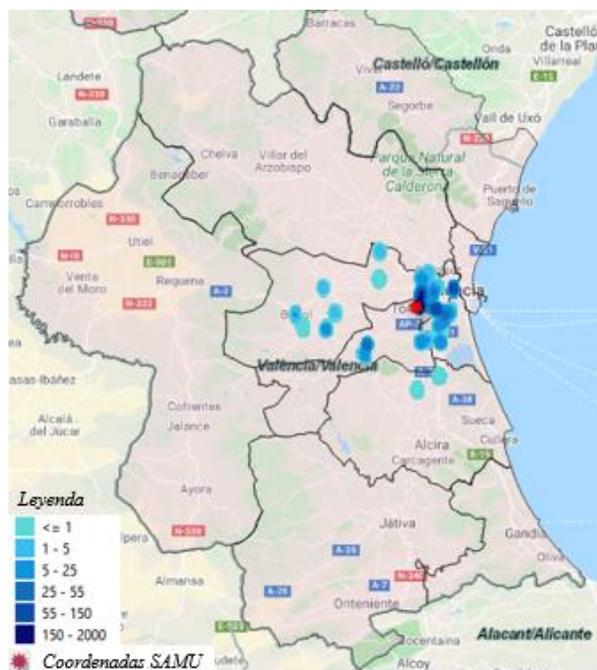


Figura 39. Desplazamientos del Alfa 10 Torrent en 2017.  
Fuente: Elaboración propia.

<sup>8</sup> Hemos tenido acceso a los datos de 18 SAMU de los 20 que trabajan en la provincia de Valencia.

Gracias a estos mapas, vemos que los SAMU atienden emergencias no solamente de su área de salud, sino también de otras áreas. Pero el mayor interés está en la dispersión de los desplazamientos. Por ejemplo, si comparamos los mapas del Alfa 4 Hospital General de los años 2018 y 2019 (Figuras 40 y 41) con los mapas del Delta 7 Ontinyent en los mismos años (Figuras 42 y 43), vemos que el área de desplazamiento del Delta 7 es más amplia, es decir, se hacen recorridos más largos. Lo mismo pasa con el Alfa 3 Campanar en el año 2019 (Figura 44) y el Delta 2 Liria en el año 2019 (Figura 45).

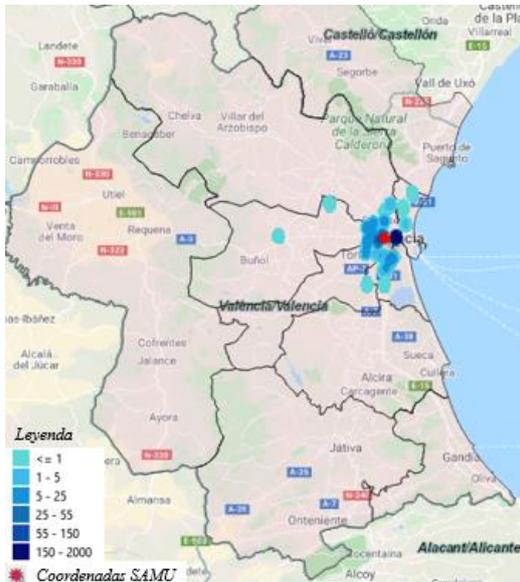


Figura 40. Desplazamientos del Alfa 4 Hospital general en 2018.  
Fuente: Elaboración propia.



Figura 41. Desplazamientos del Alfa 4 Hospital General en 2019.  
Fuente: Elaboración propia.

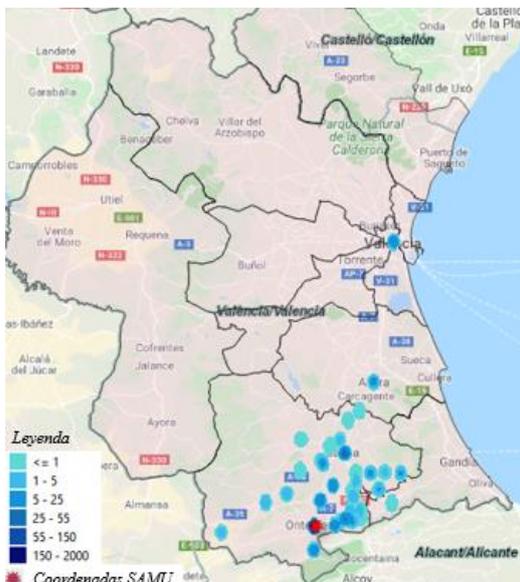


Figura 42. Desplazamientos del Delta 7 Ontinyent en 2018.  
Fuente: Elaboración propia.

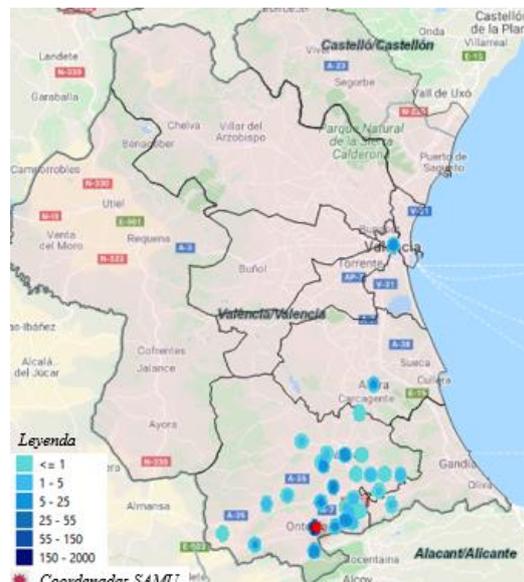


Figura 43. Desplazamientos del Delta 7 Ontinyent en 2019.  
Fuente: Elaboración propia.



Figura 44. Desplazamientos del Alfa 3 Campanar en 2019.  
Fuente: Elaboración propia.

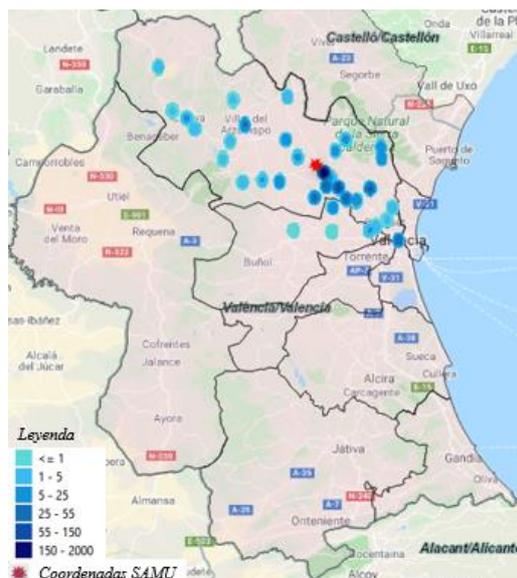


Figura 45. Desplazamientos del Delta 2 Liria en 2019.  
Fuente: Elaboración propia.

Esta diferencia en desplazamientos entre SAMU también se puede observar viendo los datos del número de desplazamientos por hora (Tabla 8 y Figura 46).

SAMU	Desplazamientos por hora 2017	Desplazamientos por hora 2018	Desplazamientos por hora 2019
a07_campanar_v	0,25	0,23	0,21
a04_general_v	0,22	0,23	0,22
a08_paterna_v	0,19	0,20	0,18
a03_campanar_v	0,20	0,19	0,19
a10_torrente_v	0,16	0,15	0,13
a01_manises_v	0,16	0,15	0,15
a05_silla_v	0,14	0,14	0,12
d05_gandia_v	0,15	0,14	0,13
d03_alcudia_v	0,14	0,13	0,12
d01_sagunto_v	0,12	0,12	0,12
d09_oliva_v	0,13	0,12	0,13
d02_liria_v	0,11	0,11	0,10
d08_xativa_v	0,11	0,10	0,10
d04_sueca_v	0,10	0,08	0,08
d07_ontenien_v	0,08	0,07	0,07
d10_utiel_v	0,08	0,07	0,07
a11_buñol_v	0,06	0,07	0,07
d06_requena_v	0,06	0,05	0,05

Tabla 8. Desplazamientos por hora 2017-2019.  
Fuente: Elaboración propia.

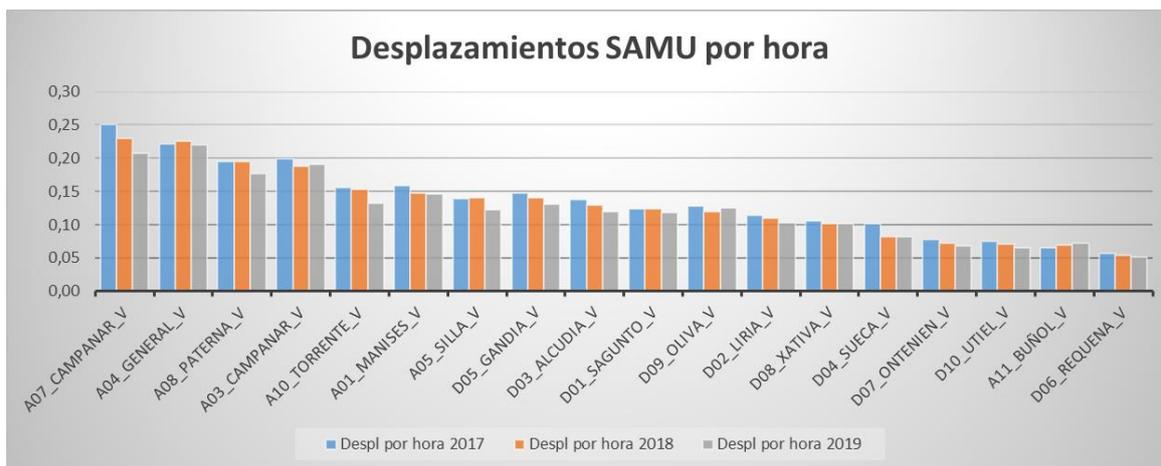


Figura 46. Desplazamientos SAMU 2017-2019 por hora.  
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 46 nos muestra que hay ambulancias que tienen muchos desplazamientos por hora y otras no tantos. Y, además, vemos la variación del número de desplazamientos por hora de cada vehículo de un año para otro.

Es interesante ver los datos de cada cuánto tiempo (aproximadamente) cada SAMU atiende una emergencia (Tabla 9).

SAMU	Tiempo entre desplazamientos 2017	Tiempo entre desplazamientos 2018	Tiempo entre desplazamientos 2019
a07_campanar_v	4	4	5
a04_general_v	5	4	5
a03_campanar_v	5	5	5
a08_paterna_v	5	5	6
a01_manises_v	6	7	7
a10_torrente_v	6	7	8
d05_gandia_v	7	7	8
a05_silla_v	7	7	8
d03_alcudia_v	7	8	8
d09_oliva_v	8	8	8
d01_sagunto_v	8	8	8
d02_liria_v	9	9	10
d08_xativa_v	10	10	10
d04_sueca_v	10	12	12
d07_ontenien_v	13	14	15
d10_utiel_v	13	14	15
a11_buñol_v	15	14	14
d06_requena_v	18	18	20

Tabla 9. Tiempo (en horas) aproximado entre dos desplazamientos 2017-2019.  
Fuente: Elaboración propia.

Es obvio que en las zonas rurales, Requena, Utiel, Ontinyent, donde la densidad de la población es mucho menor, se produzcan menos emergencias. En este sentido llama la atención el caso de Alfa 11 Buñol, cuyo número de desplazamientos es muy bajo.

El tiempo de respuesta está estrechamente relacionado con el número de desplazamientos. Si vemos los gráficos de Caja y Bigotes<sup>9</sup>, observamos que hay ambulancias con una variabilidad muy alta en los tiempos de respuesta (especialmente zonas rurales) y que la media del tiempo de respuesta varía mucho de un vehículo a otro (Figuras 47, 48 y 49).

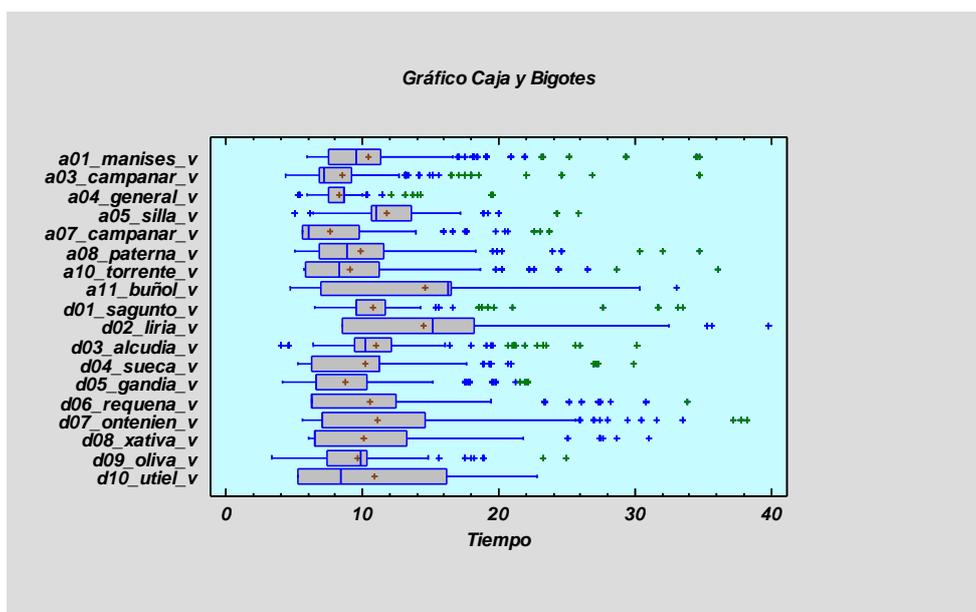


Figura 47. Gráfico de Caja y Bigotes de los tiempos de respuesta 2017.  
Fuente: Elaboración propia.

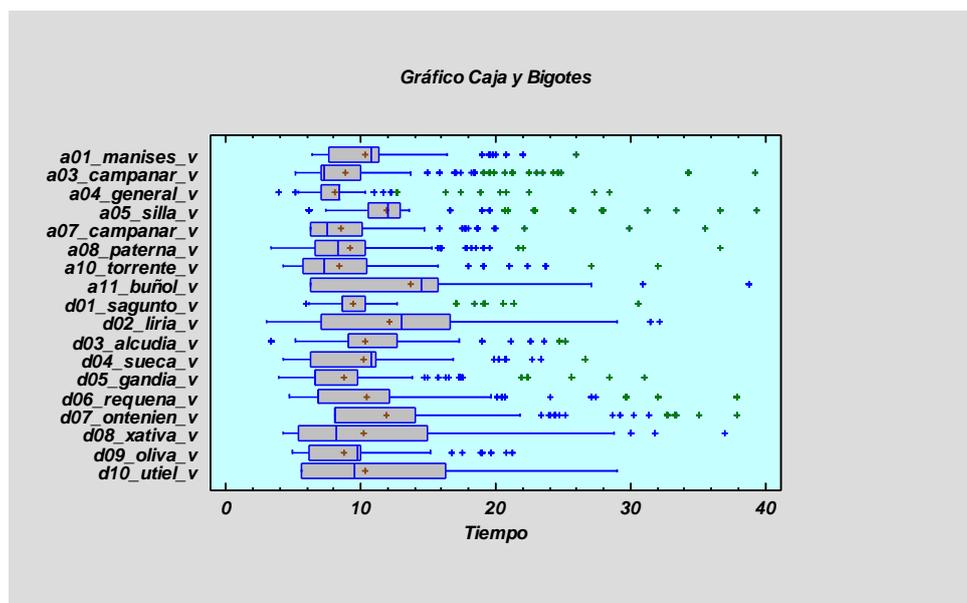
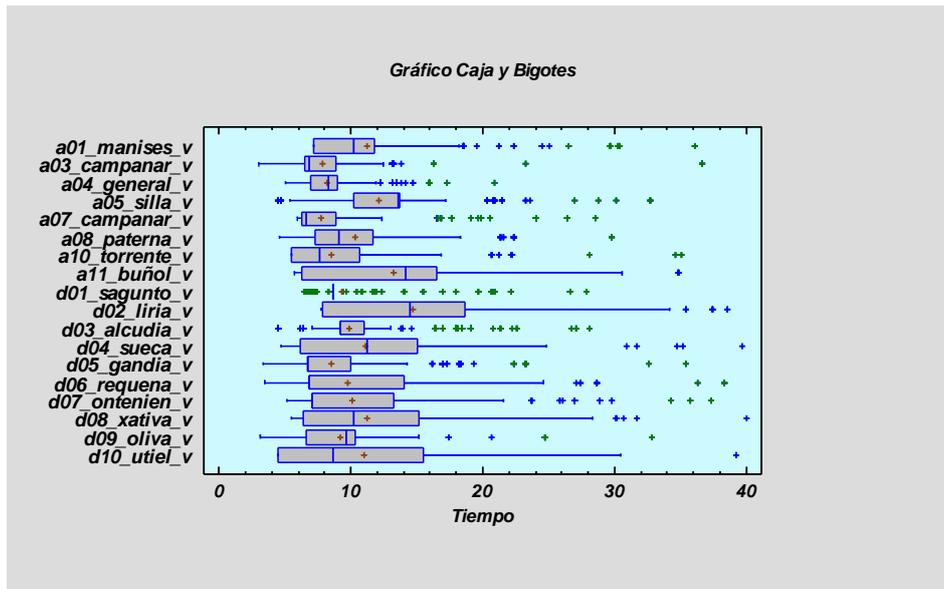


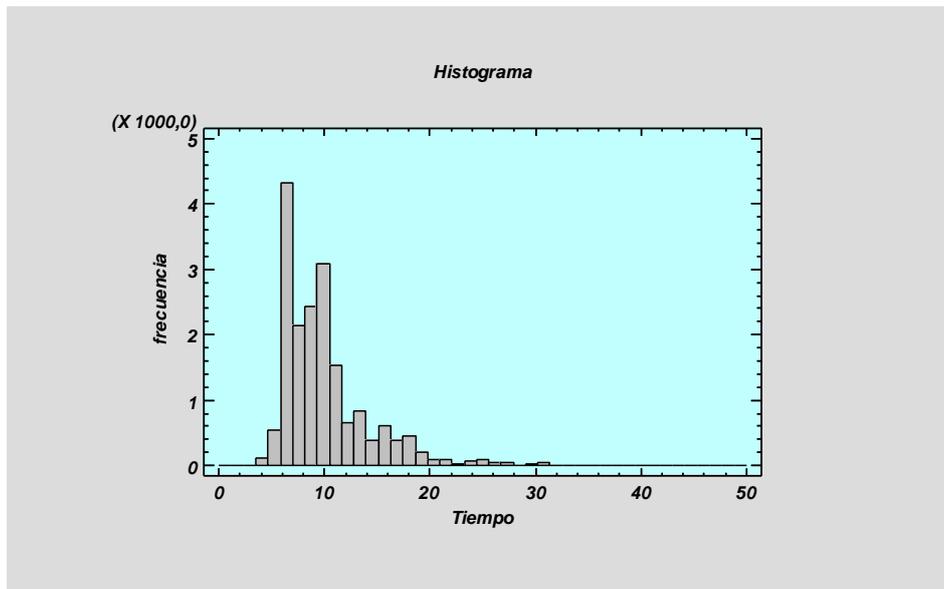
Figura 48. Gráfico de Caja y Bigotes de los tiempos de respuesta 2018.  
Fuente: Elaboración propia.

<sup>9</sup> Para este análisis se han eliminado las llamadas con tiempo de respuesta menor de 3 minutos y mayor de 40.



*Figura 49. Gráfico de Caja y Bigotes de los tiempos de respuesta 2019.  
Fuente: Elaboración propia.*

Si observamos los histogramas del tiempo de respuesta de los SAMU en los años 2017, 2018 y 2019, vemos que no hay simetría (Figuras 50, 51 y 52).



*Figura 50. Histograma de los tiempos de respuesta 2017.  
Fuente: Elaboración propia.*

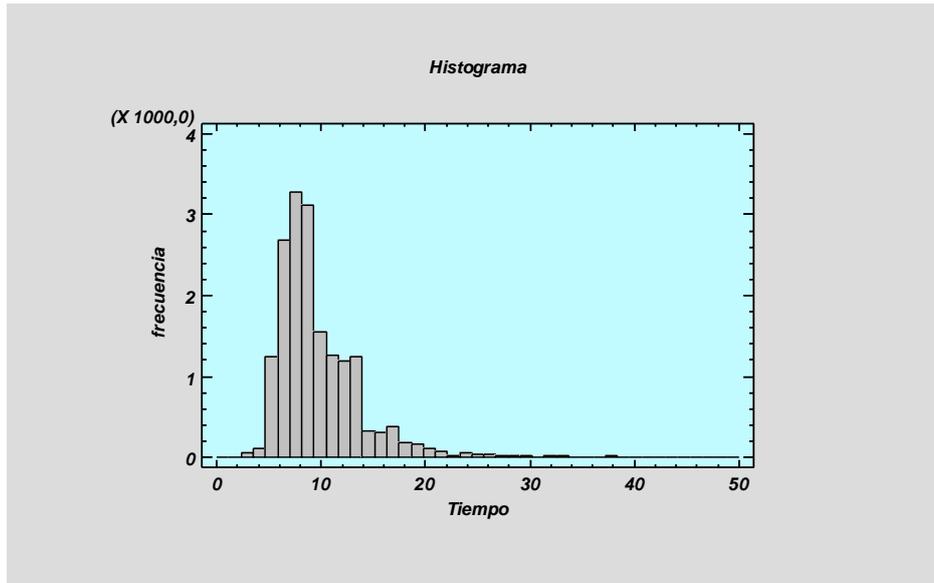


Figura 51. Histograma de los tiempos de respuesta 2018.  
Fuente: Elaboración propia.

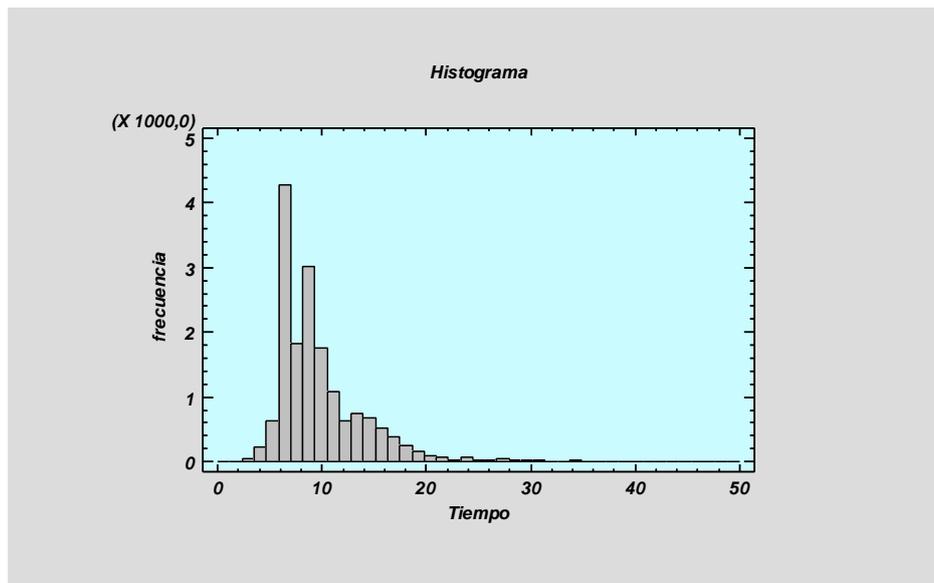


Figura 52. Histograma de los tiempos de respuesta 2019.  
Fuente: Elaboración propia.

Los análisis univariantes muestran que no hay normalidad en los datos, pero aun así, a modo aproximado, mostramos los gráficos de intervalos LSD para comparar las medias de los tiempos de respuesta (Figuras 53, 54 y 55).

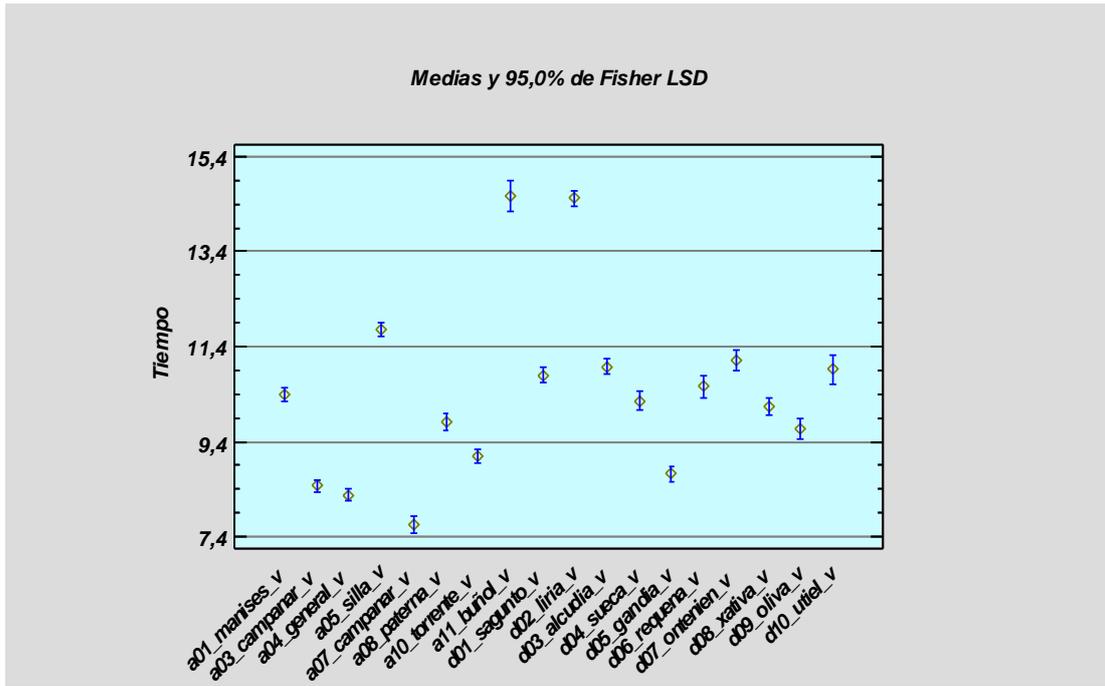


Figura 53. Gráfico de intervalos LSD para tiempo de respuesta 2017.  
Fuente: Elaboración propia.

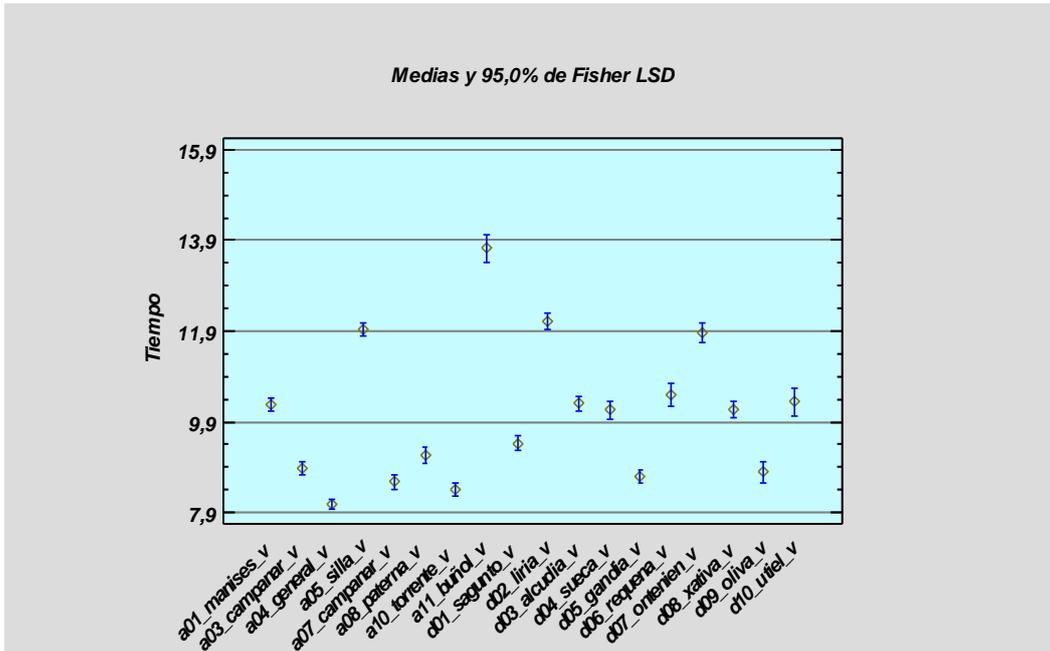


Figura 54. Gráfico de intervalos LSD para tiempo de respuesta 2018.  
Fuente: Elaboración propia.

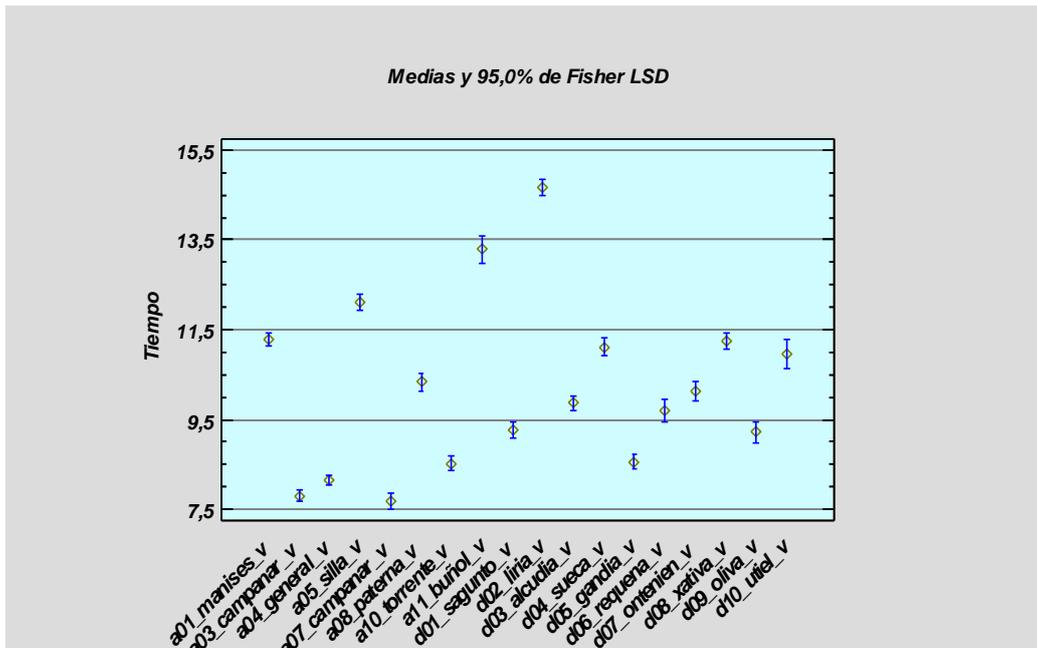


Figura 55. Gráfico de intervalos LSD para tiempo de respuesta 2019.  
Fuente: Elaboración propia.

Según la media del tiempo de respuesta se pueden definir varios grupos (la malla horizontal de los gráficos separa los grupos). Los Alfas tienen las medias de los tiempos de respuesta más pequeñas, menos el de Silla y el de Buñol, mientras que los Deltas tienen las medias más altas, sobre todo el de Liria.

Si comparamos las medias del mismo SAMU en diferentes años, encontramos diferentes casos, en los que la media sube de un año para otro, baja o no varía (Figuras 56, 57, 58 y 59).

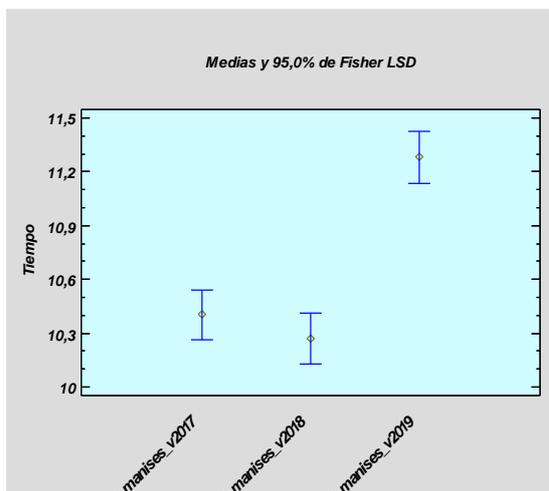


Figura 56. Gráfico de intervalos LSD para tiempo de respuesta de Alfa 1 Manises.  
Fuente: Elaboración propia.

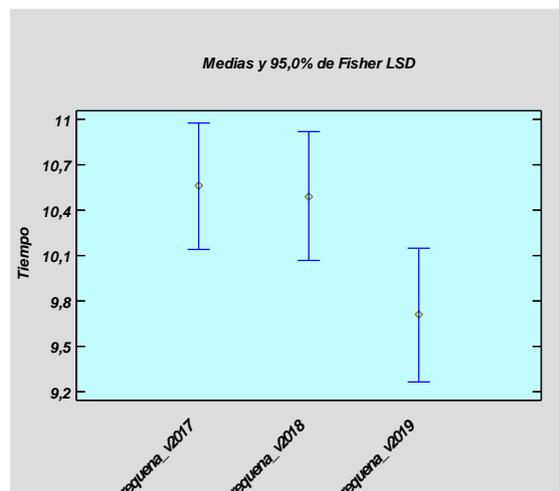


Figura 57. Gráfico de intervalos LSD para tiempo de respuesta de Delta 6 Requena.  
Fuente: Elaboración propia.

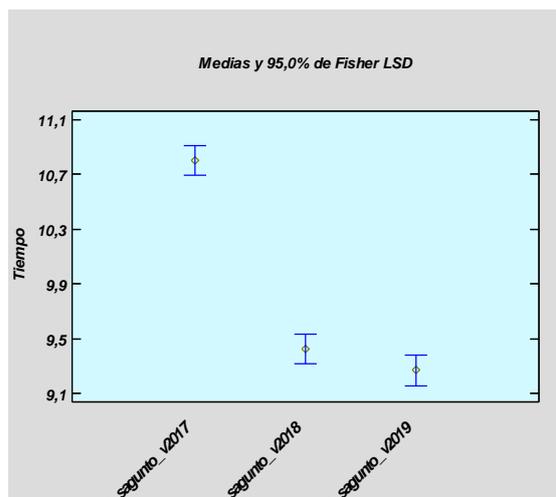


Figura 58. Gráfico de intervalos LSD para tiempo de respuesta de Delta 1 Sagunto.  
Fuente: Elaboración propia.

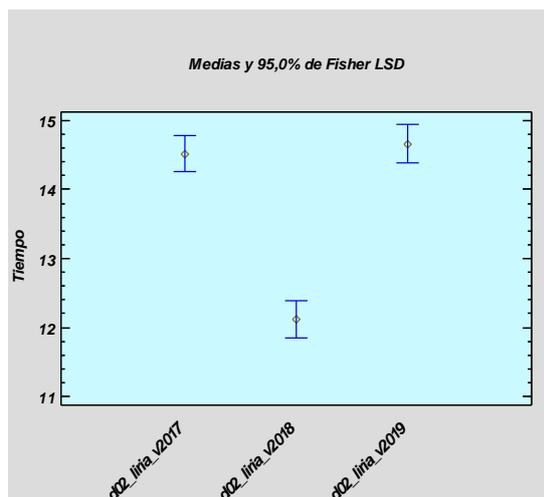


Figura 59. Gráfico de intervalos LSD para tiempo de respuesta de Delta 2 Liria.  
Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 10 muestra un resumen estadístico de los tiempos de respuesta de los 18 SAMU.

	2017	2018	2019
<b>Recuento</b>	18315	17589	16702
<b>Promedio</b>	10,0243	9,73119	9,84937
<b>Desviación Estándar</b>	4,30688	4,08415	4,29122
<b>Coefficiente de Variación</b>	42,96%	41,97%	43,57%
<b>Mínimo</b>	3,4	3,06667	3
<b>Máximo</b>	39,8	39,3833	40
<b>Percentil 25</b>	6,86667	7,05	6,85
<b>Percentil 50</b>	9,16667	8,58333	8,88333
<b>Percentil 65</b>	10,2333	10,0667	10,0333

Tabla 10. Resumen de estadísticas para el tiempo de respuesta de los SAMU.  
Fuente: Elaboración propia.

Aunque la media global en los años 2018 y 2019 está por debajo de 10 minutos, la desviación típica es muy grande (más de 4 minutos). Y, además, si nos fijamos en los percentiles, más de la mitad de las llamadas se ha atendido con tiempo superior a 8 minutos y solo alrededor del 65% de las llamadas han sido atendidas con menos de 10 minutos.

Del análisis de los servicios realizados por los SAMU podemos concluir que hay mucha variabilidad en el número de desplazamientos realizados a lo largo del año. A la vista de estos resultados, se podría aconsejar a los responsables de los servicios de emergencias sanitarias realizar una rotación de los equipos en diferentes bases para equilibrar la carga del trabajo.

También se ha visto que hay mucha variabilidad en el tiempo de respuesta de los SAMU y muchas de las llamadas se atienden fuera de los límites de 8-10 minutos. Uno de nuestros objetivos es desarrollar un método de reubicación de las ambulancias para intentar mejorar este tiempo de respuesta, un tiempo que en muchos casos puede ser vital.

## 2.2.4 Análisis de los servicios de emergencias sanitarias realizados por los Alfas

Entre los principales objetivos de reubicación de ambulancias está el de buscar la eficiencia de los servicios de emergencias sanitarias, por lo tanto se tienen que evitar desplazamientos frecuentes y desplazamientos largos. No tiene sentido reubicar, por ejemplo, un SAMU desde Requena (Delta 6) hasta Valencia o desde Ontinyent (Delta 7) hasta Gandía (Figura 60).



Figura 60. Distribución de los vehículos SAMU en la provincia de Valencia.  
Fuente: Elaboración propia.

Dado que la ubicación de los Delta es muy dispersa (zonas rurales) y es estratégicamente importante (ya se ha visto que los puntos calientes de las zonas rurales justamente están cubiertos por los Delta), nos vamos a centrar en la reubicación de los Alfas, que son 10 SAMU que operan en la ciudad de Valencia y alrededores. Se podría plantear una reubicación entre el Delta 6 y el Delta 10 o entre el Delta 5 y el Delta 9, pero son casos puntuales y se dejan fuera de este estudio.

Para analizar los desplazamientos de los Alfas tenemos que introducir el concepto de mapa de isócronas. Un área que abarca todos los puntos donde se puede llegar en un tiempo determinado desde un punto dado se llama el mapa de isócronas. Para realizar un mapa de isócronas se necesita tener un punto inicial y trazar vectores desde este punto en diferentes direcciones. La longitud de cada vector está acotada por el tiempo del trayecto (por ejemplo, 7 minutos). El perímetro del polígono que define un mapa de isócronas es justamente la línea que une todos los extremos de los vectores trazados. En la Figura 61 está representado un mapa de isócronas de 7 minutos desde la base del Alfa 10 Torrent. El área de color violeta (el mapa de isócronas) abarca todos los puntos a los que se puede llegar en 7 minutos desde el punto marcado con estrella (la base del Alfa 10 Torrent).



	Alfa 1 Manises	Alfa 2 Alfahuir	Alfa 3 Campanar	Alfa 4 H. General	Alfa 5 Silla	Alfa 6 Malvarrosa	Alfa 7 Campanar	Alfa 8 Paterna	Alfa 10 Torrent	Alfa 11 Buñol
Recuento	1277	1593	1670	1924	1073	827	909	775	1154	315
Promedio	11,28	8,53	7,80	8,15	12,11	8,05	7,68	10,33	8,52	13,30
Desviación Estándar	4,28	2,86	2,07	1,42	3,42	2,50	2,48	3,47	3,37	6,13
Coefficiente de Variación	0,38	0,34	0,27	0,17	0,28	0,31	0,32	0,34	0,40	0,46
Mínimo	7,20	6,05	3,00	5,03	4,48	5,57	5,92	4,62	5,52	5,73
Máximo	36,10	26,20	36,63	20,90	32,75	22,42	28,60	29,75	35,05	34,87
Percentil 25	7,22	7,42	6,47	6,90	10,23	6,87	6,25	7,27	5,52	6,32
Percentil 50	10,25	7,73	6,88	8,28	13,62	6,87	6,65	9,08	7,58	14,17
Percentil 75	11,73	7,73	8,88	8,98	13,68	9,18	8,83	11,72	10,62	16,57
% DESPLAZ. > 10 MIN	<b>53%</b>	<b>14%</b>	<b>8%</b>	<b>4%</b>	<b>78%</b>	<b>11%</b>	<b>4%</b>	<b>42%</b>	<b>35%</b>	<b>66%</b>

Tabla 12. Resumen de estadísticas para el tiempo de respuesta de los Alfas.  
Fuente: Elaboración propia.

Realizamos un análisis gráfico de los puntos que representan los desplazamientos de los Alfas con tiempo de respuesta superior a 10 minutos y los mapas de isócronas de 7 minutos desde las bases de otros Alfas. Los 7 minutos es el tiempo de viaje y se elige porque según muchos estudios el tiempo de triaje (el tiempo previo del despacho de una ambulancia) fluctúa alrededor de 3 minutos. La idea es ver, si los puntos donde ha llegado una ambulancia pasados 10 minutos desde que se ha hecho la llamada, podrían haber sido alcanzados por otras ambulancias en 7 minutos. Por ejemplo, en la Figura 62 se han representado desplazamientos del Alfa 1 Manises con un tiempo de respuesta superior a 10 minutos. Si el número total de estos desplazamientos es de 682, 140 de ellos (más del 20%) corresponden a Paterna y estos puntos sí estarían al alcance del Alfa 8 Paterna (ver isócrona de color rosa más oscuro). Otros 107 desplazamientos (más del 15%) corresponden a Valencia y estos puntos estarían al alcance del Alfa 4 Hospital General (isócrona de color rosa más claro)<sup>10</sup>.

