

Cómo citar este trabajo: Pérez-Fernández, O., & Moya-Gómez, B. (2023). The emergency medical services of Madrid tested: analysis of the spatial-temporal performance of SAMUR-PC in the first months of the postCOVID-19 new normality period *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, (96). <https://doi.org/10.21138/bage.3247>

El sistema médico de emergencias de Madrid a prueba: análisis del rendimiento espaciotemporal del SAMUR-PC en los primeros meses de la nueva normalidad postCOVID-19

The emergency medical services of Madrid tested:
analysis of the spatial-temporal performance of SAMUR-PC
in the first months of the postCOVID-19 new normality period

Onel Pérez-Fernández 

oneperez@ucm.es

Universidad de Panamá (Panamá)

Universidad Complutense de Madrid (España)

Borja Moya-Gómez 

bmoyagomez@ucm.es

Grupo de Investigación tGIS, Departamento de Geografía

Universidad Complutense de Madrid (España)

Resumen

Quienes requieren de atención sanitaria de emergencia no pueden esperar. Las ambulancias deben llegar al lugar del suceso lo más rápido posible. Las ambulancias suelen estar asignadas a

bases, que se distribuyen por toda la ciudad para minimizar el tiempo de llegada al suceso. Sin embargo, la distribución espacial de los sucesos cambia a lo largo del día, debido al ritmo y uso que las personas hacen de la ciudad. Este artículo evalúa, por medio de modelos de localización-asignación, el desempeño espaciotemporal del SAMUR-PC, el Servicio Médico de Emergencias de Madrid (España) en dos escenarios diferenciados, antes de la pandemia de la COVID-19 y durante los primeros meses de la nueva normalidad. Los resultados muestran que el sistema respondió relativamente bien al cambio de los patrones de los sucesos debidos a la pandemia, aunque hubiese sido necesario hacer algunas intervenciones para garantizar el mismo servicio que antes de la crisis epidemiológica.

Palabras clave: modelos de localización-asignación; ambulancias; tráfico; congestión; COVID-19.

Abstract

Those requiring emergency health care cannot wait. Ambulances must arrive at the scene as quickly as possible. Ambulances are usually assigned to bases distributed throughout the city to minimize arrival time to the event. However, the spatial distribution of events changes during the day according to people's rhythm and city use. This paper evaluates, through location-allocation modelling, the Spatio-temporal performance of SAMUR-PC, the Emergency Medical Service of Madrid (Spain), in two different scenarios, before the COVID-19 pandemic and during the first months of the new normality period. The results show that the system responded relatively well to the change in event patterns due to the pandemic. However, some interventions would have been necessary to guarantee the same service as before the epidemiological crisis.

Key words: location-allocation models; ambulances; traffic; congestion; COVID-19.

1 Introducción

Cada día, multitud de personas en todo el mundo sufren algún tipo de suceso, que requiere de la rápida intervención de los Servicios Médicos de Emergencia (SME) como son los accidentes de tráfico, accidentes no de tráfico y otro tipo de sucesos. Aunque muchos de estos sucesos pueden no suponer ningún riesgo serio para la vida de los afectados, el que los SME puedan llegar lo antes posible al lugar del suceso y con los medios necesarios es crucial para los afectados, ya que están experimentando una situación inesperada que precisa de atención médica (Strohmandl et al., 2021).

Por un lado, la rápida intervención de los SME puede suponer un alivio psicológico del afectado y otras personas que están en el mismo lugar del suceso, al estar, rápidamente, en manos de los profesionales sanitarios. Por el otro lado, porque los SME pueden tomar decisiones a tiempo que reduzcan la lesividad derivada del suceso e incluso incrementar la posibilidad de supervivencia en los casos de mayor gravedad (Pons et al., 2005)

La rapidez con la que los SME pueden atender los sucesos que requieren de atención médica, una vez activado el recurso, dependen de la accesibilidad del recurso, generalmente vehículo motorizado como es el caso de las ambulancias, al lugar del suceso. Esta accesibilidad, mayormente, la resultante de la ubicación inicial del recurso activado, principalmente, en bases de SME, y, en parte, al estado del tráfico de la ruta que le une con la localización del suceso (Zhou et al., 2020) el cual varía en función del día y hora del día.

Generalmente, el dimensionamiento del SME (el número de bases, distribución espacio temporal y dotación de recursos asignada, entre otros) debe responder, adecuadamente, a una variedad de escenarios probables en los que ocurren un conjunto de sucesos al mismo tiempo. Los sucesos activan una serie de recursos y de los cuales, un porcentaje predeterminado deben ser atendidos sin superar tiempos máximos determinados (Schmid, 2012). Estos tiempos suelen estar establecidos por normativa con base en estudios y recomendaciones que son recogidos bajo el concepto de accesibilidad normativa (Páez et al., 2012).

Para asistir a la toma de decisión en el dimensionamiento de dichos servicios, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y, en particular, aquellos que permiten generar diversas soluciones atendiendo a diferentes Modelos de Localización-Asignación (MLA), son herramientas de especial interés. El resultado de estos modelos ofrece, como mínimo, propuestas de ubicaciones óptimas o cercanas al óptimo de entre el conjunto de localizaciones candidatas, según el tipo de función objetivo y restricciones operativas (Bolouri et al., 2020). De la misma manera, dichos modelos se pueden usar para evaluar situaciones actuales.

Parte de la creación de posibles escenarios para el dimensionamiento de los SME pueden estar ligados con la distribución espacio temporal de la población, la cual también cambia a lo largo del día y depende, en cierta medida, de la especialización de la actividad de cada parte de la ciudad. Sin embargo, estos patrones relativos, expresión de la vida cotidiana, fueron alterados por la aparición de la pandemia de la COVID-19 y las medidas para evitar su avance, tales como la limitación de las actividades y de la movilidad permitida, especialmente, durante las primeras olas de la pandemia, en 2020 (Hunter et al., 2021). En esta situación, se daban varios

fenómenos opuestos que podían afectar el rendimiento del dimensionamiento de SME. Por un lado, la limitación de la movilidad implicaba una red viaria con menor congestión, con lo que los tiempos de acceso a los sucesos podían ser semejantes a los observados durante la noche, cuando se suele circular en velocidad de flujo libre. Por el otro, la distribución espacial de la población era diferente a la prevista y, por lo tanto, la distribución de sucesos no era la habitual o para aquellas que estaba diseñada el servicio, si bien el hecho de limitar la movilidad y las actividades también podía reducir el número de sucesos a los que los servicios de SME deben atender.

Un caso que se puede considerar como excepcional del cambio de actividad por la COVID-19 es el caso de Madrid (España). España fue uno de los países con más afectados por la pandemia en varios sentidos (Glodeanu et al., 2021). Durante 2020, se registraron 50 837 muertes y 1 928 265 contagios (Ministerio de Sanidad, 2020). Ante el rápido aumento del número de casos confirmados, el Gobierno español se vio obligado a declarar el estado de alarma por razones sanitarias el 14 de marzo de 2020. La principal medida del estado de alarma fue el establecimiento de medidas de confinamiento obligatorio a los ciudadanos, como recurso para frenar el rápido contagio entre la población. Esta situación provocó que la ciudad de Madrid cambiase el ritmo de su actividad, la ciudad se paró (Romanillos et al., 2021). El transporte público de Madrid registró una reducción del 82,5 % en la cantidad de usuarios (Moovit, 2020) y el tráfico cayó un 66,0 % en los meses del confinamiento, según datos de TomTom (TomTom, 2020). En consecuencia, la actividad de los SME de la ciudad también sufrió cambios.

El SME de la ciudad de Madrid es el llamado Servicio de Asistencia Municipal de Urgencias y Rescate – Protección Civil, más conocido por su acrónimo SAMUR-PC. El SAMUR-PC solo atiende los sucesos que ocurren en vía pública y en los locales abiertos al público. Este servicio disponía de un total de 218 vehículos en diciembre de 2019 repartidos en 22 bases permanentes, de los cuales, 88 vehículos estaban destinados para el traslado de afectados (ambulancias, con personal sanitario cualificado) y 50 vehículos se destinaban a facilitar el acceso del personal sanitario (SAMUR, 2020). En esta institución trabajaban 901 personas en diferentes puestos, entre ellos se encuentra el personal técnico, médicos, enfermeros, psicólogos, administrativos y farmacéuticos. A lo largo de 25 años han prestado 2,5 millones de servicios de asistencia, con un tiempo medio de llegada de ocho minutos. Mientras que el SAMUR-PC atendió para los meses de estudio una media de 278 sucesos/día en 2019, el valor bajó casi un 11 % para el 2020. Hay que señalar, que el resto de los SME, como, por ejemplo,

el atender urgencias médicas en domicilios son competencia del Servicio de Urgencias Médicas de Madrid (SUMMA) y que, por falta de acceso a datos, no se ha incluido en este artículo.

El presente artículo tiene dos objetivos principales:

- El primero es el estudio de cuál fue el desempeño teórico del SAMUR-PC para la ciudad de Madrid según el número de sucesos atendidos de los meses de julio a diciembre para los años 2019 (antes de la pandemia) y 2020 (primeros meses de relajamiento en las medidas para frenar el avance de la pandemia, dentro del periodo llamado de nueva normalidad) que podrían ser atendidos dentro de unos tiempos máximos y el estado de congestión de la red viaria.
- El segundo, proponer posibles cambios en la implementación territorial de las bases del SAMUR-PC y en los tiempos de acceso máximo permitido que hubiesen garantizado el mismo nivel de prestaciones que el recibido por la población madrileña en 2019. Este objetivo puede entenderse como valoración de la resiliencia del sistema en situaciones relativamente antagónicas.

Según el conocimiento de los autores, son pocos los trabajos que, hasta la fecha, han incluido, de manera simultánea, en MLA el dinamismo observado en los sucesos reportados por el SME con la variación de las velocidades de la red vial. Del mismo modo, los autores no conocen ningún otro estudio en donde se hayan evaluado dos escenarios reales tan dispares como el periodo previo a la pandemia de la COVID-19 y durante la misma, pudiendo ofrecer una valoración del grado de resiliencia del SME en casos extremos. Finalmente, hay que destacar que los resultados del presente artículo pueden ser de interés para la administración pública a la hora de plantear y diseñar cambios en los SME, con el fin de ofrecer un mejor servicio de emergencias a los ciudadanos.

El artículo está organizado en siete secciones. Luego de la introducción se realiza en la sección 2, una revisión de la literatura. Después se presenta, en la sección 3, el caso de estudio, en la sección 4 la descripción de los datos, seguidamente, continúa en la sección 5 con la explicación de la metodología, continúa con la presentación de los resultados en la sección 6 y, por último, la sección 7 expone las conclusiones del artículo.

2 Revisión de literatura

Los Modelos de Localización-Asignación (MLA) se han utilizado durante años para encontrar la mejor ubicación para una gran variedad de servicios públicos. Los MLA tienen como objetivo

seleccionar las ubicaciones más apropiadas entre una serie de centros de suministro potenciales, para proporcionar los servicios necesarios a la demanda (Bolouri et al., 2018). Elegir el lugar óptimo o próximo al óptimo para la ubicación de un equipamiento o un determinado negocio es de interés y preocupación para las autoridades y empresas privadas (Frade & Ribeiro, 2015; Namazian & Roghanian, 2019). Estos modelos son de gran ayuda en la planificación de una diversidad de instalaciones, pensando, por lo general, en el bienestar de la población servida. Para ello toman en cuenta la mejor distribución de la demanda con respecto a un conjunto de instalaciones candidatas, es decir, que la demanda sea asignada considerando los parámetros de impedancia al desplazamiento, tales como la distancia más corta o el menor tiempo recorrido.

Como señalan Buzai y Baxandale (1995), los MLA intentan evaluar las ubicaciones actuales de los equipamientos, sobre la base de la distribución de la demanda y generar alternativas para lograr una distribución espacial más eficiente y/o equitativa. Ellos buscan las ubicaciones óptimas (localización) y determinan las mejores vinculaciones de la demanda (asignación).

El problema de los MLA consiste en ubicar un conjunto de nuevas instalaciones de forma tal que el coste del transporte a/desde los equipamientos para los clientes optimice una función objetivo, como puede ser la maximización del número de demanda atendida dado un tiempo máximo de respuesta y un número predeterminado de equipamientos a localizar entre los posibles candidatos. (Azarmand & Neishabouri, 2009). Muchos estudios emplean MLA para ubicar hospitales (Abdelkarim, 2019; Ledesma & Zurita, 1995), estaciones de bomberos (Bolouri et al., 2018; Wang et al., 2021; Yu et al., 2020) o escuelas (Al-Sabbagh, 2020; Wondwossen & Bedasa, 2019).

El caso de los MLA de los servicios médicos de urgencia se ha estudiado durante años, probando diversos algoritmos y soluciones (Dibene et al., 2017). Entre los métodos, la solución para maximizar la cobertura del servicio es uno de los más utilizados para formular problemas de localización de ambulancias (Jia et al., 2007). En el trabajo de Eaton et al. (1985), se propone el uso del modelo de cobertura máxima para planificar un servicio de emergencias médicas buscando reducir el tiempo de respuesta. Por otro lado, Azizan et al. (2012) utilizan la solución de máxima cobertura con algoritmos genéticos y redes de OpenStreetMap. Strohmandl et al. (2021) evalúan la situación actual de un servicio médico de urgencia y proponen el número óptimo de estaciones para atender con éxito las emergencias en la Región Autónoma de Žilina (Eslovaquia). En su planteamiento, utilizan las soluciones de maximizar la cobertura y minimizar

las instalaciones. Se han encontrado varios trabajos de revisión bibliográfica sobre los problemas de localización de las ambulancias que destacan su uso (Jia et al., 2007; Li et al., 2011; Serra & Marianov, 2002; Tassone & Choudhury, 2020). Cabe mencionar que no es el único método posible. Así hay trabajos que usan otras funciones a maximizar con otros limitantes, tales como maximizar el peso de la demanda cubierta y, simultáneamente, minimizar la distancia media a la población no cubierta (Yin & Mu, 2012).

En la actualidad, producto del surgimiento de nuevas fuentes de datos, se han desarrollado MLA de ambulancias que incorporan el tráfico histórico en la red y registros GPS con las coordenadas de los sucesos atendidos. Zhou et al. (2020), proponen un modelo de localización utilizando datos de velocidad en la red, considerando el tiempo, la población y los puntos de interés. El flujo vehicular se obtuvo de la aplicación Gaode, una aplicación de mapas digitales y asistente de ruta con gran penetración en el mercado chino, y aplicaron la solución maximizar cobertura. Sun et al. (2020) formularon un modelo dinámico para la selección de estaciones de ambulancias móviles. En su enfoque, emplearon las bases actuales como candidatas, mientras que la demanda se extrae a partir de registros históricos de las coordenadas de los sucesos asistidos. Wang et al. (2021) utilizan datos multitemporales del estado del tráfico y puntos de interés. Analizan la cobertura real de las estaciones de bomberos en el centro de Pekín, bajo diferentes situaciones de congestión. Para lograr su objetivo, emplearon las soluciones de maximizar la cobertura, minimizar el número de instalaciones y minimizar la impedancia (coste) total.

Por otro lado, encontramos estudios que utilizan los propios registros GPS con la localización de sucesos atendidos por los proveedores de servicios médicos de urgencia. Por ejemplo, Dibene et al. (2017) consideran la ubicación de ambulancias en Tijuana, México, mediante la clasificación de la demanda de acuerdo con su comportamiento a lo largo del día, y evalúa los días de semana y los fines de semana, utilizando para ello el sitio de las llamadas de emergencia. El trabajo de Rajagopalan et al. (2008) realiza un modelo para determinar el número mínimo de ambulancias y su distribución para cada momento del día en el que se produzcan cambios significativos en el patrón de la demanda, al tiempo que se cumple con el requisito de cobertura con una fiabilidad predeterminada.

Por su parte, Zhu et al. (2016) analizan las características de la distribución de la demanda y las ubicaciones candidatas de los centros de traumatología basándose en el análisis espacial. Presentan un modelo jerárquico de localización-asignación de bajo y alto nivel en Shenzhen,

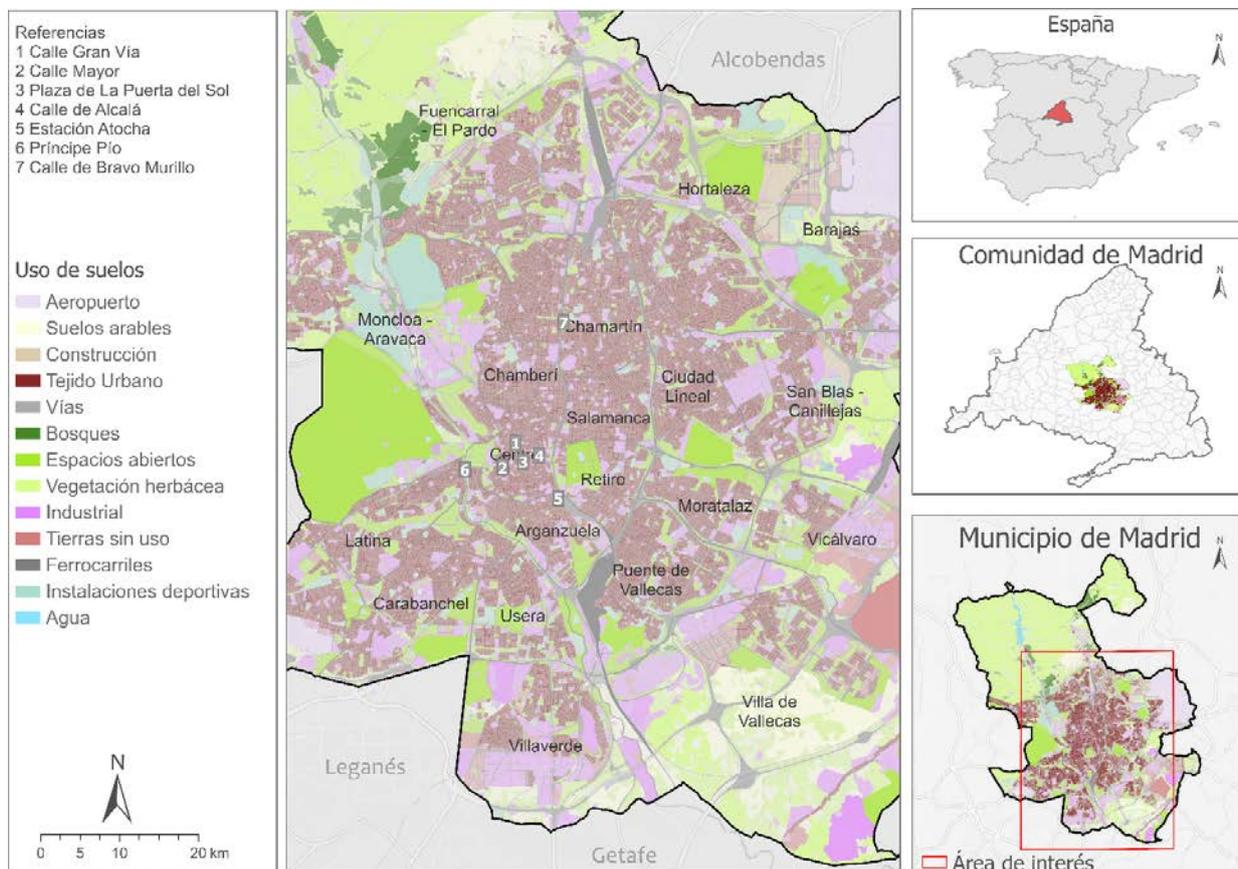
utilizando los registros GPS de los traumas atendidos. Emplean las soluciones de cobertura máxima y minimización de la impedancia. Otra investigación propone utilizar datos históricos de sucesos de incendios para reflejar la variabilidad de los sucesos. Los autores realizaron el estudio en Nanjing, China. Para lograr su objetivo, emplean la solución maximizar cobertura con algoritmos genéticos (Yu et al., 2020).

Sin embargo, todos estos trabajos se realizaron usando datos de situación de normalidad y sin realizar pruebas de estrés sobre el sistema ante situaciones imprevistas prolongadas como puede ser el caso de dos escenarios tan interesantes como son el año previo y durante la pandemia de la COVID-19.

3 El caso de estudio

El área de estudio es todo el término municipal de Madrid, en España (Figura 1). Madrid es la capital de la Comunidad de Madrid y de España, siendo el municipio más poblado en ambos casos, con más de 3,3 millones de habitantes según el padrón de 2020 (INE, n.d.). Se caracteriza por ser uno de los principales centros culturales, económicos y turísticos de Europa.

Figura 1. Distribución espacial de usos del suelo del área de estudio



Fuente: Urban atlas (Copernicus, n.d.)

En sus 604,20 km² hay una gran variedad de usos del suelo, destacándose en el centro la mezcla de residencias con actividades económicas terciarias. En las zonas periféricas y a lo largo de las grandes autopistas radiales y de circunvalación, se localizan los espacios especializados en actividades económicas. Finalmente, es de destacar la gran cantidad de parques urbanos y otros espacios verdes distribuidos por todo el municipio.

4 Datos

Para este estudio se usan las siguientes fuentes de datos:

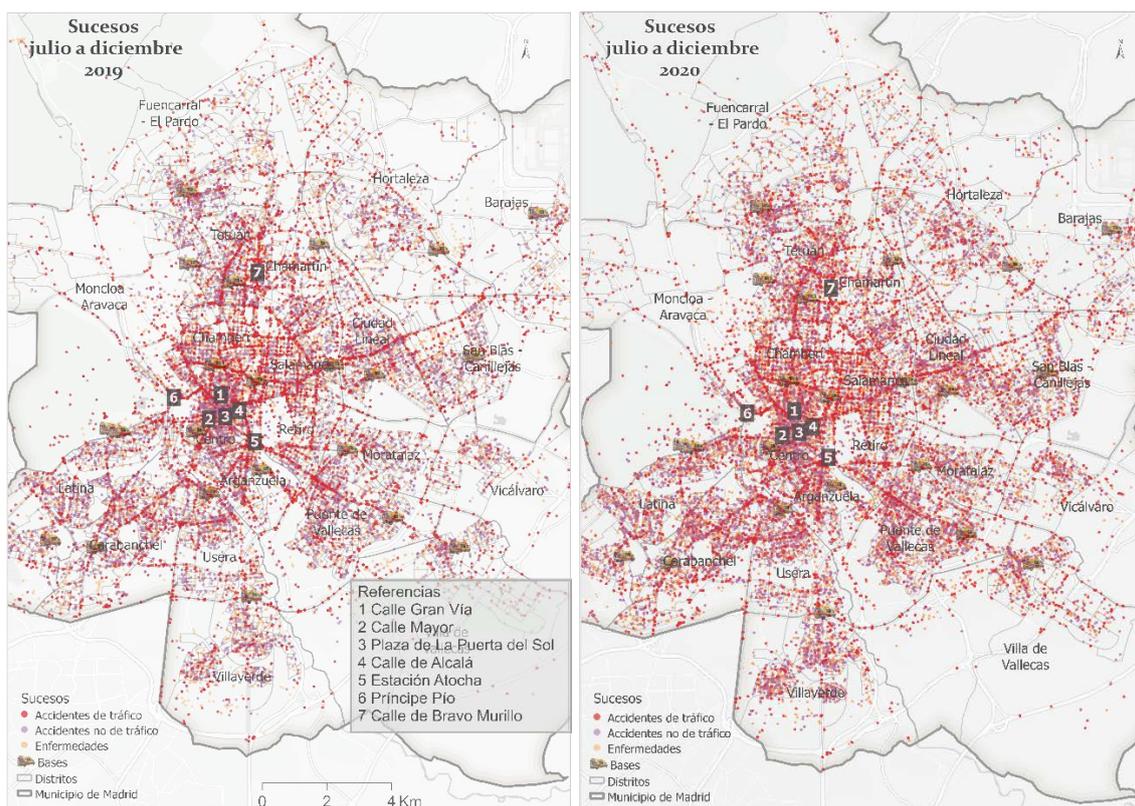
- Sucesos atendidos por el SAMUR-PC, para los meses de julio a diciembre de 2019 y 2020. Esta base de datos está formada por 51 132 sucesos para los 6 meses de 2019 y 45 693 sucesos para los meses del periodo en estudio en 2020 (Figura 2).

Cada registro contiene datos relativos a la localización, fecha, hora de comunicación y tipo de suceso (en grandes grupos: por enfermedad, por accidente de tráfico, por accidente no relacionado con el tráfico, por psiquiátrico, a petición del servicio de bomberos, y miscelánea). Estos datos han sido agrupados en cuatro franjas horarias (de 0.00 a 6.59, de 7.00 a 10.59, 11.00 a 14.59 y de 17.00 a 21.59), en días laborables y días de fin de semana, y en ambos años (julio a diciembre).

Comparando las estadísticas en ambos años, se puede decir que la media de sucesos presentó valores más altos en el transcurso del año 2019 en todas las franjas horarias. El coeficiente de variación de los datos del 2020 sugiere una distribución de los sucesos más homogénea en comparación a 2019, donde se presenta una mayor variabilidad de los datos.

- La localización de las 22 bases de ambulancias operativas en 2021 según OpenStreetMaps (<https://www.openstreetmap.org>).
- Red viaria de Madrid. En este estudio se han creado diferentes redes estáticas, una para cada uno de los períodos mencionados, anteriormente, tanto para días entre semana y días de fin de semana, a partir de los datos dinámicos del producto *Historical Speed Profiles de TomTom* referentes a la versión 2018Q4 (datos de los 48 meses anteriores a septiembre 2018). Esta fuente de datos dispone de dato de velocidad media cada 5 minutos para cada día de la semana en aquellos arcos con suficientes observaciones y, en caso contrario, un valor medio según tipo de día.

Figura 2. Sucesos atendidos por el SAMUR-PC en 2019–2020 (periodo julio a diciembre)



Fuente: elaboración propia a partir de registros del SAMUR-PC

Debe comentarse que se ha elegido los últimos 6 meses en ambos años porque permitía comparar dos situaciones que, si bien distintas por la pandemia y limitaciones a la movilidad por cierres perimetrales (últimos meses de 2020), ambas situaciones permitirían el uso del espacio público y, ser atendidos por el SAMUR-PC en caso de necesitados. Por otro lado, se ha elegido estos intervalos tomando en cuenta el análisis temporal de los datos (presentados en sección 6) (Figura 4), consideramos los horarios pico donde se da el mayor número de sucesos atendidos por el SAMUR-PC. Además, valoramos el comportamiento de la congestión en las mismas franjas horarias elegidas. De esta manera se toman en cuenta aspectos relacionados al comportamiento de los sucesos y del tráfico, originando los siguientes escenarios: pocos sucesos y congestión (0.00 a 06.59), mucha congestión y pocos sucesos (7.00 a 10.59), congestión normal y muchos sucesos (11.00 a 14.59) y muchos sucesos y congestión (17.00 a 21.59).

5 Metodología

El estudio del rendimiento del SME de Madrid se ha desarrollado en las siguientes fases: en primer lugar, se realiza un análisis descriptivo de los datos, en el ámbito espacial y temporal. Luego, se evalúa el nivel de rendimiento del servicio mediante el conteo de sucesos que pueden

ser atendidos en un tiempo determinado para 2019 y 2020 (periodo julio a diciembre). Por último, con la finalidad de garantizar el nivel de servicio mejor observado en cualquiera de los dos periodos de estudio, se proponen diferentes escenarios en los que se evalúa el efecto de localizar nuevas bases en localizaciones óptimas para ser añadidas a las existentes, y el efecto de cambiar los tiempos permitidos para atender los sucesos desde las bases ya existentes.