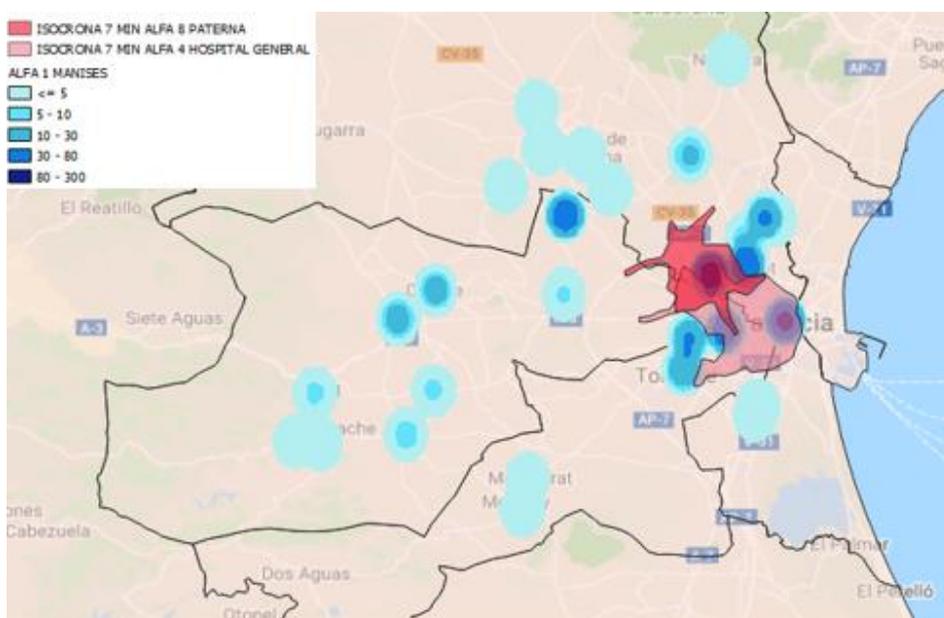


Figura 62. Desplazamientos del Alfa 1 Manises con tiempo de respuesta superior a 10 minutos.  
Fuente: Elaboración propia.

<sup>10</sup> No hay que olvidar que los datos representados son aproximados porque no tenemos las coordenadas exactas de los puntos de emergencias.

Del total de 841 desplazamientos con tiempo de respuesta superior a 10 minutos realizados por el Alfa 5 Silla (Figura 63), 222 (más del 26%) corresponden a Valencia. Estos puntos estarían al alcance de alguno de los Alfas de Valencia, por ejemplo, el Alfa 7 Campanar (isócrona de color marrón). Otros 45 desplazamientos (más del 5%) se han realizado a Torrent. Estos puntos estarían al alcance del Alfa 10 Torrent (isócrona de color verde más oscuro). Pero también hay desplazamientos a Picassent (104), Catarroja (114), Alfafar (98), que suman más del 37% y que no pueden ser cubiertos por ningún mapa de isócronas de 7 minutos (es el punto azul oscuro en medio de los mapas de isócronas).

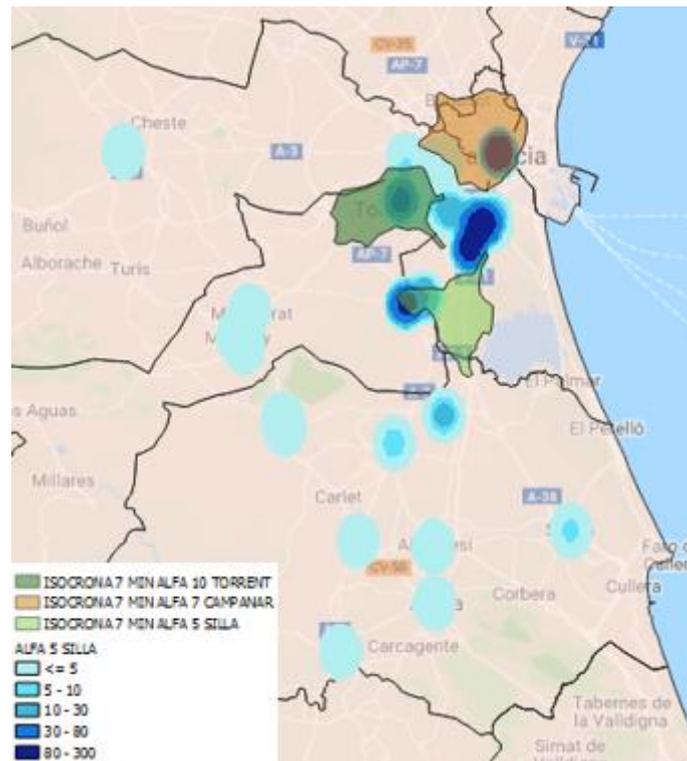


Figura 63. Desplazamientos del Alfa 5 Silla con tiempo de respuesta superior a 10 minutos.  
Fuente: Elaboración propia.

Lo mismo pasa con los desplazamientos del Alfa 2 Alfahuir a Massamagrell: 51 de 225 (22%) y a Foios 30 del 225 (13%) que no pueden ser cubiertos por ningún mapa de isócronas de 7 minutos (en la Figura 64 es el punto azul oscuro entre los dos mapas de isócronas).

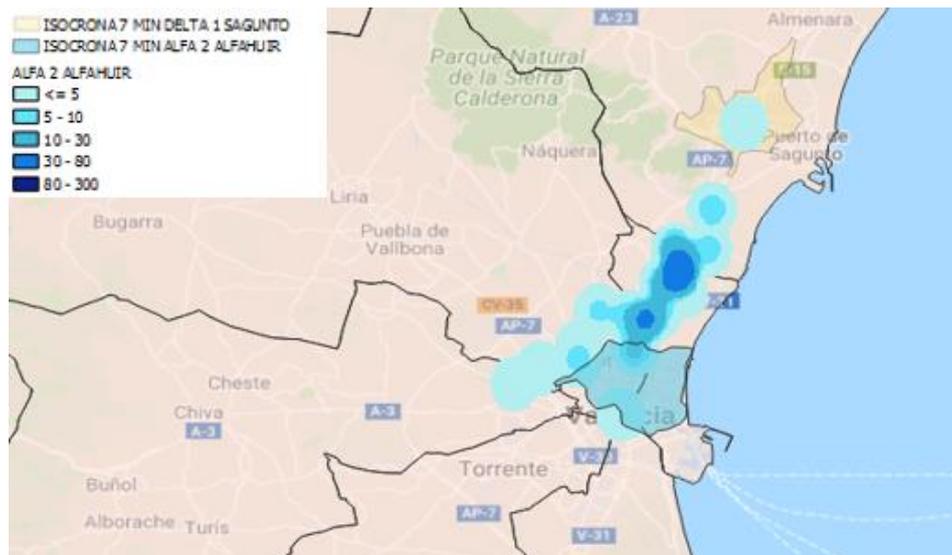


Figura 64. Desplazamientos del Alfa 2 Alfahuir con tiempo de respuesta superior a 10 minutos.  
Fuente: Elaboración propia.

De los 328 desplazamientos del Alfa 8 Paterna (Figura 65) con tiempo de respuesta superior a 10 minutos, 140 (más del 42%) han sido a Valencia. Estos puntos se podrían alcanzar por alguno de los Alfás de Valencia, por ejemplo, el Alfa 4 Hospital General (isócrona rosa).

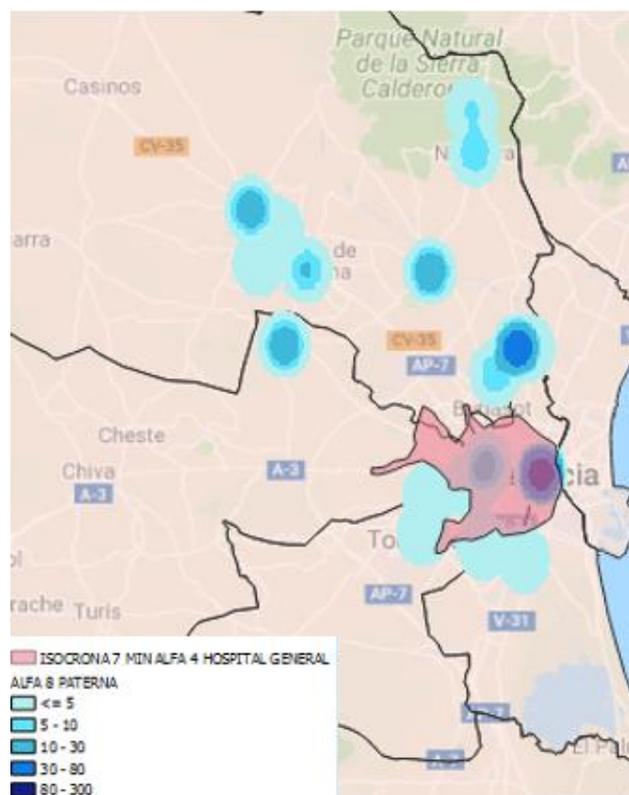


Figura 65. Desplazamientos del Alfa 8 Paterna con tiempo de respuesta superior a 10 minutos.  
Fuente: Elaboración propia.

De los 401 desplazamientos del Alfa 10 Torrente (Figura 66) con tiempo de respuesta superior a 10 minutos, 94 (más del 23%) han sido a Valencia. Estos puntos se podrían cubrir, por ejemplo, por el Alfa 4 Hospital General (isócrona rosa). Los 90 desplazamientos (más del 22%) a Paiporta no pueden ser cubiertos por ningún mapa de isócronas de 7 minutos (es el punto azul oscuro en medio de los mapas de isócronas).

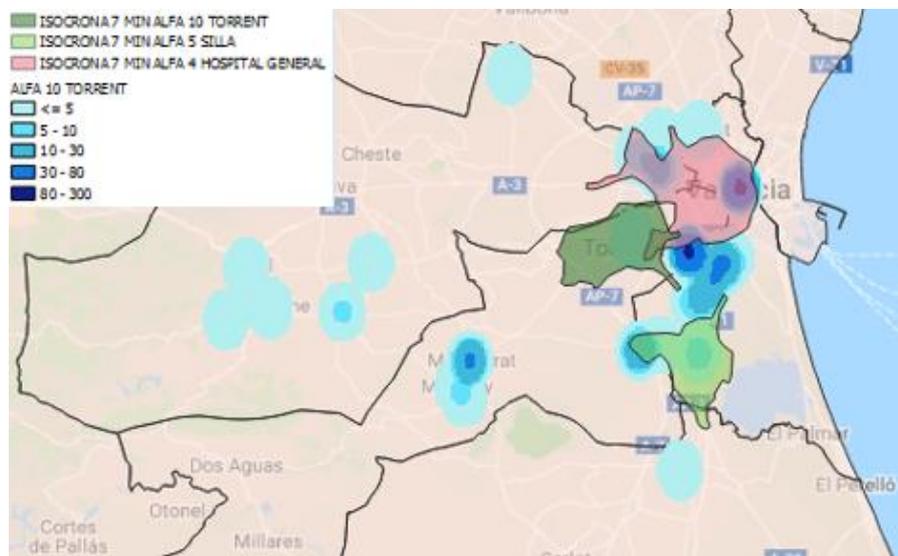


Figura 66. Desplazamientos del Alfa 10 Torrente con tiempo de respuesta superior a 10 minutos. Fuente: Elaboración propia.

Y, por último, de los 208 desplazamientos del Alfa 11 Buñol con tiempo de respuesta superior a 10 minutos (Figura 67), ni 52 (25%) a Chiva, ni 35 (más del 16%) a Turís, ni 33 (más del 15%) a Cheste, pueden ser cubiertos por mapas de isócronas de 7 minutos (ver puntos azules más oscuros en medio de la Figura).

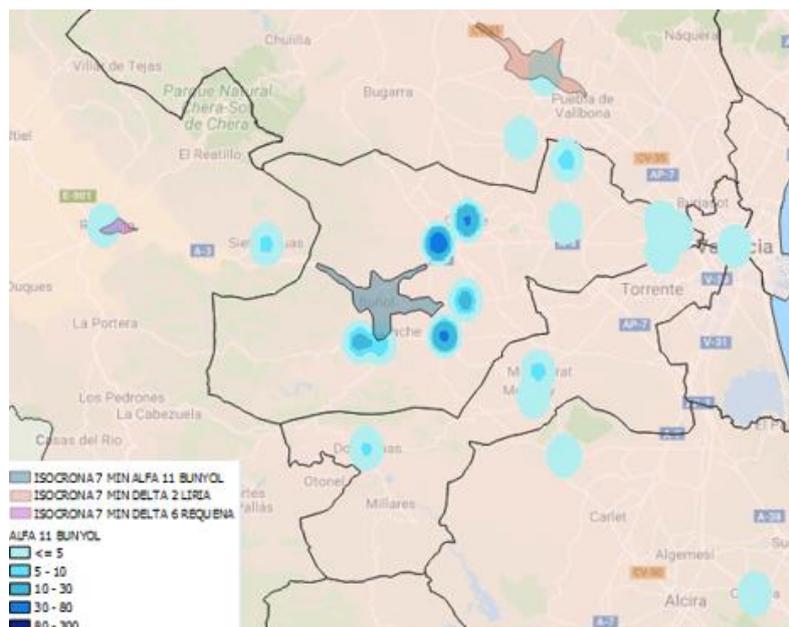


Figura 67. Desplazamientos del Alfa 11 Buñol con tiempo de respuesta superior a 10 minutos. Fuente: Elaboración propia.

Según estos análisis gráficos, por un lado tenemos emergencias cuyos puntos no pueden ser alcanzados por los SAMU en un tiempo menor o igual a 7 minutos (falta de cobertura a nivel estratégico) y, por otro lado, hay bastantes emergencias de la ciudad de Valencia que se atienden por los Alfás, cuya base no está en la ciudad (nivel operativo). Hay que tener en cuenta que este resultado es aproximado, ya que las localizaciones de las llamadas de emergencias representadas en los mapas no son exactas dado que no tenemos las direcciones y por lo tanto, coordenadas exactas.

Aparte de analizar los desplazamientos con un tiempo de respuesta superior a 10 minutos, se han analizado los que tienen un tiempo de respuesta menor o igual a 10 minutos para ver posibles “sustitutos” entre los Alfás. Por ejemplo, si observamos todos los puntos visitados por el Alfa 1 Manises en 2019 con tiempo de respuesta hasta 10 minutos (Figura 68), vemos que el mapa de isócronas de 7 minutos desde el Hospital General cubre una buena parte de estos puntos.

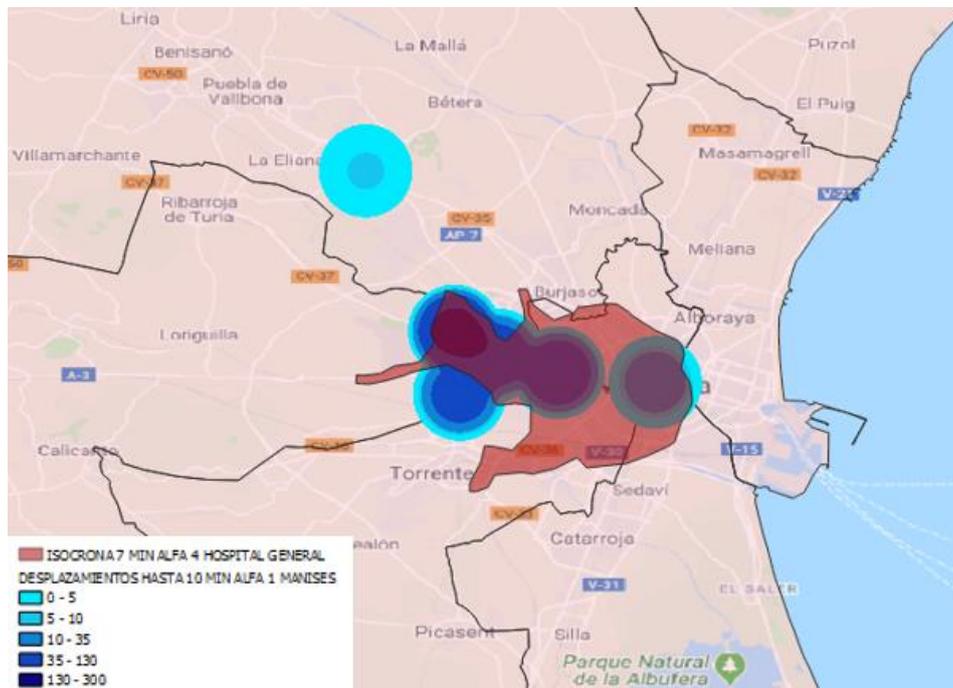


Figura 68. Desplazamientos del Alfa 1 Manises con tiempo de respuesta hasta 10 minutos e Isócrona de 7 minutos desde la base del Alfa 4 Hospital General.  
Fuente: Elaboración propia.

Por el contrario, el mapa de isócronas desde la base del Alfa 5 Silla no cubre ningún punto a los que se ha desplazamos el Alfa 1 Manises con tiempo de respuesta hasta 10 minutos (Figura 69).

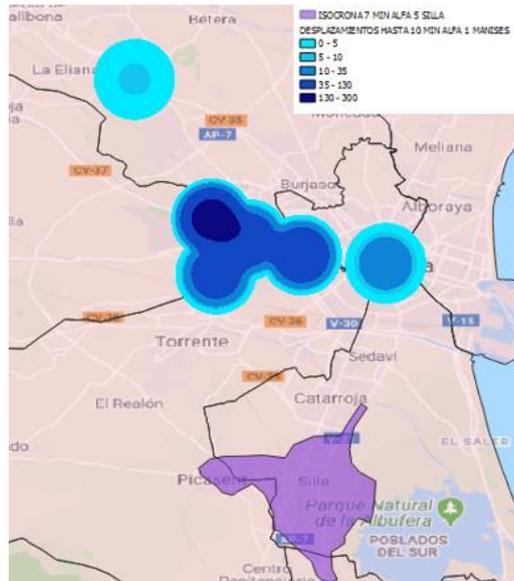


Figura 69. Desplazamientos del Alfa 1 Manises con tiempo de respuesta hasta 10 minutos e isócrona de 7 minutos desde la base del Alfa 5 Silla.  
Fuente: Elaboración propia.

De este modo podemos ver que algunos Alfas pueden ser “sustitutos” de otros porque su isócrona cubre una parte de los puntos. Para ver el análisis completo de los 10 Alfas remitimos al Anexo 1.

Como resultado del análisis visual mostramos la Tabla 13 de posible sustitución entre los Alfas (versión preliminar). Los Alfas localizados en las bases de la segunda columna pueden ser sustituidos por los Alfas localizados en las bases de la segunda fila según indica cada color. Por ejemplo, un Alfa estando en la Base 1 Manises puede ser sustituido en parte por un Alfa que está en la Base 3 Campanar I, bastante por el de la Base 4 Hosp. General, en parte por el de la Base 7 Campanar II y bastante por el de la Base 8 Paterna.

		BASES									
		B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B10	B11
BASES	B1	Black		Yellow	Green			Yellow	Green		
	B2		Black	Green	Yellow		Yellow	Green			
	B3		Yellow	Black				Green			
	B4		Yellow	Yellow	Black			Yellow			
	B5					Black					
	B6		Green	Yellow	Yellow		Black	Yellow			
	B7			Green	Green			Black			
	B8	Yellow							Black		
	B10									Black	
	B11										Black

ID	Denominación
B1	Manises
B2	Alfahuir
B3	Campanar I
B4	Hosp. General
B5	Silla
B6	Malvarrosa
B7	Campanar II
B8	Paterna
B10	Torrent
B11	Buñol

Grado de sustitución	
poco o nada	White
en parte	Yellow
bastante	Green

Tabla 13. Posible sustitución entre los Alfas (versión preliminar).  
Fuente: Elaboración propia.

Para refinar este análisis visual se ha cuantificado el porcentaje de superposición entre cada par de isócronas. En la Figura 70 se observan 2 mapas de isócronas (desde la base del Alfa 1 Manises y desde la base del Alfa 2 Alfahuir marcadas con estrellas) que tienen un nivel de solapamiento pequeño. En la Figura 71 se representa el porcentaje de solapamiento, es decir, el 6,79% de la isócrona del Alfa 1 Manises se solapa con isócrona del Alfa 2 Alfahuir. En la Figura 72 vemos que el 3,78% de la isócrona del Alfa 2 Alfahuir se solapa con la del Alfa 1 Manises. El análisis completo de cada par de los 10 Alfas se encuentra en el Anexo 2.



Figura 70. Solapamiento entre el mapa de isócrona del Alfa 1 Manises y el del Alfa 2 Alfahuir.  
Fuente: Elaboración propia.

fid	1
Nombre	Alfa 1
AA_MINS	
AA_MODE	driving-car
TOTAL_POP	92864
ISOCRONA 7 MIN ALFA 2 ALFAHUIR_area	1591468,7472555367
ISOCRONA 7 MIN ALFA 2 ALFAHUIR_pc	6,794981272957217

Figura 71. % de solapamiento entre el mapa de isócrona del Alfa 1 Manises y el del Alfa 2 Alfahuir.  
Fuente: Elaboración propia.

fid	1
Nombre	Alfa 2
AA_MINS	
AA_MODE	driving-car
TOTAL_POP	361106
ISOCRONA 7 MIN ALFA 1 MANISES_area	1591468,7472556736
ISOCRONA 7 MIN ALFA 1 MANISES_pc	3,7791768417411366

Figura 72. % de solapamiento entre el mapa de isócrona del Alfa 2 Alfahuir y el del Alfa 1 Manises.  
Fuente: Elaboración propia.

Como resultado del análisis cuantitativo llevado a cabo sobre la operativa de los SAMU mostramos la Tabla 14 de posible sustitución entre los Alfas. Esta información será fundamental para diseñar las estrategias de reubicación que definen la técnica heurística implementada para resolver el problema de reubicación operativa de los vehículos de emergencias sanitarias y que explicaremos en el capítulo 4.

		BASES									
		B3	B7	B4	B2	B6	B8	B10	B1	B5	B11
BASES	B3	Black	Green	Light Green	Yellow						
	B7	Green	Black	Light Green	Yellow						
	B4	Light Green	Light Green	Black	Yellow				Yellow		
	B2	Light Green	Light Green	Yellow	Black	Yellow					
	B6				Green	Black					
	B8			Yellow			Black		Light Green		
	B10							Black			
	B1	Yellow	Yellow	Light Green			Green		Black		
	B5									Black	
	B11										Black

ID	Denominación
B3	Campanar I
B7	Campanar II
B4	Hosp. General
B2	Alfahuir
B6	Malvarrosa
B8	Paterna
B10	Torrent
B1	Manises
B5	Silla
B11	Buñol

% Población Cubierta	
[0, 25)	
[25, 50)	Yellow
[50, 75)	Light Green
[75, 100]	Green

Tabla 14. Posible sustitución entre los Alfas (versión definitiva).  
Fuente: Elaboración propia.

Este capítulo pretendía obtener información del funcionamiento de las emergencias sanitaria analizando los datos históricos con diferentes herramientas estadísticas. De este análisis podemos destacar los siguientes resultados:

- Hay una variación de la demanda en el período vacacional relacionada con los desplazamientos de la población, principalmente a los municipios costeros. Esta variación se puede tener en cuenta a la hora de gestionar la flota de ambulancias.
- Se observa la variación tanto en el número de emergencias atendidas, como en el tiempo de respuesta entre diferentes SAMU. Las ambulancias cuya base se encuentra en la ciudad de Valencia tienen una carga de trabajo muy parecida, mientras que los vehículos ubicados en las zonas rurales tienen un número de emergencias atendidas menor, con una media del tiempo de respuesta y una desviación típica mayores. Estas diferencias se podrían tener en cuenta a la hora de formar turnos de trabajo.
- Los puntos de demanda más calientes coinciden con las ubicaciones de las bases de los SAMU, pero hay algunas zonas que no se pueden atender con un tiempo de respuesta menor o igual a 10 minutos. Además, se ha detectado que los desplazamientos realizados por algunos Alfas con tiempo de respuesta superior a 10 minutos están dentro de los mapas de isócronas de otros Alfas y hay una posible sustitución entre ellos.
- Se ha observado que hay una posible sustitución entre diferentes Alfas en un radio de tiempo de desplazamiento de 7 minutos (solapamiento entre mapas de isócronas). Esta información va a ser esencial a la hora de desarrollar la heurística para reubicación de las ambulancias.
- En ausencia de los datos de la demanda de emergencias sanitarias se puede utilizar el concepto de población como su indicador. Hay una correlación lineal positiva entre estas dos variables.

### **3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

El estudio de los problemas de localización de ambulancias tiene una larga trayectoria. En este capítulo presentamos una revisión bibliográfica de diferentes modelos de reubicación de ambulancias y un resumen de los puntos más importantes para tenerlos en cuenta a la hora de desarrollar nuestra técnica.

Los primeros modelos de localización de vehículos de emergencias (años 60-70) eran estáticos y no tenían en cuenta posibles fluctuaciones en el sistema, es decir, se resolvían para un momento dado del tiempo: por ejemplo, los modelos P-media (minimizan el tiempo promedio de respuesta de la flota), los modelos P-central (minimizan el tiempo total de respuesta), los modelos de cobertura (minimizan el número total de instalaciones de servicio de ambulancias), los modelos de máxima cobertura (maximizan la demanda cubierta con un número de vehículos disponibles). Todas las variables se consideraban dadas en estos modelos y los recursos estaban siempre disponibles.

El siguiente en aparecer fue un tipo de modelos de localización que intentaba introducir aleatoriedad en la formulación del proceso a través de diferentes parámetros (probabilidad de que un vehículo pueda no estar disponible, tasa de demanda, proporción de una doble cobertura de la demanda) e, incluso, a través de las variables aleatorias, como el tiempo de respuesta probabilístico. El desarrollo de los modelos, no solamente se dirige en el intento de incorporar toda la complejidad del proceso de atención prehospitalaria, sino también en hacer que los modelos sean más realistas.

Un sistema médico de emergencia real debe estar localizado de tal manera que no sólo la primera llamada sea atendida a tiempo, sino también los tiempos de respuesta frente a futuras emergencias sean lo más adecuados posible. El problema de localización se debe resolver teniendo en cuenta la influencia que puede tener un acto sobre los actos futuros. Así surgen los modelos dinámicos que intentan encontrar una configuración óptima del sistema esquivando la complejidad dimensional (muchísimas variables en diferentes momentos), combinatoria (un número enorme de posibles respuestas) y probabilística (cambios de demanda según momento del día o de la semana, cambios de velocidades en los trayectos, etc.). Para ver un análisis comparativo de los primeros modelos de localización de los servicios de emergencias se remite a Brotcorne, et al., (2003) y a Bélanger , et al., (2015).

Dado que el buen funcionamiento del sistema médico de emergencias no solamente depende de la localización inicial de los centros de ambulancias, sino también de cada decisión de envío de un vehículo que influye sobre futuros estados del sistema, surge una rama de investigación importante que es la reubicación de vehículos.

Unos de los primeros investigadores que formulan el problema de redistribución de ambulancias fueron Gendreau, et al., (2001), que mencionan que el escaso estudio de este tema hasta entonces se podía explicar por falta de tecnología como GPS (Sistema de Posicionamiento Geográfico) y SIG (Sistema de Información Geográfica). El desarrollo de estas herramientas hace que el problema de redistribución sea manejable ya que los datos requeridos pueden obtenerse y procesarse en tiempo real.

#### **3.1 Revisión de modelos de reubicación de vehículos de emergencias**

La clasificación de los modelos de reubicación de ambulancias es muy diversa. Se podía empezar por una clasificación genérica según el enfoque:

1. Programación matemática.
2. Simulación.
3. Optimización geográfica.
4. Heurísticas.

1. Los modelos de programación matemática intentan encontrar las soluciones óptimas representando el proceso como un problema matemático, con un diseño específico de la estructura: variables, función objetivo, restricciones, etc. Son modelos teóricos que se basan en algunas hipótesis para poder representar el proceso real de reubicación de ambulancias. Entre los modelos de la rama de Programación lineal, podemos mencionar Gendreau, et al., (2001), Schmid & Doerner, (2010), Enayati, et al., (2018); de Programación dinámica Restrepo, (2008), Maxwell, et al., (2009), Schmid, (2012) y de Programación estocástica Gendreau, et al., (2006), Rajagopalan, et al., (2008), Alanis, et al., (2013), Andrade & Cunha, (2015).

2. La simulación es una herramienta muy potente que lleva incorporados modelos analíticos y consiste en modelar una actividad real en un entorno computacional a través de variables, sus distribuciones y sus relaciones para el análisis y la mejora del proceso. En comparación con los modelos de programación matemática, los modelos de simulación permiten observar un sistema bajo diferentes conjuntos de supuestos. A través de la simulación se puede ver el cumplimiento de los objetivos, calcular los tiempos efectivos de viaje, visualizar los estados de las ambulancias (Henderson & Mason, 2005). También se brinda la posibilidad de probar nuevas estrategias operativas y diferentes ubicaciones de ambulancias o reglas de despacho. Entre los modelos de simulación se pueden nombrar Yue, et al., (2012), Aboueljinane, et al., (2012), Van Buuren, et al., (2012), Rodríguez, et al., (2016). Muchas veces la simulación se usa en combinación con la programación matemática como una herramienta de validación de los modelos: Rajagopalan, et al., (2008), Maxwell, et al., (2009), Lim, et al., (2011), Schmid, (2012), Liu, et al., (2013), Lam, et al., (2015), Sudtachat, et al., (2016), Enayati, et al., (2018).

3. Los modelos de optimización geográfica se distinguen por un uso intensivo de las herramientas de referencia geográfica (coordenadas) y sistemas de posicionamientos global. Aunque estas herramientas existen desde hace bastante tiempo, su utilización a gran escala es un hecho reciente (por ejemplo, en Alemania en el año 2017 no todas las ambulancias llevaban un GPS). La tecnología de este tipo permite realizar un análisis dinámico de problemas de ubicación y ayuda en la toma de decisiones en tiempo real. Como ejemplos de los modelos de optimización geográfica, se pueden mencionar Peleg & Pliskin, (2004), Billhardt, et al., (2014), Lam, et al., (2015).

4. Heurísticas. La Real Academia Española define una heurística como “técnica de la indagación y del descubrimiento” y también como “manera de buscar la solución de un problema mediante métodos no rigurosos, como por tanteo, reglas empíricas” (Real Academia Española, s.f.). El método heurístico se conoce desde la antigüedad como un método de invención para resolver diversos problemas, incluidos los matemáticos. En el contexto actual, es una técnica muy importante y de uso muy extendido ya que permite resolver problemas complejos en un tiempo muy razonable. Muchos autores de los métodos matemáticos acuden a las heurísticas a la hora de resolver el problema de reubicación de ambulancias: Gendreau, et al., (2001), Haghani & Yang, (2007), Rajagopalan, et al., (2008), Schmid & Doerner, (2010), Alanis, et al., (2013). Otros, Andersson & Värbrand, (2007), Jagtenberg, et al., (2015), utilizan heurísticas no sólo para resolver el problema de reubicación, sino también para formularlo.

Para una clasificación de modelos de reubicación de ambulancias más detallada, se pueden considerar muchos aspectos diferentes:

- Estructura de objetivos y restricciones (Lineal o no lineal).

- Certidumbre de los datos (Modelo determinista o estocástico).
- Número de Objetivos (un objetivo o más de uno).
- Presencia de la variable tiempo (Modelo estático o dinámico).
- Método de resolución (Algoritmo exacto, algoritmo heurístico, aproximación dinámica).
- Enfoque (Calculando la respuesta a priori o a posteriori).

Pero desde la perspectiva de nuestro estudio vamos a considerar como relevantes los siguientes elementos (Tablas 15 y 16):

- ✓ Técnica de solución del modelo
- ✓ Método de resolución del modelo
- ✓ Objetivo planteado
- ✓ Regla de despacho
- ✓ Momento de reubicación
- ✓ N.º de ambulancias para reubicar

Artículo	Técnica de solución del modelo	Método de resolución del modelo
Gendreau, et al., (2001)	Programación lineal	Algoritmo heurístico (Tabu Search)
Gendreau, et al., (2006)	Programación estocástica	Algoritmo exacto
Andersson & Värbrand, (2007)	Heurística	Algoritmo heurístico
Haghani & Yang, (2007)	Simulación	Algoritmo heurístico (Tabu Search)
Petz, (2008)	Programación estocástica	Algoritmo heurístico (PACO)
Rajagopalan, et al., (2008)	Programación estocástica	Algoritmo heurístico (Tabu Search), algoritmo de aproximación de hipercubos
Restrepo, (2008)	Programación dinámica estocástica	Aproximación lineal con funciones básicas
Maxwell, et al., (2009)	Programación dinámica estocástica	Aproximación lineal con funciones básicas
Maxwell, et al., (2010)	Programación dinámica estocástica	Aproximación lineal con funciones básicas
Schmid & Doerner, (2010)	Programación lineal	Algoritmo heurístico (VNS)
Schmid, (2012)	Programación dinámica estocástica	Aproximación basada en agregación pura
Liu, et al., (2013)	Programación estocástica	Algoritmo heurístico (Algoritmo genético), algoritmo de aproximación de hipercubos
Alanis, et al., (2013)	Programación dinámica estocástica	Algoritmo heurístico
Moeini, et al., (2014)	Programación lineal	Algoritmo exacto
Poulton & Roussos, (2013)	Optimización geográfica	Algoritmo heurístico
Billhardt, et al., (2014)	Optimización geográfica	Algoritmo de Lloyd
Jagtenberg, et al., (2015)	Heurística	Algoritmo heurístico
Lam, et al., (2015)	Programación lineal y Optimización geográfica	Algoritmo exacto, Análisis de puntos calientes, Análisis de polígonos de desplazamiento
Sudtachat, et al., (2016)	Programación dinámica estocástica	Algoritmo no lineal
Van Barneveld, et al., (2016)	Heurística	Algoritmo heurístico
Paz Roa, (2016), Paz Roa, et al., (2020)	Heurística y Programación lineal	Algoritmo heurístico, Algoritmo exacto
Enayati, et al., (2018)	Programación lineal	Algoritmo exacto

Tabla 15. Resumen de las técnicas y de los métodos de resolución de los modelos de reubicación de ambulancias.  
Fuente: Elaboración propia.

Artículo	Objetivo planteado	Regla de despacho	Momento de reubicación	N.º de amb.
Gendreau, et al., (2001)	Maximizar la cobertura doble menos un coste de reubicación	Más cercana (urgencias) y la que menos afecta la cobertura doble (no urgencias)	Después de la recepción de una llamada	Finito
Gendreau, et al., (2006)	Maximizar la cobertura esperada	-	Después de la recepción de una llamada	Finito
Andersson & Vårbrand, (2007)	Minimizar el tiempo de viaje máximo para cualquiera de las ambulancias reubicadas	Más cercana (urgencias) y la que menos afecta "Preparedness" (no urgencias)	Cuando la tasa de "Preparedness" de una zona está por debajo de un valor crítico (Indicador)	Finito
Haghani & Yang, (2007)	Minimizar el tiempo de viaje total ponderado	Más cercana	Cuando hay deficiencias de la cobertura (Indicador)	Finito
Petz, (2008)	Maximizar la cobertura esperada y minimizar el número de reubicaciones	-	Después de la recepción de una llamada de una zona con alta densidad poblacional (Indicador)	Finito
Rajagopalan, et al., (2008)	Minimiza el número de ambulancias desplegadas	-	Cuando cambia demanda (modelo multi-período)	Finito
Restrepo, (2008)	Minimizar el número de llamadas no atendidas dentro de un tiempo límite	Más cercana	Después de acabar un servicio (adicionalmente se hacen pruebas para reubicar las ambulancias inactivas)	Uno (Finito)
Maxwell, et al., (2009)	Minimizar el número de llamadas no atendidas dentro de un tiempo límite	Más cercana	Después de acabar un servicio	Uno (Finito)
Maxwell, et al., (2010)	Minimizar el número de llamadas no atendidas dentro de un tiempo límite	Más cercana	Después de acabar un servicio (adicionalmente se hacen pruebas para reubicar las ambulancias inactivas)	Uno (Finito)
Schmid & Doerner, (2010)	Maximizar la doble cobertura y minimizar el número de reubicaciones	Más cercana	Cuando cambia un período de tiempo a otro, por ejemplo, debido a la congestión del tráfico (modelo multi-período)	Finito
Schmid, (2012)	Minimizar el tiempo de respuesta	Más cercana	Después de acabar un servicio	Uno
Liu, et al., (2013)	Maximizar el rendimiento optimista con un nivel de confianza dado sujeto a algunas restricciones de oportunidad	-	Sin especificar (el problema se resuelve a nivel táctico en función del estado de los vehículos, el tiempo de viaje potencial y la fluctuación de la demanda)	Finito
Alanis, et al., (2013)	Minimizar del tiempo total estimado para alcanzar el cumplimiento del sistema	Más cercana	Después de la recepción de una llamada o después de acabar un servicio	Finito
Moeini, et al., (2014)	Maximizar la cobertura simple y la doble menos un coste de reubicación	Se entiende que es la misma que en (Gendreau, et al., 2001)	Se entiende que es el mismo que en (Gendreau, et al., 2001)	Finito
Poulton & Roussos, (2013)	Maximizar el valor del estado (suma ponderada de 5 funciones)	Según el valor del estado	No especificado	-

Billhardt, et al., (2014)	Minimizar el tiempo esperado de llegada a posibles nuevos pacientes de emergencia	Más cercana (enfoque dinámico)	Cuando hay cambios significativos en el sistema	Toda la flota disponible
Jagtenberg, et al., (2015)	Minimizar la fracción esperada de accidentes que se alcanzan más tarde que un tiempo dado	Más cercana	Después de acabar un servicio	Uno
Lam, et al., (2015)	Maximizar la cobertura doble	Más cercana	Cuando cambia demanda (modelo multi-período)	Finito
Sudtachat, et al., (2016)	Maximizar la cobertura esperada	Más cercana	Después de la recepción de una llamada o después de acabar un servicio	Uno
Van Barneveld, et al., (2016)	Minimiza el tiempo de respuesta promedio	Más cercana	Después de la recepción de una llamada o después de acabar un servicio	Uno Finito
Paz Roa, (2016), Paz Roa, et al., (2020)	Maximizar la cobertura doble, minimizar el tiempo máximo de traslado	Más cercana (urgencias) y la que menos afecta el nivel de preparación (no urgencias)	Cuando la tasa de preparación de una zona está por debajo de un valor crítico (Indicador) y después de terminar un servicio	Finito Uno
Enayati, et al., (2018)	Maximizar la cobertura con el menor tiempo de viaje total	Más cercana	Después de la recepción de una llamada o después de acabar un servicio	Finito Uno

Tabla 16. Resumen de algunos aspectos más importantes de los modelos de reubicación de ambulancias.  
Fuente: Elaboración propia.

Tal como se ha comentado antes, uno de los primeros modelos de reubicación de ambulancias fue el de Gendreau, et al., (2001), según el cual el problema de redistribución consiste en reubicar las ambulancias disponibles a los sitios de ubicación potencial cuando se reciben las llamadas<sup>11</sup>. Básicamente, el problema de redistribución se reduce a un problema de ubicación de ambulancias cada vez que entra una llamada de emergencia. El sistema permite tomar decisiones en tiempo real en dos niveles: determinar qué ambulancia enviar a una llamada determinada y redistribuir las ambulancias restantes de la mejor manera posible (maximizando la cobertura doble de la demanda).

El problema se resuelve para el momento  $t$  con un número de ambulancias disponibles dado y se define la mejor ubicación de los servicios de emergencias. El problema se vuelve a resolver (en tiempo real) para el momento  $t+1$ , con un número de ambulancias disponibles menor si alguna ambulancia está ocupada y luego con un número de ambulancias mayor si alguna ambulancia vuelve a estar disponible y así sucesivamente.

Para poder realizar los cálculos en tiempo real se usa la computación paralela. Para resolver el problema de redistribución se utiliza el método de Búsqueda Tabú.

En el año 2006 los mismos autores apoyándose en el modelo estocástico de Daskin, (1983) proponen reubicar automóviles médicos, vehículos que se utilizan como complemento de la flota estándar de ambulancias. La particularidad de este modelo probabilístico es que calcula previamente las soluciones para todos los estados posibles del sistema dinámico (cuando hay 1 vehículo ocupado, 2 vehículos ocupados, etc.) y lo único que hay que hacer es ver cuántos vehículos ocupados hay actualmente y colocar los restantes según los resultados “precalculados”.

<sup>11</sup> Dada la cantidad y la variedad de los modelos de reubicación de ambulancias hemos optado por una presentación cronológica de los mismos.

Para que el número de reubicaciones no sea elevado, se introduce un parámetro que acota el número de las bases que se pueden cambiar al aumentar (disminuir) el número de vehículos ocupados. El objetivo del modelo es maximizar la cobertura esperada en el tiempo sujeto a un límite superior. El valor esperado se debe a la introducción de la probabilidad de que un vehículo esté disponible. El modelo es eficiente sólo si el número de vehículos es pequeño.

La extensión de este modelo fue propuesta por Van Barneveld, (2016), donde se introduce la contribución a la cobertura de varias ambulancias ubicadas en un radio dado (se calcula la probabilidad de responder a una llamada no solamente por la ambulancia más cercana, sino también por la segunda más cercana, la tercera y así sucesivamente).

En el año 2007 Haghani & Yang realizan un estudio de reubicación de ambulancias basado en la simulación. El módulo clave en el marco de simulación es un optimizador que puede resolver el problema de despacho de vehículos en tiempo real. La asignación y la reubicación se consideran simultáneamente considerando la prioridad de las llamadas de emergencia. El objetivo es minimizar el tiempo de viaje total ponderado. Se utiliza un coeficiente de penalización asociado con la deficiencia de cobertura que forma parte de la función objetivo. Cuando la tasa de cobertura total disminuye, aumenta el coeficiente de penalización. Cuando este coeficiente es demasiado grande, la reubicación de vehículos para cobertura de servicio tendrá prioridad y se resuelve con la heurística de Búsqueda Tabú.

Petz, (2008) introduce varias modificaciones en el modelo de Gendreau, et al., (2006) de tal forma que la reubicación se hace no solo dependiendo de la cantidad de los vehículos ocupados, sino también de la zona de la llamada de emergencia. Si ocurre una emergencia en una zona con mucha densidad poblacional y un vehículo cercano se envía para atender esta emergencia, será beneficioso reubicar otro vehículo en esta zona. Si la emergencia ocurre en una zona con la densidad de población baja, no será necesario reubicar ningún vehículo. Por lo tanto, el número de reubicaciones depende del vehículo de emergencia ocupado (hay un indicador de probabilidad de reubicación). El modelo multi-objetivo (maximizar la cobertura y minimizar el número de reubicaciones) se resuelve con la heurística Colonia de Hormigas.