5.1 Análisis descriptivo de la distribución espacio temporal de los sucesos

En esta etapa se presenta un análisis espacio temporal de los sucesos atendidos por el SAMUR-PC durante el periodo de julio a diciembre de los años 2019 y 2020. Los datos fueron agregados en hexágonos de 400 metros de lado. Se han elegido hexágonos frente a otras figuras geométricas porque ofrecen las siguientes ventajas: la distancia entre el centroide de un hexágono y los centroides vecinos es la misma en todas las direcciones, todos los hexágonos vecinos tienen la misma relación espacial con el hexágono central, su forma más suavizada ayuda a visualizar mejor los cambios espaciales graduales (McKenzie, 2022). Además, diversos autores han utilizado los hexágonos para la agregación de datos puntuales y su análisis espacio temporal (Arias-Molinares et al., 2021; Condeço-Melhorado et al., 2020; García-Palomares et al., 2015). Por otro lado, para la elección de la dimensión de los lados de los hexágonos, se ha elegido 400 metros, siguiendo la metodología empleada por Barros et al. (2019). Su metodología consiste en utilizar el estadístico de Moran Global probando con varios tamaños de hexágonos hasta obtener el mejor índice de autocorrelación espacial. De esta manera se probó los hexágonos con diferentes longitudes de lado, arrojando el índice de Moran más alto los 400 metros.

Una vez los datos se agregaron en hexágonos procedimos a realizar el análisis espacial empleando herramientas de autocorrelación espacial para identificar la localización de los puntos de concentración de sucesos. En particular, se ocupa el análisis de Anselin Local Moran (LISA) para detectar los patrones de agrupamiento de los datos en 2019 y 2020 y en las diferentes franjas temporales de los días laborables y fines de semana. Además, se confeccionan mapas coropléticos para describir de manera visual la distribución de la cantidad de sucesos por año. Los datos recabados contienen información completa de los dos años (julio a diciembre), lo que permite comparar la situación en los años 2019 y 2020.

5.2 Estudio del rendimiento del servicio real y en escenarios alternativos

Con el fin de evaluar el rendimiento del servicio SAMUR-PC en los años de estudio y analizar los efectos de posibles cambios, que se producirían en escenarios alternativos se procede a usar un

MLA de maximización de la cobertura del servicio. Esta solución precisa definir un número de bases que deberían ser localizadas dentro de un conjunto de sitios candidatos para poder atender al mayor número de sucesos que requieren la atención del SME dentro de una impedancia determinada. Se ha elegido la solución maximizar cobertura ya que es una de las más empleadas para formular problemas de localización de ambulancias (Dibene et al., 2017; Eaton et al., 1985; Jia et al., 2007). Este tipo de solución puede expresarse como se muestra en la ecuación 1, según la definición de Church y ReVelle (1974).

$$(a) \text{ Max } \sum_{i \in I} a_i y_i$$

Sujeto a:

(Ec. 1)

$$(b) \sum_{j \in N_i} x_j \geq y_i, \forall i \in I$$

$$(c) \sum_{j \in J} x_j = P$$

$$(d) x_j = \{0, 1\}, \forall j \in J$$

$$(e) y_i = \{0, 1\}, \forall i \in I$$

Donde:

I es el conjunto de puntos de demanda a cubrir;

J es el conjunto de bases candidatas;

S es la impedancia máxima a la que una base puede atender a cualquier punto de demanda;

d_{ji} es la distancia entre la base candidata j -ésima y el punto de demanda i -ésima;

x_j es una variable binaria que indica si la base candidata j -ésima es parte de la solución propuesta;

y_i es una variable binaria que indica si la localización i -ésima está asignada;

N_i es el conjunto de bases candidatas j -ésimas que pueden atender al punto de demanda i -ésima al cumplir $d_{ji} \leq S$;

a_i es el peso de la demanda en la localización i -ésima;

P es el número de bases a ser ubicadas.

Como puede observarse, este modelo es dependiente del rendimiento de la red en el momento de realizar la asignación de bases y del número de bases a asignar.

5.3 Escenario base y alternativa

Los MLA se han desarrollado tomando en cuenta un escenario base que permita comparar con los diferentes escenarios alternativos, donde se considera evaluar el rendimiento del sistema de emergencias, ya sea aumentando tiempo de reacción o el número de bases existentes.

Todos los análisis se realizan considerando la congestión para el año 2019 como el caso más realista. Para el año 2020, y debido a la ausencia de datos relativos a la red en ese periodo, los resultados se estiman considerando la misma distribución e intensidad de la congestión utilizada para el periodo 2019 y, además, se ha considerado la red en flujo libre (sin congestión). De este modo, los resultados de 2020 se presentan en formato de intervalo y cada extremo de los intervalos se compara con el valor obtenido en 2019.

a) Escenario base

Se ha ejecutado un modelo de localización asignación donde se elige escenario de referencia el rendimiento del SAMUR-PC durante el periodo entre julio a diciembre 2019 por considerarse el escenario más acorde al diseño del sistema. Luego se comparan con el mismo periodo de 2020, para evaluar el rendimiento global en ambos años. Se parte de un MLA en donde se utilizan como sitios de demanda los sucesos segmentados en cuatro franjas horarias en días laborables y fines de semana (de 0.00 a 6.59, de 7.00 a 10.59, de 11.00 a 14.59 y de 17.00 a 21.59) y se evalúa la cantidad de sucesos cubiertos en cada base durante el día.

Como candidatos se eligen las 22 estaciones actuales del servicio de emergencia SAMUR-PC. El modelo se ejecutó con un umbral de respuesta de 8 minutos, considerando que este es el tiempo medio de respuesta según el SAMUR-PC. Además, justificamos la elección de este umbral con los estándares de la OMS, donde se establece que 8 minutos es el tiempo ideal para que los servicios de emergencias lleguen a dar atención (Nogueira et al., 2016; OMS, 2008).

Para analizar el tiempo de reacción del servicio de emergencia desde las bases hasta el lugar del suceso se toma en cuenta la red de calles bajo condiciones de congestión, para 2019 y 2020 y sin congestión en las mismas franjas horarias en que se dividen los sucesos.

b) Escenario alternativo 1: Modelo aumentando el tiempo de reacción

Para el desarrollo de los MLA planteados en este escenario utilizamos los mismos parámetros que en el modelo del escenario base. La diferencia radica en el aumento paulatino del umbral de distancia a partir de los 8 minutos. El enfoque consiste en experimentar cuántos minutos adicionales se requieren en cada franja horaria del periodo julio a diciembre 2020 para lograr

los mismos porcentajes globales de cobertura que presentó el sistema de emergencia para 2019. Se ejecutan los modelos en las diferentes franjas temporales hasta que se obtenga en cada una un mejor rendimiento con respecto al escenario base (2019) y se analiza la repercusión territorial de estos cambios.

c) Situación alternativa 2: Modelo incrementando la cantidad de bases

En este MLA se propone como solución a la diferencia entre rendimientos globales el aumento de bases disponibles. Se realizan pruebas para determinar cuántas bases adicionales eran necesarias en 2020 para alcanzar o mejorar el porcentaje de sucesos cubiertos en 2019. El modelo se ejecutó utilizando las ubicaciones de las 22 bases existentes como instalaciones requeridas. Mientras que los sitios candidatos se obtienen a partir de los centroides de los hexágonos donde se produjeron sucesos en 2019 y 2020. La demanda se tomó de los centroides de cada franja temporal en que se dividieron los datos. Al plantear este modelo se estableció un umbral de respuesta de 8 minutos.

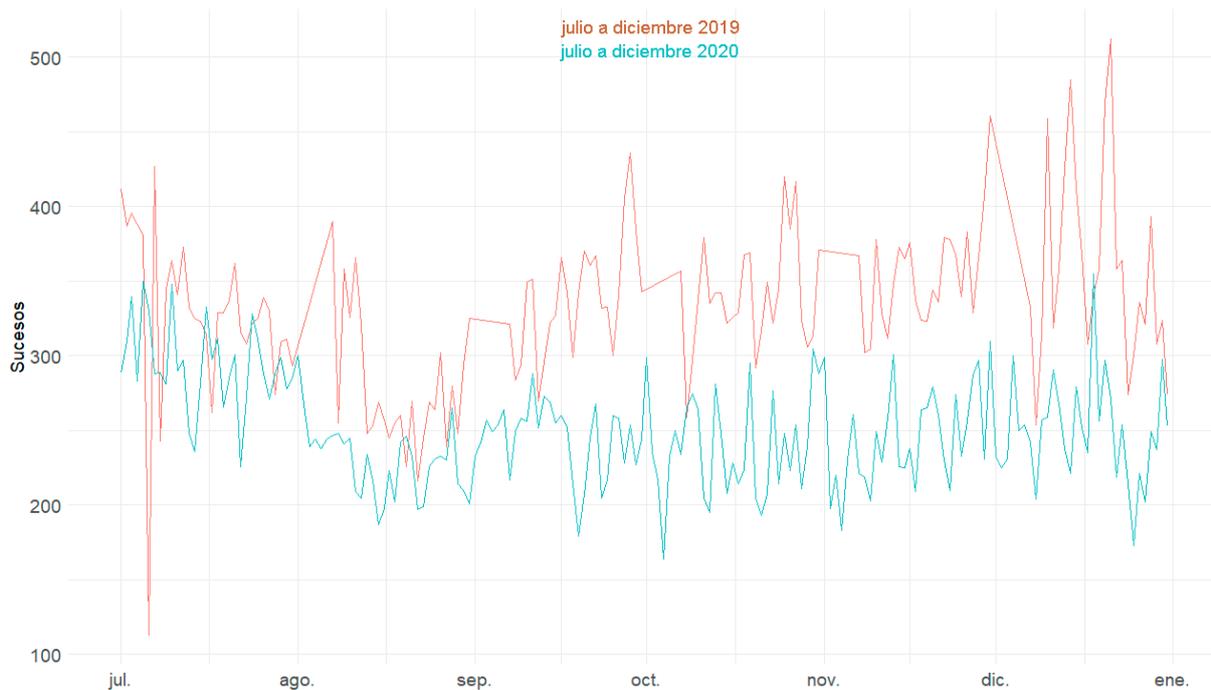
6 Resultados

En esta sección se muestra primero el análisis descriptivo de los sucesos atendidos por el SAMUR-PC. Por último, los resultados obtenidos de los modelos de localización donde se probaron diferentes tiempos de reacción y los que proponen aumentar el número de bases. Todos estos resultados se presentan de forma comparativa para el periodo de julio a diciembre para los años 2019 y 2020.

6.1 Análisis descriptivo de los sucesos del SAMUR

La Figura 3 presenta la evolución de los sucesos ocurridos durante el periodo julio-diciembre de 2019 y 2020. En 2019, se presenta una serie de picos de sucesos en diciembre, donde se llegaron a registrar más de 500 sucesos. Este repunte guarda relación con el alto volumen de peatones y vehículos que circulan por las principales arterias comerciales de la ciudad (Ayuntamiento de Madrid, 2020a). Por otro lado, se muestra menor número de sucesos atendidos en los meses de julio y agosto, coincidiendo con los periodos vacacionales donde la población local suele desplazarse a otras regiones del país (Instituto Nacional de Estadística de España, 2020).

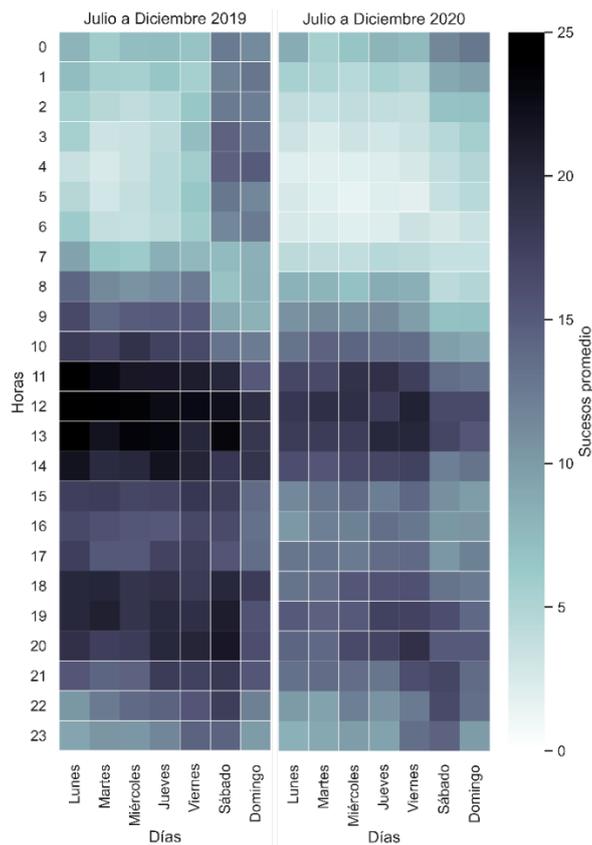
Figura 3. Evolución temporal de los sucesos 2019–2020



Fuente: elaboración propia a partir de registros del SAMUR-PC

Sin embargo, el patrón mostrado anteriormente mudó en 2020. Se destaca que se observó un primer pico en julio. Este pico quizás esté relacionado con la vuelta de las personas a las calles luego de sufrir meses de confinamiento por la crisis sanitaria de la COVID-19. Además, en 2020 disminuye el número de agosto a septiembre. Esto puede ser consecuencia del periodo de vacaciones, cuando la población volvió a aprovechar para viajar (Talavera-García & Pérez-Campaña, 2021). Luego el número de sucesos vuelve a incrementarse a partir de noviembre. En general, la serie temporal presenta en ambos años un patrón estacionario, donde se aprecian los mismos picos y caídas de sucesos. Debe recordarse que la política de contención de la COVID-19 en los primeros meses de la nueva normalidad, es decir, los últimos meses de 2020, se basó en cierres perimetrales que limitaban la movilidad, aunque no la restringían al completo. El número de sucesos atendidos en 2019–2020 por hora y día se muestra en la Figura 4. Para 2019, los días con mayor número de sucesos atendidos son los sábados y domingos. Mientras que, en 2020, la situación cambia y fueron los jueves y viernes los que presentaron los valores más altos. En cuanto a las horas, en ambos años se observó que la mayor concurrencia de sucesos se registró en las franjas de la mañana (de 11 a 14.59 h) y de la tarde (17 a 20.59 h).