En el trabajo de Rajagopalan, et al., (2008) se desarrolla un modelo estocástico cuyo objetivo es: minimizar el número de ambulancias requeridas mientras se cumplen los requisitos predeterminados de disponibilidad de ambulancia. Inicialmente se calcula el número de ambulancias requeridas en el momento  $t$ . Para el momento  $t+1$  se recalcula el número de las ambulancias y sus reubicaciones según los cambios significativos en el patrón de la demanda. Se considera que el momento  $t$  es un momento del día (por ejemplo, cuando la gente está en las zonas residenciales) y  $t+1$  es otro momento del día (por ejemplo, cuando las personas están en los centros de trabajo). El problema se resuelve con la heurística de Búsqueda Tabú reactiva. Este modelo resulta ser muy interesante porque introduce las fluctuaciones de la demanda explícitamente.

Los modelos vistos hasta ahora intentan resolver el problema de reubicación con técnicas de programación lineal o estocástica en tiempo real (es un enfoque intensivo en cálculos computacionales), con heurísticas (realizando una aproximación a los valores de un sistema concreto de ambulancias) o con simulación (experimentando en la fase de preparación). Pero aparece otro tipo de modelos, que formulan el problema de reubicación como un proceso (secuencia de fases) explícitamente y lo resuelven usando técnicas de programación dinámica. Habitualmente, dado un número finito de fases, los modelos de programación dinámica se resuelven desde la última fase hacia atrás evaluando todas las políticas. Pero en el caso que nos ocupa el número de fases es infinito. Para abordar este hecho, la programación dinámica utiliza aproximación a una función objetivo y resuelve el problema hacia delante de manera iterativa.

En su tesis doctoral Restrepo, (2008) y posteriormente Maxwell, et al., (2009) y Maxwell, et al., (2010) abordan el problema de reubicación de las ambulancias como un problema de programación dinámica estocástica. La reubicación de las ambulancias solamente es posible cuando un vehículo está volviéndose a la base después de un servicio. La decisión de reubicar o no una ambulancia determina el estado siguiente del sistema. A cada decisión le corresponde un coste de transacción que indica el número total de llamadas no atendidas dentro de un tiempo límite. Por lo tanto la mejor decisión será aquella que minimiza este coste. El estado óptimo del sistema se obtiene no solamente valorando la situación en el momento dado, sino también teniendo en cuenta la distribución de probabilidad de las consecuencias futuras de cada movimiento.

Entre otros trabajos que utilizan la programación dinámica podemos mencionar el de Zhang, (2010) y el de Schmid, (2012).

Volviendo a los modelos de programación lineal, Schmid & Doerner, (2010) hacen una extensión del modelo de Gendreau, et al., (1997) considerando la velocidad del vehículo variable y dependiente de diferentes factores: hora del día, volumen del tráfico, etc. El problema se resuelve de manera miope e independientemente una vez por cada período de tiempo  $t$ , teniendo en cuenta los tiempos de viaje y los radios de cobertura correspondientes. El objetivo es maximizar la doble cobertura dentro un radio (tiempo de llegada) para todo horizonte de planificación y minimizar el número de reubicaciones de ambulancias. La heurística utilizada en este caso es la Búsqueda en Vecindario Variable. Otros trabajos de programación multi-período fueron realizados por Andrade & Cunha, (2015), donde el problema de la reubicación de las ambulancias se resuelve con la heurística ABC de Colonia de Abejas; Van den Berg & Aardal, (2015) consideran que no solamente el tiempo de viaje varía durante el día, sino también la demanda y la disponibilidad de las ambulancias, el problema se resuelve con un algoritmo exacto.

El trabajo de Lim, et al., (2011) revisa los modelos dinámicos de reubicación de ambulancias desde la perspectiva de las políticas de despacho. La política de despacho más habitual es la que asigna la ambulancia disponible más cercana a una escena de llamada. Pero hay otras políticas: despachar dependiendo de la probabilidad de recibir una llamada, despachar dependiendo de la urgencia, redirigir una ambulancia a una llamada más urgente. Los autores, basándose en el modelo de máxima cobertura y a través de la simulación, estudian la posibilidad de reasignar una ambulancia que acaba de completar un servicio y, también, la posibilidad de redireccionamiento de las ambulancias.

Alanis, et al., (2013) proponen un modelo de reubicación de ambulancias basado en las tablas de cumplimiento. Una tabla de cumplimiento muestra las ubicaciones deseadas para un número dado de ambulancias disponibles. Cuando el estado del sistema cambia, los despachadores deciden qué ambulancias mover para alcanzar el cumplimiento (asignación de las ambulancias a las bases) en el nuevo estado del sistema. Se intenta minimizar la cantidad de movimientos necesarios para alcanzar el cumplimiento. El problema de reubicación se define como una cadena de Márkov finita de tiempo continuo. Un algoritmo iterativo evalúa el conjunto de ambulancias “no conformes” y el conjunto de estaciones “no conformes” en cada estado del sistema. Teniendo en cuenta las probabilidades del estado siguiente del sistema, hace coincidir los dos conjuntos en el menor tiempo posible. Otro trabajo basado en las tablas de cumplimiento es de Sudtachat, et al., (2016), donde se desarrolla un modelo para obtener la mejor tabla de cumplimiento para su caso.

Moeini, et al., (2013) y Moeini, et al., (2014) indican que la doble cobertura utilizada en muchos modelos no es necesaria para todas las zonas (análisis histórico de las llamadas simultáneas) e incluyen este hecho explícitamente en su modelo basado en el de la doble cobertura de demanda

de Gendreau, et al., (2001). El objetivo es maximizar la suma de la cobertura simple y la doble, menos los costes de reubicación. La resolución se realiza con un algoritmo exacto.

Poulton & Roussos, (2013) proponen evaluar el estado del sistema a través de la suma ponderada de varias funciones: el número de llamadas muy urgentes y urgentes que esperan despacho de una ambulancia; el % del área que las ambulancias disponibles pueden alcanzar en  $t$  minutos multiplicado por la densidad de incidentes esperada; el tiempo de viaje total actual para ambulancias en ruta a llamadas muy urgentes y urgentes. Este trabajo de optimización geográfica utiliza el concepto de isócronas (el área formada por los puntos que se pueden alcanzar desde un sitio en un período de tiempo determinado), pero no especifica el proceso de reubicación de las ambulancias.

Otro trabajo de optimización geográfica es el de Billhardt, et al., (2014) en el que los autores intentan optimizar en cada momento las posiciones de todas las ambulancias todavía disponibles, de modo que se minimiza el tiempo esperado de llegada a posibles nuevos pacientes de emergencia. Se utiliza el concepto de los centroides de Voronoi<sup>12</sup>, que representan las ubicaciones de las ambulancias disponibles, a partir de las coordenadas de los puntos de demanda ponderados por su probabilidad condicional. Las ambulancias se pueden redistribuir a cualquier punto de la región y todas las ambulancias inactivas se redistribuyen dinámicamente cada vez que los cambios en el sistema indican que puede existir una mejor asignación. Para evitar movimientos continuos, una ambulancia no se desplaza si su nueva posición está a menos de 300 m. Aun así, la ubicación de las ambulancias en cualquier sitio de la región es un hecho poco probable.

Lam, et al., (2015) es otro trabajo de optimización geográfica. Realizando un análisis exhaustivo de los datos históricos, los autores determinan diferentes patrones de la demanda e identifican puntos calientes (demanda de emergencias alta) para diferentes momentos del tiempo. Con la ayuda de la técnica de análisis de polígonos de desplazamiento (una especie de mapa de isócronas), hacen coincidir las bases de las ambulancias con los puntos calientes para cada período del tiempo definido, maximizando la doble cobertura. De este modo, se resuelve un problema de reubicación multi-período.

Entre los trabajos más recientes está el modelo de programación matemática de Enayati, et al., (2018), que considera reubicar tanto las ambulancias inactivas desde las bases, como las que acaban de quedarse libres. El objetivo es maximizar la cobertura ponderada por el volumen histórico de las llamadas minimizando el tiempo de viaje total. Cada ambulancia tiene una cuenta acumulada del tiempo que está ocupada. El tiempo de reubicación se limita a 15 minutos como máximo porque se supone que las ambulancias no están disponibles mientras se reubican. El primer paso es resolver un problema lineal binario de maximización de la cobertura cada vez que una ambulancia se haya despachado para atender una emergencia. Si la cobertura adicional que se obtiene en este paso es superior a un umbral, se activa el siguiente paso que es realizar las reubicaciones minimizando el tiempo total del viaje teniendo en cuenta la restricción de la carga del trabajo. Cuando una ambulancia se queda libre, únicamente se ejecuta el primer paso para encontrar la ubicación que maximiza la cobertura. Todos los parámetros se validan con un modelo de simulación.

Aquí termina la revisión genérica de los modelos de reubicación de vehículos de emergencias. En el siguiente apartado presentamos trabajos que utilizan técnicas heurísticas de reubicación de ambulancias.

---

<sup>12</sup> Una teselación de Voronoi es una partición de un espacio en una serie de regiones alrededor de un conjunto de puntos de control (centroides), de manera que el perímetro de los polígonos generados sea equidistante (distancia Euclídea) a los puntos vecinos.

## 3.2 Revisión de técnicas heurísticas de reubicación de vehículos de emergencias

Ya se ha comentado antes que, dada la complejidad del problema y la necesidad de obtener buenas soluciones a menudo en un tiempo real, muchos modelos de programación matemática utilizan heurísticas para su resolución. En este apartado realizamos un repaso de los modelos cuyo método de resolución es un algoritmo heurístico. También presentamos trabajos que formulan y resuelven el problema con técnicas heurísticas.

El modelo de Gendreau, et al., (2001) se resuelve en tiempo real con la heurística Búsqueda Tabú. Esta heurística es un método de búsqueda local que se mueve en cada iteración de una solución a su mejor vecino, incluso si esto hace que el valor de la función objetivo se deteriore. Para evitar ciclos, se prohíben soluciones similares a las recientemente examinadas (tabú) para varias iteraciones. Para modelar restricciones relacionadas con la reubicación de ambulancias (restricciones que evitan mover las mismas ambulancias repetidamente, las que evitan los viajes de ida y vuelta y las restricciones que evitan los viajes largos), en la función objetivo se añade un coeficiente de penalización. Este coeficiente captura parte de la historia de cada ambulancia y será más grande para, por ejemplo, una ambulancia que se ha movido con frecuencia en el pasado.

Petz, (2008) utiliza la heurística de Colonia de Hormigas de Pareto (PACO) inspirada en el comportamiento de búsqueda de hormigas reales.

Rajagopalan, et al., (2008) aplican una Búsqueda Tabú reactiva, una variación de la versión conocida, “precalculando” los resultados para diferentes momentos del tiempo.

La heurística utilizada en el caso de Schmid & Doerner, (2010) es la VNS (Variable Neighborhood Search), búsqueda de vecindad variable, que cambia sistemáticamente el vecindario en dos fases: primero, descenso para encontrar un óptimo local y luego, una fase de perturbación para salir del valle correspondiente.

Uno de los primeros modelos que introduce un indicador específico para poner en marcha el algoritmo de reubicación de ambulancias es el de Andersson & Värbrand, (2007). Este trabajo se basa en un nuevo concepto llamado “Preparedness”, que es una forma de evaluar la capacidad de un conjunto de ambulancias de atender a pacientes potenciales ahora y en el futuro. Una llamada urgente siempre es atendida por la ambulancia más cercana, pero una llamada menos urgente se atiende por la ambulancia que proporciona mejor valor para “Preparedness”.

El “Preparedness” se compone del número de ambulancias que están por la zona, el tiempo de viaje a la zona, la demanda de emergencias en la zona y un factor de contribución para las ambulancias. Este indicador de preparación de una zona aumenta si una ambulancia se acerca a la zona, es decir, si tiempo de llegada disminuye. Además, si la frecuencia de llamadas en una zona aumenta, el “Preparedness” disminuye. El sistema detecta automáticamente la zona en la que el nivel de “Preparedness” está por debajo de un nivel crítico y se pone en marcha un algoritmo para reubicar más cerca de la zona “descubierta” una de las ambulancias de otras zonas cercanas. Cada vez sólo se puede mover una ambulancia, la que más aumenta el “Preparedness”. En cuanto esta ambulancia esté reubicada, se vuelve a calcular el nivel de “Preparedness” por si otra zona se ha quedado “descubierta” y se repite el proceso. El objetivo es minimizar el tiempo de viaje máximo para cualquiera de las ambulancias reubicadas, hasta que el nivel de “Preparedness” esté por encima del límite. Para que las ambulancias no estén moviéndose mucho, hay un límite superior de la función objetivo, pero dado que no se consideran los costes de las reubicaciones, el número total de las mismas es bastante elevado.

En el trabajo de Lee, (2011), basándose en el concepto de “Preparedness”, se introducen varias modificaciones en el algoritmo de despacho original. Otra modificación es la incorporación de diferentes funciones de bienestar social para ver el “Preparedness” de todo el área, y no solamente de una zona.

Otro trabajo basado en el concepto de “Preparedness” fue propuesto por Liu, et al., (2013), en el que se introducen los cálculos de probabilidades de envío de vehículos de emergencia según el modelo utilizado por Rajagopalan, et al., (2008). De este modo en la formulación del “Preparedness” se introduce el concepto de probabilidad de disponibilidad de un vehículo para cubrir una zona.

En el trabajo de Jagtenberg, et al., (2015) se propone una heurística para resolver el problema de reubicación dinámica de ambulancias, con el objetivo de minimizar el porcentaje de llamadas atendidas fuera de un tiempo límite. La reubicación es posible únicamente después de que una ambulancia finalice un servicio. Las bases a las que se puede dirigir están determinadas y su número es menor que el número de ambulancias. Se utiliza el concepto de cobertura máxima esperada de Daskin, (1983). A partir de la probabilidad de que un vehículo esté ocupado y la tasa de llegadas de llamadas, se calcula un número de vehículos disponibles en un momento dado, la demanda cubierta esperada y la contribución marginal de una ambulancia a este valor de cobertura esperada. Dado que varias ambulancias se ubican en la misma base, ya hay una cierta cobertura de la región, por lo tanto, el concepto más importante es la cobertura marginal.

Otra heurística se propone en el artículo de Van Barneveld, et al., (2016). Aparte de reubicar una ambulancia al finalizar un servicio, también se contempla la posibilidad de reubicar los vehículos inactivos desde la base (el número de las posibles bases receptoras es muy limitado). Para evitar viajes largos, se pueden realizar reubicaciones consecutivas más cortas de varias ambulancias. El concepto clave de la heurística es la falta de preparación, que es el tiempo necesario para atender a todos los puntos en un momento dado. Uno de los objetivos que proponen los autores de este trabajo es determinar si la acción de reubicación es realmente necesaria, porque puede ocurrir que la ganancia esperada en el rendimiento al realizar esta acción es muy pequeña, y el beneficio no supera las desventajas relacionadas con la cantidad de reubicaciones de ambulancias adicionales. Según los resultados, la reubicación siempre da mejores resultados que una política estática, pero cuando su número no es muy elevado.

El trabajo de Van Barneveld, et al., (2018) considera las dos heurísticas anteriores, Jagtenberg, et al., (2015) y Van Barneveld, et al., (2016). Como base se toma la primera, de cobertura máxima esperada, pero se añaden algunos conceptos de la segunda, como por ejemplo, tener en cuenta las ambulancias cuyo tiempo de traspaso del paciente al hospital supera el límite o las reubicaciones en cadena (como máximo 2 ambulancias). Aparte, se añade el límite al tiempo de reubicación. Todos los resultados se evalúan con la simulación.

En el trabajo de Grado de Paz Roa, (2016) y posteriormente en el artículo de Paz Roa, et al., (2020) los autores combinan la propuesta de Gendreau, et al., (2001) y la de Andersson & Värbrand, (2007). Se desarrolla una herramienta que considera las decisiones de despacho de ambulancias y de relocalización conjuntamente en tiempo real. Hay dos momentos en los que se puede realizar la reubicación: después de terminar un servicio o cuando el nivel de la preparación de una zona se sitúe por debajo del nivel mínimo. Cuando una ambulancia vuelve a estar libre, se busca la mejor localización para ella en función del parámetro llamado por Andersson “Preparednes”. En este caso, este índice se define como la tasa de ocupación de la teoría de colas (la probabilidad de que un vehículo esté disponible). Después de despachar una ambulancia para atender una emergencia, se comprueba el nivel de índice de preparación. Si en alguna zona este índice está por debajo del mínimo, se ponen en marcha 2 algoritmos. Primero, teniendo como objetivo maximizar la doble cobertura, se determina el número de ambulancias a reubicar y

segundo, minimizando el tiempo máximo de traslado, se realizan las reubicaciones. Para conseguir un mayor nivel de la preparación, los autores proponen también “reubicar” la ambulancia que empieza su turno, es decir, cada vez que un equipo comienza su turno, no empieza en su base asignada, sino que se determina la mejor ubicación para su vehículo.

### **3.3 Resumen de la revisión de modelos de reubicación de vehículos de emergencias**

La revisión de la literatura ha mostrado que hay muchos enfoques para resolver el problema de reubicación de ambulancias. La evolución de los modelos ha ido en la dirección de incorporar mayor efectividad y realismo. Desde los modelos estáticos, donde cada ambulancia se volvía a su base asignada, hemos pasado a los modelos de reubicación prácticamente continua, en los que los vehículos se podían colocar en cualquier punto del mapa. Pero la tendencia en el desarrollo de los modelos actuales es realizar una cantidad de reubicaciones limitada.

Según los modelos vistos, se pueden sintetizar 3 “momentos” para realizar la reubicación:

- Con el cambio del patrón de la demanda. Reubicación multi-período.
- Cuando hay aviso de un indicador (baja cobertura, baja preparación de la zona).
- Cuando hay un cambio en el estado del sistema debido a:
  - Asignación de una ambulancia a una emergencia
  - Finalización de un servicio de una ambulancia.

La cantidad de los vehículos a reubicar varía de un modelo a otro. En las reubicaciones multi-período se suele considerar toda la flota para tal fin, aunque realmente se mueve una cantidad finita de vehículos (se introduce un parámetro de penalización de las reubicaciones). Lo mismo pasa en los modelos con un indicador de reubicación, donde la limitación de los movimientos se consigue a través de la función objetivo (minimizar el número de reubicaciones). En los modelos de cambio de estado, podemos encontrar diferentes combinaciones:

- Cuando entra una llamada considerar toda la flota para reubicación;
- Cuando entra una llamada considerar una cantidad finita de ambulancias;
- Cuando un vehículo vuelve a estar disponible reubicar toda la flota;
- Cuando un vehículo vuelve a estar disponible reubicar únicamente este vehículo.

Por lo tanto, hay modelos que únicamente consideran reubicar las ambulancias que vuelven a estar disponibles (en este caso el número de movimientos realizados por un vehículo será el mismo que en un modelo estático, sólo cambiará el destino) y otros modelos, que consideran también reubicar las ambulancias que están inactivas en la base (en este caso el número de movimientos de cada vehículo será más elevado que en un modelo estático). Dos estudios interesantes para comparar la efectividad de diferentes modelos de reubicaciones y los costes se han realizado por Bélanger, et al., (2016) y por Trujillo, et al., (2020).

La resolución de los problemas de reubicación se hace de una de las dos formas siguientes: “precalculando” las posiciones óptimas (uso de tablas de búsqueda) o en tiempo real. Los modelos que utilizan tablas de búsqueda dejan la tarea de la reubicación a los despachadores. Este enfoque requiere mucha habilidad y experiencia y no siempre es efectivo. Si hay mucha fluctuación en el sistema, no se llega a cumplir con las tablas y hasta se puede devaluar la solución óptima.

La resolución en tiempo real es muy costosa en cálculos computacionales. La programación lineal no siempre es efectiva, sobre todo con una flota de vehículos elevada. La programación dinámica exacta no es posible dado un horizonte temporal infinito y dimensionalidad intratable. La programación aproximada depende mucho de la elección de los parámetros y, como matemáticamente es muy compleja, su uso a la hora de convencer a los responsables del SES es limitado. Estas son algunas de las razones que motivan el hecho de implementar algoritmos heurísticos para la resolución de este problema.

## 4. TÉCNICA HEURÍSTICA PROPUESTA

### 4.1 Descripción de los aspectos generales

El análisis de los modelos de reubicación de las ambulancias expuesto en el capítulo 3 muestra que no existen soluciones que puedan ser aplicadas a todos los SES. Los resultados obtenidos dependen de las características del servicio como: la frecuencia con la que se producen las emergencias en determinadas zonas, el número de ambulancias, el número de bases, el tiempo máximo del desplazamiento para la reubicación, etc. Es bastante difícil hacer comparaciones entre diferentes casos. Cada uno es particular. Dado que nuestro objetivo es modelizar la reubicación dinámica para un caso real (el SES de la provincia de Valencia), con muchas particularidades y cuya resolución debe darse de forma instantánea, se va a aplicar una metodología heurística para afrontar su resolución.

La metodología heurística tiene un carácter aproximado frente a los métodos exactos y no siempre proporciona resultados óptimos. Aun así, tiene varias ventajas frente a otros métodos de resolución, entre las que destacaríamos:

- Es muy flexible y permite incorporar fácilmente aspectos realistas o difícilmente expresables a través de expresiones matemáticas.
- Puede proporcionar soluciones de calidad en un tiempo de computación pequeño.
- Puede ser una herramienta intuitiva y más fácil de explicar a los usuarios.

Antes de definir los detalles de nuestra técnica, tenemos que hacer una descripción del resto de los factores que influyen en el tiempo de respuesta a una emergencia.

#### 1. Cantidad y calidad de los recursos

Estos parámetros están dados en nuestro problema. Tratamos un caso real del SES de la provincia de Valencia, cuya descripción se ha dado en el apartado 2 de este trabajo, y donde hemos comentado que nos centramos en el conjunto de los 10 SAMU ubicados en la ciudad de Valencia y sus alrededores (Figura 73), identificados como los Alfas.

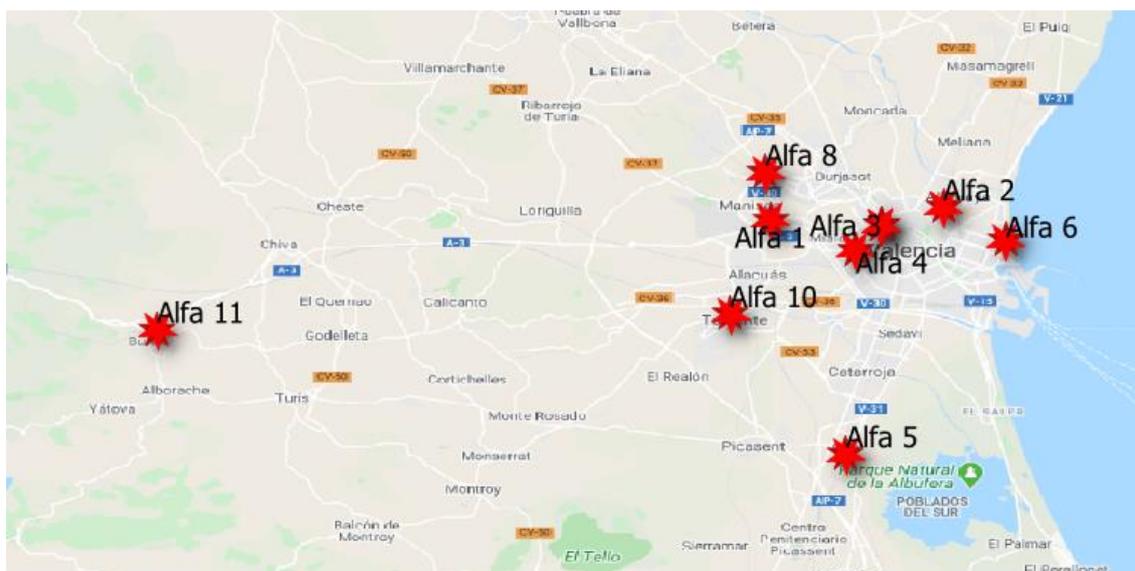


Figura 73. Ubicación de los Alfas en la ciudad de Valencia y alrededores.  
Fuente: Elaboración propia.

## **2. Reglas de asignación de las ambulancias a las emergencias**

En la mayoría de los casos se envía la ambulancia más cercana. Se ha visto que puede haber una asignación diferente, pero habitualmente se utiliza para las llamadas menos urgentes. En nuestro caso se envía la ambulancia más cercana. No se puede asignar una ambulancia a otro servicio después de terminar el anterior hasta que no regrese a una base, ya que el vehículo ha de ser desinfectado. Dado que sólo las ambulancias que están esperando en una base pueden participar en la asignación para atender una emergencia, en caso de que no haya ninguna ambulancia para atender una llamada, el algoritmo no genera respuesta para esta emergencia. Entendemos, que una situación en la que no haya ni un vehículo libre es excepcional y por ese motivo hacemos este supuesto, como en el modelo de Paz Roa, et al., 2020, donde es el locutor el que debe generar, controlar y resolver el servicio de colas.

## **3. El tiempo de triaje**

Es el tiempo que transcurre hasta que la ambulancia empieza a moverse. En nuestro caso lo consideraremos entorno a los 3 minutos, como en muchos de los modelos publicados. La eficiencia en este punto de servicio (una rápida y correcta recogida de los datos de la emergencia) es muy importante, porque puede acortar el tiempo de respuesta, pero su estudio se queda fuera de los límites de este trabajo.

## **4. Velocidad media de una ambulancia**

Hay diferentes estudios que demuestran que la velocidad media de una ambulancia depende de la hora del día, sobre todo en las ciudades con una densidad poblacional elevada y/o una infraestructura determinada, que dificulta que haya una ruta alternativa. Pero en otros estudios se ha visto que con una sirena y luces no hay diferencia significativa de velocidad media en diferentes períodos. Dado que en la provincia de Valencia hay una red de carreteras más o menos adecuada y se puede saber si hay atasco en algún punto, se considera la velocidad media constante.

## **5. Demanda**

Dentro del contexto del problema que nos ocupa hay que determinar qué engloba el concepto demanda. La densidad de población, la frecuencia de llamadas de emergencia, factores socioeconómicos como el número de escuelas, jardines de infancia y hogares para ancianos se van a considerar conjuntamente bajo el citado término. La demanda es una variable aleatoria que se intenta modelar de diferentes formas. Hay estudios que intentan predecir, en base a los datos históricos, la probabilidad de una llamada en una zona. Otros utilizan el término de población como un indicador de la demanda. En el apartado 2.2.2 hemos realizado un análisis de los servicios de emergencias sanitarias de los departamentos de salud de la provincia de Valencia, donde concluimos que hay una relación lineal directa entre la población SIP y la demanda de las emergencias sanitarias. Por lo tanto, la utilización de la población como un indicador de la demanda de las emergencias sanitarias sería una buena estrategia, ya que la demanda es una variable que habría que modelizar, mientras que la población es una información más o menos conocida.

Aparte de estos cinco factores, tenemos que definir otros aspectos del problema que tienen importancia para la reubicación de las ambulancias.

La cantidad de los SAMU depende del turno de trabajo y no es la misma en todos los momentos del día. En nuestro caso vamos a considerar un periodo de tiempo reducido, desde las 9:00 hasta las 15:00 horas.

Aunque en la vida real un paciente no siempre es trasladado al hospital más cercano porque éste puede no disponer del servicio necesario, en este estudio vamos a considerar que un paciente se

traslada al hospital más cercano a la localización donde se ha producido la emergencia. El tiempo de traspaso del paciente al personal hospitalario se considera nulo.

Se ha visto que la maximización de la cobertura es uno de los objetivos más comunes de los modelos de reubicación de ambulancias. Sería interesante trabajar con la cobertura esperada, es decir teniendo en cuenta la probabilidad de ocurrencia de una emergencia, pero hasta ahora hemos tenido acceso a los datos históricos mensuales, con los que, de momento, no podemos modelar una distribución de las emergencias y, por lo tanto, nuestro objetivo será maximizar la demanda cubierta, es decir, la población que puede ser atendida por un Alfa dentro de un determinado tiempo.

A la hora de realizar los mapas de isócronas, el software QGIS proporciona un atributo adicional que es la población cubierta. En la Figura 74 se observa que la isócrona de 7 minutos desde la base del Alfa 2 Alfahuir cubre una población de 361.106 individuos.

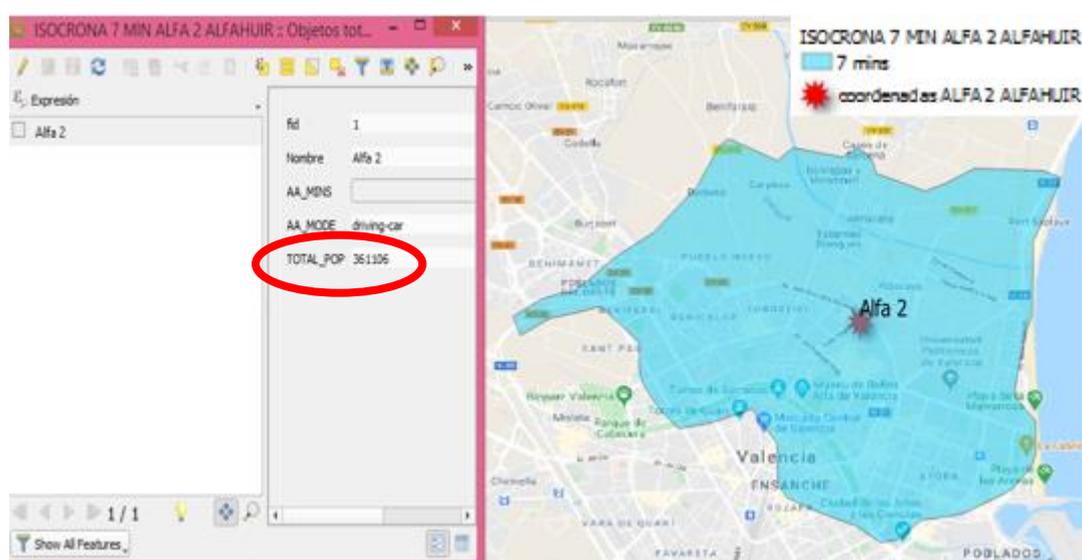


Figura 74. El mapa de isócrona del Alfa 2 Alfahuir y su población cubierta.  
Fuente: Elaboración propia.

Como primera opción se consideró reubicar los vehículos en función de la cobertura proporcionada con los mapas de isócronas. Pero esta opción se ha tenido que descartar porque actualmente QGIS no muestra la población marginal, es decir, no se tienen en cuenta los solapamientos de los mapas<sup>13</sup>. Dado este inconveniente, hemos optado por una reubicación de los Alfas en base a la Tabla 14 de posible sustitución entre los Alfas, obtenida en el apartado 2.2.4, manteniendo el objetivo de maximización de la demanda cubierta. Teniendo en cuenta todo lo expuesto, para poder llevar a cabo la relocalización dinámica la heurística diseñada debe responder a las siguientes cuestiones:

1.- ¿Cuándo reubicar?

Esto implica identificar las circunstancias que deben darse para que nos planteemos la reubicación de un SAMU.

<sup>13</sup> No queremos descartar esta opción, sino considerarla en futuras investigaciones porque se puede desarrollar un algoritmo en QGIS que calcule la población cubierta teniendo en cuenta los solapamientos entre los mapas de isócronas.

## 2.- ¿Cómo reubicar?

Hay que decidir cómo y dónde se va a llevar a cabo esa reubicación.

En las dos secciones siguientes se muestran los detalles de cómo la heurística diseñada responde a estas dos cuestiones.

## 4.2 Determinación de las Condiciones de la Reubicación

Según los estudios analizados en la sección de revisión bibliográfica, los mejores resultados respecto a la tasa de llamadas atendidas en un límite de tiempo dado se obtienen con la reubicación completamente dinámica (cuando se pueden mover todos los vehículos disponibles, incluso inactivos en la base), pero los costes de estas reubicaciones son considerables. Se consideran como costes: el total de kilómetros recorridos con reubicaciones, el número de reubicaciones, el tiempo total de reubicaciones, el coste de explotación (carburante, desgaste de los neumáticos, incremento de los mantenimientos), los costes intangibles (en un entorno ya por sí estresante, las molestias que sufre el personal debido a los constantes movimientos).

Según el estudio de Bélanger, et al., (2016), la reubicación de las ambulancias solo después de terminar un servicio proporciona muy buenos resultados y relativamente (comparando con la reubicación de los vehículos desde la base) los costes no son muy elevados. El rendimiento obtenido es prácticamente igual a si se hubiera incrementado la plantilla en un 10%. Teniendo en cuenta los resultados de este estudio y con la finalidad de evitar aumentar el número de desplazamientos, los costes intangibles y estresar el sistema con demasiados cambios, se van a establecer una serie de condiciones que ayudan a identificar el momento idóneo para activar la estrategia de relocalización. A continuación, se introducirá el conjunto de condiciones que deben darse para realizar la reubicación.

**Condición 1:** *Todo SAMU que finalice un servicio tras realizar un traslado a un centro hospitalario, se convierte en un vehículo susceptible de ser reubicado en una base distinta a la que tenía asignada inicialmente.*

Para que un SAMU pueda relocalizarse, necesariamente debe darse la Condición 1. Pero esta condición no es suficiente. Para ello, el vehículo debe encontrarse en uno de los Escenarios, definidos por un conjunto de condiciones especiales. A continuación, vamos a caracterizar cada uno de los escenarios y para ello vamos a partir de la Figura 75. Esta imagen representa la situación inicial del sistema, cuando cada SAMU o Alfa está ubicado en la base que tiene asignada y es a la que volvería al terminar un servicio si no hubiera reubicación. Además, observamos la cobertura que los 10 vehículos conseguirían desde estas localizaciones para un tiempo de isócrona de 7 minutos.



Figura 75. Cobertura inicial, cuando todos los Alfas están en sus bases habituales.  
Fuente: Elaboración propia.

Para analizar algunos detalles de la cobertura de la Figura 75 se ha elaborado la Tabla 17 (es similar a la Tabla 14). La columna Población Cubierta muestra la cantidad de población que se cubriría en 7 minutos si se localizase un SAMU en la Base de la primera columna de la tabla. Por ejemplo, si se ubica un vehículo en la Base 3 Campanar I, se cubriría a 454.341 habitantes. El objetivo de la tabla es ver qué porcentaje de población vinculada a una base se cubriría si se localizase el SAMU en cada una de las restantes bases. Por ejemplo, en la primera fila (sin tener en cuenta las filas de la cabecera) observamos que si se localiza un SAMU en la Base 7 Campanar II, se estaría cubriendo entre un 75-100% de la población que se cubriría al ubicar el vehículo en la Base 3. La finalidad última de esta tabla es detectar realmente cuando la población vinculada a una base se queda descubierta.

		BASES										
		Población Cubierta	B3	B7	B4	B2	B6	B8	B10	B1	B5	B11
BASES	B3	454.341	Black	Green	Green	Yellow						
	B7	454.341	Green	Black	Green	Yellow						
	B4	445.122	Green	Green	Black	Yellow				Yellow		
	B2	361.106	Green	Green	Yellow	Black	Yellow					
	B6	208.231				Green	Black					
	B8	124.808			Yellow			Black		Green		
	B10	103.288							Black			
	B1	92.864	Yellow	Yellow	Green			Green		Black		
	B5	36.735									Black	
	B11	9.708										Black

ID	Denominación
B3	Campanar I
B7	Campanar II
B4	Hospital General
B2	Alfahuir
B6	Malvarrosa
B8	Paterna
B10	Torrent
B1	Manises
B5	Silla
B11	Buñol

% Población Cubierta	
[0, 25)	
[25, 50)	Yellow
[50, 75)	Green
[75, 100]	Black

Tabla 17. Posible sustitución entre los Alfas.  
Fuente: Elaboración propia.

En la tabla, se observa que las ambulancias que están en las cuatro primeras bases, la Base 3 Campanar I, la Base 7 Campanar II, la Base 4 Hospital General y la Base 2 Alfahuir proporcionan la mayor cobertura con respecto a la población de Valencia. Si una de estas ambulancias deja la base para atender una emergencia, se queda sin cobertura una parte de población importante, pero al mismo tiempo estas ambulancias tienen un grado de sustitución entre ellas bastante elevado. Por ejemplo, vemos que el Alfa que está en la Base 3 Campanar I puede ser sustituido por el Alfa que está en la Base 7 Campanar II (verde oscuro), por el que está en la Base 4 Hospital General (verde claro) y en la Base 2 Alfahuir (amarillo).

Siendo muy prudentes y dado que los porcentajes de sustitución entre un Alfa y otro son aproximados<sup>14</sup>, nos vamos a centrar únicamente en los que proporcionan una sustitución de más de 50% (en la Tabla 17 marcados en verde claro y oscuro). Teniendo en cuenta esta información de complementariedad de los SAMU, se identifican 5 escenarios ordenados de mayor a menor población descubierta.

### **Escenario 1**

Las dos condiciones necesarias para que se dé el Escenario 1 son las siguientes:

- Campanar II se queda sin ambulancia
- Hospital General se queda sin ambulancia

Cuando estas dos bases, que son las bases habituales de los principales “sustitutos” del Alfa 3 Campanar I, se quedan libres, se queda una parte de la población importante sin cobertura, marcada en la Figura 76 con una elipse rosa. Y aunque dentro de la elipse hay una parte cubierta por algunas isócronas, la densidad poblacional y, por lo tanto, la frecuencia de llamadas en esta zona es muy elevada y en cualquier momento otra ambulancia puede dejar la zona para atender una emergencia.

---

<sup>14</sup> Cuando un mapa de isócronas solapa un, por ejemplo, 15% de otro mapa, no quiere decir que el 15 % de la población cubierta por una isócrona pueden ser sustituidos por otra, porque la densidad de la población no es la misma en todas las zonas.

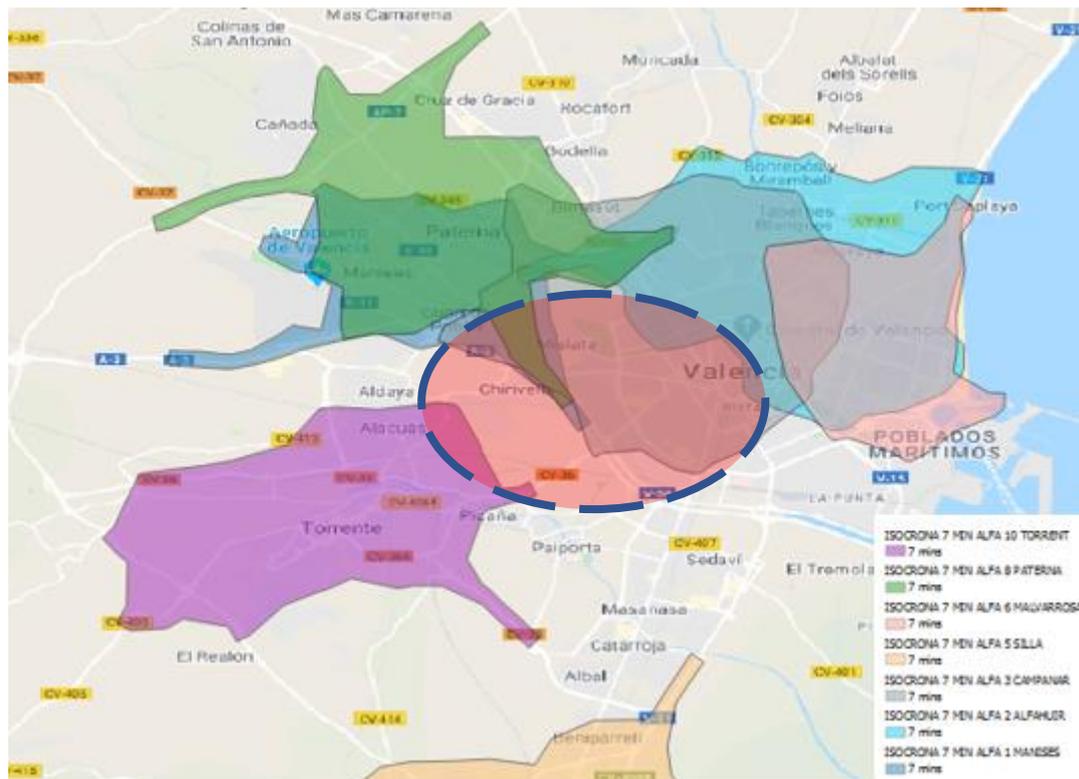


Figura 76. Escenario 1. Campanar II y Hospital General están libres.  
Fuente: Elaboración propia.

## Escenario 2

Las dos condiciones necesarias para que se dé el Escenario 2 son las siguientes:

- Campanar I se queda sin ambulancia
- Hospital General se queda sin ambulancia

En este caso se quedan libres las dos bases habituales de los principales “sustitutos” del Alfa 7 Campanar II y se queda sin cobertura la zona marcada con la elipse en la Figura 77.

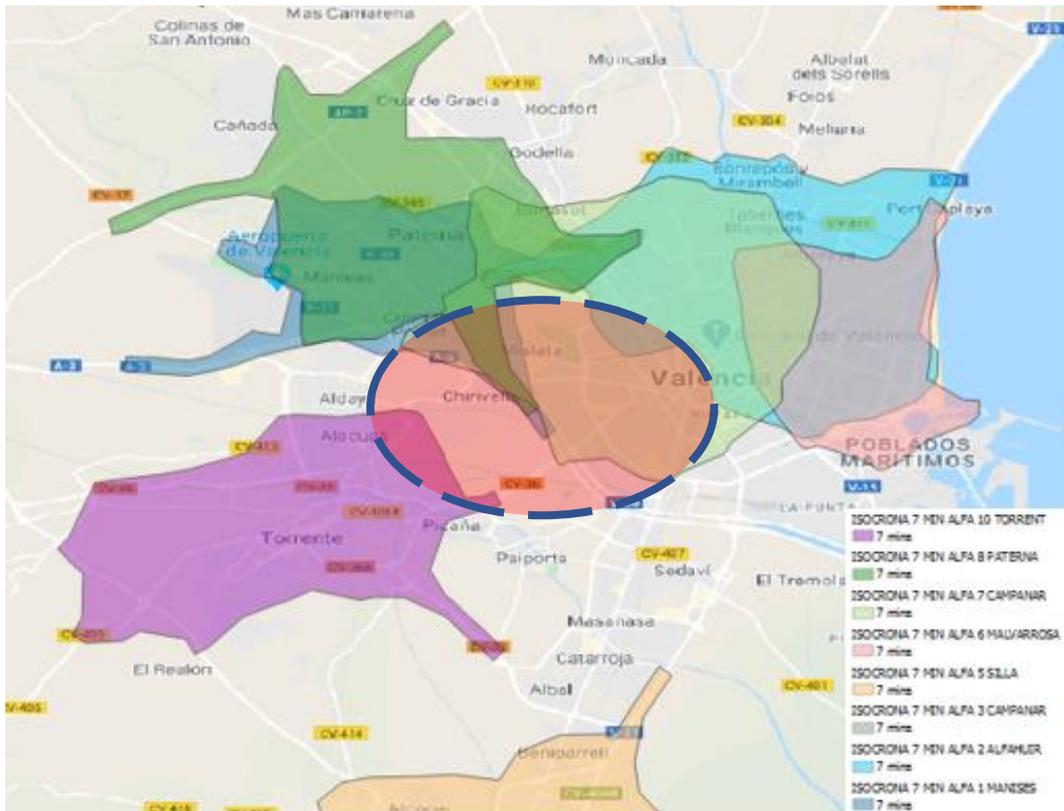


Figura 77. Escenario 2. Campanar I y Hospital General están libres.  
Fuente: Elaboración propia.

### Escenario 3

Se da el Escenario 3 cuando:

- Campanar I se queda sin ambulancia y
- Campanar II se queda sin ambulancia

La zona que se queda sin cobertura cuando las dos bases habituales de los principales “sustitutos” del Alfa 4 Hospital General se quedan libres, se observa en la Figura 78.

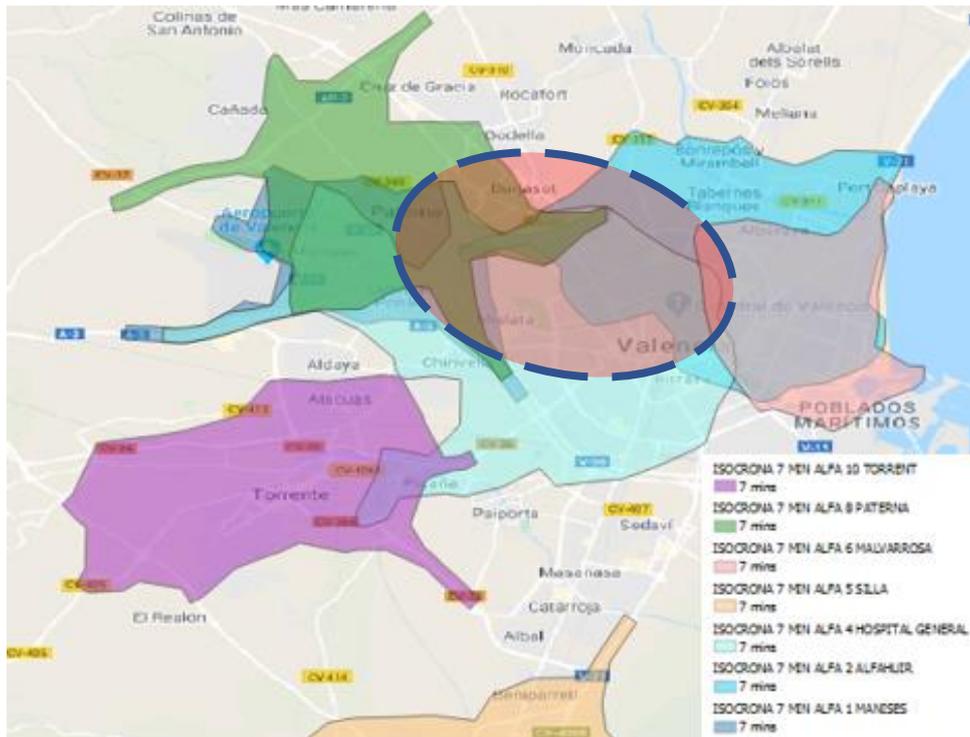


Figura 78. Escenario 3. Campanar I y Campanar II están libres.  
Fuente: Elaboración propia.

Los dos principales “sustitutos” del Alfa 2 Alfahuir son el Alfa 3 Campanar I y el Alfa 7 Campanar II, por lo tanto, si se quedasen libres Campanar I y Campanar II, en este caso estaríamos en el mismo escenario que el anterior.

#### Escenario 4

Dado que en la Tabla 17 a partir de la fila correspondiente a Malvarrosa la población cubierta correspondiente a cada base es más pequeña, para que se dé un Escenario no es suficiente que las bases habituales de los principales “sustitutos” estén libres, sino también la base del mismo Alfa tiene que estar libre. Por lo tanto, las dos condiciones necesarias para que se dé el Escenario 4 son las siguientes:

- Alfahuir se queda sin ambulancia
- Malvarrosa se queda sin ambulancia

La falta de cobertura en este caso se muestra en la Figura 79.

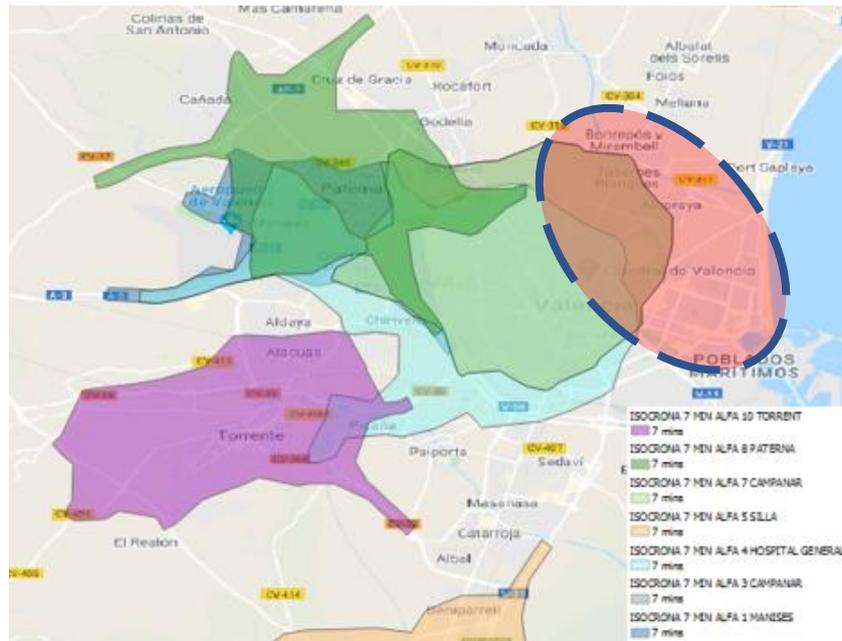


Figura 79. Escenario 4. Alfahuir y Malvarrosa están libres.  
Fuente: Elaboración propia.

## Escenario 5

Se da el Escenario 5 cuando:

- Paterna se queda sin ambulancia y
- Manises se queda sin ambulancia

En la Figura 80 vemos la zona descubierta en el Escenario 5.

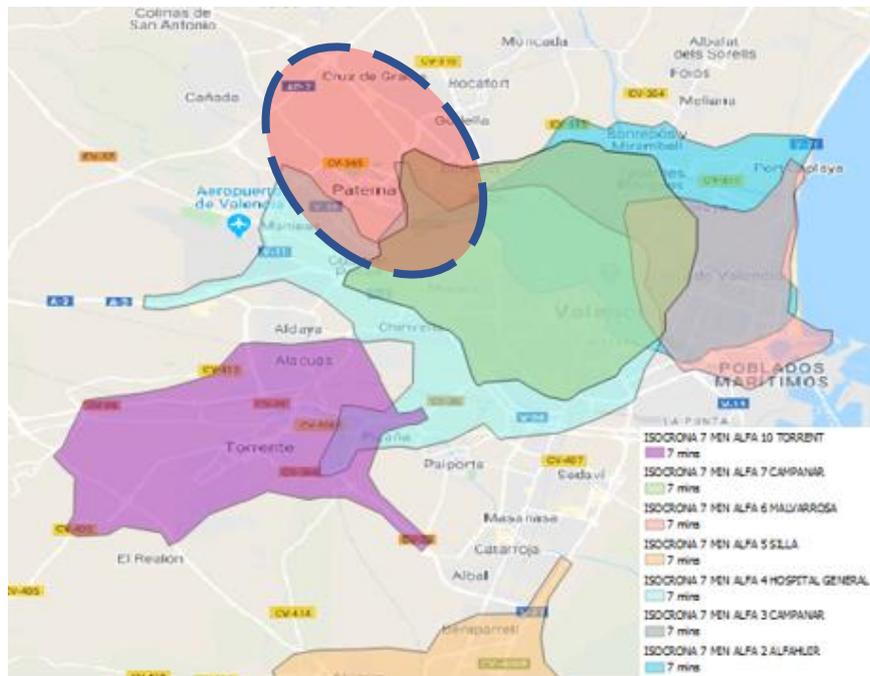


Figura 80. Escenario 5. Paterna y Manises están libres.  
Fuente: Elaboración propia.

Según el modo en el que hemos definido los escenarios, en la Tabla 17 hay otra combinación de las bases (correspondiente a la fila de Manises) que daría un posible escenario, que es cuando Paterna, Manises y Hospital General están libres. Pero si nos damos cuenta, el escenario 5 ya contempla una reubicación cuando Paterna y Manises están libres, por lo tanto es una condición suficiente y no hace falta que además Hospital General se quede también libre para hacer reubicación.

Los Escenarios enumerados tienen un orden decreciente por su importancia (de mayor cobertura a menor), por lo tanto si hubiera varios a la vez, el algoritmo se quedaría con el primero, el más importante, para atender la mayor parte de la población.

Teniendo en cuenta los escenarios definidos, las dos condiciones que deberían darse para plantear la reubicación de una ambulancia serían:

**Condición 1:** *Todo SAMU que finalice un servicio tras realizar un traslado a un centro hospitalario, se convierte en un vehículo susceptible de ser reubicado en una base distinta a la que tenía asignada inicialmente.*

**Condición 2:** *Para que se considere la opción de reubicación de un vehículo en una base distinta a la que tenía asignada inicialmente se tiene que producir uno de los siguientes Escenarios:*

- *Escenario 1. Campanar II y Hospital General*
- *Escenario 2. Campanar I y Hospital General*
- *Escenario 3. Campanar I y Campanar II*
- *Escenario 4. Alfahuir y Malvarrosa*
- *Escenario 5. Paterna y Manises*

## **4.3 Determinación del Modo de la Reubicación**

Hemos identificado las condiciones que deben darse para llevar a cabo una reubicación. A continuación, hay que especificar cómo se va a realizar la misma. Para ello es necesario identificar:

- Base de destino de la reubicación
- Punto de origen de la reubicación
- Ambulancias candidatas para ser reubicadas.

### **4.3.1 Determinar Base de Destino de la Reubicación**

Las bases que se quedan libres o vacías en los escenarios identificados anteriormente, las denominaremos “bases candidatas”, porque deberían de cubrirse por las ambulancias a reubicar. La base candidata en la cual la ambulancia cubriría mayor población la llamaremos “base de destino de la reubicación”. En la Tabla 18 enumeramos todas las bases candidatas y las bases de destino para cada escenario.

<b>Escenario</b>	<b>Bases candidatas</b>	<b>Base de destino</b>
Escenario 1	Campanar II y Hospital General	Campanar II
Escenario 2	Campanar I y Hospital General	Campanar I
Escenario 3	Campanar I y Campanar II	Campanar I
Escenario 4	Alfahuir y Malvarrosa	Alfahuir
Escenario 5	Paterna y Manises	Paterna

*Tabla 18. Bases candidatas y bases de destino para cada escenario.  
Fuente: Elaboración propia.*

Si analizamos el Escenario 1 observamos que hay dos bases libres a cubrir, es decir, donde se podría ubicar una ambulancia. Dado que sólo podemos asignar un vehículo, la mejor opción sería localizar un SAMU en Campanar II.

### **4.3.2 Determinar Punto de Origen de la Reubicación**

Tras identificar en el apartado anterior qué bases pueden necesitar ambulancias, en este apartado analizaremos los puntos desde los que se pueden realizar las reubicaciones. Hay que señalar que no todos los Alfas son candidatos para ser reubicados. Según muchos estudios (Rajagopalan, et al., (2008), Maxwell, et al., (2010), Poulton & Roussos, (2013)), en un 75-80% de las emergencias, el paciente necesita un traslado al hospital, en el resto de los casos la emergencia se resuelve in situ en el lugar donde ésta se ha producido. En este estudio únicamente vamos a considerar los casos en los que el paciente tiene que ser trasladado a un hospital. De este modo acotamos los puntos en los que puede estar una ambulancia al terminar un servicio. Este aspecto se ha especificado en la *Condición 1* explicada en el epígrafe 4.2.

En la ciudad de Valencia y sus alrededores hay 6 hospitales a los que los Alfas pueden llevar a los pacientes<sup>15</sup>. Los marcamos con una estrella violeta en la Figura 81. En la misma figura marcamos con círculos amarillos bases de destino para cada escenario de reubicación, tal como se ha indicado en la Tabla 18.

<sup>15</sup> Se pueden incluir otros hospitales, como, por ejemplo, el Hospital de Sagunto (Departamento de Sagunto) o el Hospital Arnau de Vilanova (Departamento Arnau de Vilanova - Liria) porque los Alfas también atienden las emergencias de estas zonas, pero de momento, estos hospitales no se van a considerar.

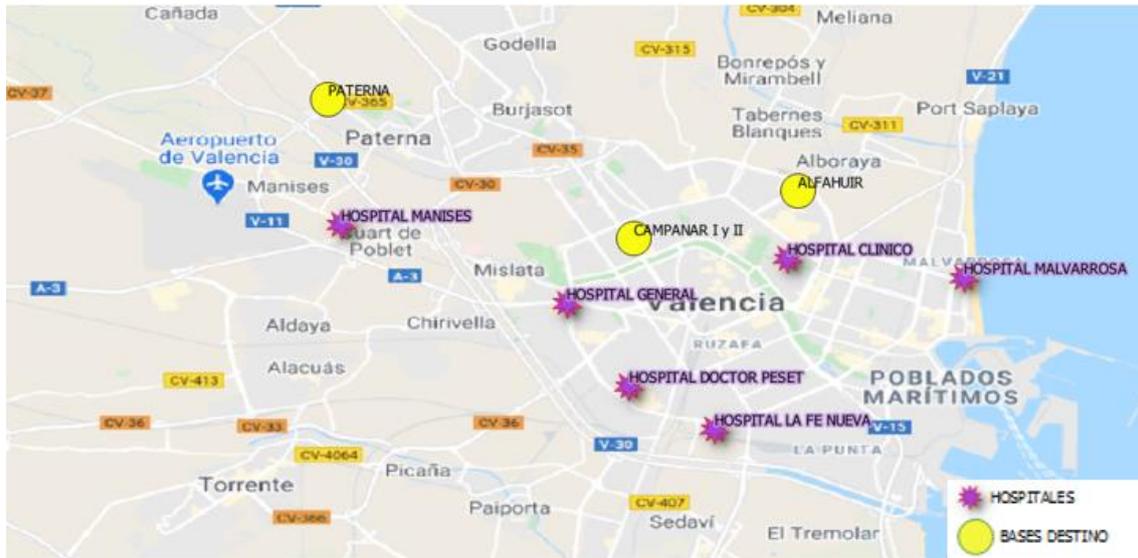


Figura 81. Hospitales y bases de destino de la reubicación.  
Fuente: Elaboración propia.

Si estudiamos los tiempos de trayectos<sup>16</sup> desde cada uno de los hospitales donde puede estar una ambulancia al terminar un servicio hasta cada una de las bases de destino de la reubicación (ver Tabla 19), obtenemos posibles puntos de origen para reubicación en cada escenario. Si el tiempo de trayecto desde un hospital hasta una base destino no supera los 11 minutos<sup>17</sup>, la ambulancia que termina su servicio en este hospital podría ser relocalizada a la base correspondiente.

	BASES			
	CAMPANAR I	CAMPANAR II	ALFAHUIR	PATERNA
HOSPITAL MANISES	12	12	12	11
HOSPITAL GENERAL	5	5	9	12
HOSPITAL DOCTOR PESET	8	8	12	15
HOSPITAL LA FE NUEVA	12	12	14	17
HOSPITAL CLINICO	7	7	3	18
HOSPITAL MALVARROSA	12	12	6	20

Tabla 19. Tiempos de trayectos (en minutos) entre los hospitales y las bases de destino de la reubicación.  
Fuente: Elaboración propia.

La información que muestra la Tabla 19 debe ser incluida en los cinco escenarios identificados. Por lo tanto, para cada escenario tendremos, tal como muestra la Tabla 20, la base destino de la reubicación y los puntos de origen de la reubicación, ordenados por el tiempo de llegada a la base destino de menor a mayor. En ninguno de estos casos el tiempo de reubicación supera los 11 minutos. De este modo, para que una ambulancia se considere para ser reubicada, necesariamente al terminar un servicio tiene que estar en uno de los puntos de origen de la reubicación.

<sup>16</sup> Para el cálculo del tiempo se ha utilizado un algoritmo de QGIS.

<sup>17</sup> La media de los tiempos de trayectos de la Tabla 19.

Escenario	Base principal candidata	Puntos de origen de la reubicación
Escenario 1	Campanar II	Hospital General
		Hospital Clínico
		Hospital Doctor Peset
Escenario 2	Campanar I	Hospital General
		Hospital Clínico
		Hospital Doctor Peset
Escenario 3	Campanar I	Hospital General
		Hospital Clínico
		Hospital Doctor Peset
Escenario 4	Alfahuir	Hospital Clínico
		Hospital Malvarrosa
		Hospital General
Escenario 5	Paterna	Hospital Manises

Tabla 20. Puntos de destino y de origen de la reubicación para cada escenario.

Fuente: Elaboración propia.

### 4.3.3 Determinar Ambulancias Candidatas para ser reubicadas

La Tabla 20 muestra el hospital desde donde partirá la ambulancia que es candidata para ser localizada en una base distinta a la suya habitual, es decir, susceptible de ser relocalizada. Sin embargo, no todas las ambulancias teniendo un escenario y estando en un hospital de origen pueden ser reubicadas. Por ejemplo, en el Escenario 1 la base destino de la reubicación es la de Campanar II y el primer hospital es el Hospital General. Si el Alfa 7 Campanar II termina un servicio en el Hospital General, tiene que elegir entre ir a su base habitual o ir a la base de destino de la reubicación. En este caso la base de destino justamente ya es su base habitual, por lo tanto, este movimiento no se considera como reubicación. Otro ejemplo, si en el mismo escenario, en el mismo punto de origen estuviera el Alfa 4 Hospital General, no se tendría que desplazar a la base de destino porque el punto de origen (Hospital General) es la base habitual del Alfa 4 y ya está en ella, y, además, el Hospital General es una de las candidatas en este escenario, por lo tanto, si el Alfa 4 se queda allí, proporcionará bastante cobertura para la zona y el escenario para la reubicación deja de existir sin hacer ningún movimiento. En resumen, en un escenario cualquiera, aquel Alfa, que es la ambulancia habitual de la base de destino de la reubicación, nunca será un candidato para reubicación. Y tampoco será un candidato el Alfa que está en un punto de origen que es su base habitual, menos en el caso del Escenario 5. Este caso es particular (ver Figura 82) porque siempre es preferible que una ambulancia esté en Paterna que en Manises, dado que desde Paterna se pueden cubrir más puntos, muchos de los cuales corresponden a Manises.



Figura 82. Mapa de isócronas de 7 minutos desde la Base 8 Paterna y la Base 1 Manises.  
Fuente: Elaboración propia.

Dicho esto, las ambulancias candidatas para ser reubicadas son aquellas que terminan un servicio en un hospital que es un punto de origen de la reubicación en un escenario dado y cuyas bases habituales no son ni la base de destino de la reubicación, ni la base punto de origen de la reubicación, menos en el Escenario 5.

Repasando todos los escenarios con cada uno de los puntos de origen de la reubicación, en la Tabla 21 nombramos los Alfas candidatos a ser reubicados.

ESCENARIO	BASE DESTINO	CANDIDATOS A SER REUBICADOS	
		PUNTO DE ORIGEN	ALFA
Escenario 1	Campanar II	Hospital General	Alfa 11 Buñol
			Alfa 5 Silla
			Alfa 1 Manises
			Alfa 10 Torrent
			Alfa 8 Paterna
			Alfa 6 Malvarrosa
			Alfa 2 Alfahuir
			Alfa 3 Campanar
Escenario 1	Campanar II	Hospital Clínico	Alfa 11 Buñol
			Alfa 5 Silla
			Alfa 1 Manises
			Alfa 10 Torrent
			Alfa 8 Paterna
			Alfa 6 Malvarrosa
			Alfa 2 Alfahuir
			Alfa 4 Hospital General
Escenario 1	Campanar II	Hospital Doctor Peset	Alfa 11 Buñol
			Alfa 5 Silla
			Alfa 1 Manises
			Alfa 10 Torrent
			Alfa 8 Paterna
			Alfa 6 Malvarrosa
			Alfa 2 Alfahuir
			Alfa 4 Hospital General
Escenario 2	Campanar I	Hospital General	Alfa 11 Buñol
			Alfa 5 Silla
			Alfa 1 Manises
			Alfa 10 Torrent
			Alfa 8 Paterna
			Alfa 6 Malvarrosa
			Alfa 2 Alfahuir
			Alfa 7 Campanar
Escenario 2	Campanar I	Hospital Clínico	Alfa 11 Buñol
			Alfa 5 Silla
			Alfa 1 Manises
			Alfa 10 Torrent
			Alfa 8 Paterna
			Alfa 6 Malvarrosa
			Alfa 2 Alfahuir
			Alfa 4 Hospital General
Escenario 2	Campanar I	Hospital Doctor Peset	Alfa 11 Buñol
			Alfa 5 Silla
			Alfa 1 Manises
			Alfa 10 Torrent
			Alfa 8 Paterna
			Alfa 6 Malvarrosa
			Alfa 2 Alfahuir
			Alfa 4 Hospital General
Alfa 7 Campanar			

ESCENARIO	BASE DESTINO	CANDIDATOS A SER REUBICADOS	
		PUNTO DE ORIGEN	ALFA
Escenario 3	Campanar I	Hospital General	Alfa 11 Buñol
			Alfa 5 Silla
			Alfa 1 Manises
			Alfa 10 Torrent
			Alfa 8 Paterna
			Alfa 6 Malvarrosa
			Alfa 2 Alfahuir
Escenario 3	Campanar I	Hospital Clínico	Alfa 11 Buñol
			Alfa 5 Silla
			Alfa 1 Manises
			Alfa 10 Torrent
			Alfa 8 Paterna
			Alfa 6 Malvarrosa
			Alfa 2 Alfahuir
Alfa 4 Hospital General			
Escenario 3	Campanar I	Hospital Doctor Peset	Alfa 11 Buñol
			Alfa 5 Silla
			Alfa 1 Manises
			Alfa 10 Torrent
			Alfa 8 Paterna
			Alfa 6 Malvarrosa
			Alfa 2 Alfahuir
Alfa 4 Hospital General			
Escenario 4	Alfahuir	Hospital Clínico	Alfa 11 Buñol
			Alfa 5 Silla
			Alfa 1 Manises
			Alfa 10 Torrent
			Alfa 8 Paterna
			Alfa 6 Malvarrosa
			Alfa 4 Hospital General
Alfa 7 Campanar			
Alfa 3 Campanar			
Escenario 4	Alfahuir	Hospital Malvarrosa	Alfa 11 Buñol
			Alfa 5 Silla
			Alfa 1 Manises
			Alfa 10 Torrent
			Alfa 8 Paterna
			Alfa 4 Hospital General
			Alfa 7 Campanar
Alfa 3 Campanar			
Escenario 4	Alfahuir	Hospital General	Alfa 11 Buñol
			Alfa 5 Silla
			Alfa 1 Manises
			Alfa 10 Torrent
			Alfa 8 Paterna
			Alfa 6 Malvarrosa
			Alfa 7 Campanar
Alfa 3 Campanar			
Escenario 5	Paterna	Hospital Manises	Alfa 11 Buñol
			Alfa 5 Silla
			Alfa 1 Manises
			Alfa 10 Torrent
			Alfa 6 Malvarrosa
			Alfa 2 Alfahuir
			Alfa 4 Hospital General
Alfa 7 Campanar			
Alfa 3 Campanar			

Tabla 21. Ambulancias candidatas para ser reubicadas.  
Fuente: Elaboración propia.

## 4.4 Algoritmo Operativo y de Reubicación

Antes de detallar los pasos del Algoritmo de reubicación cabe mencionar que no es el único del que vamos a hablar en este apartado. El Algoritmo de reubicación forma parte de otro algoritmo, llamado Algoritmo operativo. Este algoritmo define cómo se gestiona todo el proceso de atención de emergencias, es decir la asignación de las ambulancias a las llamadas producidas, envío de los pacientes a los hospitales, etc. Por lo tanto, en esta sección explicaremos el funcionamiento de ambos algoritmos y cómo se integra el Algoritmo de reubicación dentro del Algoritmo operativo.

### 4.4.1 Algoritmo de reubicación

En este apartado se exponen:

- Las condiciones necesarias para que el algoritmo se active
- Los pasos que definen el funcionamiento del mismo.

#### Activación del algoritmo

El Algoritmo de reubicación se activa cuando se cumplen las dos condiciones necesarias:

**Condición 1:** *Todo SAMU que finalice un servicio tras realizar un traslado a un centro hospitalario, se convierte en un vehículo susceptible de ser reubicado en una base distinta a la que tenía asignada inicialmente.*

**Condición 2:** *Para que se considere la opción de reubicación de un vehículo en una base distinta a la que tenía asignada inicialmente se tiene que producir uno de los siguientes Escenarios:*

- *Escenario 1. Campanar II y Hospital General*
- *Escenario 2. Campanar I y Hospital General*
- *Escenario 3. Campanar I y Campanar II*
- *Escenario 4. Alfahuir y Malvarrosa*
- *Escenario 5. Paterna y Manises*

#### Pasos del algoritmo

Una vez se dan las dos condiciones necesarias para que se active el algoritmo, se recorre una serie de pasos que se muestran en la Figura 83.

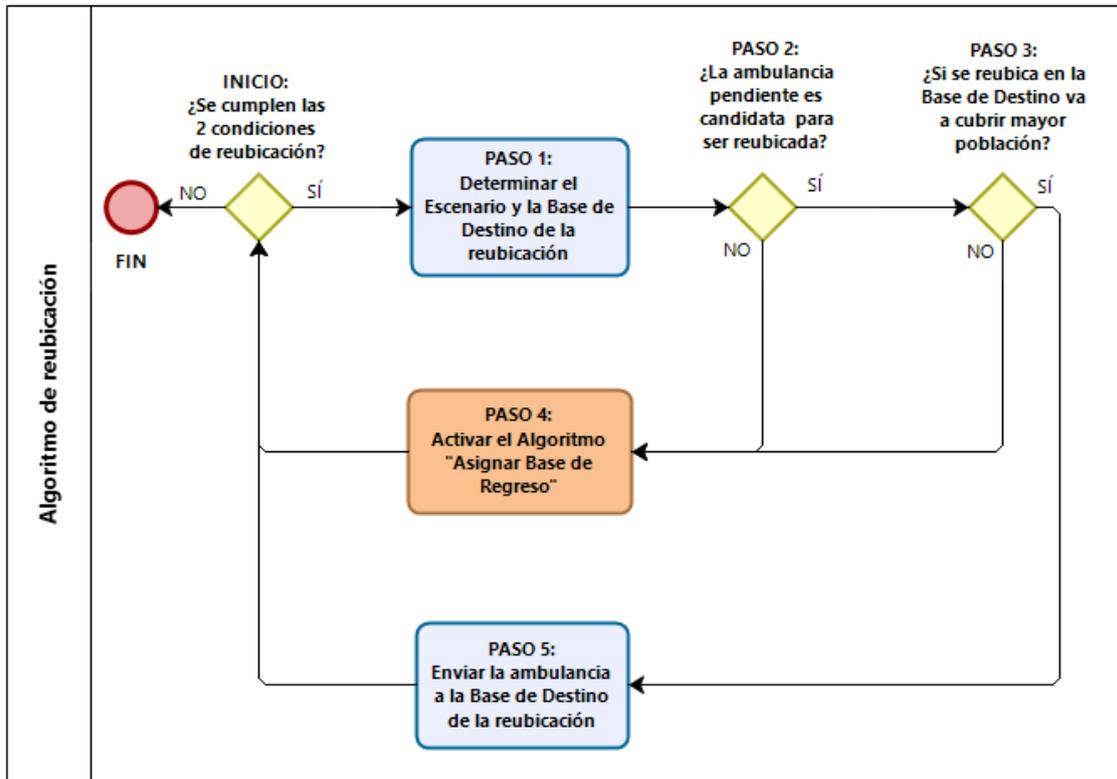


Figura 83. Diagrama de pasos del Algoritmo de reubicación.  
Fuente: Elaboración propia.

### Paso 1

En el Paso 1 se determina el Escenario en el que estamos y la Base de Destino correspondiente, a la que se reubicaría la ambulancia pendiente, tal como se ha definido en la Tabla 18.

### Paso 2

En este paso se comprueba si la ambulancia pendiente es Candidata para ser reubicada, es decir, si se encuentra en alguno de los Puntos de Origen de la reubicación para este escenario y si está en la lista de los Candidatos de la Tabla 21. Si la ambulancia es Candidata, se activa el Paso 3, si no, la ambulancia debería volver a su base habitual. En un entorno dinámico es posible que la base habitual de una ambulancia ya esté ocupada porque en los momentos anteriores se haya producido una reubicación, por lo tanto hay que asignar una base de regreso, que es lo que se hace en el Paso 4.

### Paso 3

Teniendo en cuenta el objetivo de la maximización de la población cubierta, en este paso se comprueba si al reubicar un Candidato en la Base de Destino se va a cubrir mayor población que en la base de regreso. Si la condición se cumple, se activa el Paso 5, si no, el Paso 4.

### Paso 4

Como ya se ha comentado, en un entorno dinámico, es posible que una ambulancia no pueda volver a su base habitual porque en los momentos anteriores se haya producido una reubicación

y la base ya está ocupada. Por lo tanto, en este paso se activa el Algoritmo “Asignar Base de Regreso”, que consiste en cinco pasos<sup>18</sup>, representados en la Figura 84.

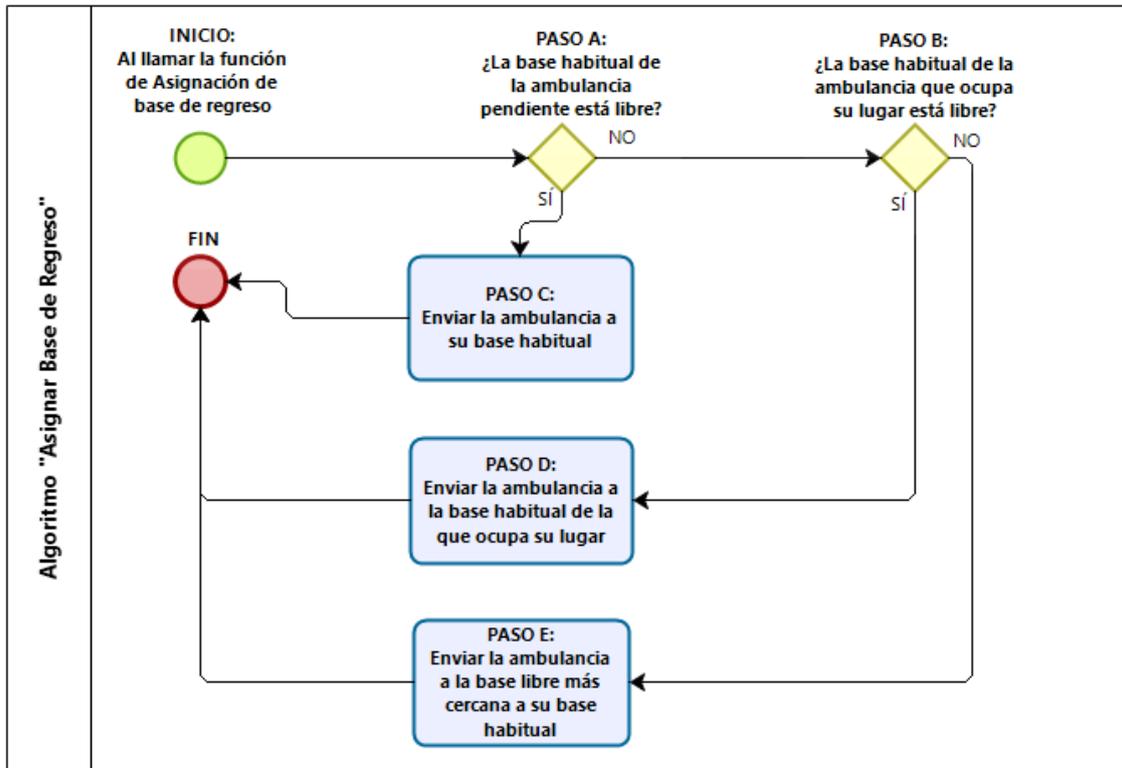


Figura 84. Diagrama de pasos del Algoritmo “Asignar Base de Regreso”.  
Fuente: Elaboración propia.

## Paso 5

La ambulancia pendiente se envía a la Base de Destino de la reubicación.

Después de cada decisión (Pasos 4 y 5) el Algoritmo de reubicación vuelve a comprobar si se cumplen las dos condiciones necesarias para la reubicación. Si no es así, finaliza.

Una vez descrito el Algoritmo de reubicación, tenemos que integrarlo en el Algoritmo operativo, según el cual se asignan las ambulancias a las emergencias, se asignan los pacientes a los hospitales, etc.

## 4.4.2 Integración del Algoritmo de reubicación dentro del Algoritmo operativo

Antes de explicar cómo funciona el Algoritmo operativo y en qué momento se activa el Algoritmo de reubicación, tenemos que introducir los posibles estados de una ambulancia y de una base.

Se consideran 5 posibles estados de una ambulancia:

<sup>18</sup> Paso E: dado que al final del turno las ambulancias se tienen que volver a su base habitual, es preferible que estén lo más cerca posible.

- Inactiva (esperando en la base)
- Preparándose (un estado intermedio, desde que una ambulancia es asignada a una llamada hasta que empieza a moverse hacia el lugar de la emergencia)
- Ocupada (atendiendo una emergencia, desde el momento en el que sale de la base hasta que finalice un servicio en el hospital). Por lo tanto, el tiempo en el que una ambulancia se considera ocupada se compone del tiempo de trayecto hacia el lugar de la emergencia, duración de la asistencia in situ y el tiempo de trayecto hasta el hospital más cercano
- Pendiente (una vez finalizado un servicio)
- Regresando (un estado intermedio, cuando una ambulancia ya está asignada a una base, pero aún no ha llegado).

Se consideran 4 posibles estados de una base:

- Asignada (cuando hay una ambulancia esperando en la base)
- En preparación (un estado intermedio, desde que la ambulancia que ocupa la base es asignada a una llamada hasta que empieza a moverse hacia el lugar de la emergencia)
- Libre (cuando la base se queda sin vehículo)
- Esperando ambulancia (un estado intermedio, cuando la base ya está asignada, pero la ambulancia aún está de camino hacia esta base).

No se puede asignar una ambulancia a una nueva emergencia hasta que no regrese a una base. Se considera que el tiempo de traspaso del paciente al equipo médico hospitalario es nulo. No se consideran llamadas en cola, es decir, si no hay ambulancias inactivas para atender una emergencia, el algoritmo no genera respuesta para esta emergencia. De momento no se considera la opción de reubicación para varias candidatas, es decir, si hay más de una ambulancia que ha finalizado un servicio en el mismo instante, únicamente se considera la primera candidata.

El algoritmo operativo está unido a un contador de tiempo en un período  $N$  (en minutos). Se activa en el momento  $m = 0$ . Recorre todos los pasos buscando cambios en la configuración del sistema, provocados por:

- Entrada de una llamada de emergencia y/o
- Cambios en el estado de las ambulancias

Con cada cambio se tienen que tomar diferentes decisiones. Una vez recorridos todos los pasos, la cuenta se incrementa en 1 ( $m = 0$  se convierte en  $m = 1$ ). Se vuelven a recorrer todos los pasos y se produce el siguiente incremento en la cuenta ( $m = 2$ ). Y así sucesivamente hasta que llegue a  $m = N$ , que es cuando finaliza.

Todos los datos referentes a las emergencias se gestionan con una base de datos, llamada tabla de gestión (como ejemplo, ver Tabla 22), que se actualiza con cada cambio, es decir, con la entrada de emergencias, con cambios de estado de las ambulancias de preparándose a ocupadas, de ocupadas a pendientes y de regresando a inactivas (columnas marcadas en amarillo). Los cambios de estado de las ambulancias intermedios, el cambio de inactivas a preparándose y el cambio de pendientes a regresando, coinciden con el Momento de entrada de emergencias y con el momento de Cambio de ocupada a pendiente, respectivamente. Estos cambio intermedios son utilizados para el funcionamiento del algoritmo, pero no generan decisiones.

Para poder actualizar la tabla de gestión se utiliza un contador de tiempo interno para cada emergencia ( $m^{\wedge}$ ).

Llamada	Lugar	Momento de entrada de emerg.	Ambul. asignada	Cambio de inactiva a prepar.	Cambio de prepar. a ocupada	Tiempo de trayecto base-lugar de emerg.	Duración de atención in situ	Tiempo de trayecto lugar de emerg. - hospital	Tiempo de respuesta	Hospital	Cambio de ocupada a pendiente	Cambio de pendiente a regresando	Base de regreso	Tiempo de trayecto hospital - base	Cambio de regresando a inactiva
1	3	4	A2	4	7	6	15	3	9	H1	31	31	B1	5	36

Tabla 22. Ejemplo de una tabla de gestión.  
Fuente: Elaboración propia.

Los pasos del algoritmo operativo están representados como un diagrama de flujo en la Figura 85.

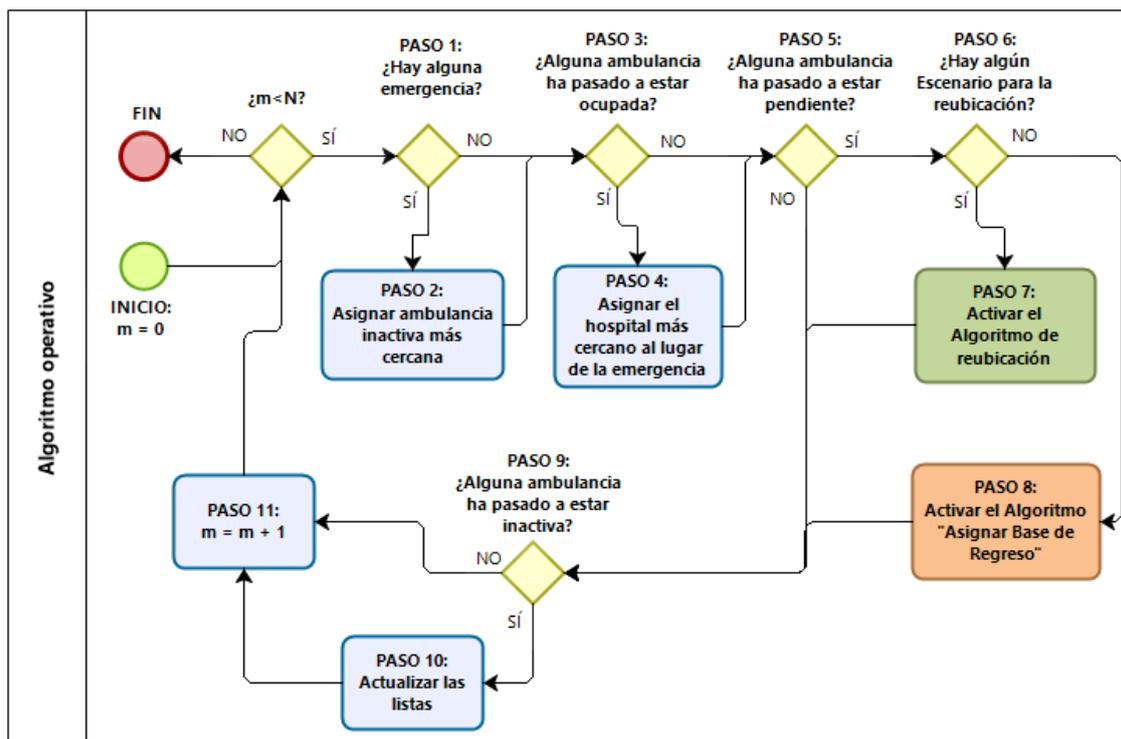


Figura 85. Diagrama de pasos del Algoritmo operativo.  
Fuente: Elaboración propia.

### Paso 1

Se comprueba si hay una emergencia, es decir, si el momento en el que está el algoritmo coincide con el momento de entrada de alguna emergencia. Por ejemplo, en la Tabla 22 el algoritmo detectará que hay una emergencia en el momento  $m = m' = 4$ . Cuando el contador de tiempo del algoritmo llegue a 4, coincidirá con el 4 que es el momento de la entrada de la emergencia (tercera columna). Si hay una emergencia, se activa el Paso 2, si no, el Paso 3.

### Paso 2

Se asigna un número a la llamada. Se determina la localización de la emergencia y la ambulancia inactiva más cercana. La ambulancia pasa a estar preparándose y la base pasa a estar en preparación. Dado que entre la asignación de un vehículo a la emergencia y su cambio al estado preparándose pasan unos segundos, el momento de entrada de una emergencia y el momento de cambio de estado de una ambulancia de inactiva a preparándose coinciden en nuestro algoritmo. Se pone en marcha el contador de tiempo para esta emergencia, donde al tiempo de entrada de la

llamada se le suma el tiempo de triaje igual a 3 minutos. El valor obtenido se agrega en la tabla de gestión (Cambio de preparándose a ocupada). Se activa el siguiente paso.