Figura 4. Sucesos por hora y día 2019–2020



Fuente: elaboración propia a partir de registros del SAMUR-PC

Este comportamiento puede obedecer al considerable número de accidentes de tráfico que se producen en esas horas (Ayuntamiento de Madrid, 2020b) otros accidentes en vía pública y a la alta afluencia a los establecimientos comerciales. Por otro lado, destaca el comportamiento de la franja nocturna (0.00 a 5.59), esta franja suele no mostrar un gran número de sucesos a atender salvo los días de fin de semana de 2019. Esto debe ser consecuencia del gran número de actividad lúdica nocturna que había en aquel periodo y que no se repitió en 2020.

En cuanto al análisis espacial, la Figura 5a refleja el número de sucesos ocurridos durante el periodo de julio a diciembre 2019. Se observa una alta concentración de sucesos en el distrito Centro del municipio de Madrid, sobre todo en las calles Gran Vía, Alcalá, plaza de La Puerta del Sol y Atocha. Estas calles se caracterizan por ser zonas muy transitadas por los habitantes de la ciudad y los turistas (TC Group Solutions, 2021). Representan unas de las principales arterias comerciales de Madrid, ya que cuentan con una variada oferta de locales. También, encontramos otros focos de concentración de sucesos en los barrios de Salamanca y Tetuán.

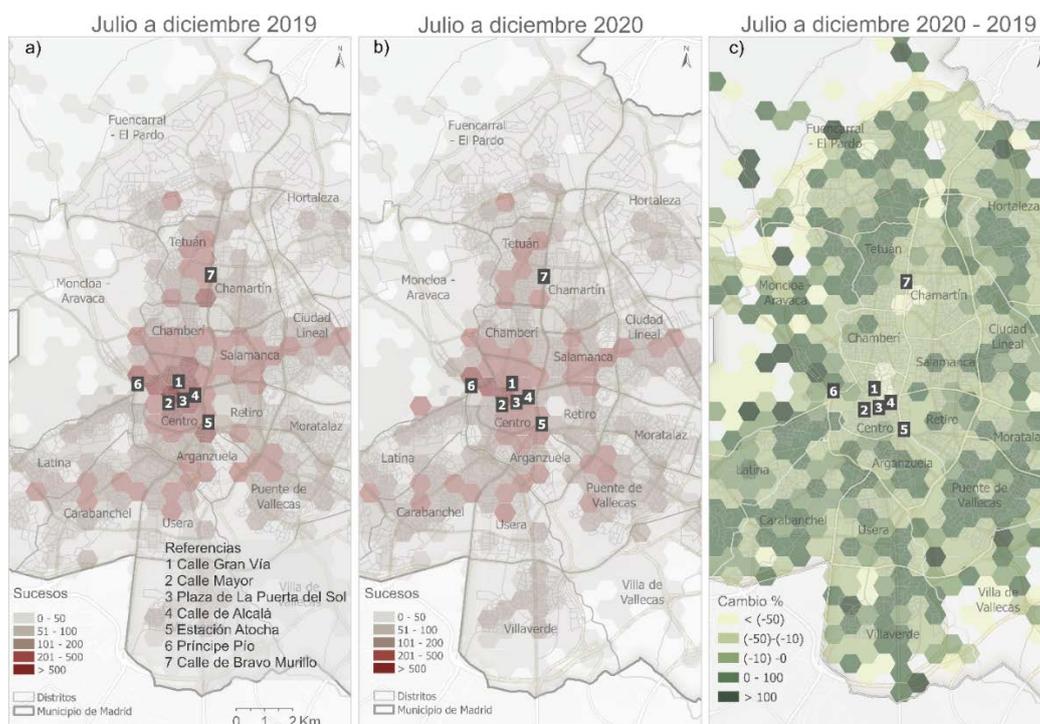
En cambio, la frecuencia de los sucesos que ocurren es menor en la periferia por tratarse de zonas residenciales, con una relativa menor actividad comercial y, por lo tanto, con menor

probabilidad de producirse un suceso que pueda ser atendido por el SAMUR-PC. La situación 2020 (Figura 5b) muestra una reducción en la intensidad de sucesos, pero destaca aún el elevado número de sucesos atendidos en el área central, en las zonas próximas a la Gran Vía y la plaza de La Puerta del Sol. En la Figura 5c se muestra la variación porcentual de sucesos para el periodo entre julio a diciembre en 2020 y 2019.

Nótese como los distritos más residenciales, por ejemplo, Tetuán, Latina, Puente de Vallecas, registraron un incremento porcentual positivo respecto a 2019, mientras que las áreas más centrales reducen su posición de centralidad con respecto al resto de distritos del municipio. Ello puede estar relacionado con el temor de la población a contagiarse (Lasa N, Gomez J, Padilla J, Garcia J, Gorosiaga A, 2020), al frecuentar sitios de gran aglomeración como es el centro de Madrid, en consecuencia, las personas preferían movilizarse en los alrededores de sus barrios y realizar actividades al aire libre (Mayo Clinic, 2022).

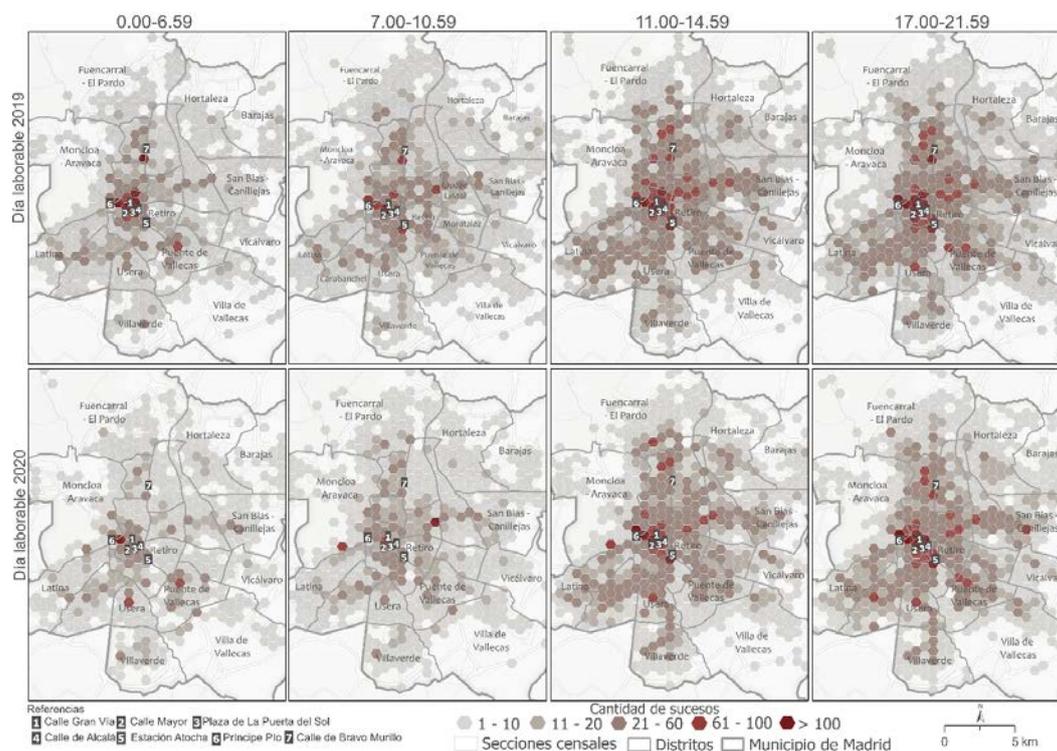
Los sucesos registrados en los días laborables del periodo de julio a diciembre de 2019 y 2020 se segmentaron en cuatro franjas horarias (Figura 6 y Figura 7). La Figura 6 muestra la distribución de los sucesos en los días laborables mientras que la Figura 7 muestra los resultados de la agrupación espacial de estos sucesos según el análisis de Anselin Moran's Local o LISA.

Figura 5. Sucesos atendidos y porcentaje de cambio en julio a diciembre 2019 y 2020



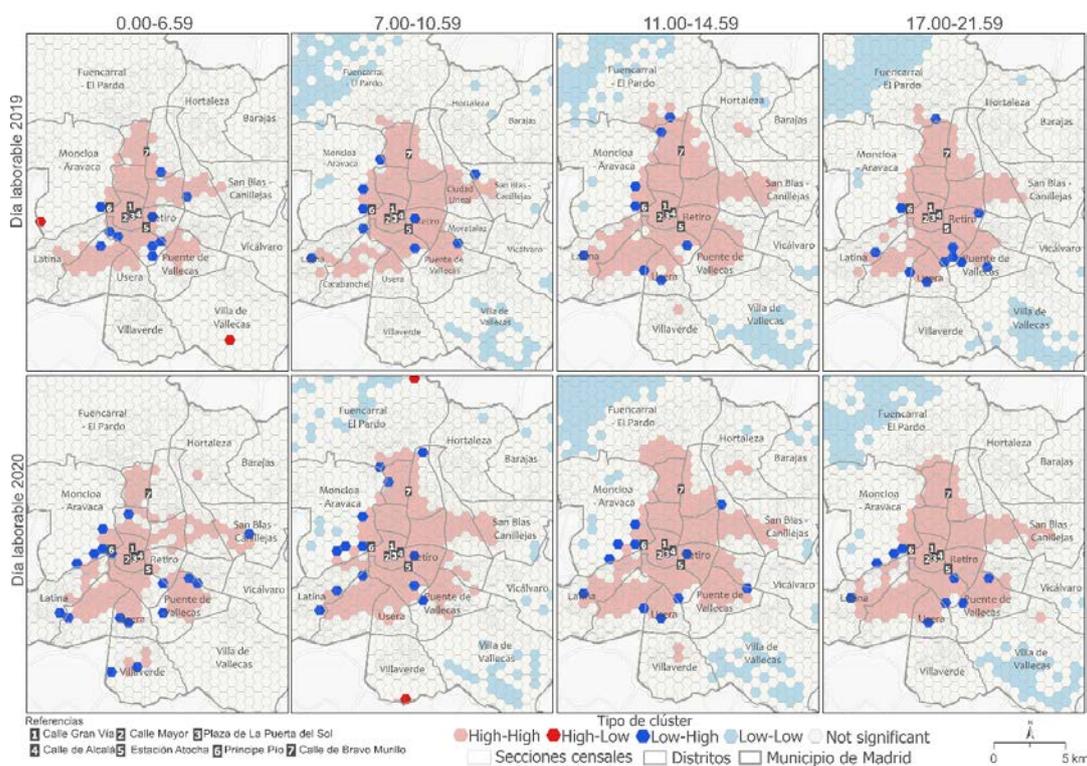
Fuente: elaboración propia a partir de registros del SAMUR-PC

Figura 6. Cantidad de sucesos por franja horaria año julio a diciembre 2019



Fuente: elaboración propia a partir de registros del SAMUR-PC

Figura 7. Resultados del análisis LISA en 2019 y 2020 según franjas temporales (días laborables)



Fuente: elaboración propia a partir de registros del SAMUR-PC

En general, se observó que la intensidad de los sucesos disminuyó en las cuatro franjas horarias al comparar ambos años, registrando los valores más extremos la franja 0.00-6.59 (-25 % respecto a 2019).

Durante las franjas horarias 11.00-14.59 y 17.00-21.59 se presentó el mayor registro de sucesos en ambos años (con una cifra cercana al 50 % de los sucesos atendidos en cada año). La primera reflexión al respecto surge porque en esas dos franjas horarias se desarrolla la jornada laboral y de ocio, lo que conlleva una mayor actividad de la población flotante en las diferentes zonas de la ciudad (Ayuntamiento de Madrid, 2015), aumentando de esta manera la posibilidad de ocurrencia de sucesos.

Por otro lado, los distritos que muestran la mayor concentración de sucesos en todas las franjas son el distrito Centro, Salamanca, Retiro, Puente de Vallecas y otros. Algunos de ellos caracterizados por un alto volumen de actividades comerciales y de ocio. (Ayuntamiento de Madrid, 2020c). En general, toda la zona conocida como la Almendra Central, los barrios que se sitúan dentro del anillo de circunvalación M-30, presenta una gran cantidad de sucesos tanto en los días laborables de 2019 como en 2020. Se destacan las calles Gran Vía, Mayor, Plaza de la Puerta del Sol, entre otras. Estas calles y plazas son iconos turísticos de la ciudad, en consecuencia, atraen un gran volumen de visitantes nacionales y extranjeros durante la mayor parte del año (Salas-Olmedo et al., 2018).

Obsérvese la formación del clúster HH (autocorrelación positiva de valores altos) en la parte central del municipio de Madrid (Figura 7), presentando una distribución similar en las franjas horarias diurnas y vespertinas y para ambos años. En este clúster destacan los siguientes distritos: Retiro, Centro, Puente de Vallecas, Chamberí, Salamanca, Tetuán, Arganzuela, entre otros. Sin embargo, esta estructura cambia en 2020, en la cual el área central se amplía e, incluso aparecen nuevas áreas clasificadas como HH en el sur de la ciudad. Este comportamiento puede ser, precisamente, por la pérdida del número de sucesos en el centro de la ciudad y el aumento en las áreas residenciales del arco suroeste-este.