### **Paso 3**

Se comprueba si hay alguna ambulancia que haya cambiado del estado preparándose al estado ocupada (si el momento en el que está el algoritmo coincide con el momento de cambio de estado de alguna ambulancia de preparándose a ocupada). Siguiendo el ejemplo anterior, será el momento  $m = m' = 7$  (momento de entrada de la emergencia igual a 4 más el tiempo de triaje igual a 3). Si hay cambio de estado de preparándose a ocupada, se activa el Paso 4. Si no, se activa el Paso 5.

### **Paso 4**

Se actualizan todas las listas, tanto de ambulancias, como de bases. Se calcula el tiempo de respuesta para esta emergencia, que es la suma del tiempo de triaje (3 min) y el tiempo de trayecto desde la base hasta el lugar de la emergencia. Este valor se agrega a la tabla de gestión. Al contador del tiempo para la emergencia se le suma el tiempo de trayecto desde la base hasta el lugar de la emergencia, la duración de la atención in situ y el tiempo de trayecto hasta el hospital más cercano. De este modo, obtenemos el momento en el que la ambulancia va a finalizar el servicio y va a pasar a estar pendiente. Se asigna el hospital más cercano. Según la Tabla 22, si la ambulancia ha cambiado su estado a ocupada en el momento  $m' = 7$ , sabiendo los tiempos de trayectos desde la base hasta el lugar de la emergencia (por, ejemplo, 6 minutos), desde el lugar de la emergencia hasta el hospital (por ejemplo, 3 minutos) y la duración de la asistencia in situ (por ejemplo, 15 minutos), la ambulancia va a dejar al paciente en el hospital en el momento  $m' = 31$ . Se actualiza la tabla de gestión. Se activa el siguiente paso.

### **Paso 5**

Se comprueba si alguna ambulancia ha cambiado del estado ocupada al estado pendiente. Si lo ha hecho, Paso 6, si no, Paso 7.

### **Paso 6**

Se actualizan las listas. Se comprueba si tiene lugar alguno de los 5 Escenarios para reubicación. Si hay algún Escenario, se activa el Paso 7, si no, el Paso 8.

### **Paso 7**

Se activa **el Algoritmo de Reubicación** descrito en el epígrafe 4.4.1 de este trabajo. Al acabar, se activa el Paso 9.

### **Paso 8**

En un modelo sin reubicación una ambulancia al terminar un servicio siempre volvería a su base habitual. Pero si se introduce la reubicación, la base habitual de una ambulancia puede no estar libre. Por lo tanto, en este paso se activa **el Algoritmo “Asignar Base de Regreso”** también descrito en el apartado 4.4.1. Al finalizar, se activa el Paso 9.

### **Paso 9**

Se comprueba si alguna ambulancia ha llegado a la base asignada. Si es así, se activa el Paso 10. Si no, el Paso 11.

**Paso 10**

La ambulancia se pasa al estado inactiva. La base se pasa al estado asignada. Se activa el siguiente paso.

**Paso 11**

Se incrementa la cuenta del algoritmo en 1 y el ciclo vuelve a empezar.

El código completo del algoritmo sin reubicación y con reubicación se puede consultar en los Anexos 3 y 4 respectivamente.

## 4.5 Validación de la técnica

Para validar la técnica heurística de reubicación de ambulancias propuesta, se van a comparar los resultados obtenidos con un modelo estático, donde cada ambulancia al finalizar un servicio vuelve a su base habitual (algoritmo operativo sin reubicación) y un modelo dinámico, en el que cada vez que una ambulancia finaliza un servicio se evalúa la necesidad y se hace efectiva la reubicación (algoritmo operativo con reubicación).

Las medidas de desempeño más utilizadas en los modelos son el porcentaje de llamadas atendidas fuera de un tiempo límite, el nivel de preparación de las zonas, el nivel de cobertura, la tasa de utilización de los vehículos, el número de relocalizaciones, el tiempo de respuesta. La medida de desempeño utilizada en este estudio es el tiempo de respuesta. Por lo tanto, se compara este tiempo obtenido con el algoritmo sin reubicación y con el algoritmo con reubicación para las emergencias en cada una de las instancias.

### 4.5.1 Generación Instancias Test

Para validar el algoritmo propuesto, mostramos un ejemplo de generación de instancias en el que intentamos reproducir una posible situación real. Para tal fin, necesitamos concretar el valor de los siguientes parámetros:

1. Localizaciones de las emergencias
2. Momentos de llegada de las emergencias
3. Duración de cada asistencia en el lugar de la emergencia

La elección de las localizaciones de las emergencias para las instancias no es una tarea sencilla ya que requiere delimitar la zona habitual de trabajo de los Alfa sin perder la aleatoriedad en el proceso de generación de emergencias. Dado que el mayor número de emergencias se concentra en los municipios más poblados (ver apartado 2.2.1), la probabilidad de ocurrencia de una emergencia en estos municipios es más elevada. Por lo tanto, para determinar algunas localizaciones de emergencias para nuestro ejemplo, se han revisado los datos de todos los municipios visitados por los 10 Alfas (Anexo 5) y se han elegido las poblaciones que representan por lo menos un 5% de todos los desplazamientos de cada Alfa. Dado que la población de Valencia es muy elevada comparando con otros municipios, la ciudad se ha dividido en barrios. La Figura 86 muestra los municipios más visitados por los Alfas. De estos municipios/barrios se han escogido 15 con mayor población (mayor probabilidad de ocurrencia de las emergencias) y se han marcado en amarillo. Para cada uno de los 15 municipios/barrios se ha determinado un punto aleatorio con la función (ver la Figura 87) de generación de puntos dentro de un polígono determinado en QGIS.

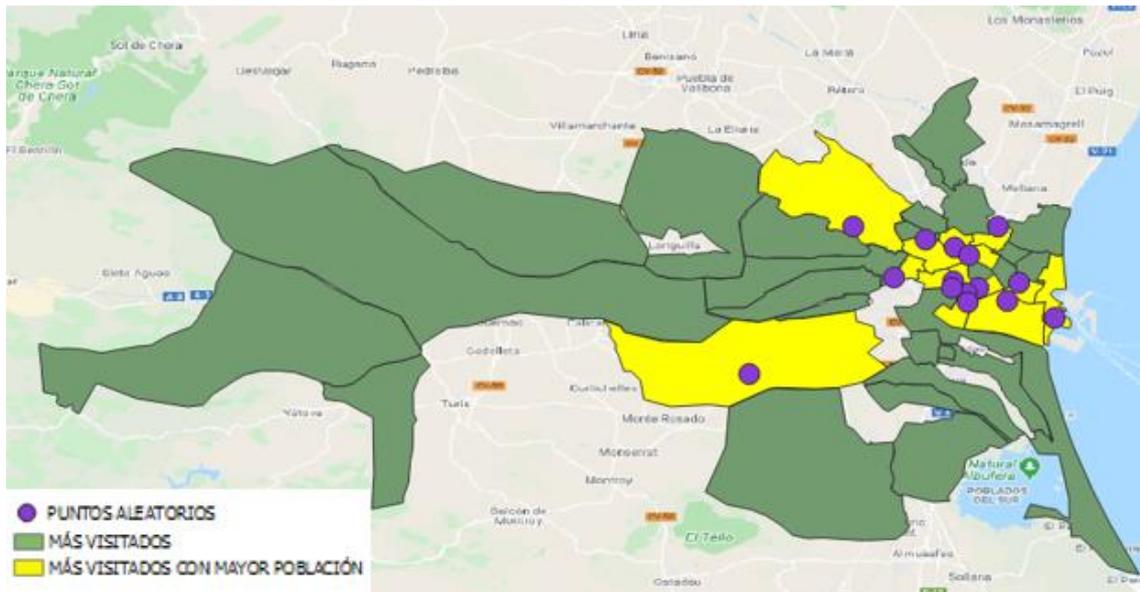


Figura 86. Municipios más visitados por los Alfas y los puntos aleatorios en los municipios/ barrios más poblados.  
Fuente: Elaboración propia.

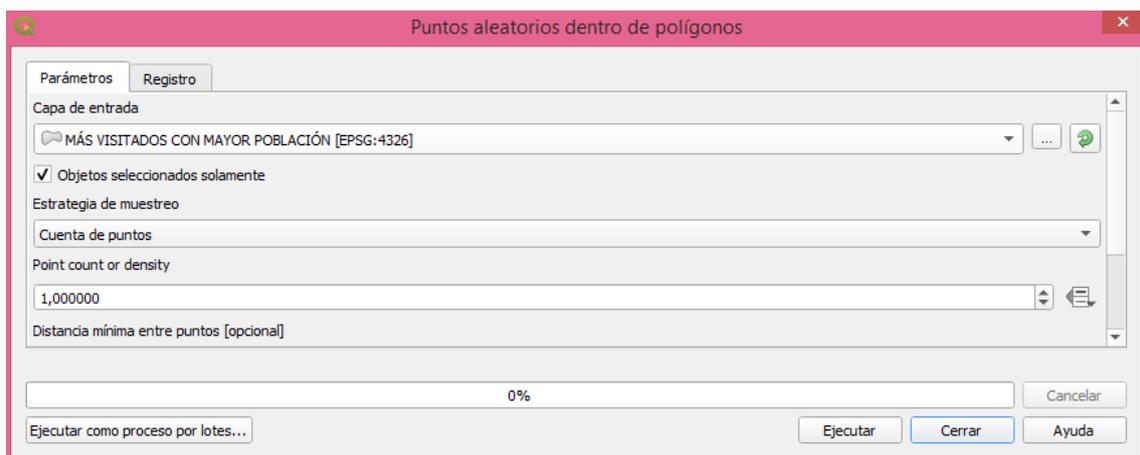


Figura 87. Ventana emergente de la función de generación de puntos aleatorios en QGIS.  
Fuente: Elaboración propia.

Los momentos de llegada de las emergencias y la duración de las asistencias in situ se determinan de modo aleatorio. Definimos, para nuestro ejemplo, un período de tiempo de 3 horas, es decir, 180 minutos, por lo que las emergencias surgen en algún momento de este período. Suponemos que el tiempo de asistencia in situ se comporta como una distribución uniforme entre 15 y 30 minutos.

Como resumen, obtenemos la Tabla 23, donde identificamos todos los parámetros mencionados para recrear una situación que se podría producir en el entorno real. Los datos obtenidos se integran en la tabla de gestión.

Localización de la emergencia	Momento de aparición (minutos)	Duración de la asistencia in situ U(15,30)
1	171	29
2	62	17
3	128	26
4	103	23
5	112	27
6	11	20
7	10	27
8	38	17
9	16	28
10	160	24
11	150	29
12	155	24
13	136	21
14	4	20
15	99	15

*Tabla 23. Datos de emergencias para un ejemplo.  
Fuente: Elaboración propia.*

Una vez determinadas las localizaciones de las 15 emergencias para nuestro ejemplo, se obtienen matrices de tiempos (en minutos) de desplazamientos entre<sup>19</sup>:

- Las bases y las localizaciones de las emergencias
- Las localizaciones de las emergencias y los hospitales
- Los hospitales y las bases
- Las Bases entre sí

Por último, necesitaremos alguna información más:

- Tabla en la que a cada ambulancia se asigna su base habitual
- Tabla en la que a cada base se asigna la población cubierta en un radio de 7 minutos de trayecto
- Tabla de candidatos para reubicación

Tal como se ha comentado antes, el algoritmo empieza en el momento 0, cuando todas las ambulancias están en sus bases habituales. Lee la información de la tabla de gestión y si encuentra los cambios en la configuración del sistema toma las decisiones programadas y actualiza la tabla de gestión. Para cada decisión obtenemos la descripción de las actuaciones realizadas (como un histórico). Al finalizar el recorrido, se muestra la tabla de gestión actualizada. En la columna 10 de esta tabla está la información del tiempo de respuesta para cada emergencia, que es la que se va a utilizar para evaluar el desempeño del algoritmo.

---

<sup>19</sup> Los tiempos se calculan con un algoritmo de QGIS.

## 4.5.2 Resultados

Para validar la técnica heurística propuesta, se han generado 20 instancias del modo que explicamos a continuación<sup>20</sup>. Hay 88 municipios visitados por los Alfas en el año 2019, pero no todos componen la región habitual del trabajo de los Alfas. Hay municipios que están a más de una hora de distancia de la base de los Alfas más cercana y los que han recibido unas pocas visitas en todo el año. Por lo tanto, acotamos la región habitual del trabajo de los Alfas reduciendo la lista a 59 municipios, que tienen más de 10 desplazamientos al año. Dividimos el municipio de Valencia en barrios. Obtenemos una lista de 77 municipios/barrios y su población porcentual respecto a la población total. Según este porcentaje se obtiene una lista de 100 municipios/barrios, es decir, si la población de un municipio representa un 4%, va a aparecer 4 veces en la lista. Ordenamos la lista de modo aleatorio, así que a cada municipio/barrio se le asigna un número entre 1 y 100.

Según el análisis realizado en el apartado 2.2.4 de este trabajo, un Alfa atiende una emergencia aproximadamente cada 5 horas. Si tomamos un período de 6 horas (entre 9:00 y 15:00 horas), por los 10 Alfas se atenderían unas 10-15 emergencias. Por lo tanto, se generan las instancias de 10, 15, 20 y 25 emergencias (5 réplicas). Se obtiene un conjunto de 20 instancias.

Para obtener las localizaciones de las emergencias en cada instancia se generan 20 series de números aleatorios entre 1 y 100. Por ejemplo, para la instancia Inst10\_1, donde 10 es el número de emergencias y 1 es el número de la réplica, se generan 10 números aleatorios entre 1 y 100; para la Inst10\_2 se generan otros 10 números aleatorios; para la Inst15\_1 se generan 15 números aleatorios entre 1 y 100, etc. De la lista generada anteriormente, en la que a cada municipio le corresponde un número, se escogen los municipios/barrios correspondientes a los números aleatorios de cada instancia. De este modo obtenemos las listas de localizaciones de las emergencias para las 20 instancias (ver Anexo 6). Con el software QGIS se generan los puntos aleatorios en cada uno de los municipios/barrios. Los momentos de aparición y la duración de las asistencias in situ se generan de forma aleatoria.

La Tabla 24 muestra los tiempos de respuesta obtenidos con los dos algoritmos: sin reubicación (columnas “sin”) y con reubicación (columnas “con”) en las primeras 10 instancias, las más pequeñas (10 y 15 emergencias).

---

<sup>20</sup> En el ejemplo de generación de instancias del apartado 4.5.1 se han escogido 15 municipios con mayor población, pero las emergencias también surgen en los municipios menos poblados, por lo que éstos también deben tener la oportunidad de entrar a la muestra.

INSTANCIAS	Inst10_1		Inst10_2		Inst10_3		Inst10_4		Inst10_5		Inst15_1		Inst15_2		Inst15_3		Inst15_4		Inst15_5	
ALGORITMO	sin	con																		
TIEMPOS DE RESPUESTA	10	10	12	12	10	10	13	13	28	28	12	12	13	13	14	14	15	15	13	13
	5	5	11	11	19	19	26	26	13	13	17	17	15	15	16	16	11	11	23	23
	15	15	15	15	18	18	23	23	6	6	7	7	22	22	10	10	24	24	6	9
	13	13	6	6	7	7	7	7	9	9	18	18	6	6	6	6	6	6	22	22
	5	5	7	7	5	5	7	7	5	5	7	7	6	6	11	11	6	6	6	6
	8	8	16	16	6	6	11	11	5	5	12	12	14	14	9	9	12	12	9	9
	6	6	25	25	7	7	17	17	9	9	11	11	5	5	7	7	12	12	13	13
	14	14	16	19	27	27	12	12	13	13	8	8	4	4	4	4	8	8	6	6
	7	7	18	18	21	21	21	21	25	25	7	7	17	17	8	8	7	7	16	16
	18	18	23	23	12	12	22	22	7	7	10	10	12	12	13	13	6	6	28	28
											13	13	19	19	13	13	20	26	10	10
											13	13	28	28	6	6	15	15	14	14
											10	10	6	6	21	21	30	30	6	6
											23	23	8	8	28	28	16	16	11	11
										24	24	8	8	24	24	10	10	24	24	
INSTANCIAS	Inst10_1		Inst10_2		Inst10_3		Inst10_4		Inst10_5		Inst15_1		Inst15_2		Inst15_3		Inst15_4		Inst15_5	
Nº REUBIC.	0		1		0		0		1		1		1		0		2		1	

Tabla 24. Tiempos de respuesta para las instancias de 10 y 15 emergencias obtenidos con los algoritmos sin reubicación y con reubicación.  
Fuente: Elaboración propia.

Según estos resultados, el algoritmo con reubicación no proporciona mejoras respecto al tiempo de respuesta e, incluso, hay tres casos (marcados en rojo), donde el tiempo de respuesta empeora.

Hay que tener en cuenta que el objetivo de la heurística propuesta es maximizar la población cubierta y por eso se reubican las ambulancias a las zonas con elevada densidad poblacional. Pero la demanda es una variable aleatoria y pueden surgir emergencias en las zonas con menor densidad poblacional. Si surge una emergencia en una zona que se haya quedado sin ambulancia por cubrir otra zona, de mayor prioridad respecto a la cobertura, el tiempo de respuesta para esta emergencia va a aumentar. Pero la cobertura en el momento de emergencia sería mayor en caso de reubicación que sin reubicación. Dado que el QGIS actualmente no proporciona la población real cubierta (el problema de solapamiento ya comentado anteriormente), no podemos utilizar como medida de desempeño de la heurística la población cubierta.

Si analizamos los tiempos de respuesta obtenidos en las instancias más grandes (20 y 25 emergencias) (ver Tabla 25), observamos que hay 7 casos (en rojo) en los que el tiempo de respuesta ha aumentado con el algoritmo de reubicación, pero hay 11 casos en los que el tiempo de respuesta ha disminuido (marcados en verde).

INSTANCIAS	Inst20_1		Inst20_2		Inst20_3		Inst20_4		Inst20_5		Inst25_1		Inst25_2		Inst25_3		Inst25_4		Inst25_5	
ALGORITMO	sin	con																		
TIEMPOS DE RESPUESTA	11	11	8	8	19	19	18	18	15	15	14	14	12	12	12	12	10	10	13	13
	10	10	11	11	6	6	7	7	43	43	13	13	7	7	17	17	17	17	15	15
	9	9	14	14	15	15	14	14	11	11	21	21	26	26	17	17	26	26	18	18
	6	6	12	10	18	18	25	25	11	11	13	13	17	24	10	10	13	13	15	17
	17	17	22	22	10	10	10	10	7	7	12	12	10	10	7	7	9	9	24	21
	13	13	8	8	10	10	9	9	12	12	16	16	10	10	10	10	12	12	12	12
	7	7	5	8	5	5	9	9	18	18	10	10	7	7	12	12	19	19	6	6
	8	8	6	6	9	9	6	6	13	13	6	6	15	8	20	16	7	7	10	10
	29	29	10	10	14	14	5	5	7	7	9	9	11	11	8	8	6	6	6	6
	33	33	9	9	8	8	9	9	7	7	10	7	13	9	12	12	10	10	10	10
	6	6	7	7	11	11	14	14	11	11	11	11	6	6	9	9	15	15	7	7
	5	5	18	18	11	11	9	9	8	8	9	9	6	6	9	9	10	10	11	11
	13	13	10	10	23	24	8	8	13	13	5	5	11	11	16	16	7	7	11	11
	15	12	27	27	17	17	8	8	5	5	9	7	9	9	13	13	12	12	10	10
	20	20	15	15	25	25	10	10	16	16	12	12	7	7	10	10	19	19	7	7
	25	25	5	5	23	23	18	18	24	24	5	5	11	11	13	13	19	19	6	6
	26	26	8	8	6	6	31	31	30	30	9	9	11	11	5	5	7	7	14	17
	23	23	11	11	11	11	8	8	12	12	10	10	18	18	26	26	10	8	23	23
	14	14	12	12	11	11	7	7	12	12	11	11	23	21	23	23	27	27	13	13
	11	11	10	10	10	10	8	8	12	12	15	15	23	23	9	9	26	26	23	23
										26	26	5	5	5	5	33	33	7	7	
										26	26	9	9	13	13	4	4	10	10	
										7	7	12	12	9	9	9	9	14	14	
										9	14	11	11	13	10	24	24	9	9	
										8	8	9	9	10	10	12	12	10	11	
INSTANCIAS	Inst20_1		Inst20_2		Inst20_3		Inst20_4		Inst20_5		Inst25_1		Inst25_2		Inst25_3		Inst25_4		Inst25_5	
Nº REUBIC.	4		4		4		0		2		5		9		4		2		6	

Tabla 25. Tiempos de respuesta para las instancias de 20 y 25 emergencias obtenidos con los algoritmos sin reubicación y con reubicación.  
Fuente: Elaboración propia.

Si calculamos el RPD (Relative Percentage Deviation) para cada emergencia en las instancias de 20 y 25 emergencias considerando como la mejor solución aquella, donde el tiempo de respuesta es menor:

$$RPD = \frac{\text{Solución algoritmo} - \text{Mejor solución}}{\text{Mejor solución}} * 100$$

obtenemos los siguientes resultados (ver Tabla 26).

Inst	INST20_1		INST20_2		INST20_3		INST20_4		INST20_5		INST25_1		INST25_2		INST25_3		INST25_4		INST25_5		
Alg	sin	con																			
RPD	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
	0%	0%	20%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	41%	0%	0%	0%	0%	0%	13%
	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	14%	0%
	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	0%	0%	0%	60%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	88%	0%	25%	0%	0%	0%	0%	0%
	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	43%	0%	44%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	0%	0%	0%	0%	0%	4%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	25%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	29%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	21%
	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	25%	0%	0%	0%
	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	10%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
											0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
											0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
											0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
											0%	56%	0%	0%	30%	0%	0%	0%	0%	0%	
											0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	10%	
<b>Media RPD</b>	<b>1%</b>	<b>0%</b>	<b>1%</b>	<b>3%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>3%</b>	<b>2%</b>	<b>6%</b>	<b>2%</b>	<b>2%</b>	<b>0%</b>	<b>1%</b>	<b>0%</b>	<b>1%</b>	<b>2%</b>	

Tabla 26. RPD para las instancias de 20 y 25 emergencias.  
Fuente: Elaboración propia.

La última fila de la Tabla 26 muestra la media de RPD para cada instancia para los dos algoritmos. Observamos que el algoritmo con reubicación se aleja más de la mejor solución que el algoritmo sin reubicación en la Inst20\_2 (3% frente a 1% respectivamente) y en la Inst25\_5 (2% frente a 1%). Mientras que en las instancias Inst20\_1, Inst25\_1, Inst25\_2, Inst25\_3 y Inst25\_4 el algoritmo con reubicación está más cerca de la mejor solución que el algoritmo sin reubicación.

Se observa que la reubicación dinámica de las ambulancias es más efectiva en las últimas 5 instancias, con mayor carga de trabajo. Si consideramos el RPD medio para las 5 réplicas de cada tipo de instancia, obtenemos:

Algoritmo	sin	con
<b>RPD instancias de 20 emergencias</b>	0,5%	0,6%
<b>RPD instancias de 25 emergencias</b>	2,5%	1,1%

Tabla 27. RPD medio para las instancias de 20 y 25 emergencias.  
Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 27 muestra que el algoritmo sin reubicación en las Instancia de 25 emergencias está a doble de distancia de la mejor solución (2,5%) que el algoritmo con reubicación (1,1%).

Para confirmar el mejor comportamiento del algoritmo con reubicación respecto al algoritmo sin reubicación en las instancias grandes, se han generado 5 instancias adicionales de 40 emergencias. Es un caso con una carga de trabajo excesiva, pero probable. Los tiempos de respuesta para cada emergencia y la media de RPD para cada instancia se muestran en la Tabla 28.

INSTANCIAS	INST40_1		INST40_2		INST40_3		INST40_4		INST40_5	
ALGORITMO	sin	con	sin	con	sin	con	sin	con	sin	con
TIEMPOS DE RESPUESTAS	15	15	9	19	22	22	7	10	10	10
	21	18	14	14	27	27	14	14	7	11
	25	25	17	14	18	18	18	18	21	21
	15	20	12	15	19	19	17	14	14	14
	20	20	16	16	7	7	11	11	20	20
	10	10	20	20	18	18	10	9	15	15
	16	18	15	9	7	7	14	9	13	13
	18	18	17	17	7	7	7	7	8	8
	7	7	14	9	17	17	7	7	7	6
		14	6	6	13	11	11	11	8	8
	24	22	11	11	11	11	14	14	9	7
			8	8	7	7	8	13	15	8
	7	7	8	8	5	5	10	10	15	8
	5	5	11	11	7	7	6	6	9	9
	23	23	35	35	12	12	7	7	10	10
	9	9	13	13	22	22	14	14	7	7
	26	13	6	6	22	22			15	10
	20	30	8	6	8	8	16	16	13	13
	19	20	11	12	17	17	16	16	9	13
	13	13	13	22	6	6	27	28	19	19
	28	28	5	10	6	6	18	18	16	16
	19	19	15	16	40	40	26	26	12	12
	28	38	26	26	23	23	17	17	17	17
	14	14	17	17	16	16	31	30		23
	12	8	16	16	18	18	26	26	7	7
	6	6					10	10	24	24
	6	6	33	33	25	25	36	36	17	17
	11	11	22	10	16	13	13	13	28	27
	11	7	5	5			13	9	5	5
	17	17	11	16	33	33	8	9	9	9
	20	19	12	6	23	23	17	5	9	9
	12	7	9	21	16	16	18	18	11	11
23	23	6	6	8	8	23	23	18	18	
13	13	14	17	22	22	13	13	15	15	
26	19	10	10	26	26	15	15	49	49	
8	8	20	20	5	5	14	14	31	31	
8	7	11	11	9	9	8	8	16	16	
10	9	26	26	16	16	10	14	19	19	
12	12	15	19	27	27	13	13	12	12	
28	19	3	3	20	15	17	17	7	12	
<b>N.º REUBIC.</b>	<b>12</b>		<b>16</b>		<b>12</b>		<b>9</b>		<b>15</b>	
<b>Media RPD</b>	<b>11%</b>	<b>4%</b>	<b>10%</b>	<b>14%</b>	<b>2%</b>	<b>0%</b>	<b>10%</b>	<b>4%</b>	<b>7%</b>	<b>4%</b>

Tabla 28. Tiempos de respuesta para las instancias de 40 emergencias, número de reubicaciones y la media de RPD. Fuente: Elaboración propia.

Solo en la instancia Inst40\_2 el algoritmo sin reubicación es mejor que el algoritmo con reubicación (el RPD de 14% frente al de 10% respectivamente). En los demás casos el algoritmo con reubicación genera mejores resultados.

Tal como se ha comentado anteriormente, si no hay ambulancias libres para atender una emergencia, los algoritmos no generan respuesta para este caso. Dado que 40 emergencias es una cantidad excesiva para un período de 6 horas, en cada una de las réplicas aparecen emergencias sin atender (celdas vacías en la Tabla 28). Lo interesante es que el algoritmo con reubicación sí que atiende 2 emergencias (marcadas en azul) que no son atendidas por el algoritmo sin reubicación. Y aun así, atendiendo 1 emergencia más en las instancias Inst40\_1 y Inst40\_5, el algoritmo con reubicación logra obtener mejores resultados tanto en las instancias correspondientes, como en el conjunto de las 5 réplicas (ver Tabla 29).

Algoritmo	sin	con
<b>RPD instancias de 40 emergencias</b>	8,0%	5,2%

Tabla 29. RPD medio para las instancias de 40 emergencias.  
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 88 vemos el comportamiento de la media de los tiempos de respuesta para cada tipo de instancia. Mientras que en las instancias pequeñas el algoritmo sin reubicación proporciona mejores resultados (la media del tiempo de respuesta es más pequeña), en las instancias más grandes los mejores resultados los proporciona el algoritmo con reubicación.



Figura 88. La media de los tiempos de respuesta con y sin reubicación.  
Fuente: Elaboración propia.

Otro aspecto para considerar en los resultados obtenidos es el número de reubicaciones realizadas en cada instancia. En la Tabla 24 se observa que este número para las instancias de 10 y 15 emergencias fluctúa entre 0 y 2, siendo la media de las reubicaciones igual a 0,7. Para las instancias más grandes (ver Tabla 25) el número de reubicaciones fluctúa entre 0 y 9, siendo la media igual a 4. Consideramos que estos números no son elevados y no saturan el sistema, incluso en las instancias de 40 emergencias (ver Tabla 28). Además, dado que las reubicaciones se producen justamente después de terminar un servicio, no son molestas para el personal.

Éstos son los resultados de nuestro estudio inicial de un problema tan complejo como apasionante, en el que faltaría depurar mejor la base de datos, realizar muchas más pruebas y si es posible con simulación y tener en cuenta otros aspectos, de los que hablaremos en el apartado 5.2 Investigación futura.

## 5. CONCLUSIONES E INVESTIGACIÓN FUTURA

### 5.1 Conclusiones

En este trabajo, motivado por la necesidad de reducción del tiempo de respuesta a las emergencias y por la indisponibilidad de los equipos médicos para asistir las emergencias mientras atiendes otras llamadas, se desarrolla un algoritmo que puede servir como base de un soporte operativo para ayudar a los servicios de atención prehospitalaria en la toma de decisiones de reubicación dinámica de ambulancias.

Se afronta la resolución de un problema real, del Servicio de Emergencias Sanitarias de la provincia de Valencia, que no se había abordado anteriormente en la Comunidad Valenciana.

El desarrollo del algoritmo heurístico se basa en:

- Un estudio de la estructura y el funcionamiento del servicio de emergencias sanitarias de la provincia de Valencia
- Un análisis previo de los datos históricos de:
  - La demanda de las emergencias en la provincia de Valencia
  - Los servicios prestados por los departamentos sanitarios
  - Los servicios realizados por los SAMU
  - Los servicios realizados por los Alfas
- Una revisión bibliográfica de los modelos de reubicación de las ambulancias.

La activación del algoritmo de reubicación está condicionada por la aparición de alguno de los Escenarios, que son diferentes combinaciones de las bases libres, es decir las zonas que se quedan sin cobertura.

La evaluación de la técnica heurística propuesta se realiza comparando los resultados obtenidos con el algoritmo sin reubicación, cuando todas las ambulancias vuelven a sus bases y con el algoritmo con reubicación. La medida de desempeño utilizada en este estudio es el tiempo de respuesta para las emergencias.

Los resultados muestran que el algoritmo de reubicación es más efectivo en las instancias más grandes, cuando hay una carga de trabajo más elevada. El número de desplazamientos realizados en cada instancia es el mismo que en un modelo estático, dado que la reubicación únicamente se realiza al finalizar un servicio. Por lo tanto, la solución propuesta es bastante equilibrada porque se pueden obtener mejores tiempos de respuesta para las emergencias sin estresar el sistema con demasiados cambios y sin aumentar los costes intangibles.

Este trabajo muestra cómo se puede afrontar un problema real y complejo, en el que se han aplicado tanto conocimientos y herramientas estadísticas, como los de la investigación operativa.

### 5.2 Investigación futura

La relevancia, la complejidad y la existencia de muchos enfoques diferentes del problema de reubicación de los vehículos de emergencias sanitarias permiten continuar con el desarrollo de varios aspectos de este tema.

Uno de los puntos más importantes es el análisis más detallado de los datos históricos que permitiría obtener:

- La función de distribución de las llamadas de emergencias y todas sus características.
- Probabilidad de ocurrencia de las emergencias en cada zona.
- Patrones de demanda más específicos: no sólo diferencias la demanda de los meses de verano, sino también, por ejemplo, la del período de fiestas navideñas o Pascuas y, incluso, diferencias la demanda de un momento del día y otro.
- Patrones de demanda simultánea.
- Variables que influyen sobre la demanda de los servicios médicos prehospitalarios (colegios, residencias de mayores, puntos negros en la carretera, etc.)
- Los motivos de las emergencias atendidas con un tiempo superior a 10 minutos (si es un problema de cobertura estratégico o es un problema operativo).

El porcentaje de las llamadas atendidas por SAMU en el año 2019 con el tiempo de respuesta superior a 10 minutos, pero inferior a 12, es de casi 40 % del total de las emergencias atendidas fuera del límite de 10 minutos. Sería interesante averiguar los motivos de estos retrasos porque son muy pequeños y podrían ser cruciales para los pacientes.

Los resultados del análisis más exhaustivo de los datos históricos permitirían construir un indicador para controlar mejor la cobertura de las áreas de salud. Sería interesante considerar la opción de reubicación no sólo de las ambulancias que terminan un servicio, sino también de las inactivas, las que esperan en la base. Y, también, comparar los resultados de ambos tipos de reubicación tanto respecto a su eficacia, como respecto a su eficiencia.

Otro punto para tener en cuenta en la futura investigación es considerar como posibles bases no sólo las actuales, sino también los hospitales a los que las ambulancias llevan a los pacientes o centros de salud abiertos hasta las 15:00 h. Es posible que se resolviesen algunos problemas de cobertura estratégicos.

Los resultados de las pruebas con las instancias de 40 emergencias muestran que el algoritmo de reubicación es capaz de atender un mayor número de emergencias (en la Tabla 28 las hemos marcado en azul). Para que el algoritmo sin reubicación atienda el mismo número de emergencias, debería haber vehículos adicionales. Por lo tanto, sería interesante cuantificar la mejora obtenida por el algoritmo con reubicación porque en su caso no se añaden más recursos.

Ya se ha comentado, que el software QGIS actualmente no tiene un algoritmo para calcular la población de los mapas de isócronas solapados, pero es una futura opción muy potente y no hay que descartarla.

Dado que es muy complicado determinar la muestra representativa de las localizaciones de las emergencias y, sobre todo, porque se trata de un problema dinámico, sería interesante utilizar la simulación para evaluar el desempeño de la técnica heurística propuesta de una forma más efectiva.

Y, por último, para visualizar la situación del sistema en cada momento y, especialmente, para detectar el nivel de cobertura de la población en cada instante, se podría realizar la programación del algoritmo directamente en el entorno del QGIS ya que el software dispone de la consola en Python.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aboueljinnane, L., Jemai, Z. & Sahin, E., 2012. Reducing ambulance response time using simulation: The case of Val-de-Marne department Emergency Medical service. *Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (WSC)*, December, pp. 1-12.

Agencia Valenciana de Salud, 2013. *Integración de la atención de las emergencias sanitarias al sistema corporativo de gestión de emergencias de la Generalitat. Generalitat. Proyecto AES 112.* <http://www.dep4.san.gva.es/contenidos/urg/archivos/informes/informes/Integraci%C3%B3n%20112.pdf> [Accessed Mayo 2020].

Alanis, R., Ingolfsson, A. & Kolfal, B., 2013. A Markov Chain Model for an EMS System with Repositioning. *Production and operations management*, 22(1), p. 216–231.

Andersson, T. & Värbrand, P., 2007. Decision support tools for ambulance dispatch and relocation. *Operational research society*, 58(2), p. 195– 201.

Andrade, L. A. C. G. & Cunha, C. B., 2015. An ABC heuristic for optimizing moveable ambulance station location and vehicle repositioning for the city of São Paulo. *International Transactions in Operational Research*, 22(3), p. 473–501.

Bélanger, V., Ruiz, A. & Soriano, P., 2015. Recent Advances in Emergency Medical Services Management. *CIRRELT*, July.

Bélanger, V., Kergosien, Y., Ruiz, A. & Soriano, P., 2016. An empirical comparison of relocation strategies in real-time ambulance fleet management. *Computers & Industrial Engineering*, April, Volume 94, pp. 216-229.

Billhardt, H. et al., 2014. Dynamic coordination of ambulances for emergency medical assistance services. *Knowledge-Based Systems*, Volume 70, p. 268–280.

Brotcorne, L., Laporte, G. & Semet, F., 2003. Ambulance location and relocation models. *European Journal of Operational Research*, 147(3), pp. 451-463.

Conselleria de Sanitat Universal i Salut Pública, 2017. *MEMÒRIA DE GESTIÓ.* [http://www.san.gva.es/documents/157385/7466463/Mem%C3%B2ria+CS+2017\\_optimizado.pdf](http://www.san.gva.es/documents/157385/7466463/Mem%C3%B2ria+CS+2017_optimizado.pdf) [Accessed Mayo 2020].

Conselleria de Sanitat Universal i Salut Pública, 2018. *MEMÒRIA DE GESTIÓ.* [http://www.san.gva.es/documents/157385/8232066/8.+SGGT+-+Actividad+asistencial+2018new\\_tr.pdf](http://www.san.gva.es/documents/157385/8232066/8.+SGGT+-+Actividad+asistencial+2018new_tr.pdf) [Accessed Mayo 2020].

Daskin, M., 1983. A Maximum Expected Covering Location Model: Formulation, Properties and Heuristic Solution. *Transportation Science*, 17(1), pp. 48-70.

Enayati, S., Mayorga, M. E., Rajagopalan, H. K. & Saydam, C., 2018. Real-time ambulance redeployment approach to improve service coverage with fair and restricted workload for EMS providers. *Omega*, September, Volume 79, p. 67–80.

Gendreau, M., Laporte, G. & Semet, F., 2001. A dynamic model and parallel tabu search heuristic for real-time ambulance relocation. *Parallel computing*, 27(12), pp. 1641-1653.

Gendreau, M., Laporte, G. & Semet, F., 1997. Solving an ambulance location model by tabu search. *Location Science*, 5(2), pp. 75-88.

Gendreau, M., Laporte, G. & Semet, F., 2006. The maximal expected coverage relocation problem for emergency vehicles. *Journal of the Operational Research Society*, 57(1), pp. 22-28.

- Haghani, A. & Yang, S., 2007. Real-time emergency response fleet deployment: concepts, systems, simulation & case studies. *Dynamic fleet management, ser. Operations Research/Computer Science Interfaces Series*, Volume 38, p. 133–162.
- Henderson, S. & Mason, A., 2005. Ambulance service planning: simulation and data visualisation. *Operations research and health care, ser. International Series in Operations Research & Management Science*, Volume 70, p. 77–102.
- Jagtenberg, C., Bhulai, S. & Van der Mei, R., 2015. An efficient heuristic for realtime ambulance redeployment. *Operations Research for Health Care*, Volume 4, p. 27–35.
- Lam, S. et al., 2015. Dynamic ambulance reallocation for the reduction of ambulance response times using system status management. *American Journal of Emergency Medicine*, 33(2), p. 159–166.
- Lee, S., 2011. The role of preparedness in ambulance dispatching. *Journal of the Operational Research Society*, 62(10), p. 1888–1897.
- Lim, C., Mamat, R. & Bräunl, T., 2011. Impact of Ambulance Dispatch Policies on Performance of Emergency Medical Services. *IEEE Transactions on intelligent transportation systems*, June, 12(2), pp. 624-632.
- Liu, Y., Yuan, Y., Li, Y. & Pang, H., 2013. A chance constrained programming model for reliable emergency vehicles relocation problem. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Volume 96, p. 671 –682.
- Maxwell, M., Henderson, S. & Topaloglu, H., 2009. Ambulance redeployment: An approximate dynamic programming approach. *Proceedings Winter simulation conference (WSC)*, December, p. 1850–1860.
- Maxwell, M., Restrepo, M., Henderson, S. & Topaloglu, H., 2010. Approximate dynamic programming for ambulance redeployment. *INFORMS Journal on Computing*, 22(2), p. 266–281.
- Moeini, M., Jemai, M. & Sahin, E., 2013. An integer programming model for the dynamic location and relocation of emergency vehicles: A case study. *International Symposium on Operational Research in Slovenia, SOR*, p. 343–350.
- Moeini, M., Jemai, M. & Sahin, E., 2014. Location and relocation problems in the context of the emergency medical service systems: a case study. *Central European Journal of Operations Research*, 23(3), pp. 641-658.
- Monografía, 2011. *Libro blanco: Los servicios de emergencias y urgencias extrahospitalarias en España*. <http://www.epes.es/?publicacion=los-servicios-de-emergencias-y-urgencias-extrahospitalarias-en-espana> [Accessed Mayo 2020].
- Paz Roa, J. C., 2016. *Diseño de una herramienta cuantitativa para el problema dinámico de localización y despacho de vehículos de emergencias médicas*, Pontificia Universidad Javeriana Cali, Colombia: Trabajo de Grado de Maestría en Ingeniería.
- Paz Roa, J. C., Escobar, J. W. & Marín Moreno, C. A., 2020. An online real-time matheuristic algorithm for dispatch and relocation of ambulances. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 11(3), pp. 443-468.
- Peleg, K. & Pliskin, J., 2004. A geographic information system simulation model of EMS: reducing ambulance response time. *American Journal of Emergency Medicine*, 22(3), pp. 164-170.

- Petz, M., 2008. *Bicriterial relocation of the Viennese ambulance service*, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften der Universität Wien: Diplomarbeit Zur Erlangung des akademischen Grades Magister rerum socialium oeconomicarumque.
- Poulton, M. & Roussos, G., 2013. Towards smarter metropolitan emergency response. *IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, September.p. 2576– 2580.
- Rajagopalan, H., Saydam, C. & Xiao, J., 2008. A multiperiod set covering location model for dynamic redeployment of ambulances. *Computers & Operations Research*, 35(3), pp. 814-826.
- Real Academia Española, n.d. *Diccionario de la lengua española*. <https://dle.rae.es/heur%C3%ADstico> [Accessed Agosto 2020].
- Restrepo, M., 2008. *Computational methods for static allocation and real-time redeployment of ambulances*, s.l.: Dissertation presented to the Faculty of the Graduate School of Cornell University.
- Reuter, M. & Michalk, W., 2012. Towards the dynamic relocation of ambulances in Germany: the risk of being too late. *Annual SRII Global Conference*, July.pp. 642-649.
- Reuter, M., Van den Berg, P. & Vile, J., 2017. Logistics for Emergency Medical Service systems. *Health Systems*, Volume 6, pp. 187-208.
- Richards, D., 2005. Planning a New Model for Dynamically Reallocating Ambulances. *The Operational Research Society of New Zealand, 40th Annual Conference*, pp. 36-45.
- Rodríguez, A., 2016. *Modelo de simulación para analizar el problema de relocalización de las ambulancias de un servicio de emergencia médico (SEM)*, Universidad de Antioquia: Trabajo de investigación para optar al título de Magíster en Ingeniería en Departamento de Ingeniería Industrial.
- Rodríguez, A., Osorno, G. & Maya, P., 2016. Relocalización de vehículos en servicios de emergencias médicas: una revisión. *Ingeniería y Ciencia*, 12(23), pp. 163-202.
- Schmid, V., 2012. Solving the dynamic ambulance relocation and dispatching problem using approximate dynamic programming. *European Journal of Operational Research*, 2019(3), pp. 611-621.
- Schmid, V. & Doerner, K., 2010. Ambulance location and relocation problems with time-dependent travel times. *European Journal of Operational Research*, 207(3), pp. 1293-1303.
- Sudtachat, K., Mayorga, M. & Mclay, L. A., 2016. A nested-compliance table policy for emergency medical service systems under relocation. *Omega*, January, Volume 58, pp. 154-168.
- Trujillo, L., Alvarez-Hernandez, G., Maldonado, Y. & Vera, C., 2020. Comparative analysis of relocation strategies for ambulances in the city of Tijuana, Mexico. *Computers in Biology and Medicine*, January.116(103567).
- Van Barneveld, T. C., 2016. The Minimum Expected Penalty Relocation Problem for the Computation of Compliance Tables for Ambulance Vehicles. *INFORMS Journal on Computing*, May.28(2).
- Van Barneveld, T. C., Bhulai, S. & Van der Mei , R. D., 2016. The effect of ambulance relocations on the performance of ambulance service providers. *European Journal of Operational Research*, 252(1), pp. 257-269.

- Van Barneveld, T., Jagtenberg, C., Bhulai, S. & Van der Mei, R., 2018. Real-time ambulance relocation: Assessing real-time redeployment strategies for ambulance relocation. *Socio-Economic Planning Sciences*, June, Volume 62, p. 129–142.
- Van Buuren, M., Van der Mei, R., Aardal, K. & Post, H., 2012. Evaluating dynamic dispatch strategies for emergency medical services: TIFAR simulation tool. *Proceedings Winter Simulation Conference (WSC)*, December, pp. 1-12.
- Van den Berg, P. & Aardal, K., 2015. Time-dependent MEXCLP with start-up and relocation cost. *European Journal of Operational Research*, April, Volume 242, pp. 383-389.
- Vasic, C., Rancic, D., Predic, B. & Mitic, D., 2010. One Approach to Dynamical Relocation of Emergency Ambulance Vehicles Based on Geographic Information Systems. *X Triennial International SAUM Conference on Systems, Automatic Control and Measurements*, November 10th-12th.
- Yue, Y., Marla, L. & Krishnan, R., 2012. An efficient simulation-based approach to ambulance fleet allocation and dynamic redeployment. *Proceedings of the 26th national conference on artificial intelligence*, pp. 398-405.
- Zhang, L., 2010. Optimisation of Small-Scale Ambulance Move-up. *The Operational Research Society of New Zealand, 45th Annual Conference*, pp. 150-159.
- Бегичева, С., 2016. Модель оптимального размещения станций и филиалов скорой медицинской помощи. *Интернет-журнал «Науковедение»*, 8(6).

# ANEXOS

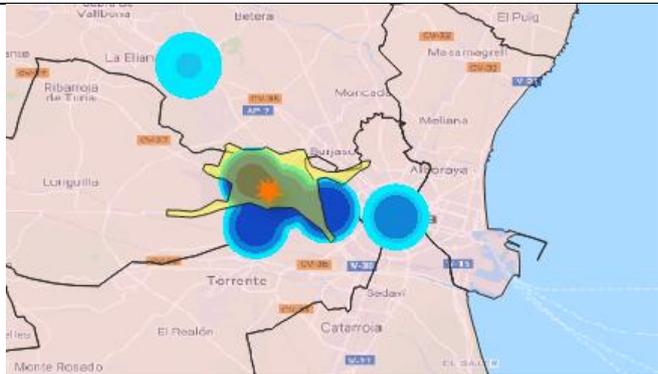
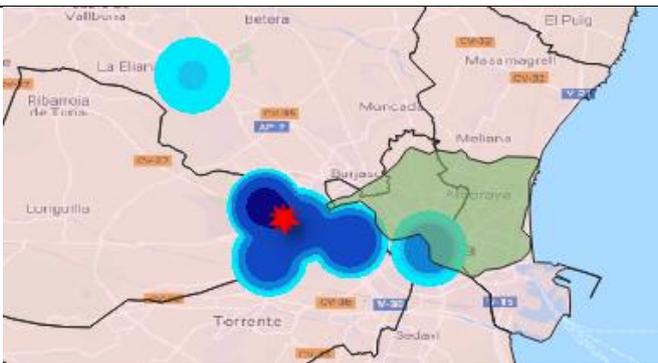
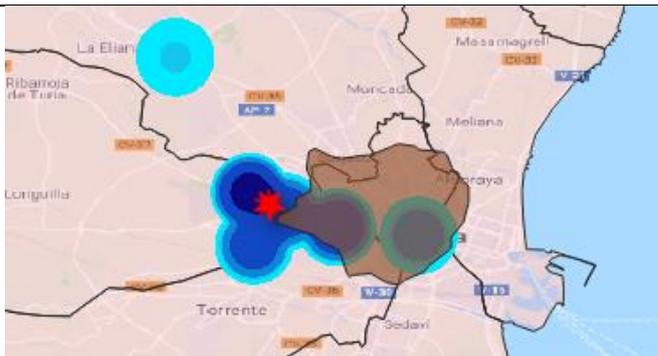
## Anexo 1. Análisis de los desplazamientos de los Alfas con tiempo de respuesta hasta 10 minutos y mapas de isócronas de 7 minutos

Leyenda:

Desplazamientos con tiempo de respuesta hasta 10 minutos

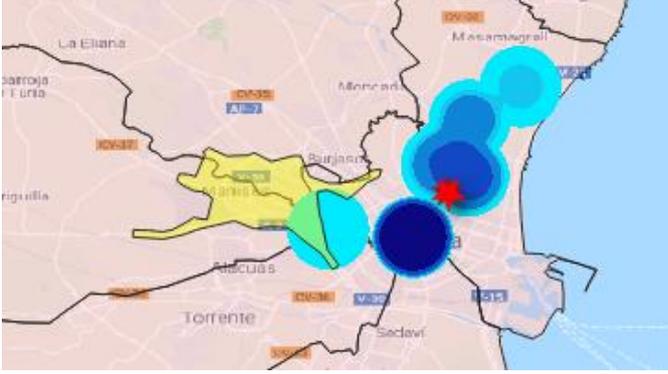
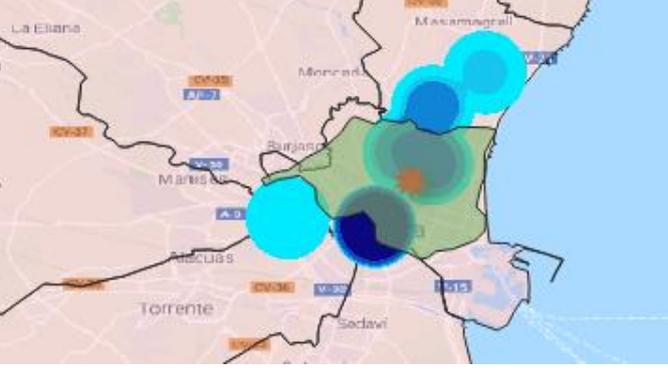
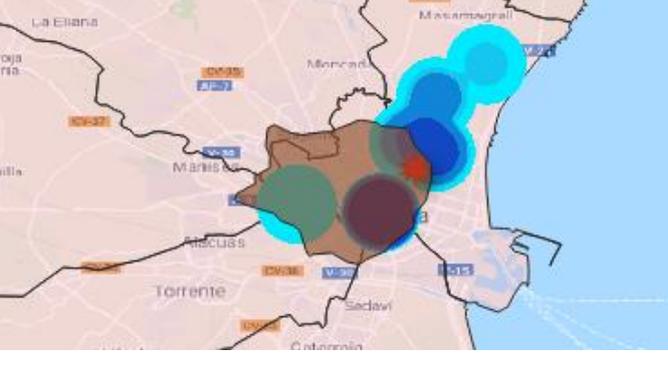
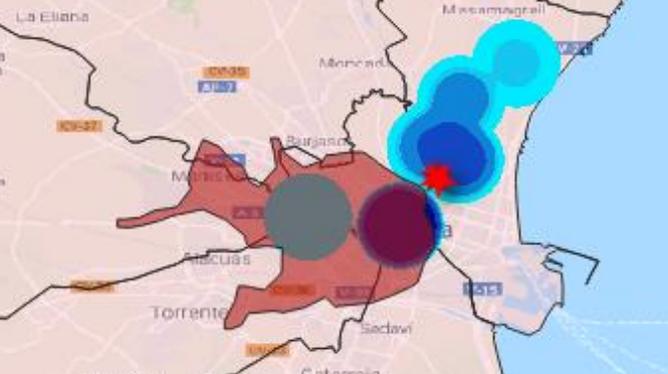
- 0 - 5
- 5 - 10
- 10 - 35
- 35 - 130
- 130 - 1500

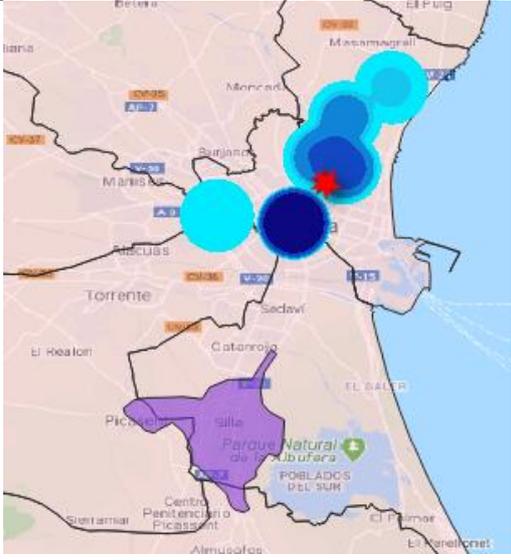
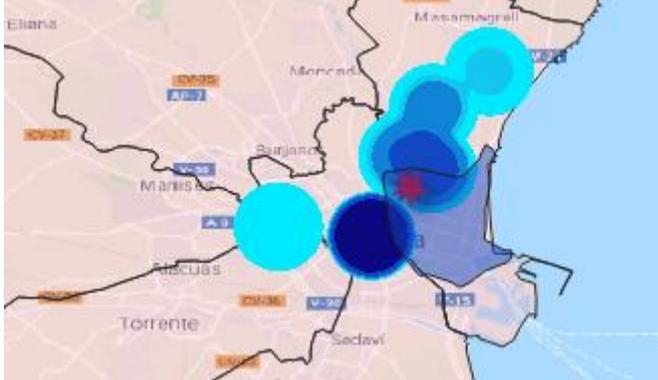
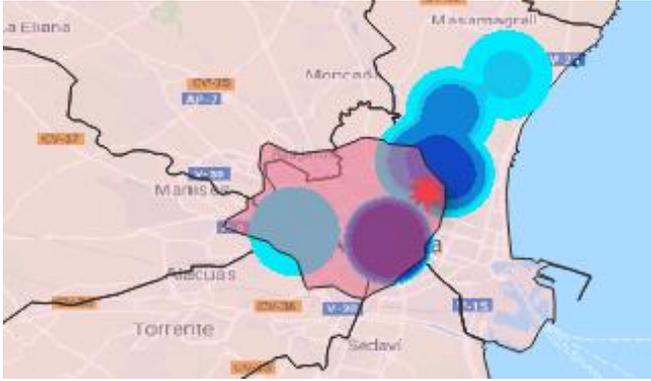
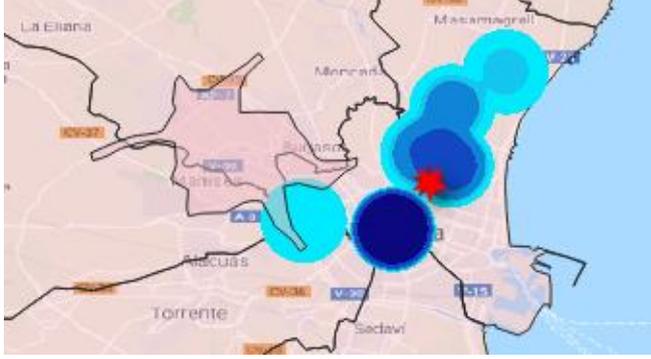
Coordenadas SAMU

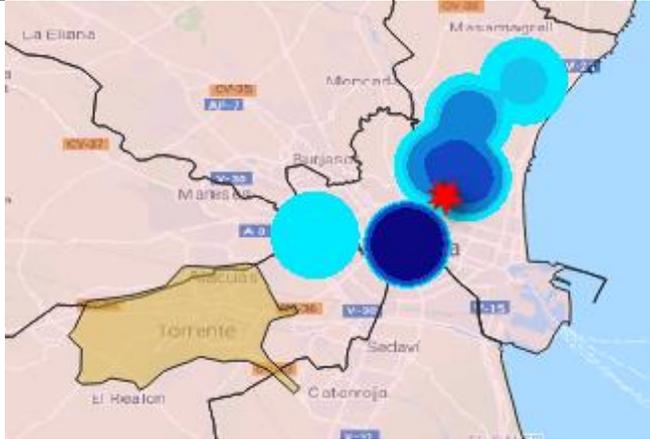
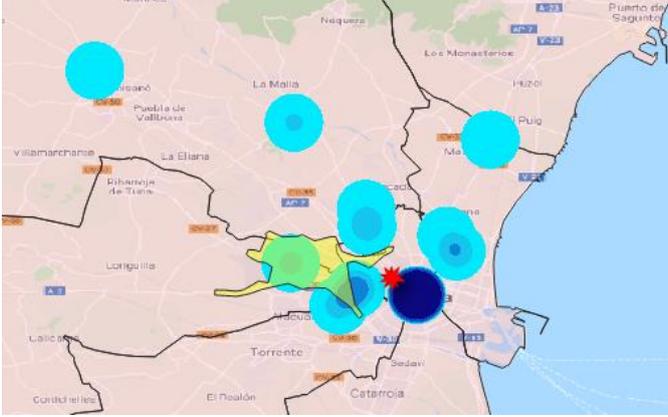
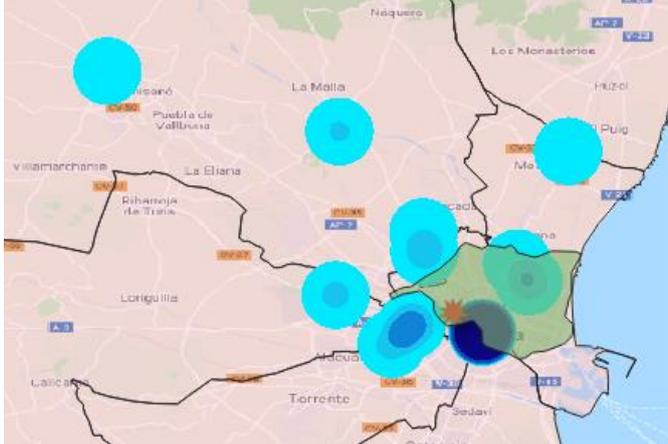
Desplazamientos de Alfa 1 Manises	Mapa de isócronas desde la base del Alfa 1 Manises
	
	Alfa 2 Alfahuir
	Alfa 3 Campanar

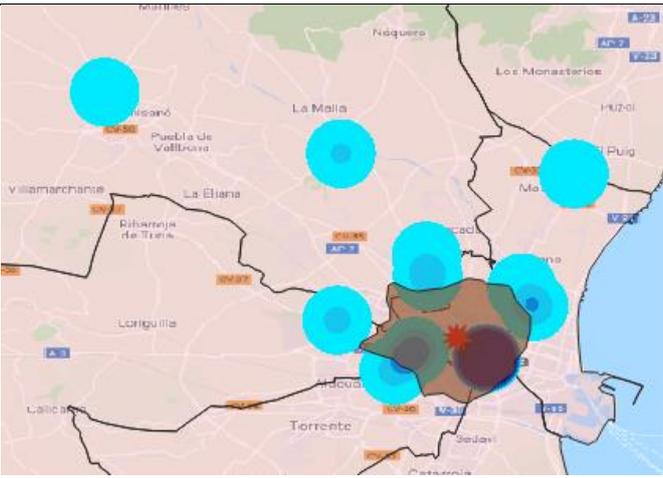
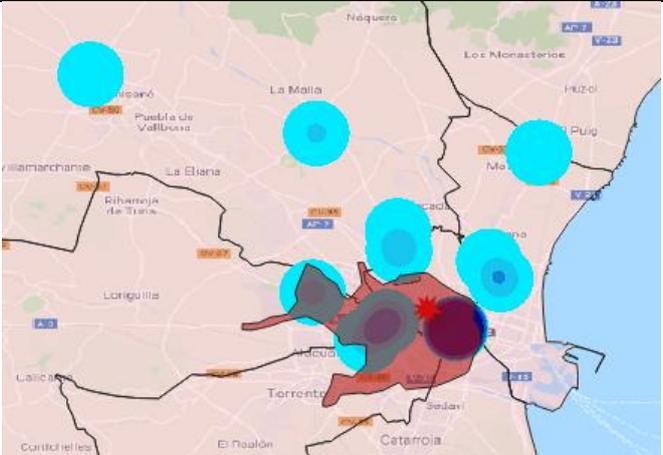
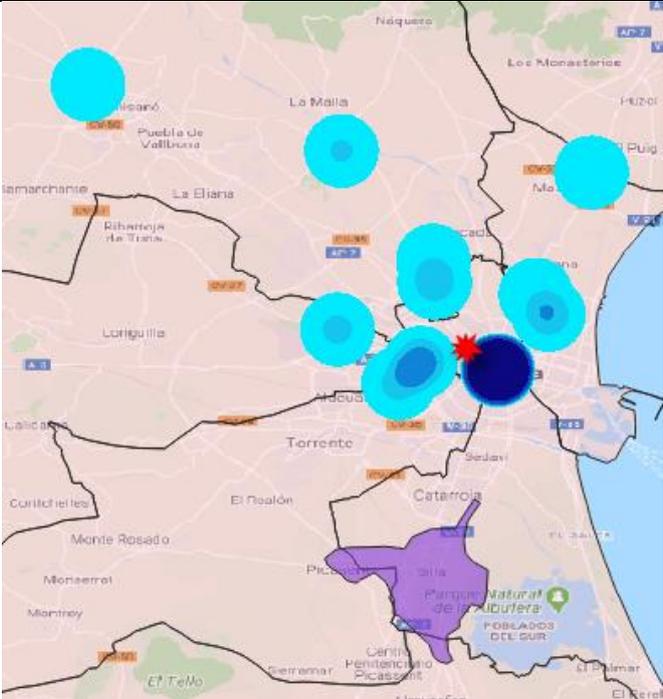
	<p>Alfa 4 Hospital General</p>
	<p>Alfa 5 Silla</p>
	<p>Alfa 6 Malvarrosa</p>

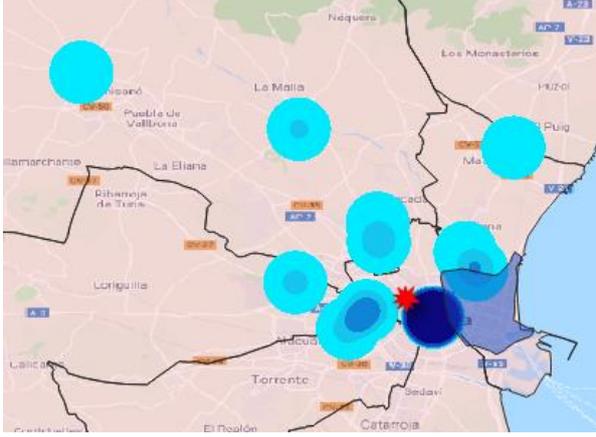
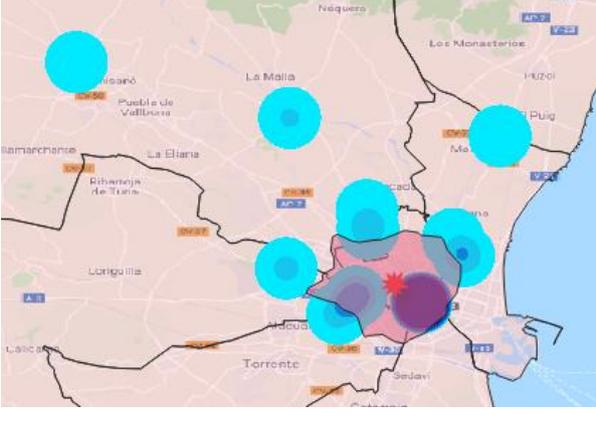
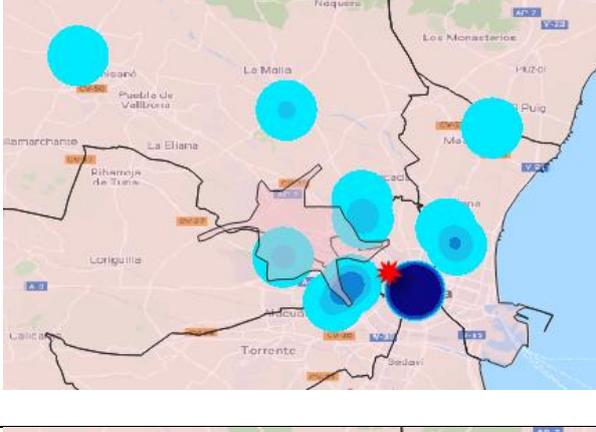
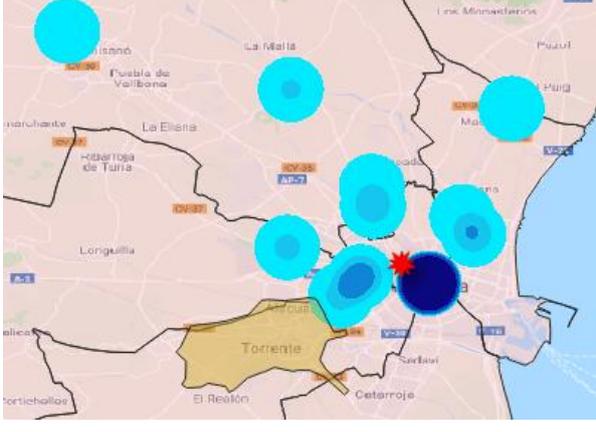
	<p>Alfa 7 Campanar</p>
	<p>Alfa 8 Paterna</p>
	<p>Alfa 10 Torrent</p>
	<p>Alfa 11 Buñol</p>

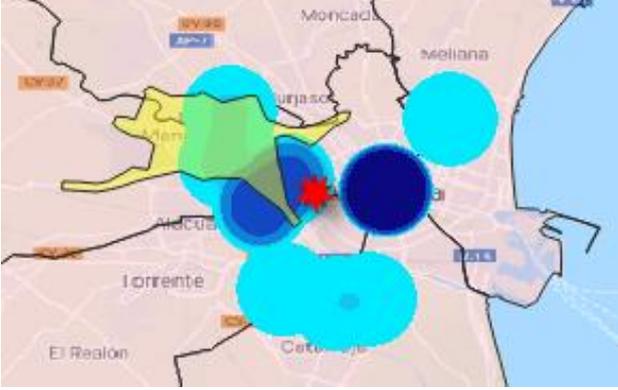
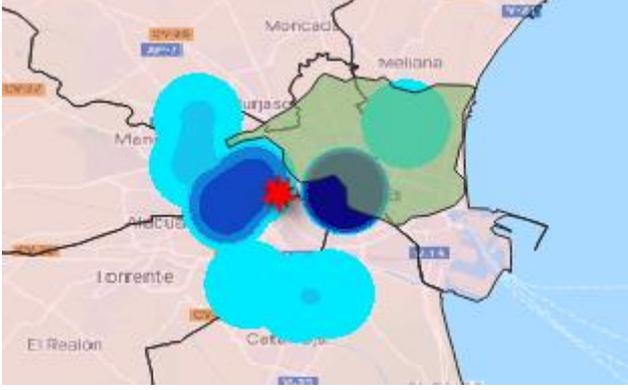
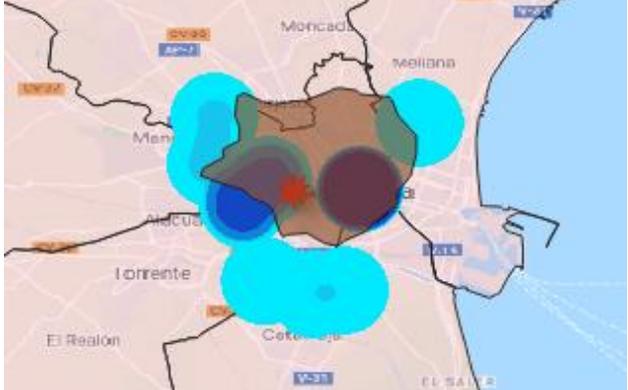
Desplazamientos de Alfa 2 Alfahuir	Mapa de isócronas desde la base del
	Alfa 1 Manises
	Alfa 2 Alfahuir
	Alfa 3 Campanar
	Alfa 4 Hospital General

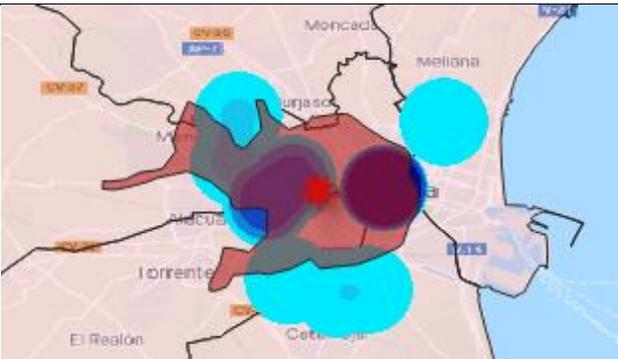
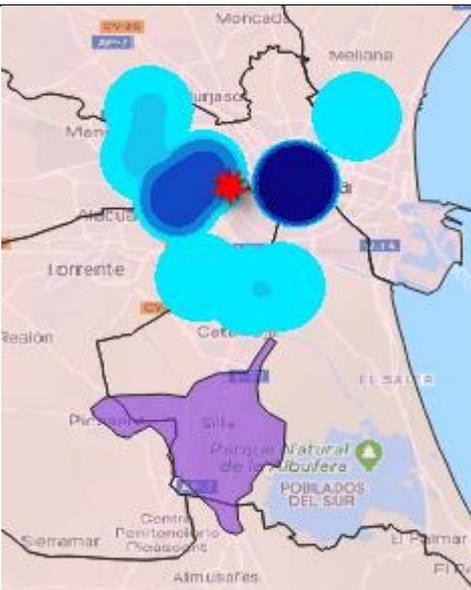
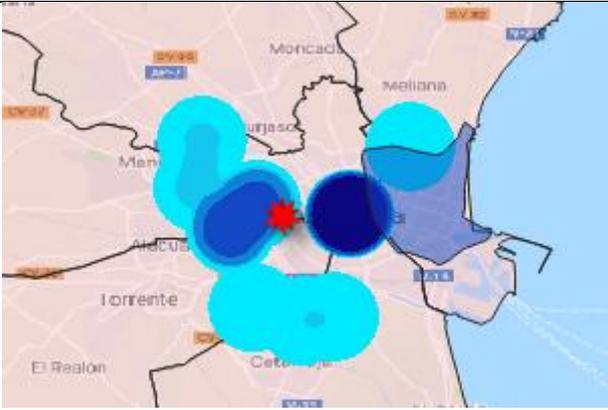
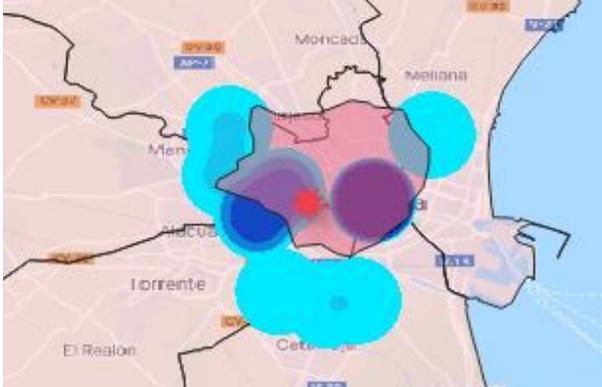
	<p>Alfa 5 Silla</p>
	<p>Alfa 6 Malvarrosa</p>
	<p>Alfa 7 Campanar</p>
	<p>Alfa 8 Paterna</p>

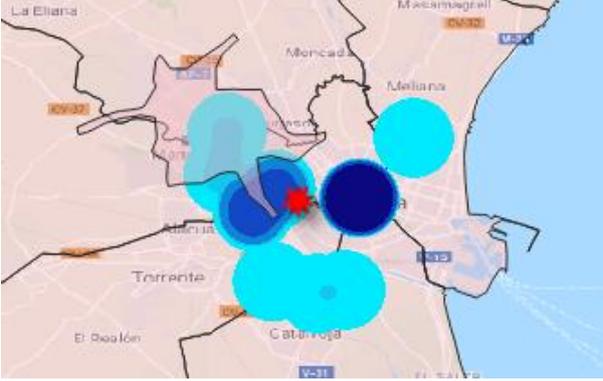
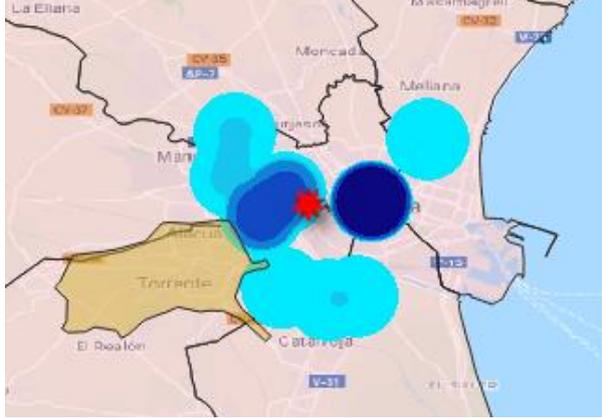
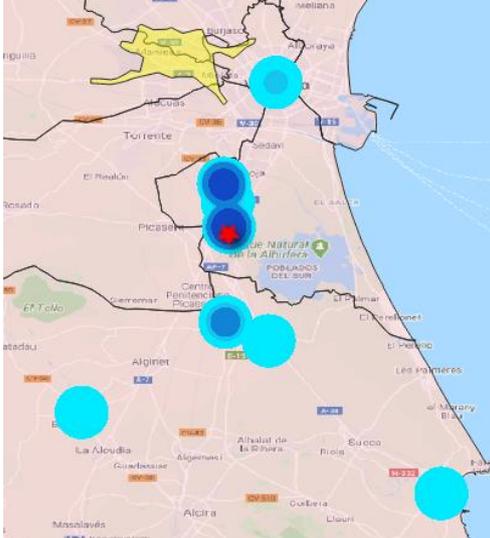
 <p>A map showing the distribution of Alfalfa 10 in the area of Torrent. The map features several circular isochrones in shades of blue and cyan, indicating the spread of the alfalfa. A red star marks the source location. The area includes municipalities like La Eliana, Barjano, and Torrente.</p>	<p>Alfa 10 Torrent</p>
 <p>A map showing the distribution of Alfalfa 11 in the area of Buñol. The map features several circular isochrones in shades of blue and cyan, indicating the spread of the alfalfa. A red star marks the source location. The area includes municipalities like Buñol, Chiva, and Torrente.</p>	<p>Alfa 11 Buñol</p>
<p>Desplazamientos de Alfa 3 Campanar</p>	<p>Mapa de isócronas desde la base del</p>
 <p>A map showing the distribution of Alfalfa 1 in the area of Manises. The map features several circular isochrones in shades of blue and cyan, indicating the spread of the alfalfa. A red star marks the source location. The area includes municipalities like Manises, La Eliana, and Torrente.</p>	<p>Alfa 1 Manises</p>
 <p>A map showing the distribution of Alfalfa 2 in the area of Alfahuir. The map features several circular isochrones in shades of blue and cyan, indicating the spread of the alfalfa. A red star marks the source location. The area includes municipalities like Alfahuir, La Eliana, and Torrente.</p>	<p>Alfa 2 Alfahuir</p>

	<p>Alfa 3 Campanar</p>
	<p>Alfa 4 Hospital General</p>
	<p>Alfa 5 Silla</p>

	<p>Alfa 6 Malvarrosa</p>
	<p>Alfa 7 Campanar</p>
	<p>Alfa 8 Paterna</p>
	<p>Alfa 10 Torrent</p>

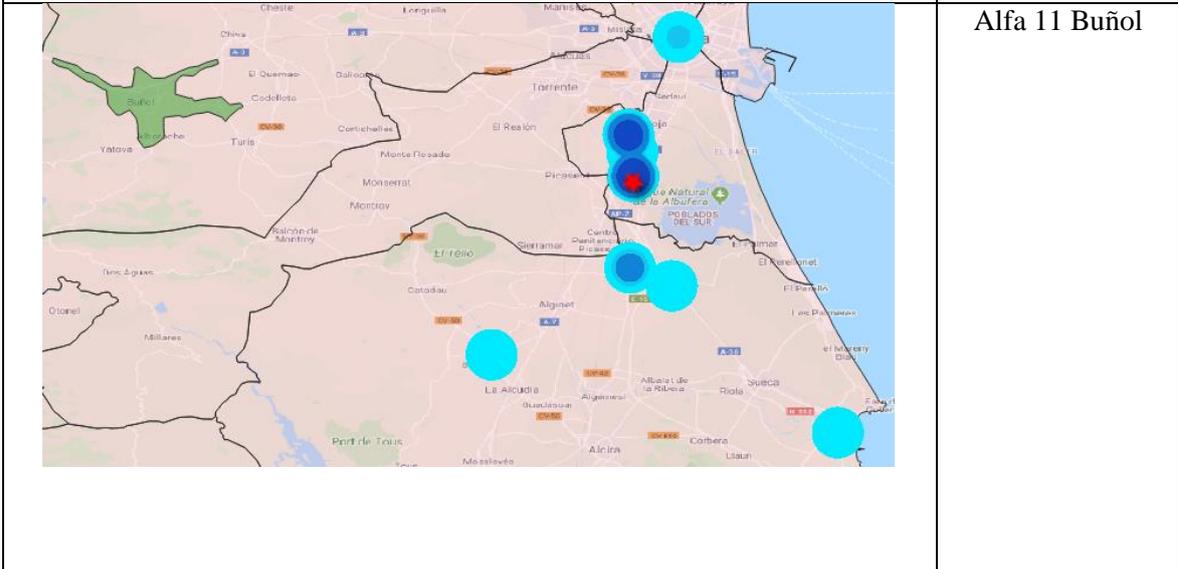
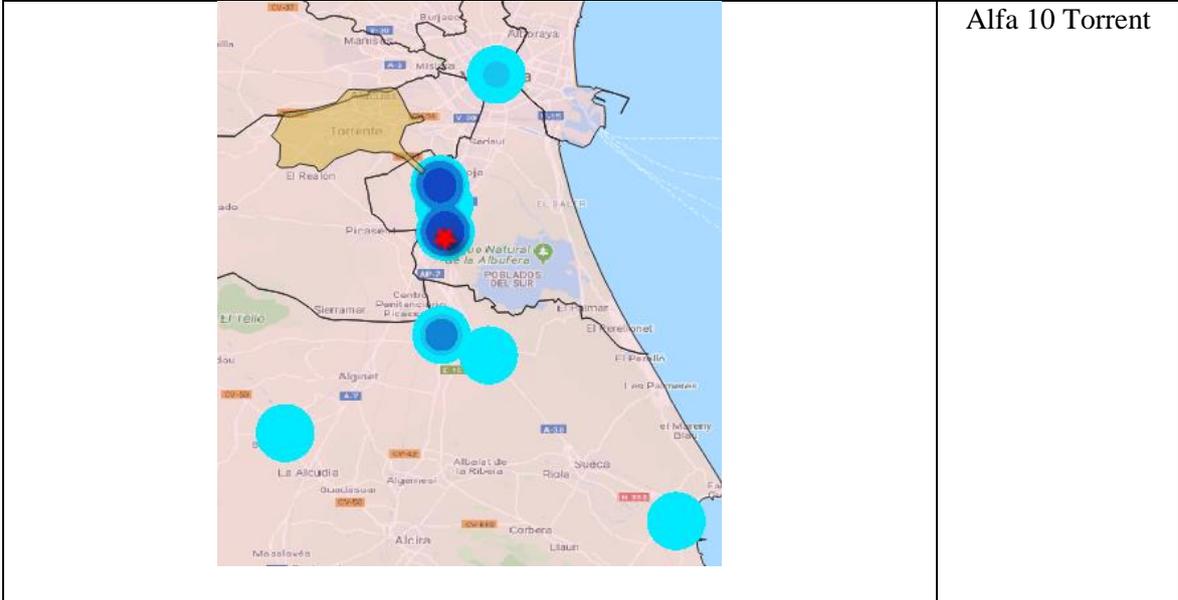
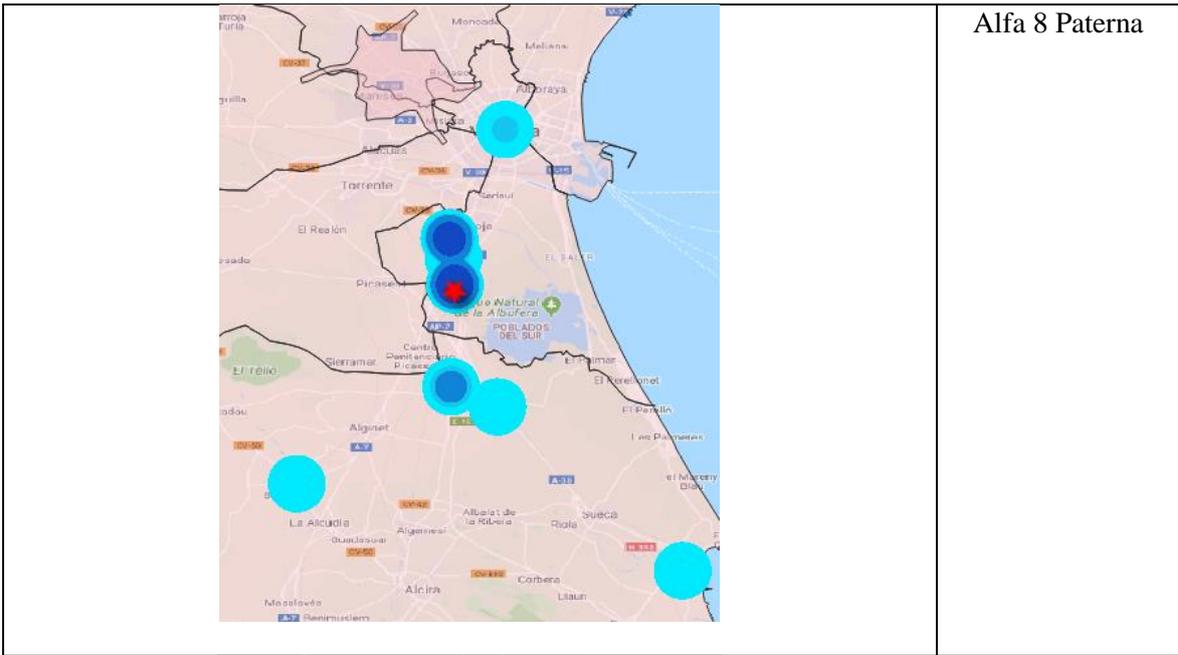
	<p>Alfa 11 Buñol</p>
<p>Desplazamientos de Alfa 4 Hospital General</p>	<p>Mapa de isócronas desde la base del</p>
	<p>Alfa 1 Manises</p>
	<p>Alfa 2 Alfahuir</p>
	<p>Alfa 3 Campanar</p>

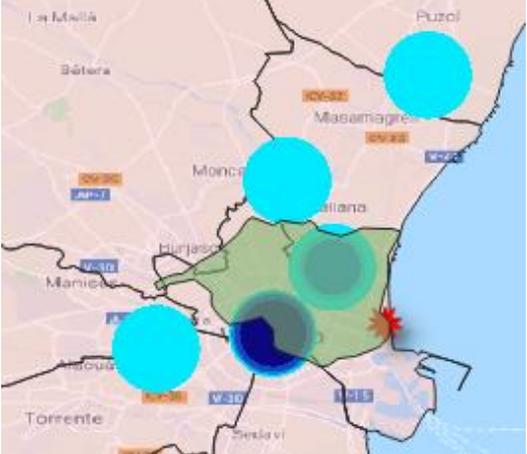
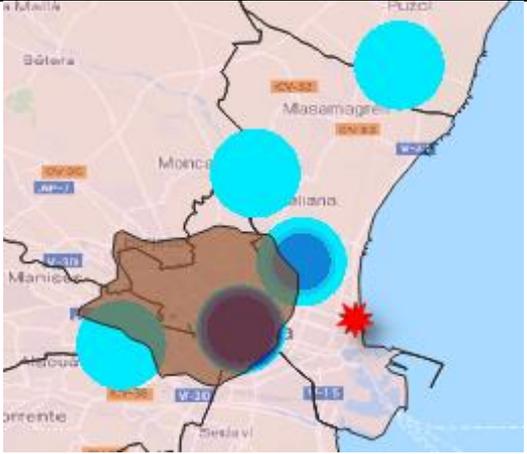
	<p>Alfa 4 Hospital General</p>
	<p>Alfa 5 Silla</p>
	<p>Alfa 6 Malvarrosa</p>
	<p>Alfa 7 Campanar</p>

	<p>Alfa 8 Paterna</p>
	<p>Alfa 10 Torrent</p>
	<p>Alfa 11 Buñol</p>
<p>Desplazamientos de Alfa 5 Silla</p>	
	<p>Mapa de isócronas desde la base del Alfa 1 Manises</p>