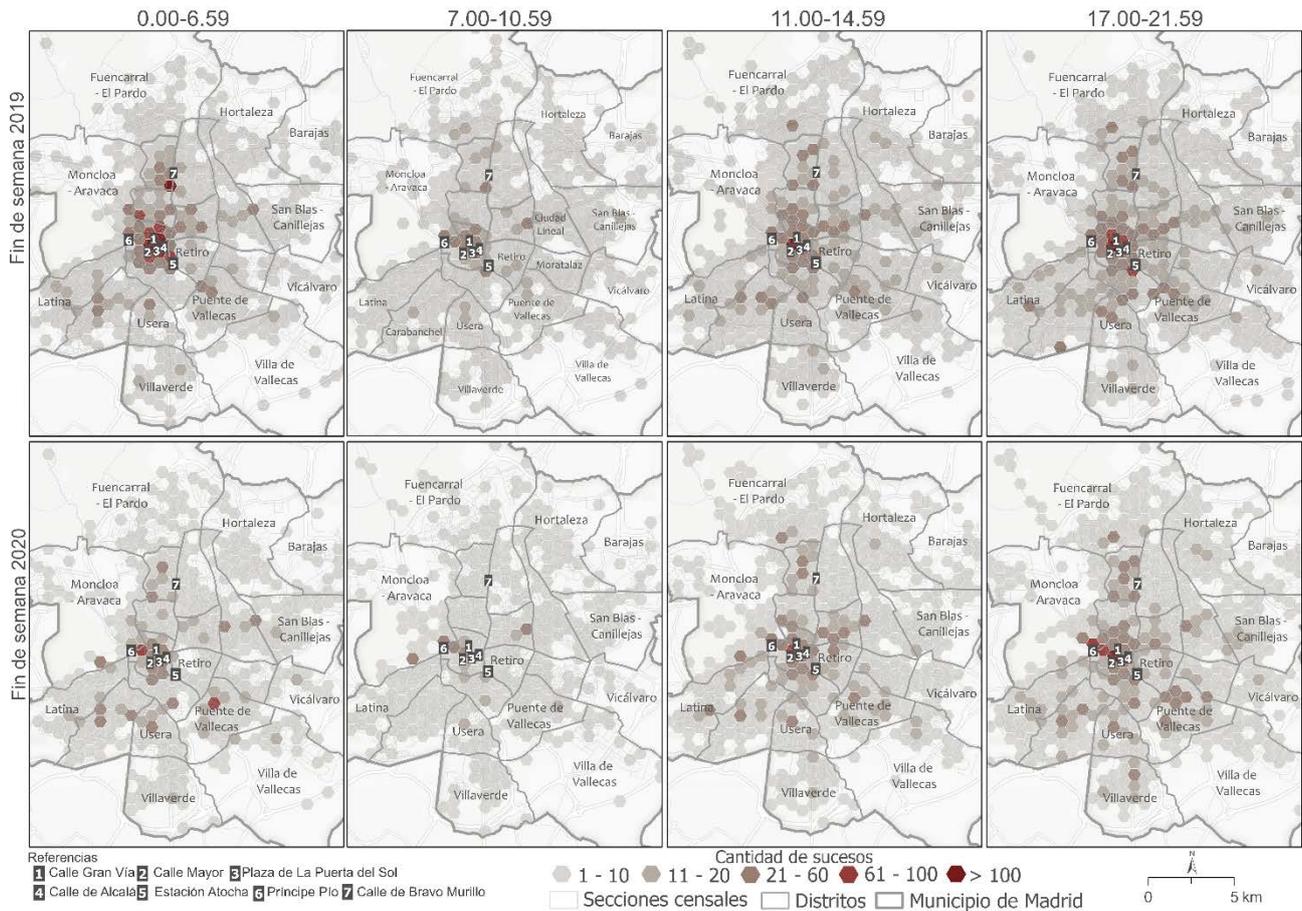
Por su parte, en la Figura 8, se muestran los valores y agrupaciones encontrados para los fines de semana de 2020 respecto a 2019. En las distintas franjas horarias de 2019, los sucesos se concentraron en la zona central del área de estudio, en las proximidades de importantes calles donde circulan una gran cantidad de peatones y vehículos (calle Gran vía, Mayor, Plaza de La Puerta del sol, estación de Atocha, entre otras) y con ocio nocturno. Mientras, en 2020, la distribución de los sucesos muestra las mismas zonas que en 2019, pero con una cantidad

mucho menor de sucesos atendidos. En cualquier caso, tal como se muestra en los mapas de la Figura 8, se observan comportamientos variados en cada una de las franjas horarias de los fines de semana. Al comparar las cuatro franjas horarias de los fines de semana de 2019–2020, se puede observar en las franjas 11.00-14.59 y 17.00-21.59, la presencia de una mayor concentración de sucesos en ambos años (alrededor de 17 % de los sucesos); producto de diferentes espacios de trabajo, ocio y restauración que se encuentran en la zona central de la ciudad de Madrid (Ayuntamiento de Madrid, n.d.).

La franja 0.00-6.59 muestra un comportamiento diferente al resto. Por un lado, es la reducción del área central de alta concentración de sucesos atendidos, destacando la no inclusión en esa área de los distritos de Retiro y Chamartín para el año 2019. Esta reducción puede explicarse, por un lado, porque en las horas de la madrugada de los días de semana la mayor parte de la población permanece en sus casas. En consecuencia, el nivel de actividad de la ciudad se ralentiza y disminuye la posibilidad de que ocurra algún suceso que requiera la atención del SAMUR-PC. Por otro lado, los distritos Retiro y Chamberí cuentan con numerosos espacios destinados al comercio, ocio y restauración que cierran (la mayoría) sus puertas al servicio de los usuarios en las horas de la madrugada. Sin embargo, el clúster central es de mayor extensión en 2020, siendo similar al observado en las otras franjas. Este comportamiento puede ser consecuencia de las políticas de reducción de movilidad para evitar el contagio de la COVID-19.

Obsérvese también, como los patrones espaciales, para los fines de semana, reflejados en la Figura 8 son bastante parecidos con los mostrados en los días laborables (Figura 6). En ambos años, los fines de semana existe una mayor concentración en las franjas horarias de 11.00 a 14.59 y de 17.00-21.59 en comparación con el resto de las franjas analizadas. Tal comportamiento puede explicarse por el hecho de que la jornada laboral y de ocio se desarrollan en estas franjas horarias. En consecuencia, existe una mayor presencia de personas en las calles, sobre todo, al entrar o salir de los centros de trabajo, por consiguiente, pueden sufrir algún tipo de percance durante su desplazamiento. Mientras que en la franja 00.00-06.59 la agrupación se reduce a las zonas de ocio y bares (Distritos Centro, Chamberí y Tetuán).

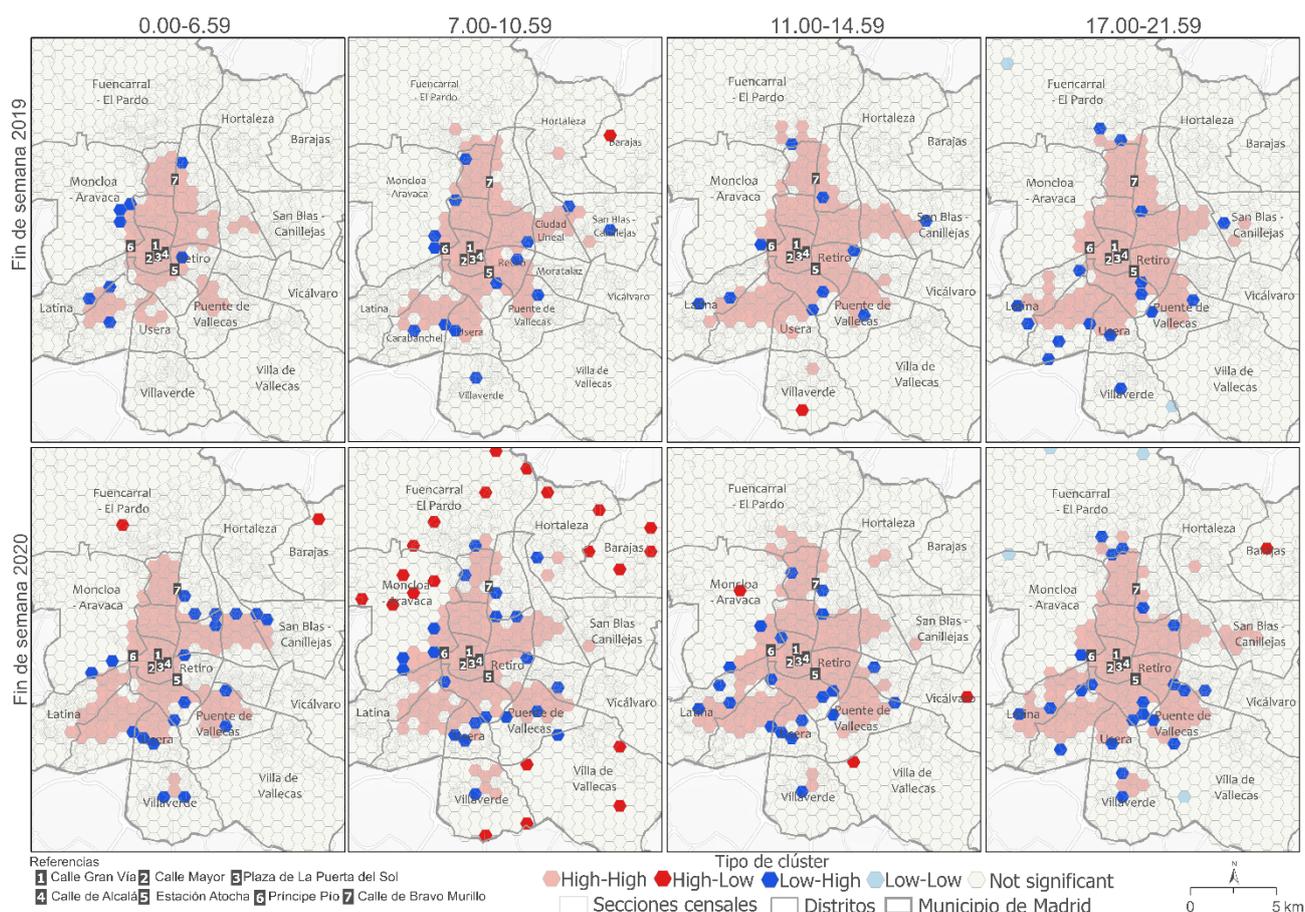
Figura 8. Cantidad de sucesos por franja horaria fin de semana
julio a diciembre de 2019 y 2020



Fuente: elaboración propia a partir de registros del SAMUR-PC

Comparando los clústeres presentados en los fines de semana de cada año (Figura 9), se pudo identificar que durante 2020 el tamaño es, ligeramente, menor, lo que indica que hubo una disminución en el número de sucesos a los que asistió el SAMUR. Estos patrones se repiten durante el resto de las franjas. Además, se observa que los fines de semana de 2020, la distribución espacial de los sucesos muestra patrones más dispersos. Donde aparecen, sobre todo, en la franja 7.00-10.59, algunos hexágonos que registran valores altos de sucesos en comparación con los vecinos. Una posible explicación para la presencia de estos valores altos en la periferia se debe a que son registrados en lugares específicos donde se podía realizar actividades al aire libre. Ejemplo de ellos son los parques o áreas verdes que la población prefería visitar luego del fin de los meses que duró el confinamiento domiciliario (Mayo Clinic, 2022).

Figura 9. Resultados del análisis LISA en 2019 y 2020 según franjas temporales (Fines de semana)



Fuente: elaboración propia a partir de registros del SAMUR-PC

6.2 Asignación en el escenario base

En 2019, con un tiempo de 8 minutos, las bases alcanzaron una cobertura que oscila entre el 85 % y el 98 % de los sucesos totales ocurridos (51 132) presentando los valores más altos los fines de semana. Este comportamiento se explica por los menores niveles de congestión en la red en comparación con los días laborables. Mientras tanto, en 2020, con un número menor de sucesos y considerando la misma congestión, sólo se cubrieron entre el 83 % y el 97 % (total de sucesos ocurridos 45 693), registrándose los valores más altos en los fines de semana. Por otro lado, los resultados alcanzados en 2020 en situaciones sin congestión en la red indican porcentajes de cobertura superiores al 94 %. Cabe señalar que en 2020 consideramos condiciones de congestión y sin congestión, en el supuesto de que la estructura del tráfico no cambió producto de algunas medidas que limitaban la movilidad aún estaban vigentes en la ciudad.

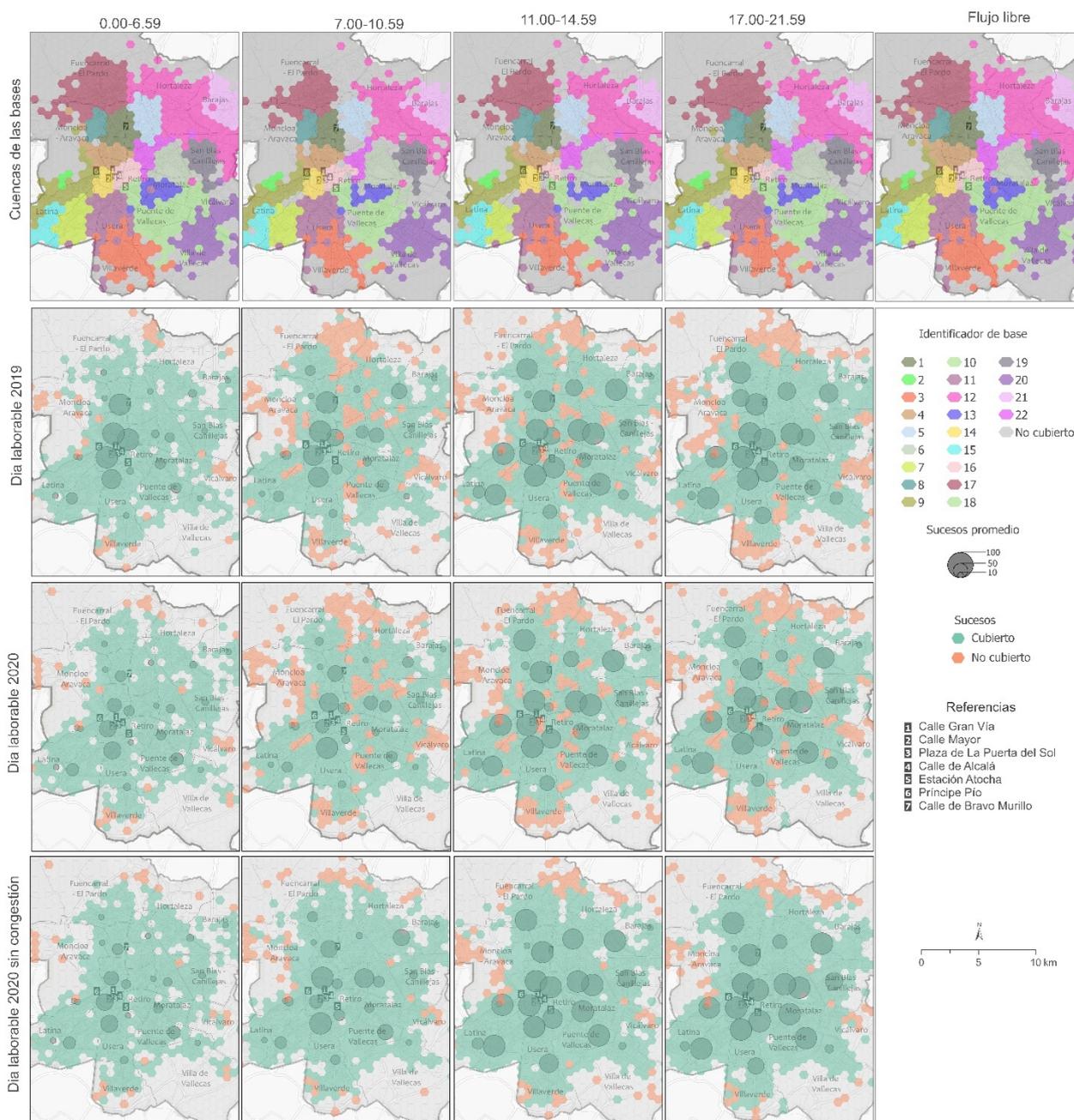
6.3 Diferencias en las áreas de asignación según franjas horarias