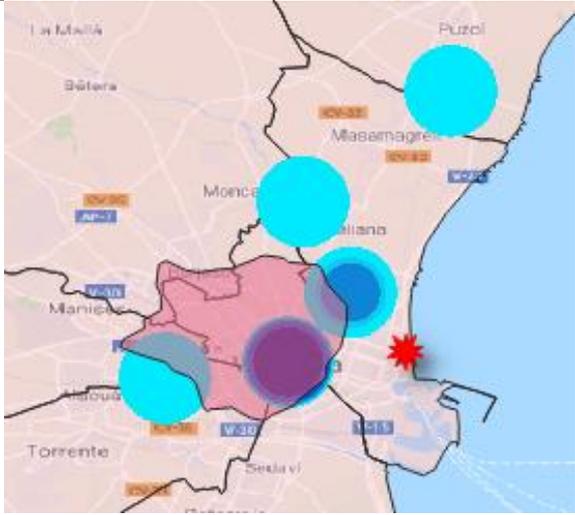
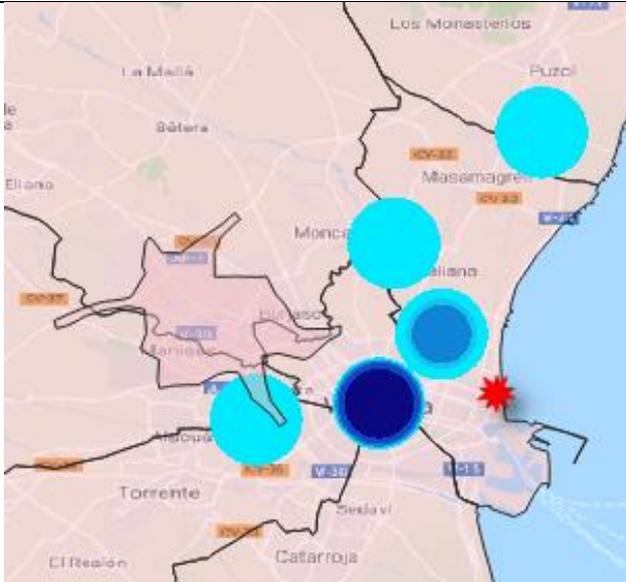
	<p>Alfa 2 Alfahuir</p>
	<p>Alfa 3 Campanar</p>
	<p>Alfa 4 Hospital General</p>

	<p>Alfa 5 Silla</p>
	<p>Alfa 6 Malvarrosa</p>
	<p>Alfa 7 Campanar</p>



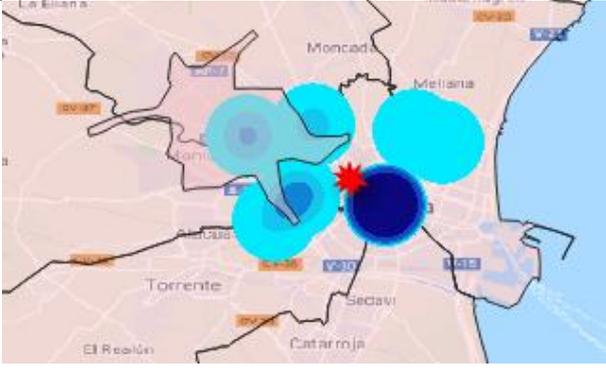
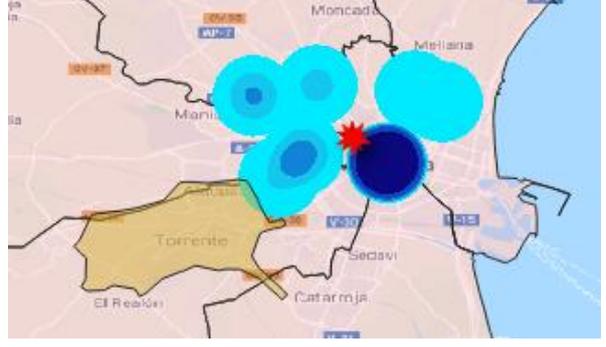
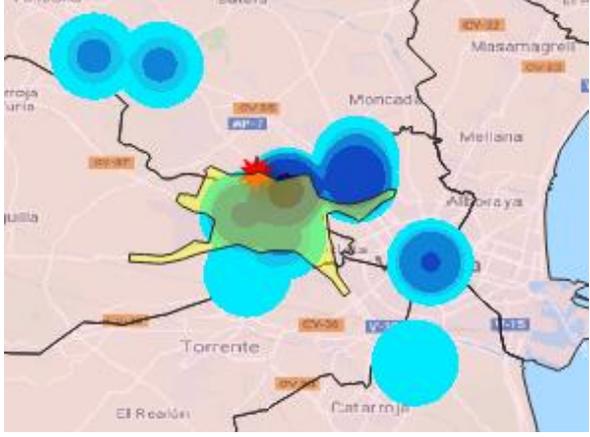
Desplazamientos de Alfa 6 Malvarrosa	Mapa de isócronas desde la base del Alfa 1 Manises
	Alfa 1 Manises
	Alfa 2 Alfahuir
	Alfa 3 Campanar

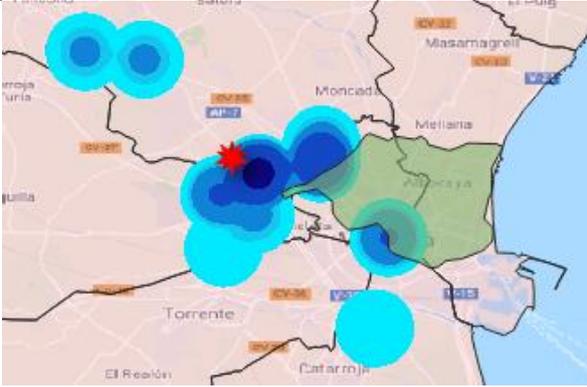
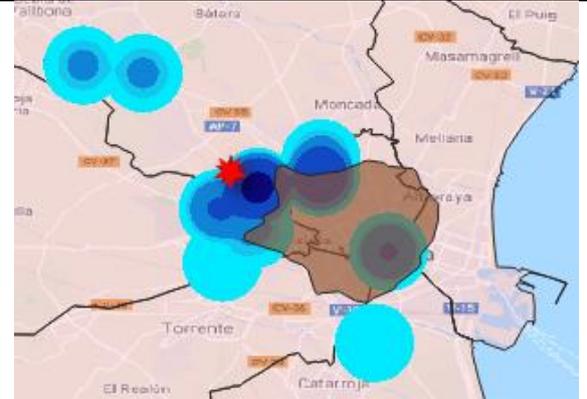
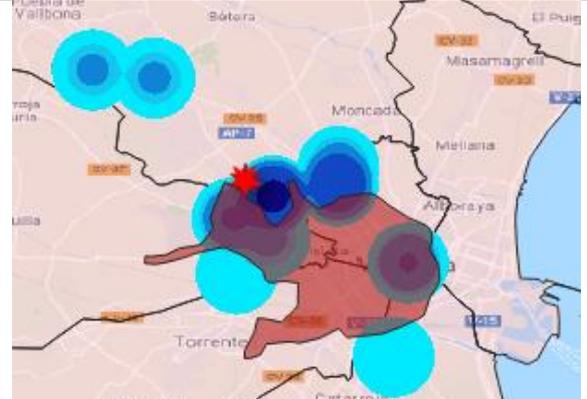
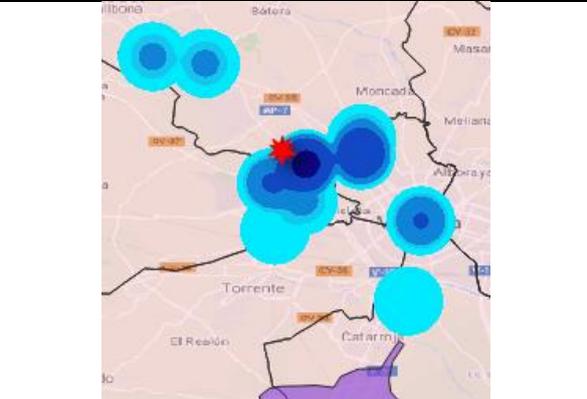
	<p>Alfa 4 Hospital General</p>
	<p>Alfa 5 Silla</p>
	<p>Alfa 6 Malvarrosa</p>

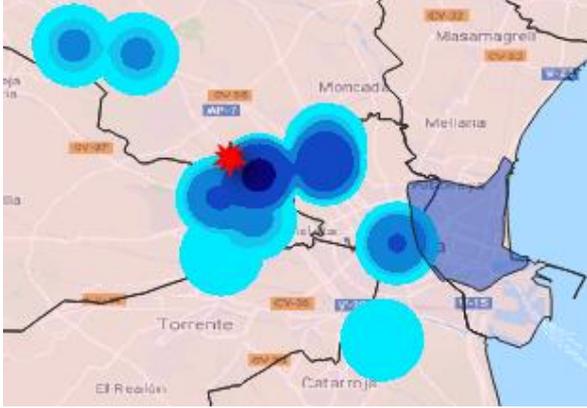
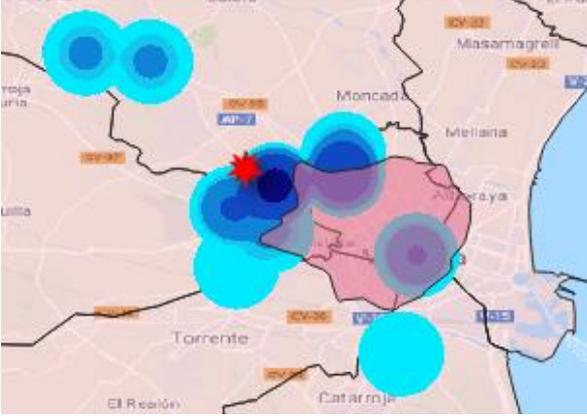
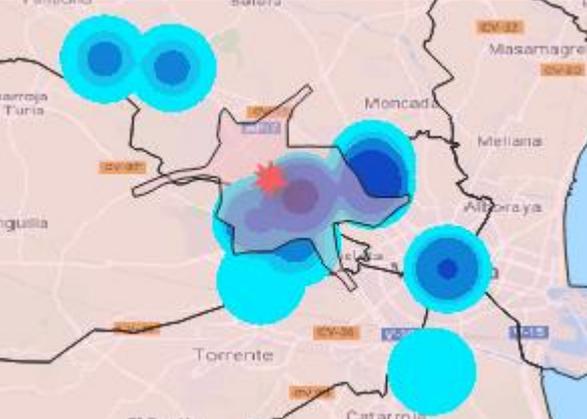
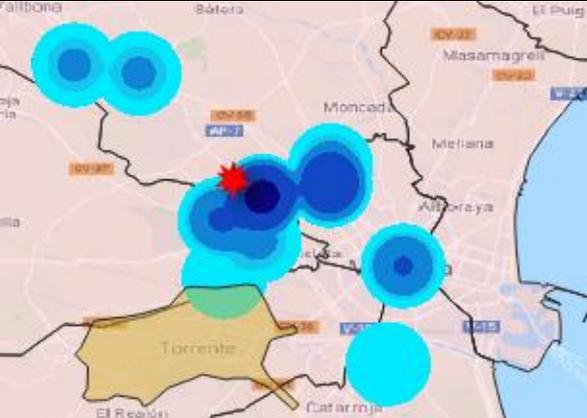
	<p>Alfa 7 Campanar</p>
	<p>Alfa 8 Paterna</p>
	<p>Alfa 10 Torrent</p>

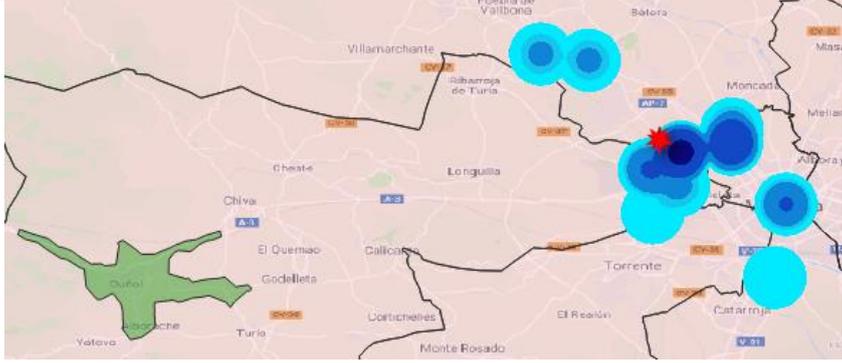
	<p>Alfa 11 Buñol</p>
<p>Desplazamientos de Alfa 7 Campanar</p>	<p>Mapa de isócronas desde la base del</p>
	<p>Alfa 1 Manises</p>
	<p>Alfa 2 Alfahuir</p>
	<p>Alfa 3 Campanar</p>

	<p>Alfa 4 Hospital General</p>
	<p>Alfa 5 Silla</p>
	<p>Alfa 6 Malvarrosa</p>
	<p>Alfa 7 Campanar</p>

	<p>Alfa 8 Paterna</p>
	<p>Alfa 10 Torrent</p>
	<p>Alfa 11 Buñol</p>
<p>Desplazamientos de Alfa 8 Paterna</p>	<p>Mapa de isócronas desde la base del</p>
	<p>Alfa 1 Manises</p>

	<p>Alfa 2 Alfahuir</p>
	<p>Alfa 3 Campanar</p>
	<p>Alfa 4 Hospital General</p>
	<p>Alfa 5 Silla</p>

	<p>Alfa 6 Malvarrosa</p>
	<p>Alfa 7 Campanar</p>
	<p>Alfa 8 Paterna</p>
	<p>Alfa 10 Torrent</p>

	<p>Alfa 11 Buñol</p>
<p>Desplazamientos de Alfa 10 Torrent</p>	<p>Mapa de isócronas desde la base del Alfa 1 Manises</p>
	
	<p>Alfa 2 Alfahuir</p>
	<p>Alfa 3 Campanar</p>

	<p>Alfa 4 Hospital General</p>
	<p>Alfa 5 Silla</p>
	<p>Alfa 6 Malvarrosa</p>
	<p>Alfa 7 Campanar</p>

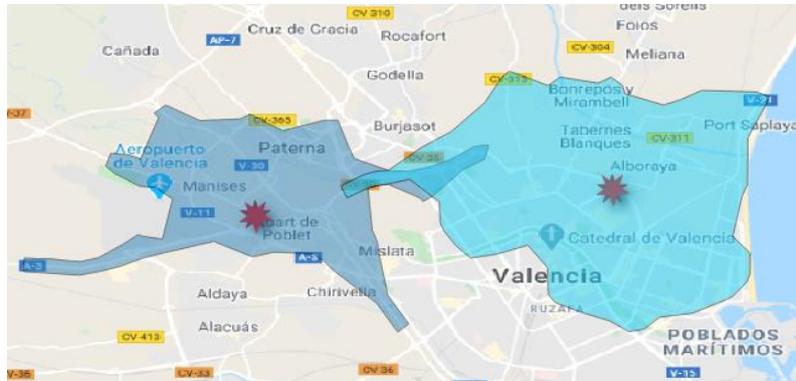
	<p>Alfa 8 Paterna</p>
	<p>Alfa 10 Torrent</p>
	<p>Alfa 11 Buñol</p>
<p>Desplazamientos de Alfa 11 Buñol</p>	
	<p>Mapa de isócronas desde la base del Alfa 1 Manises</p>
	<p>Alfa 2 Alfahuir</p>



	<p>Alfa 8 Paterna</p>
	<p>Alfa 10 Torrent</p>
	<p>Alfa 11 Buñol</p>

## Anexo 2. Análisis de los solapamientos entre cada par de mapas de isócronas de 7 minutos realizados desde las bases de los 10 Alfas

Alfa 1 Manises y Alfa 2 Alfahuir



fid	1
Nombre	Alfa 1
AA_MINS	
AA_MODE	driving-car
TOTAL_POP	92864
ISOCRONA 7 MIN ALFA 2 ALFAHUIR_area	1591468,7472555367
ISOCRONA 7 MIN ALFA 2 ALFAHUIR_pc	6,794981272957227

fid	1
Nombre	Alfa 2
AA_MINS	
AA_MODE	driving-car
TOTAL_POP	361106
ISOCRONA 7 MIN ALFA 1 MANISES_area	1591468,7472556736
ISOCRONA 7 MIN ALFA 1 MANISES_pc	3,7791768417411236

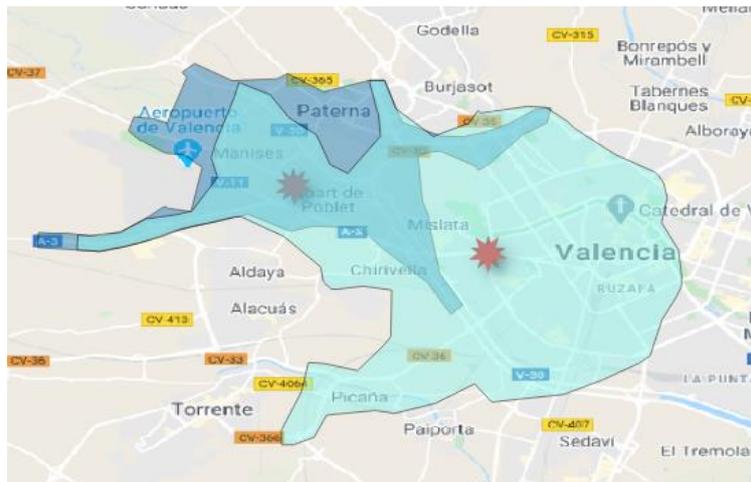
Alfa 1 Manises y Alfa 3 Campanar



fid	1
Nombre	Alfa 1
AA_MINS	
AA_MODE	driving-car
TOTAL_POP	92864
ISOCRONA 7 MIN ALFA 3 CAMPANAR_area	7131766,908944369
ISOCRONA 7 MIN ALFA 3 CAMPANAR_pc	30,44999951958966

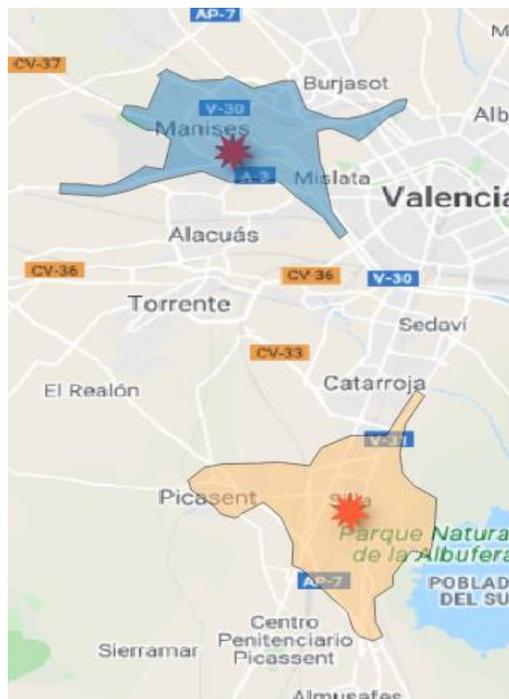
fid	1
Nombre	Alfa 3
AA_MINS	
AA_MODE	driving-car
TOTAL_POP	454341
ISOCRONA 7 MIN ALFA 1 MANISES_area	7131766,908942179
ISOCRONA 7 MIN ALFA 1 MANISES_pc	15,98168994973216

### Alfa 1 Manises y Alfa 4 Hospital General

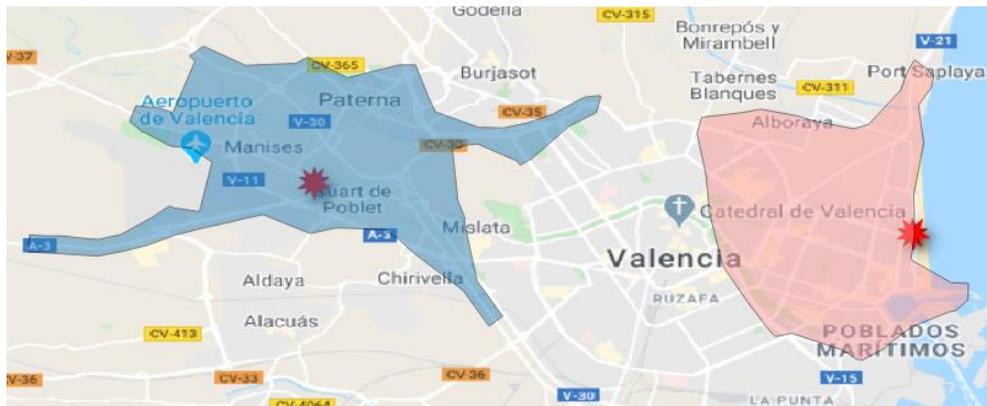


fid	1	fid	1
Nombre	Alfa 1	Nombre	Alfa 4
AA_MINS		AA_MINS	
AA_MODE	driving-car	AA_MODE	driving-car
TOTAL_POP	92864	TOTAL_POP	445122
ISOCRONA 7 MIN ALFA 4 HOSPITAL GENERAL_area	16172637,74439844	ISOCRONA 7 MIN ALFA 1 MANISES_area	16172637,744398713
ISOCRONA 7 MIN ALFA 4 HOSPITAL GENERAL_pc	69,05116471625158	ISOCRONA 7 MIN ALFA 1 MANISES_pc	28,695366814463785

### Alfa 1 Manises y Alfa 5 Silla



### Alfa 1 Manises y Alfa 6 Malvarrosa



### Alfa 1 Manises y Alfa 7 Campanar



fid	1
Nombre	Alfa 1
AA_MINS	
AA_MODE	driving-car
TOTAL_POP	92864
ISOCRONA 7 MIN ALFA 7 CAMPANAR_area	7131766,908944369
ISOCRONA 7 MIN ALFA 7 CAMPANAR_pc	30,44999951958966

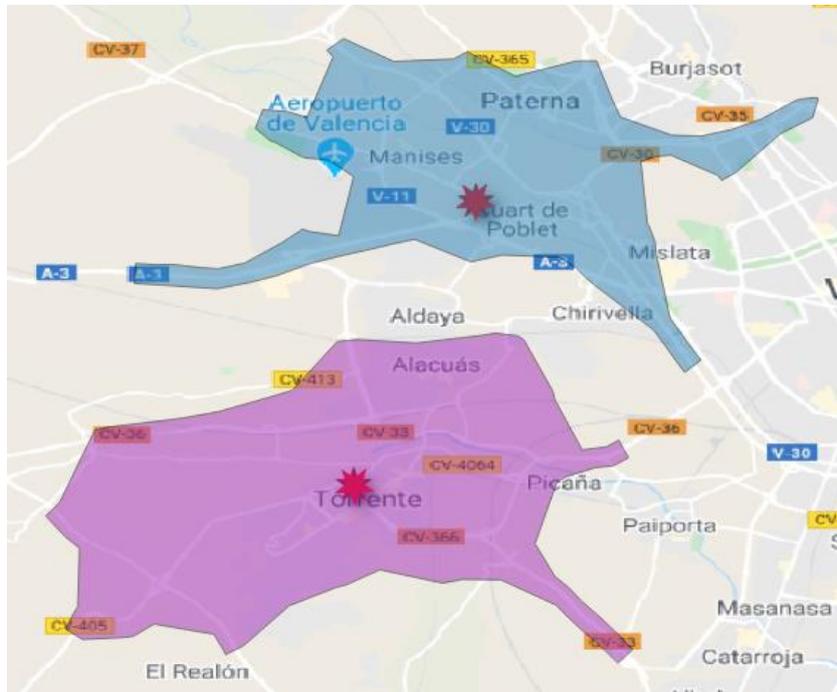
fid	1
Nombre	Alfa 7
AA_MINS	
AA_MODE	driving-car
TOTAL_POP	454341
ISOCRONA 7 MIN ALFA 1 MANISES_area	7131766,908942179
ISOCRONA 7 MIN ALFA 1 MANISES_pc	15,98168994973216

### Alfa 1 Manises y Alfa 8 Paterna



fid	1	fid	1
Nombre	Alfa 1	Nombre	Alfa 8
AA_MINS		AA_MINS	
AA_MODE	driving-car	AA_MODE	driving-car
TOTAL_POP	92864	TOTAL_POP	124808
ISOCRONA 7 MIN ALFA 8 PATERNA_area	17425478,352496024	ISOCRONA 7 MIN ALFA 1 MANISES_area	17425478,352495752
ISOCRONA 7 MIN ALFA 8 PATERNA_pc	74,40032943262067	ISOCRONA 7 MIN ALFA 1 MANISES_pc	50,233065796404425

### Alfa 1 Manises y Alfa 10 Torrent



### Alfa 1 Manises y Alfa 11 Buñol

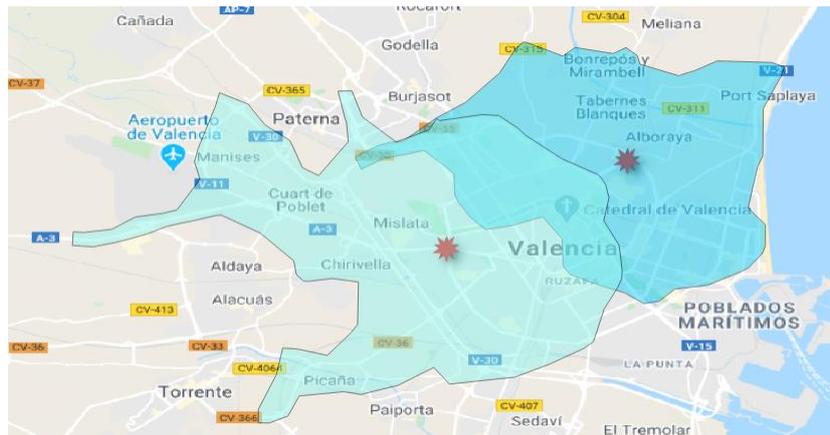


### Alfa 2 Alfahuir y Alfa 3 Campanar



fid	1	fid	1
Nombre	Alfa 2	Nombre	Alfa 3
AA_MINS	<input type="text"/>	AA_MINS	<input type="text"/>
AA_MODE	driving-car	AA_MODE	driving-car
TOTAL_POP	361106	TOTAL_POP	454341
ISOCRONA 7 MIN ALFA 3 CAMPANAR_area	21870399,41565598	ISOCRONA 7 MIN ALFA 2 ALFAHUIR_area	21870399,41565286
ISOCRONA 7 MIN ALFA 3 CAMPANAR_pc	51,93448324624622	ISOCRONA 7 MIN ALFA 2 ALFAHUIR_pc	49,00972606094483

### Alfa 2 Alfahuir y Alfa 4 Hospital General

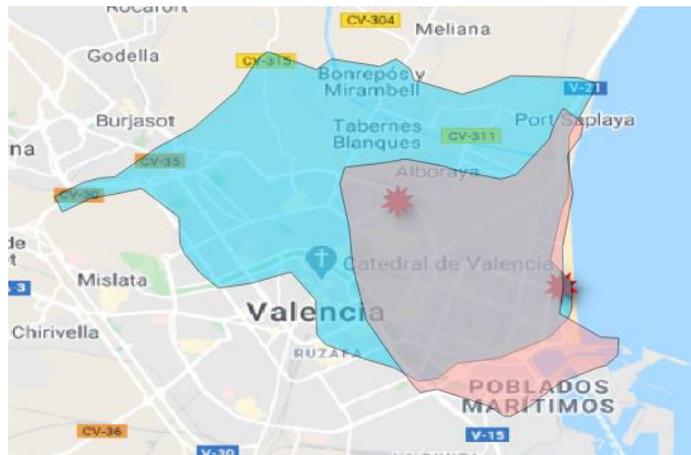


fid	1	fid	1
Nombre	Alfa 2	Nombre	Alfa 4
AA_MINS	<input type="text"/>	AA_MINS	<input type="text"/>
AA_MODE	driving-car	AA_MODE	driving-car
TOTAL_POP	361106	TOTAL_POP	445122
ISOCRONA 7 MIN ALFA 4 HOSPITAL GENERAL_area	11765771,06490952!	ISOCRONA 7 MIN ALFA 2 ALFAHUIR_area	11765771,064908925
ISOCRONA 7 MIN ALFA 4 HOSPITAL GENERAL_pc	27,93955559002282	ISOCRONA 7 MIN ALFA 2 ALFAHUIR_pc	20,876193599247554

### Alfa 2 Alfahuir y Alfa 5 Silla

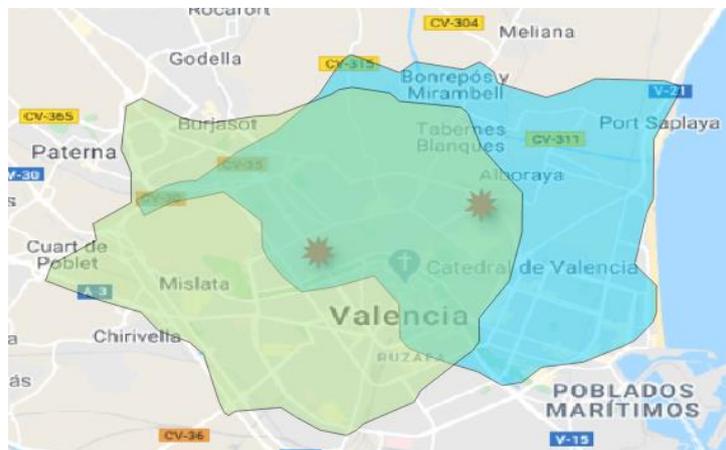


### Alfa 2 Alfahuir y Alfa 6 Malvarrosa



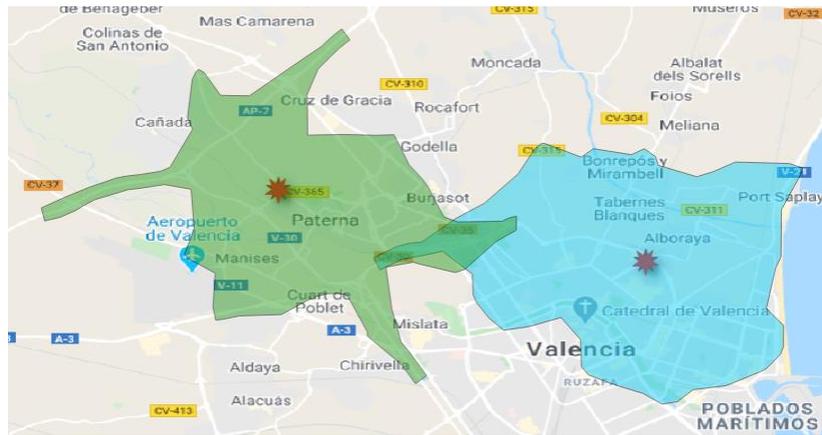
fid	1	fid	1
Nombre	Alfa 2	Nombre	Alfa 6
AA_MINS	<input type="text"/>	AA_MINS	<input type="text"/>
AA_MODE	driving-car	AA_MODE	driving-car
TOTAL_POP	361106	TOTAL_POP	208231
ISOCRONA 7 MIN ALFA 6 MALVARROSA_area	16838901,63335586	ISOCRONA 7 MIN ALFA 2 ALFAHUIR_area	16838901,63335812
ISOCRONA 7 MIN ALFA 6 MALVARROSA_pc	39,98645100814648	ISOCRONA 7 MIN ALFA 2 ALFAHUIR_pc	81,28189429329723

### Alfa 2 Alfahuir y Alfa 7 Campanar



fid	1	fid	1
Nombre	Alfa 2	Nombre	Alfa 7
AA_MINS	<input type="text"/>	AA_MINS	<input type="text"/>
AA_MODE	driving-car	AA_MODE	driving-car
TOTAL_POP	361106	TOTAL_POP	454341
ISOCRONA 7 MIN ALFA 7 CAMPANAR_area	21870399,41565598	ISOCRONA 7 MIN ALFA 2 ALFAHUIR_area	21870399,41565286
ISOCRONA 7 MIN ALFA 7 CAMPANAR_pc	51,93448324624622	ISOCRONA 7 MIN ALFA 2 ALFAHUIR_pc	49,00972606094483

### Alfa 2 Alfahuir y Alfa 8 Paterna



fid	1	fid	1
Nombre	Alfa 2	Nombre	Alfa 8
AA_MINS		AA_MINS	
AA_MODE	driving-car	AA_MODE	driving-car
TOTAL_POP	361106	TOTAL_POP	124808
ISOCRONA 7 MIN ALFA 8 PATERNA_area	2162486,820402156	ISOCRONA 7 MIN ALFA 2 ALFAHUIR_area	2162486,820402019
ISOCRONA 7 MIN ALFA 8 PATERNA_pc	5,135143323629028	ISOCRONA 7 MIN ALFA 2 ALFAHUIR_pc	6,233880099914377

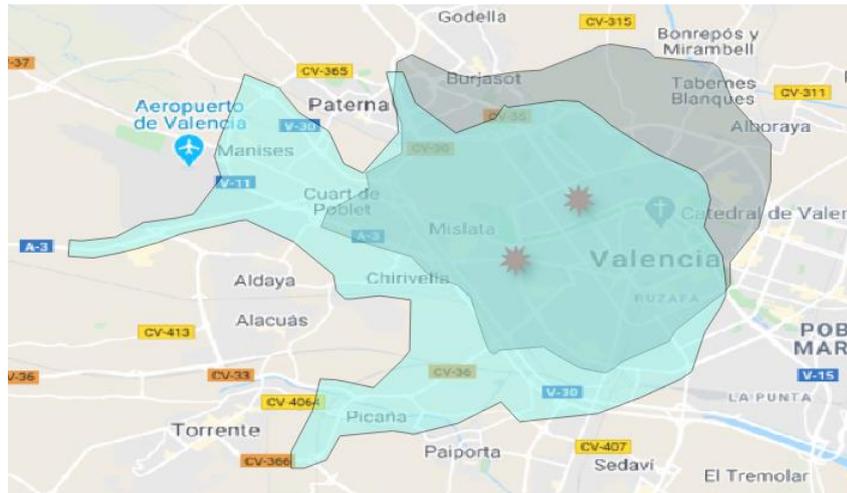
### Alfa 2 Alfahuir y Alfa 10 Torrent



### Alfa 2 Alfahuir y Alfa 11 Buñol



### Alfa 3 Campanar y Alfa 4 Hospital General



fid	1	fid	1
Nombre	Alfa 3	Nombre	Alfa 4
AA_MINS		AA_MINS	
AA_MODE	driving-car	AA_MODE	driving-car
TOTAL_POP	454341	TOTAL_POP	445122
ISOCRONA 7 MIN ALFA 4 HOSPITAL GENERAL_area	31812935,30184711	ISOCRONA 7 MIN ALFA 3 CAMPANAR_area	31812935,30185314
ISOCRONA 7 MIN ALFA 4 HOSPITAL GENERAL_pc	71,2901129378641	ISOCRONA 7 MIN ALFA 3 CAMPANAR_pc	56,44619401975113

### Alfa 3 Campanar y Alfa 5 Silla



### Alfa 3 Campanar y Alfa 6 Malvarrosa



fid	1	fid	1
Nombre	Alfa 3	Nombre	Alfa 6
AA_MINS	<input type="text"/>	AA_MINS	<input type="text"/>
AA_MODE	driving-car	AA_MODE	driving-car
TOTAL_POP	454341	TOTAL_POP	208231
ISOCRONA 7 MIN ALFA 6 MALVARROSA_area	5088465,1766238045	ISOCRONA 7 MIN ALFA 3 CAMPANAR_area	5088465,176624763
ISOCRONA 7 MIN ALFA 6 MALVARROSA_pc	11,402822583958073	ISOCRONA 7 MIN ALFA 3 CAMPANAR_pc	24,56217736804103

### Alfa 3 Campanar y Alfa 7 Campanar



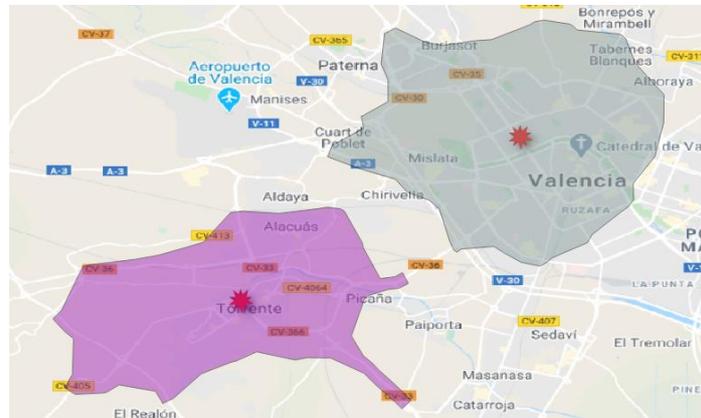
### Alfa 3 Campanar y Alfa 8 Paterna



fid	1
Nombre	Alfa 3
AA_MINS	
AA_MODE	driving-car
TOTAL_POP	454341
ISOCRONA 7 MIN ALFA 8 PATERNA_area	7795301,134919705
ISOCRONA 7 MIN ALFA 8 PATERNA_pc	17,46861435514311

fid	1
Nombre	Alfa 8
AA_MINS	
AA_MODE	driving-car
TOTAL_POP	124808
ISOCRONA 7 MIN ALFA 3 CAMPANAR_area	7795301,134919362
ISOCRONA 7 MIN ALFA 3 CAMPANAR_pc	22,47180059519608

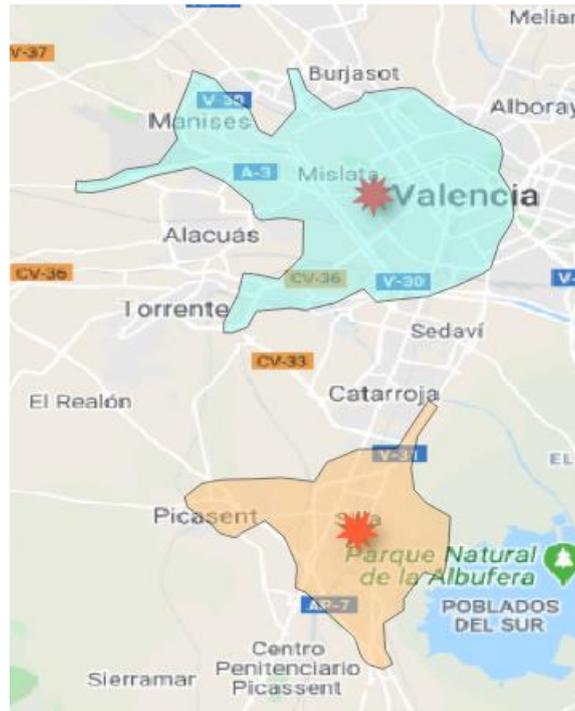
### Alfa 3 Campanar y Alfa 10 Torrent



### Alfa 3 Campanar y Alfa 11 Buñol



### Alfa 4 Hospital General y Alfa 5 Silla

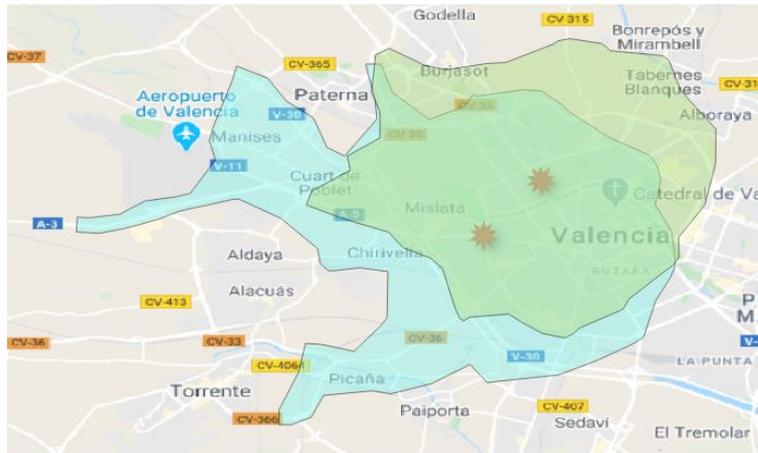


### Alfa 4 Hospital General y Alfa 6 Malvarrosa



fid	1	fid	1
Nombre	Alfa 4	Nombre	Alfa 6
AA_MINS	<input type="text"/>	AA_MINS	<input type="text"/>
AA_MODE	driving-car	AA_MODE	driving-car
TOTAL_POP	445122	TOTAL_POP	208231
ISOCRONA 7 MIN ALFA 6 MALVARROSA_area	1005589,79741213	ISOCRONA 7 MIN ALFA 4 HOSPITAL GENERAL_area	1005589,79741213
ISOCRONA 7 MIN ALFA 6 MALVARROSA_pc	1,78423387437943	ISOCRONA 7 MIN ALFA 4 HOSPITAL GENERAL_pc	4,85401277324114

### Alfa 4 Hospital General y Alfa 7 Campanar



fid	1
Nombre	Alfa 4
AA_MINS	
AA_MODE	driving-car
TOTAL_POP	445122
ISOCRONA 7 MIN ALFA 7 CAMPANAR_area	31812935,301853143
ISOCRONA 7 MIN ALFA 7 CAMPANAR_pc	56,44619401975113

fid	1
Nombre	Alfa 7
AA_MINS	
AA_MODE	driving-car
TOTAL_POP	454341
ISOCRONA 7 MIN ALFA 4 HOSPITAL GENERAL_area	31812935,30184713
ISOCRONA 7 MIN ALFA 4 HOSPITAL GENERAL_pc	71,2901129378641

### Alfa 4 Hospital General y Alfa 8 Paterna



fid	1
Nombre	Alfa 4
AA_MINS	
AA_MODE	driving-car
TOTAL_POP	445122
ISOCRONA 7 MIN ALFA 8 PATERNA_area	12785619,489012854
ISOCRONA 7 MIN ALFA 8 PATERNA_pc	22,685726780373233

fid	1
Nombre	Alfa 8
AA_MINS	
AA_MODE	driving-car
TOTAL_POP	124808
ISOCRONA 7 MIN ALFA 4 HOSPITAL GENERAL_area	12785619,489019152
ISOCRONA 7 MIN ALFA 4 HOSPITAL GENERAL_pc	36,857574411878474

### Alfa 4 Hospital General y Alfa 10 Torrent



fid	1	fid	1
Nombre	Alfa 4	Nombre	Alfa 10
AA_MINS		AA_MINS	
AA_MODE	driving-car	AA_MODE	driving-car
TOTAL_POP	445122	TOTAL_POP	103288
ISOCRONA 7 MIN ALFA 10 TORRENT_area	2489546,2215314955	ISOCRONA 7 MIN ALFA 4 HOSPITAL GENERAL_area	2489546,221530948
ISOCRONA 7 MIN ALFA 10 TORRENT_pc	4,41724121676755	ISOCRONA 7 MIN ALFA 4 HOSPITAL GENERAL_pc	7,130621279106541