Para representar el área de influencia de cada base del SAMUR-PC y valorar los cambios en los puntos de demanda asignados, en días laborables y fines de semana, se han confeccionado las Figuras 10 y 11. En la primera fila de ambas figuras, se muestra el área de cobertura de las bases o qué base cubre a cada hexágono del estudio, los hexágonos en color gris indican aquellas zonas que pese a tener sucesos no podían ser cubiertos por ninguna de las bases en menos de ocho minutos según las condiciones de la red. El área de asignación de cada base según el MLA definido en la sección 5 solo cambia en función del estado de la red en cada franja horaria de estudio al asumir que la localización de éstas está predefinida. Las siguientes filas muestran la demanda cubierta (tamaño de círculos grises) por cada base, siendo estas variables al cambiar el número de sucesos que ocurren en cada uno de los hexágonos. Los colores verdes y naranjas representan, respectivamente, aquellos hexágonos asignados y no asignados a las bases. Para el caso de 2020 sin congestión, se usan las áreas de asignación resultantes del uso de la red en flujo libre.

El análisis de los cambios en las áreas de asignación, de cada base, reflejan patrones de comportamiento significativos. Se observa que, en los días laborables, las formas de dichas áreas son desiguales como consecuencia de los cambios en el comportamiento del tráfico vehicular durante el día. Estos cambios provocan que los sitios de demanda se reasignen entre las bases. Los cambios en la reasignación de las áreas de asignación son más notables en la franja 17.00-21.59, específicamente, en las bases con identificador 3, 12, 13 y 17, localizadas hacia el sur (Villaverde), centro este (Moratalaz) y norte (Fuencarral) del área de estudio. Lo que debería relacionarse con peores condiciones de tráfico hacia esas áreas en horas de la tarde.

Las áreas de asignación, en general, presentan pocos cambios, excepto en la franja 0.00-6.59 donde se observa que las bases pueden cubrir más territorio en 8 minutos, tal comportamiento es muy parecido en las áreas de asignación que muestran los resultados en condiciones sin congestión en la red. Lo anterior nos lleva a inferir que pese al paso expedito que poseen los servicios de emergencia en la circulación por las calles, las ambulancias, se ven afectadas por las horas pico de la congestión que existe en la ciudad.

Figura 10. Áreas de asignación de las bases del SAMUR-PC según franjas horarias en días laborables periodo julio a diciembre de 2019 y 2020



Fuente: elaboración propia a partir de registros del SAMUR-PC

Al enfocarnos en las áreas de asignación ubicadas en el distrito Centro (identificador 14 y 16), se observa que la dimensión de estas es muy pequeña en todas las franjas temporales. Lo que indica que a partir de la ubicación de estas bases las distancias recorridas en 8 minutos son muy cortas. Estas distancias pueden explicarse por qué en el centro de la ciudad de Madrid la congestión vehicular es muy alta durante el día y por la dotación de bases.

La Figura 10 muestra que la demanda cubierta por las bases SAMUR-PC cambia en cada momento del día durante los días laborables 2019 y 2020.

Este comportamiento es similar en ambos años. Además, hay cuatro bases situadas en el centro que, en todas las franjas horarias, muestran un mayor número de sucesos cubiertos. Lo cual coincide con los patrones de distribución espacial mostrados en las Figuras 6 y 8. En ellas se observa una concentración de sucesos en calles y plazas cercanas a las bases del SAMUR más activas durante el día (calles Gran Vía, Mayor, Alcalá y Puerta del Sol). En particular, durante el año 2020, las bases cubrieron un menor número de sucesos en comparación a 2019, reflejando el efecto causado por la disminución en la movilidad de la población en 2020 (Ayuntamiento de Madrid, 2020b; Ministerio de transportes movilidad y agenda urbana, 2020; TomTom, 2020).

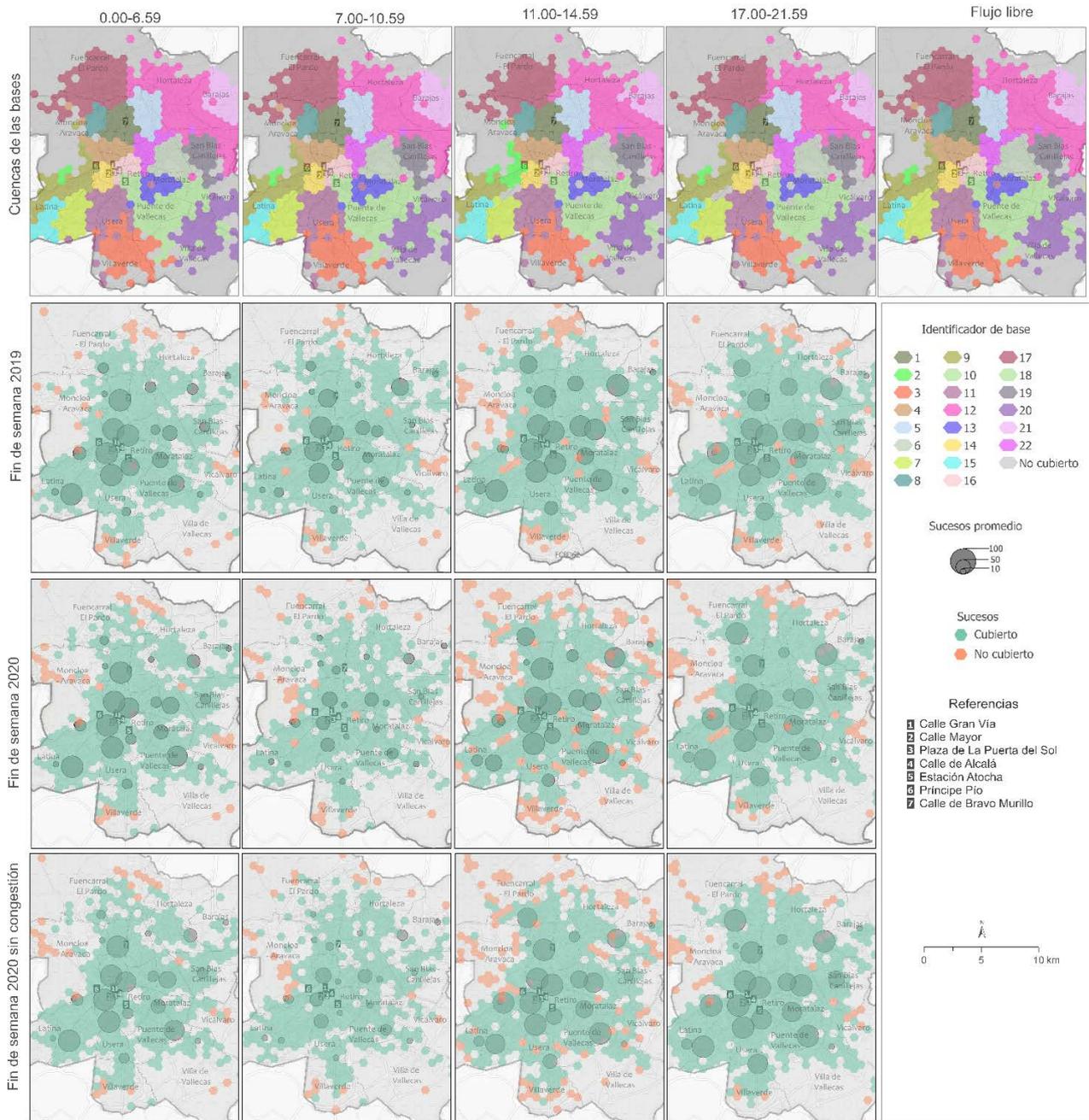
A su vez, la Figura 10 ilustra las áreas cubiertas por las bases del SAMUR-PC durante el día (color verde) y las no cubiertas (color naranja). Se observa que las franjas horarias 7.00-10.59, 11.00-14.59 y 17.00-21.59 (en los días laborables de ambos años) muestran zonas no cubiertas en ocho minutos, sobre todo, en la periferia del área de estudio, siendo más notable en los distritos Fuencarral y Hortaleza al norte y en el distrito Villaverde al sur. Dicho patrón indica que son las franjas más afectadas por la congestión de la red viaria. Esto se debe a que las horas punta de tráfico en la ciudad de Madrid son a primera hora de la mañana, cuando los trabajadores se desplazan a sus puestos de trabajo, y por la tarde, cuando los trabajadores regresan a sus hogares (Moya-Gómez & García-Palomares, 2017). De la misma manera, se observa que salvo en la franja nocturna (0.00 a 6.59) existen islas de celdas dentro del área central mostradas, anteriormente, que no pueden ser asignadas a ninguna base, puesto que necesitan más de 8 minutos para acceder a estas.

Por otro lado, en los mapas de los días laborables 2020 sin congestión (Figura 10) se puede observar un incremento de la cobertura de sucesos en todas las franjas horarias. La mayor cobertura se muestra en la franja 17.00-21.59 (hora punta de tráfico). Además, disminuye la cantidad de sitios sin cobertura (hexágonos naranjas) que se registraban en el centro, norte y sur del municipio. Estos resultados demuestran el impacto del tráfico en el tiempo de respuesta de los servicios de emergencias.

La Figura 11, cuya primera fila es la misma que en 2019 puesto que las áreas de asignación solo dependen del estado de la red muestra la distribución de la demanda cubierta por las bases en los fines de semana de ambos años. De manera general, se observan patrones bastante parecidos a los mostrados para los días laborables. Los cambios son más notables en la franja

7.00-10.59 de los fines semana 2020, tal como lo demuestra la disminución del tamaño de los círculos. Estos cambios pueden explicarse en parte porque en la franja señalada, la ciudad todavía no recuperaba el ritmo de actividad que mostraba en 2019 (Talavera-García & Pérez-Campaña, 2021), producto del temor que aún prevalecía en la población ante un posible contagio de la COVID-19. Además, se generó un éxodo de miles de madrileños tras la finalización del confinamiento del primer estado de alarma (Nommon, 2021). También obsérvese que, en el caso de fin de semana, apenas existen celdas dentro del área central que no pueden recibir el servicio del SAMUR-PC en menos tiempo del estipulado. En las franjas 11.00-14.59 y 17.00-21.59, la demanda cubierta supera a las otras dos franjas temporales analizadas. Esto se debe a la mayor movilidad de la población flotante desde las residencias a los puestos de trabajo y restaurantes ubicados en importantes arterias comerciales de la ciudad (De Cáceres & De la Hoz, 2009; Lobo, 1984). Limitando el análisis a los mapas de fin de semana 2020 sin congestión, obsérvese que algunas bases ubicadas en el distrito Centro incrementan el número de sucesos que deberían atender.

Figura 11. Áreas de asignación de las bases del SAMUR-PC según franjas horarias en fines de semana periodo julio a diciembre de 2019 y 2020



Fuente: elaboración propia a partir de registros del SAMUR-PC

Conocida la distribución espacial de los sucesos que pudieron ser atendidos en menos de 8 minutos y la carga de cada una de las bases, se muestra en la Tabla 1 los resultados globales del desempeño del sistema tanto en condiciones de congestión y no congestión, en días laborables y fines de semana para las cuatro franjas horarias.

Tabla 1. Modelos con los sucesos atendidos y congestión en la red según franjas horarias julio a diciembre 2019–2020

| FRANJA TEMPORAL | | BASES ACTUALES | | | | | |
|-----------------|-------------|----------------|------|----------------|------|----------------|------|
| | | 2019 | | 2020 | | | |
| | | CON CONGESTIÓN | | CON CONGESTIÓN | | SIN CONGESTIÓN | |
| | | SUCESOS | % | SUCESOS | % | SUCESOS | % |
| Día laboral | 0.00-6.59 | 4372 | 97,5 | 3235 | 95,6 | 3251 | 96,0 |
| | 7.00-10.59 | 4735 | 85,7 | 3977 | 83,8 | 4518 | 95,2 |
| | 11.00-14.59 | 8378 | 86,1 | 7975 | 85,4 | 8979 | 96,2 |
| | 17.00-21.59 | 8681 | 89,0 | 8265 | 86,5 | 9241 | 96,8 |
| Fin de semana | 0.00-6.59 | 3346 | 97,6 | 2251 | 96,4 | 2256 | 96,6 |
| | 7.00-10.59 | 1747 | 95,7 | 1174 | 92,8 | 1189 | 94,0 |
| | 11.00-14.59 | 3322 | 94,2 | 2711 | 93,4 | 2812 | 96,9 |
| | 17.00-21.59 | 3732 | 94,3 | 3417 | 95,2 | 3470 | 96,7 |

Fuente: elaboración propia a partir de registros del SAMUR-PC

Se valora que el sistema del SAMUR-PC pudo, en cualquier caso, llegar en menos de 8 minutos a más del 83,8 % de los sucesos. Los peores resultados se dan en las franjas horarias de 7.00-10.59 y 11.00-14.59 franjas en que la combinación de distribución del tráfico y distribución de los sucesos comprometen el desempeño del sistema. En este sentido, es de destacar como la franja de 17.00-21.59, franja con alta congestión (TomTom, 2020) y elevado número de sucesos, tiene un desempeño mejor que las franjas anteriores, seguramente por la mayor proximidad de los sucesos al conjunto de bases centrales. Por el motivo opuesto, el porcentaje de sucesos que se podían atender en el tiempo estipulado en 2020 para cualquier franja horaria y tipo de día es menor que el estimado para 2019 con congestión tanto para escenarios considerando la misma congestión como sin congestión. Finalmente, cabe comentar que los valores para los fines de semana son superiores al 94 % en cualquier caso, siendo consecuencia de la reducción de los tiempos de viaje por una menor congestión en la red viaria (TomTom, 2020).

6.4 Escenario con varios tiempos de reacción

En el punto anterior se ha mostrado que, para 2020, el sistema podría mostrar peores resultados que los registrados en la situación de normalidad o de diseño (año 2019). En esta sección se muestran los resultados de dos estrategias diferentes que intentan aumentar el número de

sucesos atendidos y tener rendimientos similares a los observados en 2019, cuando fuese necesario: el aumento del tiempo de viaje admitido para atender los sucesos o la instalación de bases extras, ubicadas en la mejor localización complementaria a las existentes, para atender más sucesos.

El enfoque de esta solución consistió en asignar el menor número de minutos adicionales que se hubiesen requerido para que el sistema del SAMUR-PC, con las bases ya existentes, pudiese alcanzar porcentajes similares o superiores a los obtenidos en 2019 para cada tipo de día y franja horaria.

La Tabla 2 resume la demanda y los porcentajes de cobertura conseguidos por las 22 bases del SAMUR-PC. Para ello se toma en cuenta la congestión en la red y la distribución de la demanda en días laborables y los fines de semana, según franjas horarias. Se observa que en casi todas las franjas horarias que mostraban un rendimiento inferior en 2020 con congestión que, en 2019, solo se hubiese requerido de un minuto adicional para alcanzar o mejorar los porcentajes de cobertura mostrados en 2019. La excepción a esta cobertura se registra en las franjas 0.00-06.59 (días laborables) y 7.00-10.59 (fines de semana) que requiere de hasta dos minutos adicionales para recuperar los valores de 2019. Por otro lado, considerando el año 2020 sin congestión hay tres escenarios que hubiesen requerido de minutos extras para llegar al mismo porcentaje de demanda cubierta que en 2019, demostrando el efecto que tuvo la relocalización de los sucesos debido a los cambios en el uso de la ciudad.

El incremento de entre uno o dos minutos tolerados para atender un suceso en 2020, con congestión y sin congestión, lleva conseguir aumentar el total de sucesos atendidos a valores superiores al 92 %, mejorando el valor mínimo del 85 % mostrado en 2019. Estas diferencias pueden explicarse en parte por las mejores condiciones de tráfico que se registran los fines de semana en la ciudad. Lo anterior permite corroborar el impacto de la congestión sobre el desplazamiento de las ambulancias del servicio de emergencias, a pesar del paso expedito que poseen estos vehículos cuando se movilizan al lugar donde ocurren los sucesos.

Por otro lado, los incrementos más llamativos de porcentaje de sucesos atendidos se presentan en las franjas 7.00-10.59, 11.00-14.59 y 17.00-21.59 de los días laborables con valores en torno a 7 % y 10 % para el caso de congestión. Esto nos lleva a inferir que en las franjas donde se presentan mayores niveles de congestión vehicular se requiere de minutos adicionales para poder mejorar la cobertura de los sucesos, ya que con ocho minutos quedan sin cobertura entre 15 % y 10 % de los sucesos. Los incrementos de porcentaje de sucesos atendidos en fin de

semana son mayores precisamente porque la red viaria está menos congestionada y se puede recorrer mayor distancia en ese minuto o dos minutos extra propuestos.

Tabla 2. Modelos con los sucesos y congestión de la red según franjas horarias de 2019-2020 (julio a diciembre)

| FRANJA TEMPORAL | | 2019 (ESCENARIO BASE) | | 2020 (CON CONGESTIÓN) | | | | | 2020 (SIN CONGESTIÓN) | | | | |
|-----------------|-------------|-----------------------|------|-----------------------|------|-------------|------|------|-----------------------|------|-----------|------|------|
| | | *SUC. | % | SUC. | % | **MIN EXTRA | SUC. | % | SUC. | % | MIN EXTRA | SUC. | % |
| Día laboral | 0.00-6.59 | 4372 | 97,5 | 3235 | 95,6 | 2 | 3331 | 98,4 | 3251 | 96,0 | 2 | 3331 | 98,4 |
| | 7.00-10.59 | 4735 | 85,7 | 3977 | 83,8 | 1 | 4400 | 92,7 | 4518 | 95,2 | 0 | - | - |
| | 11.00-14.59 | 8378 | 86,1 | 7975 | 85,4 | 1 | 8707 | 93,3 | 8979 | 96,2 | 0 | - | - |
| | 17.00-21.59 | 8681 | 89,0 | 8265 | 86,5 | 1 | 8921 | 93,4 | 9241 | 96,8 | 0 | - | - |
| Fin de semana | 0.00-06.59 | 3346 | 97,6 | 2251 | 96,4 | 1 | 2283 | 97,8 | 2256 | 96,6 | 1 | 2284 | 97,8 |
| | 7.00-10.59 | 1747 | 95,7 | 1.174 | 92,8 | 2 | 1219 | 96,4 | 1189 | 94,0 | 1 | 1210 | 95,7 |
| | 11.00-14.59 | 3322 | 94,2 | 2711 | 93,4 | 1 | 2830 | 97,5 | 2812 | 96,9 | 0 | - | - |
| | 17.00-21.59 | 3732 | 94,3 | 3417 | 95,2 | 0 | - | - | 3470 | 96,7 | 0 | - | - |

Leyenda: *Sucesos **Minutos

Fuente: elaboración propia a partir de registros del SAMUR-PC

En el caso de los resultados para 2020 sin congestión, las bases actuales en la mayoría de las franjas horarias logran en 8 minutos un mejor rendimiento con respecto a 2020 con congestión. Destacan las franjas 7.00-10.59, 11.00-14.59 y 17.00-21.59 para los días laborables que presentan valores entre el 11 % y 13 % superiores a los obtenidos para el año 2019, precisamente por ser el periodo de mayor congestión. Cabe señalar, que existen franjas horarias (0.00-6.59, 7.00-10.59 en fines de semana y 0.00-6.59 de los días laborales) que en situaciones sin congestión requieren entre uno y dos minutos para conseguir los resultados conseguidos en el escenario de referencia.

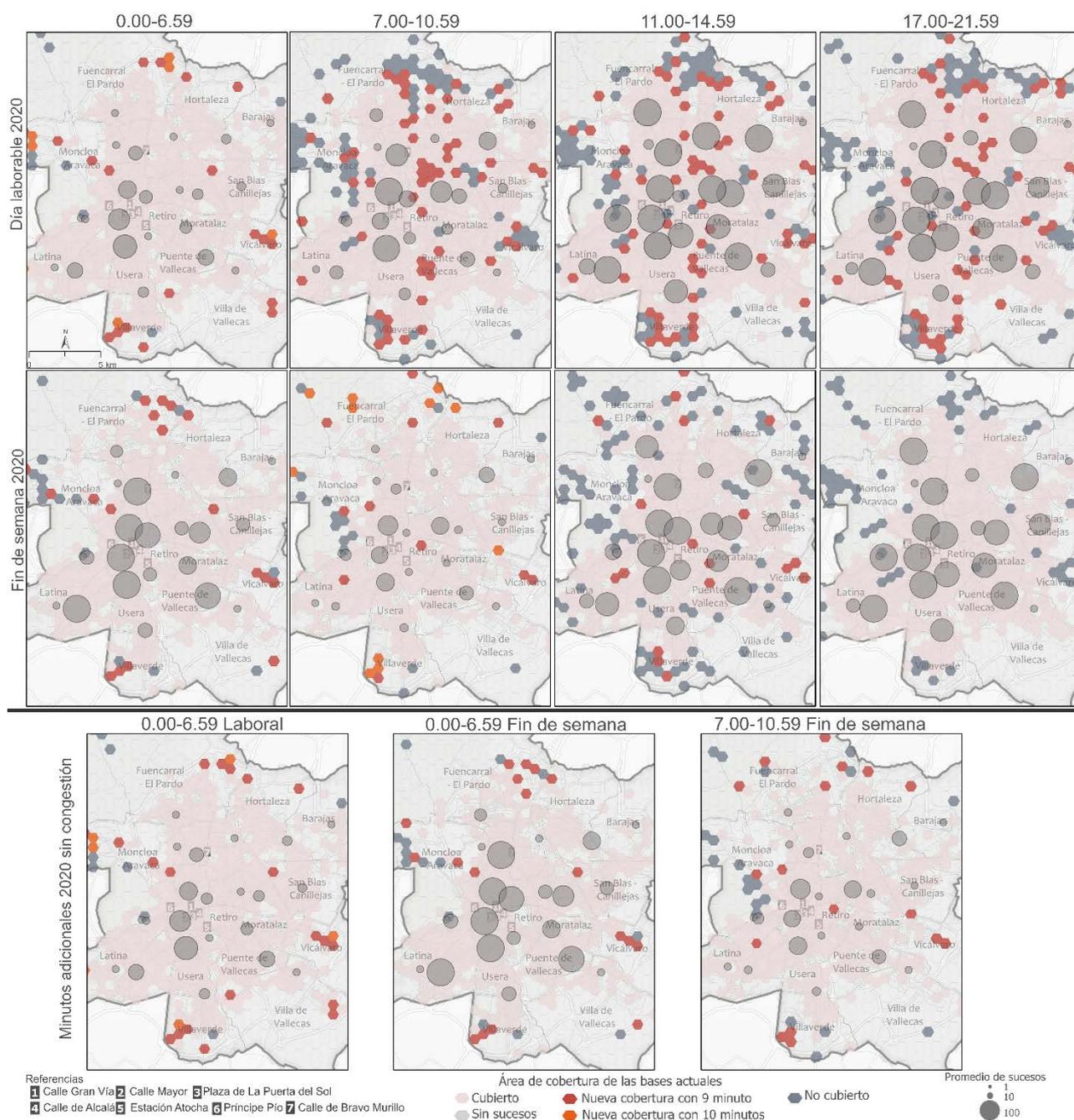
La Figura 12 muestra la cobertura para el año 2020 de las bases actuales con el incremento de los minutos considerando escenarios con y sin congestión en la red. Los hexágonos rosados representan la cobertura en 8 minutos, los de color rojo indican la nueva cobertura en un minuto

adicional (9 minutos), los de color naranja la cobertura que se consigue con dos minutos más (10 minutos), los colores grises más oscuros muestran los sitios no asignados a ninguna base y los grises menos oscuros representan sitios con ausencia de sucesos.

Se observa que con un minuto extra en las franjas 7.00-10.59, 11.00-14.59 y 17.00-21.59 se alcanzan los hexágonos ubicados tanto en la zona central como en las zonas periféricas, especialmente al norte y sur del área de estudio. Mientras que las franjas donde se ejecutó el modelo con dos minutos adicionales (0.00-6.59 laboral y 7.00-10.59 fin de semana) se cubren las áreas de la periferia. Mientras que en la franja 17.00-21.59 de los fines de semana no se requieren minutos adicionales para alcanzar el rendimiento logrado en el escenario de referencia (año 2019).

En la Figura 12 (tercera fila de mapas) también se muestra cuantos minutos adicionales se requieren en situaciones sin congestión en la red. Se observa que en la franja 0.00-6.59 (laboral) se requieren dos minutos extras para alcanzar los niveles de rendimiento ofrecido por el SAMUR-PC en 2019. Mientras en las franjas 0.00-6.59 y 7.00-10.59 de los fines de semana solo es necesario un minuto extra. En el resto de las franjas horarias la cobertura lograda fue superior al año 2019, por ello se omite representarlas en la figura en cuestión.