### Alfa 4 Hospital General y Alfa 11 Buñol



### Alfa 5 Silla y Alfa 6 Malvarrosa



### Alfa 5 Silla y Alfa 7 Campanar



### Alfa 5 Silla y Alfa 8 Paterna



### Alfa 5 Silla y Alfa 10 Torrent



### Alfa 5 Silla y Alfa 11 Buñol



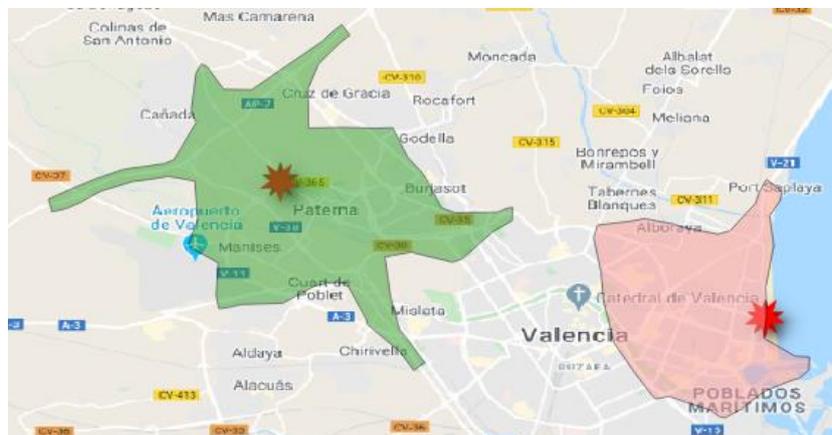
### Alfa 6 Malvarrosa y Alfa 7 Campanar



fid	1
Nombre	Alfa 6
AA_MINS	
AA_MODE	driving-car
TOTAL_POP	208231
ISOCRONA 7 MIN ALFA 7 CAMPANAR_area	5088465,176624763
ISOCRONA 7 MIN ALFA 7 CAMPANAR_pc	24,56217736804103

fid	1
Nombre	Alfa 7
AA_MINS	
AA_MODE	driving-car
TOTAL_POP	454341
ISOCRONA 7 MIN ALFA 6 MALVARROSA_area	5088465,1766238045
ISOCRONA 7 MIN ALFA 6 MALVARROSA_pc	11,402822583958073

### Alfa 6 Malvarrosa y Alfa 8 Paterna



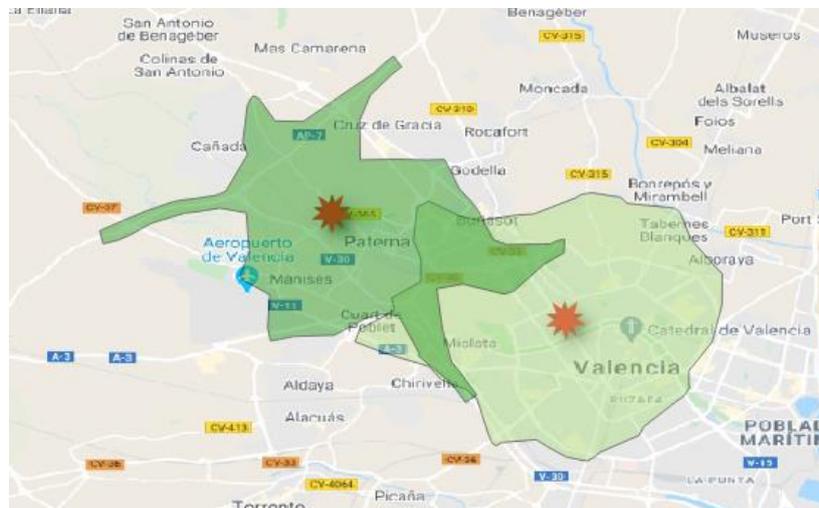
### Alfa 6 Malvarrosa y Alfa 10 Torrent



### Alfa 6 Malvarrosa y Alfa 11 Buñol



### Alfa 7 Campanar y Alfa 8 Paterna



fid	1
Nombre	Alfa 7
AA_MINS	
AA_MODE	driving-car
TOTAL_POP	454341
ISOCRONA 7 MIN ALFA 8 PATERNA_area	7795301,134919705
ISOCRONA 7 MIN ALFA 8 PATERNA_pc	17,46861435514311

fid	1
Nombre	Alfa 8
AA_MINS	
AA_MODE	driving-car
TOTAL_POP	124808
ISOCRONA 7 MIN ALFA 7 CAMPANAR_area	7795301,134919362
ISOCRONA 7 MIN ALFA 7 CAMPANAR_pc	22,47180059519608

### Alfa 7 Campanar y Alfa 10 Torrent



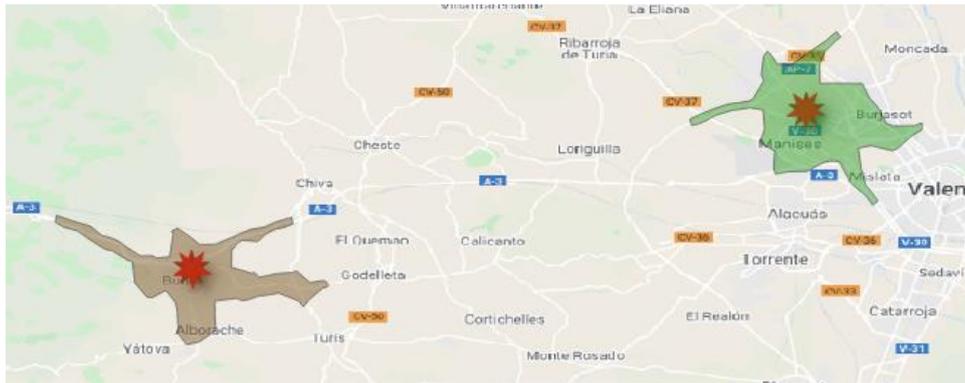
### Alfa 7 Campanar y Alfa 11 Buñol



### Alfa 8 Paterna y Alfa 10 Torrent



### Alfa 8 Paterna y Alfa 11 Buñol



### Alfa 10 Torrent y Alfa 11 Buñol



### Anexo 3. Código del algoritmo sin reubicación

```
import pandas as pd

Tabla1 = pd.read_csv("Tabla1. TABLA DE GESTION.txt", sep = "\t")

Tabla2 = pd.read_csv("Tabla2. MATRIZ BASES - LOCALIZACIONES.txt", sep = "\t")

Tabla3 = pd.read_csv("Tabla3. MATRIZ LOCALIZACIONES - HOSPITALES.txt", sep = "\t")

Tabla4 = pd.read_csv("Tabla4. BASES HABITUALES DE LAS AMBULANCIAS.txt", sep = "\t")

Tabla5 = pd.read_csv("Tabla5. MATRIZ HOSPITALES - BASES.txt", sep = "\t")

Tabla9 = pd.read_csv("Tabla9. TABLA DE GESTION ACTUALIZADA.txt", sep = "\t")

asignada = [ "Campanar I", "Paterna", "Silla", "Alfahuir", "Malvarrosa", "Torrent", "Bunyol", "Campanar II", "Hospital General", "Manises"]

inactiva = ["A3", "A8", "A5", "A2", "A6", "A10", "A11", "A7", "A4", "A1"]

preparandose = []
en_preparacion = []
libre = []
ocupada = []
pendiente = []
regresando = []
esperando_ambulancia = []
momento = 0
tr = 3
llamada = 0
index = -1
while momento <= 500:
    #buscamos la emergencia que se produce en el momento dado
    index = -1
    for emer in Tabla1["Momento_emergencia"]:
        index = index + 1
        if momento == emer:
            llamada = llamada + 1
            #asignamos a la llamada un número
```

```

Tabla9.loc[index, "Llamada"] = llamada
#identificamos el lugar de la emergencia
lugar = Tabla1.loc[index, "Lugar"]
print("\n En el momento " + str(momento) + " se produce la
llamada número " + str(llamada) + " en el lugar " + str(lugar))

#recopilamos los tiempos de llegada al lugar de la
emergencia desde las bases en las que hay ambulancias
tiempo = []
for item in asignada:
    tiempo.append(int(Tabla2[Tabla2["Base"] ==
item][str(lugar)]))
#si hay alguna base con ambulancia, elegimos la más
cercana
if tiempo != []:
    minimo = min(tiempo)
    print("Tiempo de trayecto mínimo es de " + str(minimo)
+ " minutos")
    posic = tiempo.index(minimo)
    base_cercana = asignada[posic]
    print("La base más cercana es " + base_cercana)
#determinamos la ambulancia para asignar a la
emergencia
posicion = asignada.index(base_cercana)
ambulancia_asignada = inactiva[posicion]
print("Ambulancia asignada es la " +
ambulancia_asignada)
#asignamos la ambulancia a la emergencia
Tabla9.loc[index, "Ambulancia_asignada"] =
ambulancia_asignada
#actualizamos todas las listas
inactiva.remove(ambulancia_asignada)
preparandose.append(ambulancia_asignada)
asignada.remove(base_cercana)
en_preparacion.append(base_cercana)
#asignamos el momento en el que la ambulancia va a
pasar a estar preparandose
cuenta = momento
Tabla9.loc[index, "Cambio_inactiva_preparandose"] =
cuenta

```

```

        #asignamos el tiempo de trayecto desde la base hasta
el lugar de la emergencia
        Tabla9.loc[index, "Tiempo_trayecto_base_emergencia"] =
minimo

        #asignamos el momento en el que la ambulancia va a
pasar a estar ocupada
        cuenta = momento + tr
        Tabla9.loc[index, "Cambio_preparandose_ocupada"] =
cuenta

        #si no hay ninguna base con ambulancia
        else:
            print("No hay ambulancias para atender la emergencia "
+ str(llamada))
        else:
            pass

        #buscamos si se produce un cambio de ambulancia de preparandose a
ocupada
        index = -1
        for cambio1 in Tabla9["Cambio_preparandose_ocupada"]:
            index = index + 1
            #si hay cambio de ambulancia de preparandose a ocupada
            if momento == cambio1:
                #determinamos la ambulancia de cambio y la base que ocupa
                llamada1 = Tabla9.loc[index, "Llamada"]
                ambulancia_de_cambio = Tabla9.loc[index,
"Ambulancia_asignada"]
                print("\n En el momento " + str(momento) + " ambulancia "
+ str(ambulancia_de_cambio) + " pasa a estar ocupada")
                posicion = preparandose.index(ambulancia_de_cambio)
                base_de_cambio = en_preparacion[posicion]
                print("Base " + str(base_de_cambio) + " pasa a estar
libre")

                #actualizamos todas las listas
                preparandose.remove(ambulancia_de_cambio)
                ocupada.append(ambulancia_de_cambio)
                en_preparacion.remove(base_de_cambio)
                libre.append(base_de_cambio)

            #se vuelve a poner en marcha el contador de tiempo para la
emergencia

```

```

        trayecto_ida = Tabla9.loc[index,
"Tiempo_trayecto_base_emergencia"]

        tiempo_respuesta = tr + trayecto_ida

        #calculamos el tiempo de respuesta para la llamada y lo
ponemos en la tabla de gestión

        Tabla9.loc[index, "Tiempo_respuesta"] = tiempo_respuesta

        print("Tiempo de respuesta para la llamada " +
str(llamada1) + " es de " + str(tiempo_respuesta) + " minutos")

        #determinamos el hospital más cercano al lugar de la
emergencia

        lugar = Tabla1.loc[index, "Lugar"]

        tiempos = []

        for item in Tabla3[str(lugar)]:

            tiempos.append(item)

        minimo = min(tiempos)

        index1 = tiempos.index(minimo)

        hospital = Tabla3.loc[index1, "Hospital"]

        print("El hospital asignado es " + str(hospital))

        #asignamos el hospital

        Tabla9.loc[index, "Hospital"] = hospital

        #determinamos el momento en el que la ambulancia va a
dejar de estar ocupada

        duracion_in_situ = Tabla1.loc[index, "Duracion_in_situ"]

        trayecto_hospital = minimo

        #asignamos el tiempo del trayecto hasta el hospital

        Tabla9.loc[index, "Tiempo_trayecto_emergencia_hospital"] =
trayecto_hospital

        cuenta = momento + trayecto_ida + duracion_in_situ +
trayecto_hospital

        #asignamos el momento de cambio de ocupada a pendiente

        Tabla9.loc[index, "Cambio_ocupada_pendiente"] = cuenta

        #si no hay cambio de ambulancia de preparandose a ocupada
else:

            pass

        #buscamos si se produce un cambio de ambulancia de ocupada a
pendiente

        index = -1

        for cambio2 in Tabla9["Cambio_ocupada_pendiente"]:

```

```

index = index + 1

#si hay cambio de ambulancia de ocupada a pendiente
if momento == cambio2:
    ambulancia_de_cambio = Tabla9.loc[index,
"Ambulancia_asignada"]

    #determinamos el hospital donde ambulancia ha dejado al
paciente

    hospital = Tabla9.loc[index, "Hospital"]

    print("\n En el momento " + str(momento) + " ambulancia "
+ str(ambulancia_de_cambio) + " pasa a estar pendiente en el hospital
" + str(hospital))

    #actualizamos las listas
    ocupada.remove(ambulancia_de_cambio)
    pendiente.append(ambulancia_de_cambio)

    base_habit = Tabla4.loc[Tabla4["Ambulancia"] ==
ambulancia_de_cambio, "Base"].values
    base_habitual = base_habit[0]

    print("Enviar la ambulancia " + str(ambulancia_de_cambio)
+ " a su base habitual " + str(base_habitual))

    Tabla9.loc[index, "Base_regreso"] = base_habitual

    #actualizamos todas las listas
    pendiente.remove(ambulancia_de_cambio)
    regresando.append(ambulancia_de_cambio)
    libre.remove(base_habitual)
    esperando_ambulancia.append(base_habitual)

    print("En el momento " + str(momento) + " ambulancia " +
str(ambulancia_de_cambio) + " pasa a estar regresando a la base " +
str(base_habitual))

    cuenta = momento

    Tabla9.loc[index, "Cambio_pendiente_regresando"] = cuenta

    trayecto_regreso = int(Tabla5.loc[Tabla5["Base"] ==
base_habitual, str(hospital)])

    Tabla9.loc[index, "Tiempo_trayecto_hospital_base"] =
trayecto_regreso

    cuenta = cuenta + trayecto_regreso

    Tabla9.loc[index, "Cambio_regresando_inactiva"] = cuenta

#si no hay cambio de ambulancia de ocupada a pendiente
else:
    pass

```

```

#buscamos si se produce un cambio de ambulancia de regresando a
inactiva

index = -1

for cambio3 in Tabla9["Cambio_regresando_inactiva"]:

    index = index + 1

    #si hay cambio de ambulancia de regresando a inactiva

    if momento == cambio3:

        ambulancia_de_cambio = Tabla9.loc[index,
"Ambulancia_asignada"]

        base_regreso = Tabla9.loc[index, "Base_regreso"]

        #actualizamos todas las listas

        regresando.remove(ambulancia_de_cambio)

        inactiva.append(ambulancia_de_cambio)

        esperando_ambulancia.remove(base_regreso)

        asignada.append(base_regreso)

        print("\n En el momento " + str(momento) + " ambulancia "
+ str(ambulancia_de_cambio) + " pasa a estar inactiva")

        print("En el momento " + str(momento) + " base " +
str(base_regreso) + " pasa a estar asignada")

        #si no hay cambio de ambulancia de regresando a inactiva

        else:

            pass

        #aumentamos la cuenta del algoritmo en 1 unidad

        momento = momento + 1

print("\n")

print(Tabla9)

Tabla9.to_csv("Tabla9 SIN REUBICACIÓN")

```

## Anexo 4. Código del algoritmo con reubicación

```
import pandas as pd
#definimos el algoritmo de asignación de la base de regreso
def asignacion_base():
    #comprobar si la base habitual de la ambulancia pendiente está libre
    base_hab = Tabla4[Tabla4["Ambulancia"] == ambulancia_de_cambio]["Base"].values
    base_habitual = base_hab[0]
    #si la base habitual de la ambulancia pendiente está libre
    if base_habitual in libre:
        print("Enviar la ambulancia " + str(ambulancia_de_cambio) + " a su base habitual " + str(base_habitual))
        Tabla9.loc[index, "Base_regreso"] = base_habitual
        #actualizamos todas las listas
        pendiente.remove(ambulancia_de_cambio)
        regresando.append(ambulancia_de_cambio)
        libre.remove(base_habitual)
        esperando_ambulancia.append(base_habitual)
        print("En el momento " + str(momento) + " ambulancia " + str(ambulancia_de_cambio) + " pasa a estar regresando a la base " + str(base_habitual))
        cuenta = momento
        Tabla9.loc[index, "Cambio_pendiente_regresando"] = cuenta
        trayecto_regreso = int(Tabla5.loc[Tabla5["Base"] == base_habitual, str(hospital)])
        Tabla9.loc[index, "Tiempo_trayecto_hospital_base"] = trayecto_regreso
        cuenta = cuenta + trayecto_regreso
        Tabla9.loc[index, "Cambio_regresando_inactiva"] = cuenta
    #si la base habitual de la ambulancia pendiente no está libre
    else:
        if base_habitual in en_preparacion:
            posic = en_preparacion.index(base_habitual)
            amb_ocupa_base = preparandose[posic]
        elif base_habitual in asignada:
            posic = asignada.index(base_habitual)
```

```

        amb_ocupa_base = inactiva[posic]
    else:
        posic = esperando_ambulancia.index(base_habitual)
        amb_ocupa_base = regresando[posic]

        base_hab_amb = Tabla4[Tabla4["Ambulancia"] ==
amb_ocupa_base]["Base"].values

        base_habitual_ambul_ocupa_lugar = base_hab_amb[0]

        #si la base habitual de la ambulancia que ocupa su lugar está
libre

        if base_habitual_ambul_ocupa_lugar in libre:

            print("Enviar la ambulancia " + str(ambulancia_de_cambio)
+ " a la base habitual de la que ocupa su lugar " +
str(base_habitual_ambul_ocupa_lugar))

            Tabla9.loc[index, "Base_regreso"] =
base_habitual_ambul_ocupa_lugar

            #actualizamos todas las listas

            pendiente.remove(ambulancia_de_cambio)

            regresando.append(ambulancia_de_cambio)

            libre.remove(base_habitual_ambul_ocupa_lugar)

esperando_ambulancia.append(base_habitual_ambul_ocupa_lugar)

        print("En el momento " + str(momento) + " ambulancia " +
str(ambulancia_de_cambio) + " pasa a estar regresando a la base " +
str(base_habitual_ambul_ocupa_lugar))

        cuenta = momento

        Tabla9.loc[index, "Cambio_pendiente_regresando"] = cuenta

        trayecto_regreso = int(Tabla5.loc[Tabla5["Base"] ==
base_habitual_ambul_ocupa_lugar, str(hospital)])

        Tabla9.loc[index, "Tiempo_trayecto_hospital_base"] =
trayecto_regreso

        cuenta = cuenta + trayecto_regreso

        Tabla9.loc[index, "Cambio_regresando_inactiva"] = cuenta

        #si la base habitual de la ambulancia que ocupa su lugar no
está libre

    else:

        #buscamos la base libre más cercana a la base habitual de
la ambulancia pendiente

        tiempos = []

        for item in libre:

```

```

        tiempos.append(int(Tabla7[Tabla7["Base"] ==
item][str(base_habitual)]))

        minimo = min(tiempos)

        posicion = tiempos.index(minimo)

        base_libre_cercana = libre[posicion]

        print("Enviar la ambulancia " + str(ambulancia_de_cambio)
+ " a la base libre más cercana a su base habitual " +
str(base_libre_cercana))

        Tabla9.loc[index, "Base_regreso"] = base_libre_cercana

        #actualizamos todas las listas

        pendiente.remove(ambulancia_de_cambio)

        regresando.append(ambulancia_de_cambio)

        libre.remove(base_libre_cercana)

        esperando_ambulancia.append(base_libre_cercana)

        print("En el momento " + str(momento) + " ambulancia " +
str(ambulancia_de_cambio) + " pasa a estar regresando a la base " +
str(base_libre_cercana))

        cuenta = momento

        Tabla9.loc[index, "Cambio_pendiente_regresando"] = cuenta

        trayecto_regreso = minimo

        Tabla9.loc[index, "Tiempo_trayecto_hospital_base"] =
trayecto_regreso

        cuenta = cuenta + trayecto_regreso

        Tabla9.loc[index, "Cambio_regresando_inactiva"] = cuenta

Tabla1 = pd.read_csv("Tabla1. TABLA DE GESTION.txt", sep = "\t")

Tabla2 = pd.read_csv("Tabla2. MATRIZ BASES - LOCALIZACIONES.txt", sep
= "\t")

Tabla3 = pd.read_csv("Tabla3. MATRIZ LOCALIZACIONES - HOSPITALES.txt",
sep = "\t")

Tabla4 = pd.read_csv("Tabla4. BASES HABITUALES DE LAS
AMBULANCIAS.txt", sep = "\t")

Tabla5 = pd.read_csv("Tabla5. MATRIZ HOSPITALES - BASES.txt", sep =
"\t")

Tabla6 = pd.read_csv("Tabla6. CANDIDATOS.txt", sep = "\t")

Tabla7 = pd.read_csv("Tabla7. MATRIZ BASES - BASES.txt", sep = "\t")

Tabla8 = pd.read_csv("Tabla8. POBLACION CUBIERTA.txt", sep = "\t")

Tabla9 = pd.read_csv("Tabla9. TABLA DE GESTION ACTUALIZADA.txt", sep =
"\t")

```

```

asignada = [ "Campanar I", "Paterna", "Silla", "Alfahuir",
"Malvarrosa", "Torrent", "Bunyol", "Campanar II", "Hospital General",
"Manises"]

inactiva = ["A3", "A8", "A5", "A2", "A6", "A10", "A11", "A7", "A4",
"A1"]

libre = []

ocupada = []

preparandose = []

en_preparacion = []

pendiente = []

regresando = []

esperando_ambulancia = []

momento = 0

tr = 3

llamada = 0

cuenta_reubicaciones = 0

while momento <= 500:

    #buscamos la emergencia que se produce en el momento dado

    index = -1

    for emer in Tabla1["Momento_emergencia"]:

        index = index + 1

        if momento == emer:

            llamada = llamada + 1

            #asignamos a la llamada un número

            Tabla9.loc[index, "Llamada"] = llamada

            #identificamos el lugar de la emergencia

            lugar = Tabla1.loc[index, "Lugar"]

            print("\nEn el momento " + str(momento) + " se produce la
llamada número " + str(llamada) + " en el lugar " + str(lugar))

            #recopilamos los tiempos de llegada al lugar de la
emergencia desde las bases en las que hay ambulancias

            tiempo = []

            for item in asignada:

                tiempo.append(int(Tabla2[Tabla2["Base"] ==
item][str(lugar)]))

            #si hay alguna base con ambulancia, elegimos la más
cercana

```

```

        if tiempo != []:
            minimo = min(tiempo)
            print("Tiempo de trayecto mínimo es de " + str(minimo)
+ " minutos")
            posic = tiempo.index(minimo)
            base_cercana = asignada[posic]
            print("La base más cercana es " + base_cercana)
            #determinamos la ambulancia para asignar a la
emergencia
            posicion = asignada.index(base_cercana)
            ambulancia_asignada = inactiva[posicion]
            print("Ambulancia asignada es la " +
ambulancia_asignada)
            #asignamos la ambulancia a la emergencia
            Tabla9.loc[index, "Ambulancia_asignada"] =
ambulancia_asignada
            #actualizamos todas las listas
            inactiva.remove(ambulancia_asignada)
            preparandose.append(ambulancia_asignada)
            asignada.remove(base_cercana)
            en_preparacion.append(base_cercana)
            #asignamos el momento en el que la ambulancia va a
pasar a estar preparandose
            cuenta = momento
            Tabla9.loc[index, "Cambio_inactiva_preparandose"] =
cuenta
            #asignamos el tiempo de trayecto desde la base hasta
el lugar de la emergencia
            Tabla9.loc[index, "Tiempo_trayecto_base_emergencia"] =
minimo
            #asignamos el momento en el que la ambulancia va a
pasar a estar ocupada
            cuenta = momento + tr
            Tabla9.loc[index, "Cambio_preparandose_ocupada"] =
cuenta
            #si no hay ninguna base con ambulancia
            else:
                print("No hay ambulancias para atender la emergencia "
+ str(llamada))

```

```

else:
    pass

    #buscamos si se produce un cambio de ambulancia de preparandose a
ocupada
    index = -1
    for cambio1 in Tabla9["Cambio_preparandose_ocupada"]:
        index = index + 1
        #si hay cambio de ambulancia de preparandose a ocupada
        if momento == cambio1:
            #determinamos la ambulancia de cambio y la base que ocupa
            llamada1 = Tabla9.loc[index, "Llamada"]
            ambulancia_de_cambio = Tabla9.loc[index,
"Ambulancia_asignada"]
            posicion = preparandose.index(ambulancia_de_cambio)
            base_de_cambio = en_preparacion[posicion]
            print("\nEn el momento " + str(momento) + " ambulancia " +
str(ambulancia_de_cambio) + " pasa a estar ocupada y la base " +
str(base_de_cambio) + " pasa a estar libre")
            #actualizamos todas las listas
            preparandose.remove(ambulancia_de_cambio)
            ocupada.append(ambulancia_de_cambio)
            en_preparacion.remove(base_de_cambio)
            libre.append(base_de_cambio)
            #se vuelve a poner en marcha el contador de tiempo para la
emergencia
            trayecto_ida = Tabla9.loc[index,
"Tiempo_trayecto_base_emergencia"]
            tiempo_respuesta = tr + trayecto_ida
            #calculamos el tiempo de respuesta para la llamada y lo
ponemos en la tabla de gestión
            Tabla9.loc[index, "Tiempo_respuesta"] = tiempo_respuesta
            print("Tiempo de respuesta para la llamada " +
str(llamada1) + " es de " + str(tiempo_respuesta) + " minutos")
            #determinamos el hospital más cercano al lugar de la
emergencia
            lugar = Tabla1.loc[index, "Lugar"]
            tiempos = []
            for item in Tabla3[str(lugar)]:

```

```

        tiempos.append(item)

    minimo = min(tiempos)
    index1 = tiempos.index(minimo)
    hospital = Tabla3.loc[index1, "Hospital"]
    print("El hospital asignado es " + str(hospital))
    #asignamos el hospital
    Tabla9.loc[index, "Hospital"] = hospital

    #determinamos el momento en el que la ambulancia va a
    dejar de estar ocupada

    duracion_in_situ = Tabla1.loc[index, "Duracion_in_situ"]
    trayecto_hospital = minimo

    #asignamos el tiempo del trayecto hasta el hospital
    Tabla9.loc[index, "Tiempo_trayecto_emergencia_hospital"] =
    trayecto_hospital

    cuenta = momento + trayecto_ida + duracion_in_situ +
    trayecto_hospital

    #asignamos el momento de cambio de ocupada a pendiente
    Tabla9.loc[index, "Cambio_ocupada_pendiente"] = cuenta

    #si no hay cambio de ambulancia de preparandose a ocupada
    else:
        pass

    #buscamos si se produce un cambio de ambulancia de ocupada a
    pendiente

    index = -1

    for cambio2 in Tabla9["Cambio_ocupada_pendiente"]:
        index = index + 1

        #si hay cambio de ambulancia de ocupada a pendiente
        if momento == cambio2:
            ambulancia_de_cambio = Tabla9.loc[index,
            "Ambulancia_asignada"]

            #determinamos el hospital donde ambulancia ha dejado al
            paciente

            hospital = Tabla9.loc[index, "Hospital"]

            print("\nEn el momento " + str(momento) + " ambulancia " +
            str(ambulancia_de_cambio) + " pasa a estar pendiente en el hospital "
            + str(hospital))

            #actualizamos las listas

            ocupada.remove(ambulancia_de_cambio)

```

```

pendiente.append(ambulancia_de_cambio)

#comprobamos si se da algún Escenario de la reubicación
if "Campanar II" in libre and "Hospital General" in libre
or "Campanar I" in libre and "Hospital General" in libre or "Campanar
I" in libre and "Campanar II" in libre or "Alfahuir" in libre and
"Malvarrosa" in libre or "Paterna" in libre and "Manises" in libre:

    print("Hay Escenario para reubicación")

    #si se da el Escenario 1
    if "Campanar II" in libre and "Hospital General" in
libre:

        escenario = "Escenario 1"

        print(str(escenario))

        #determinamos la base de destino de la reubicación
        escen = Tabla6.loc[Tabla6["ESCENARIO"] ==
escenario]

        base_dest = pd.unique(escen["BASE_DESTINO"])
        base_destino = base_dest[0]

        #determinamos los puntos de origen de la
reubicación

        punto_origen = pd.unique(escen["PUNTO_ORIGEN"])

    #si se da el Escenario 2
    elif "Campanar I" in libre and "Hospital General" in
libre:

        escenario = "Escenario 2"

        print(str(escenario))

        #determinamos la base de destino de la reubicación
        escen = Tabla6.loc[Tabla6["ESCENARIO"] ==
escenario]

        base_dest = pd.unique(escen["BASE_DESTINO"])
        base_destino = base_dest[0]

        #determinamos los puntos de origen de la
reubicación

        punto_origen = pd.unique(escen["PUNTO_ORIGEN"])

    elif "Campanar I" in libre and "Campanar II" in libre:
        escenario = "Escenario 3"

        print(str(escenario))

        #determinamos la base de destino de la reubicación
        escen = Tabla6.loc[Tabla6["ESCENARIO"] ==
escenario]

```

```

base_dest = pd.unique(escen["BASE_DESTINO"])
base_destino = base_dest[0]
#determinamos los puntos de origen de la
reubicación

punto_origen = pd.unique(escen["PUNTO_ORIGEN"])
#si se da el Escenario 4
elif "Alfahuir" in libre and "Malvarrosa" in libre:
    escenario = "Escenario 4"
    print(str(escenario))
#determinamos la base de destino de la reubicación
escen = Tabla6.loc[Tabla6["ESCENARIO"] ==
escenario]

base_dest = pd.unique(escen["BASE_DESTINO"])
base_destino = base_dest[0]
#determinamos los puntos de origen de la
reubicación

punto_origen = pd.unique(escen["PUNTO_ORIGEN"])
#si se da el Escenario 5
else:
    escenario = "Escenario 5"
    print(str(escenario))
#determinamos la base de destino de la reubicación
escen = Tabla6.loc[Tabla6["ESCENARIO"] ==
escenario]

base_dest = pd.unique(escen["BASE_DESTINO"])
base_destino = base_dest[0]
#determinamos los puntos de origen de la
reubicación

punto_origen = pd.unique(escen["PUNTO_ORIGEN"])
#comprobamos si la ambulancia está en algún punto de
origen de la reubicación

#si la ambulancia está en un punto de origen de la
reubicación

if hospital in punto_origen:
    #comprobamos si la ambulancia está en la lista de
los candidatos para ser reubicados

punto = escen[escen["PUNTO_ORIGEN"] == hospital]
candidatos = punto["ALFA"].values

```

```

#si la ambulancia es candidata
if ambulancia_de_cambio in candidatos:
    print("La ambulancia " +
str(ambulancia_de_cambio) + " es candidata")
    #buscamos base de vuelta alternativa
    #comprobar si la base habitual de la
ambulancia pendiente está libre
    base_hab = Tabla4[Tabla4["Ambulancia"] ==
ambulancia_de_cambio]["Base"].values
    base_habitual = base_hab[0]
    #si la base habitual de la ambulancia
pendiente está libre
    if base_habitual in libre:
        base_alternativa = base_habitual
    #si la base habitual de la ambulancia
pendiente no está libre
    else:
        if base_habitual in en_preparacion:
            posic =
en_preparacion.index(base_habitual)
            amb_ocupa_base = preparandose[posic]
        elif base_habitual in asignada:
            posic = asignada.index(base_habitual)
            amb_ocupa_base = inactiva[posic]
        else:
            posic =
esperando_ambulancia.index(base_habitual)
            amb_ocupa_base = regresando[posic]
            base_hab_amb = Tabla4[Tabla4["Ambulancia"]
== amb_ocupa_base]["Base"].values
            base_habitual_ambul_ocupa_lugar =
base_hab_amb[0]
            #si la base habitual de la ambulancia que
ocupa su lugar está libre
            if base_habitual_ambul_ocupa_lugar in
libre:
                base_alternativa =
base_habitual_ambul_ocupa_lugar
            #si la base habitual de la ambulancia que
ocupa su lugar no está libre

```

```

else:
    #buscamos la base libre más cercana a
    la base habitual de la ambulancia pendiente
    tiempos = []
    for item in libre:
tiempos.append(int(Tabla7[Tabla7["Base"] ==
item][str(base_habitual)]))

    minimo = min(tiempos)
    posicion = tiempos.index(minimo)
    base_libre_cercana = libre[posicion]
    base_alternativa = base_libre_cercana

    #comparamos poblacion cubierta en la base
destino y en la base alternativa
    poblacion_base_destino =
int(Tabla8.loc[Tabla8["Base"] == base_destino, "Poblacion"])
    poblacion_base_alternativa =
int(Tabla8.loc[Tabla8["Base"] == base_alternativa, "Poblacion"])
    #si en la base de destino cubre mayor
población que en la base alternativa
    if poblacion_base_destino >=
poblacion_base_alternativa:
        cuenta_reubicaciones =
cuenta_reubicaciones + 1
        print("Enviar la ambulancia " +
str(ambulancia_de_cambio) + " a la base de destino de la reubicación "
+ str(base_destino))
        Tabla9.loc[index, "Base_regreso"] =
base_destino
        #actualizamos todas las listas
pendiente.remove(ambulancia_de_cambio)
regresando.append(ambulancia_de_cambio)
libre.remove(base_destino)
esperando_ambulancia.append(base_destino)
        print("En el momento " + str(momento) + "
ambulancia " + str(ambulancia_de_cambio) + " pasa a estar regresando a
la base " + str(base_destino))
        cuenta = momento
        #asignamos el momento de cambio de la
ambulancia al estado regresando

```

```

        Tabla9.loc[index,
"Cambio_pendiente_regresando"] = cuenta

        #asignamos el momento de cambio de la
ambulancia al estado inactiva

        trayecto_regreso =
int(Tabla5.loc[Tabla5["Base"] == base_destino, str(hospital)])

        Tabla9.loc[index,
"Tiempo_trayecto_hospital_base"] = trayecto_regreso

        cuenta = cuenta + trayecto_regreso

        Tabla9.loc[index,
"Cambio_regresando_inactiva"] = cuenta

        #si en la base de destino no cubre mayor
población que en la base alternativa

        else:

            print("La ambulancia " +
str(ambulancia_de_cambio) + " cubre mayor población en la base " +
str(base_alternativa))

            asignacion_base()

            #si la ambulancia no es candidata

            else:

                print("La ambulancia " +
str(ambulancia_de_cambio) + " no es candidata")

                asignacion_base()

            #si ambulancia no está en el punto de origen de la
reubicación

            else:

                print("La ambulancia " + str(ambulancia_de_cambio)
+ " no está en el punto de origen de la reubicación")

                asignacion_base()

            #si no hay Escenario de reubicación

            else:

                print("No hay Escenario para reubicar")

                asignacion_base()

            #si no hay cambio de ambulancia de ocupada a pendiente

            else:

                pass

        #buscamos si se produce un cambio de ambulancia de regresando a
inactiva

        index = -1

```

```

for cambio3 in Tabla9["Cambio_regresando_inactiva"]:
    index = index + 1
    #si hay cambio de ambulancia de regresando a inactiva
    if momento == cambio3:
        ambulancia_de_cambio = Tabla9.loc[index,
"Ambulancia_asignada"]
        base_regreso = Tabla9.loc[index, "Base_regreso"]
        #actualizamos todas las listas
        regresando.remove(ambulancia_de_cambio)
        inactiva.append(ambulancia_de_cambio)
        esperando_ambulancia.remove(base_regreso)
        asignada.append(base_regreso)
        print("\nEn el momento " + str(momento) + " ambulancia " +
str(ambulancia_de_cambio) + " pasa a estar inactiva y la base " +
str(base_regreso) + " pasa a estar asignada")
        #si no hay cambio de ambulancia de regresando a inactiva
        else:
            pass
        #aumentamos la cuenta del algoritmo en 1 unidad
        momento = momento + 1
print("\n")
print(Tabla9)
print("\nSe han realizado " + str(cuenta_reubicaciones) + "
reubicaciones")
Tabla9.to_csv("Tabla9 CON REUBICACIÓN")

```



## Anexo 6. Municipios / barrios en cada instancia

Instancia 1	Instancia 2	Instancia 3	Instancia 4	Instancia 5
el Pla del Real	massanassa	Poblats Marítims	paterna	puçol
paterna	paiporta	Extramurs	pobla vallbona	silla
alaquas	torrent	l'Olivereta	puçol	l'Olivereta
manises	mislata	chiva	Benimaclet	chiva
Algirós	Poblats Marítims	Rascanya	xirivella	Rascanya
alfafar	torrent	paterna	meliana	Rascanya
silla	massamagrell	betera	aldaia	manises
Campanar	alfafar	alaquas	benifaio	benetusser
moncada	lliria	pobla vallbona	Campanar	Jesús
la Saïdia	Rascanya	paterna	torrent	Benicalap

Instancia 6	Instancia 7	Instancia 8	Instancia 9	Instancia 10
Poblats Marítims	Rascanya	Campanar	almussafes	lliria
Quatre Carreres	Extramurs	pobla vallbona	Quatre Carreres	Campanar
benetusser	picassent	paiporta	godella	torrent
manises	picanya	torrent	Quatre Carreres	Quatre Carreres
betera	Benimaclet	Rascanya	catarroja	picanya
xirivella	torrent	Camins al Grau	Camins al Grau	picassent
Benicalap	pobla vallbona	Quatre Carreres	torrent	el Pla del Real
Campanar	paiporta	l'Eixample	Rascanya	la Saïdia
catarroja	tavernes blanques	Algirós	Campanar	Pobles del Sud
albal	l'Olivereta	Campanar	paterna	silla
silla	sagunt	picanya	torrent	Benicalap
torrent	torrent	benetusser	la Saïdia	aldaia
Extramurs	Extramurs	silla	Extramurs	catarroja
almussafes	Patraix	sagunt	Benimaclet	benetusser
Rascanya	albal	paterna	Camins al Grau	mislata

Instancia 11	Instancia 12	Instancia 13	Instancia 14	Instancia 15
Camins al Grau	Quatre Carreres	sagunt	catarroja	Poblats Marítims
Benicalap	catarroja	l'Eixample	el Pla del Real	chiva
paterna	paterna	l'Eixample	sedavi	Campanar
sagunt	Camins al Grau	paterna	l'Eixample	aldaia
picanya	burjassot	Quatre Carreres	el Pla del Real	sagunt
picassent	Patraix	moncada	torrent	pobla vallbona
el Pla del Real	tavernes blanques	xirivella	Camins al Grau	paterna
Patraix	Poblats Marítims	Campanar	paterna	Quatre Carreres
xirivella	alboraia	Jesús	paterna	Jesús
Pobles del Sud	lliria	Benicalap	picassent	sedavi
Quatre Carreres	Benicalap	aldaia	Patraix	Campanar
Poblats Marítims	mislata	buñol	Jesús	Benicalap
Quatre Carreres	meliana	godella	mislata	Algirós
la Saïdia	l'Olivereta	silla	Quatre Carreres	manises
torrent	l'Olivereta	pobla vallbona	Campanar	Pobles de l'Oest
puçol	paterna	Jesús	l'Olivereta	Camins al Grau
Quatre Carreres	Camins al Grau	eliana	Benicalap	Quatre Carreres
Benimaclet	xirivella	Ciutat Vella	Poblats Marítims	Camins al Grau
almussafes	l'Eixample	catarroja	Ciutat Vella	benifaio
Camins al Grau	xirivella	Benicalap	Poblats Marítims	Quatre Carreres

<b>Instància 16</b>	<b>Instància 17</b>	<b>Instància 18</b>	<b>Instància 19</b>	<b>Instància 20</b>
sedavi	lliria	pobla vallbona	catarroja	torrent
Quatre Carreres	l'Olivereta	Quatre Carreres	la Saïdia	Poblat s Marítims
la Saïdia	buñol	Jesús	paterna	paterna
Benicalap	aldaia	xirivella	chiva	Campanar
Jesús	picanya	burjassot	Quatre Carreres	aldaia
picanya	Benicalap	Poblat s Marítims	picassent	meliana
aldaia	Camins al Grau	mislata	Camins al Grau	Quatre Carreres
el Pla del Real	l'Eixample	Camins al Grau	Algirós	moncada
Algirós	el Pla del Real	manises	Pobles de l'Oest	torrent
burjassot	l'Olivereta	Benicalap	Extramurs	Benimaclet
silla	xirivella	betera	Poblat s Marítims	Jesús
torrent	torrent	Quatre Carreres	alaquas	Patraix
Rascanya	riba-roja turia	Camins al Grau	Jesús	el Pla del Real
alaquas	Algirós	Algirós	silla	manises
buñol	Pobles de l'Oest	l'Eixample	Poblat s Marítims	Camins al Grau
l'Eixample	Quatre Carreres	Poblat s Marítims	massanassa	Camins al Grau
el Pla del Real	Benicalap	picanya	sagunt	puçol
xirivella	Pobles del Sud	silla	mislata	chiva
torrent	Benicalap	torrent	manises	eliana
manises	eliana	Camins al Grau	lliria	Algirós
sagunt	Camins al Grau	picassent	Quatre Carreres	l'Eixample
Poblat s Marítims	Patraix	chiva	massamagrell	Benimaclet
Benicalap	la Saïdia	l'Eixample	Campanar	l'Eixample
Campanar	Quatre Carreres	Rascanya	Quatre Carreres	catarroja
betera	benifaio	Jesús	quart poblet	Benimaclet