Figura 12. Cobertura de las bases actuales con más de 8 minutos con congestión y sin congestión



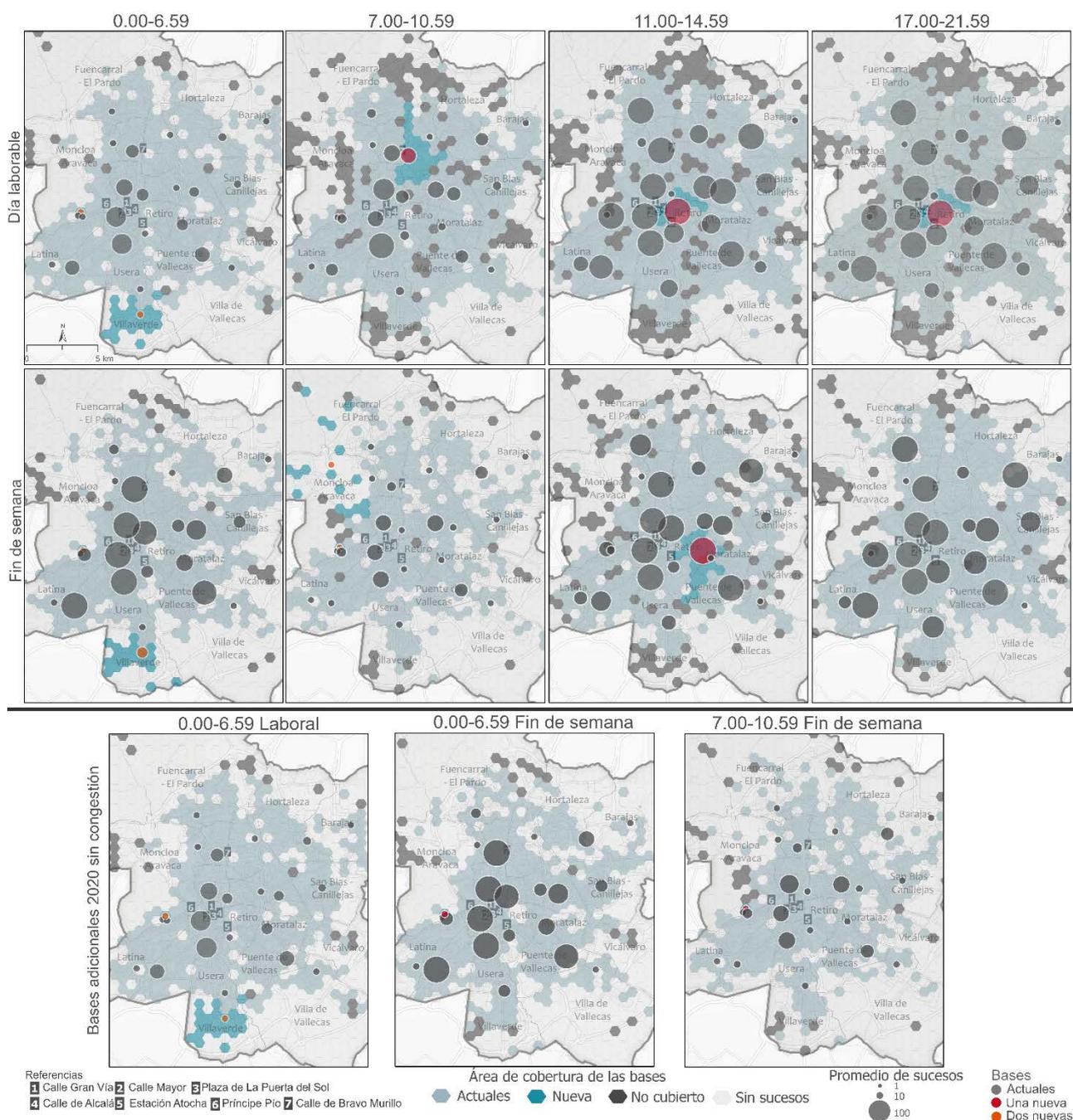
Fuente: elaboración propia a partir de registros del SAMUR-PC

6.5 Escenario con incremento del número de bases

En este modelo se ha tomado como escenario de referencia de comparación el porcentaje de sucesos cubiertos en 2019. Para ello ejecutamos varios modelos hasta obtener para 2020, la cantidad de bases adicionales requeridas. Con el objetivo de alcanzar o mejorar el porcentaje de demanda cubierta en 2019 se probó incluir bases, en cada franja, una vez igualada o

superada la cobertura del escenario de referencia; se dejaba de incluir nuevas bases. La Figura 13 muestra la ubicación de las bases SAMUR actuales (círculo gris) y las nuevas bases (círculo rojo tinto, en casos de una base, y naranja en casos de dos) incluidas en la solución propuesta considerando escenarios con y sin congestión en la red. Se muestra además el área de asignación de las bases propuestas (color cian), las áreas de asignación de las bases actuales (color celeste) y los hexágonos sin cobertura en gris.

Figura 4. Demanda cubierta por las bases actuales y propuestas con escenarios de congestión y sin congestión en la red



Fuente: elaboración propia a partir de registros del SAMUR-PC

Considerando el caso en el que la congestión no hubiese cambiado por la pandemia, se puede visualizar que las bases del centro de la ciudad son las que siguen cubriendo mayor demanda para todas las franjas horarias (Figura 13). Por su parte, las nuevas bases cambian de posición en función del comportamiento de los sucesos que se producen en cada una de las franjas horarias, tanto en días laborables como en los fines de semana. En particular, las nuevas bases deberían situarse en la Almendra Central para los días laborales salvo para la primera franja del día, en cuyo caso debería situarse en el distrito de Villaverde y Casa de Campo.

Es de destacar que para las franjas de 11.00-14.59 y 17.00-21.59 la base adicional debería situarse en el distrito de Retiro, aquellas zonas quedaban sin cubrir dentro del tiempo máximo estipulado como consecuencia de la congestión que existe durante el día.

Parece posible que estos resultados se deben a que esta zona cuenta con espacios de ocio (parque El Retiro) y de oficinas, lo cual puede originar un considerable volumen de personas moviéndose a través de sus calles. Además, en la calle Alcalá son muy comunes los accidentes de tráfico (Dirección General de tráfico, 2020). A su vez, estas nuevas bases pueden atender más demanda que algunas de las bases existentes, sobre todo, en las franjas 11.00-14.59 y 17.00-21.59, tal como indica el tamaño de los círculos rojos. En la franja de 7.00-10.59, la nueva base se desplaza hacia el distrito de Chamartín. Esto, posiblemente, guarde relación porque históricamente, en la calle Paseo de la Castellana y Ciudad Lineal, se registran muchos accidentes de tráfico.

Al poner el punto de interés en los fines de semana podemos observar que una de las nuevas estaciones repite la misma ubicación que durante la franja 0.00-6.59 de días laborables se trata de la nueva base en el distrito de Villaverde al sur del área de estudio. Este resultado podría estar relacionado con la cantidad de accidentes de tráfico que ocurre en la avenida de Andalucía y con la cercanía al parque Lineal de Manzanares, donde los visitantes pueden sufrir algún tipo de percance que requiera la atención del SAMUR-PC. Cabe señalar que en la franja 17.00-21.59 de los fines de semana no se requiere incluir ninguna nueva base.

En la Figura 13 (tercera fila de mapas) también se observa la ubicación de las estaciones extras en situaciones sin congestión en 2020. En las franjas horarias 0.00-6.59 (laboral y fin de semana) y la franja de 7.00-10.59 de los fines de semana la nueva base repite su ubicación en el distrito de Latina. Mientras que en la franja 0.00-6.59 una de las dos nuevas bases de los días laborables se localiza nuevamente en Villaverde.

En la Tabla 3, se presenta la demanda cubierta, implementando el modelo donde se busca el número mínimo de bases que se necesitan para igualar o mejorar la cobertura de 2019 en 2020 y de esta manera incorporar nuevas bases en el sistema de emergencias. A partir del escenario de referencia (porcentaje de cobertura en 2019), los resultados indican que solo se necesita una base adicional para lograr mejorar en 2020 la cobertura que se obtuvo en 2019 (franjas 7.00-10.59, 11.00-14.59, 17.00-21.59 en días laborables y la franja 11.00-14.59 fines de semana). Sin embargo, en otras franjas se requieren dos bases adicionales (0.00-06.59 en días laborables y las franjas 0.00-06.59, 7.00-10.59 en fines de semana). La recuperación del global de sucesos atendidos con bases adicionales es necesario en todas las franjas horarias considerando la congestión. Con las bases adicionales, se alcanzan incrementos por encima del 2 %, respecto a los sucesos cubiertos en 2020, con 22 bases los días laborables.

Tabla 3. Demanda cubierta por las actuales y nuevas bases según franjas horarias 2019-2020

| FRANJA TEMPORAL | | 2019 (ESCENARIO BASE) | | 2020 (CON CONGESTIÓN) | | | | | 2020 (SIN CONGESTIÓN) | | | | |
|-----------------|-------------|-----------------------|------|-----------------------|------|-------------|------|------|-----------------------|------|-------------|------|------|
| | | *SUC. | % | SUC. | % | BASES EXTRA | SUC. | % | SUC. | % | BASES EXTRA | SUC. | % |
| Día laboral | 0.00-6.59 | 4372 | 97,5 | 3235 | 95,6 | 2 | 3315 | 97,9 | 3251 | 96,0 | 2 | 3325 | 98,2 |
| | 7.00-10.59 | 4735 | 85,7 | 3977 | 83,8 | 1 | 4114 | 86,7 | 4518 | 95,2 | 0 | - | - |
| | 11.00-14.59 | 8378 | 86,1 | 7975 | 85,4 | 1 | 8238 | 88,3 | 8979 | 96,2 | 0 | - | - |
| | 17.00-21.59 | 8681 | 89,0 | 8265 | 86,5 | 1 | 8521 | 89,2 | 9241 | 96,8 | 0 | - | - |
| Fin de semana | 0.00-6.59 | 3346 | 97,6 | 2251 | 96,4 | 2 | 2292 | 98,2 | 2256 | 96,6 | 1 | 2278 | 97,6 |
| | 7.00-10.59 | 1747 | 95,7 | 1174 | 92,8 | 2 | 2292 | 98,2 | 1189 | 94,0 | 1 | 1212 | 95,8 |
| | 11.00-14.59 | 3322 | 94,2 | 2711 | 93,4 | 1 | 2760 | 95,1 | 2812 | 96,9 | 0 | - | - |
| | 17.00-21.59 | 3732 | 94,3 | 3417 | 95,2 | 0 | - | - | 3470 | 96,7 | 0 | - | - |

Leyenda: *Sucesos

Fuente: elaboración propia a partir de registros del SAMUR-PC

Una posible explicación a este comportamiento radica, por un lado, en que, durante las horas comprendidas por las franjas señaladas, la demanda se concentra en las zonas de gran actividad económica y de trabajo. Por otro lado, con las nuevas bases, se minimiza el efecto de la congestión del tráfico de vehículos existente en la ciudad en las horas pico de la mañana y la tarde. Estas franjas temporales coinciden con los desplazamientos a los colegios (Comunidad de Madrid, n.d.) y a los lugares de trabajo.

Los fines de semana 2020, en todas las franjas, con las bases añadidas se podría alcanzar valores cercanos al 100 %. La explicación de tales diferencias se debe, en parte, a los cambios en el comportamiento de la red de carreteras, que presentan un tráfico más fluido en sábados y domingos (TomTom, 2020).

Por otro lado, la Tabla 3 muestra que, en una de las franjas temporales, en escenarios sin congestión, se requieren dos bases adicionales para lograr los porcentajes de cobertura presentados en 2019. Al agregar dos bases al sistema de emergencias, en la franja 0.00-6.59 en día laboral, los porcentajes serían, ligeramente, superiores a los alcanzados en 2019. En cualquier caso, con la adición de las nuevas bases se alcanzan valores muy cercanos al 100 % de la demanda. Mientras que durante la franja horaria 0.00-06.59 y 7.00-10.59 solo es necesario incorporar una nueva base al sistema del SAMUR-PC.

La comparación de los datos de las Tablas 2 y 3 muestran que en casi todas las franjas el modelo donde se agregan minutos adicionales al tiempo de reacción estándar de los servicios de emergencia (8 minutos), presentan una mejor cobertura que el modelo donde se evaluó aumentar el número de las bases actuales. Se alcanzan incrementos que oscilan entre el 5 % y el 7 % para las franjas 7.00-10.59, 11.00-14.59, y 17.00-21.59 (horas pico de tráfico en la mañana y tarde) de los días laborables. El máximo valor se encuentra en la franja de 7.00-10.59 de los días laborables. Pero, agregar un minuto al tiempo de reacción podría acarrear riesgos para la sobrevivencia de los afectados por algún suceso (accidente de tráfico, enfermedad, entre otros), ya que con 9 y 10 minutos no se cumpliría con el tiempo de reacción estándar que establece la OMS para los servicios de emergencias (Nogueira et al., 2016; Pons & Markovchick, 2002; Villarreal et al., 2017).

7 Conclusiones

Este artículo presenta un análisis espacio temporal de los sucesos asistidos por el SAMUR-PC durante los meses de julio a diciembre de 2019 (antes de la pandemia de la COVID-19) y durante los meses de julio a diciembre de 2020 (primeros meses del periodo de nueva normalidad). Al mismo tiempo, evalúa la localización de las actuales bases del sistema de emergencias de Madrid y compara cuántas bases o minutos adicionales necesita el SAMUR-PC para lograr en 2020 los mismos o mejores porcentajes de cobertura alcanzados en 2019. A diferencia de trabajos anteriores sobre las bases de servicios médicos de urgencia, se realiza una prueba de estrés real y se valoran dos soluciones con resultados y efectos en la percepción del sistema diferentes. Para ello se ha contado con datos recogidos de GPS, que registran la

fecha y hora en que se produjeron los sucesos atendidos por el SAMUR-PC. Lo que permite tomar en cuenta los cambios en la distribución de la demanda a lo largo del día. Además, incorporamos las condiciones de tráfico en la red utilizando datos históricos de TomTom.

El uso de los datos recogidos por SAMUR-PC permitió evaluar la cobertura de las bases de la red de SAMUR-PC entre los años 2019–2020 y contrastar la funcionalidad del servicio durante los meses de julio a diciembre de ambos años. A diferencia de otros estudios, esta investigación propone una perspectiva dinámica. En primer lugar, se analiza las diferencias entre días laborables y fines de semana. En segundo lugar, fraccionamos la demanda en franjas horarias para analizar la distribución en diferentes momentos de los días laborables y los fines de semana del 2019 frente a 2020.

La metodología propuesta resulta de interés para la administración pública y los gestores de los servicios médicos de emergencia, cuando necesiten mejorar el tiempo de respuesta o aumentar el número de bases para ofrecer un mejor servicio a los ciudadanos. SAMUR-PC dispone de información precisa desde el punto de vista espacial y temporal sobre la fecha, la hora y la distribución de los sucesos atendidos. Con estos datos, es posible entender la potencial distribución futura de los sucesos y, por lo tanto, proponer modelos de localización asignación para encontrar la ubicación de nuevas bases que respondan a la futura demanda.

Los resultados indican que el servicio del SAMUR-PC presentó un desempeño bastante parecido en ambos periodos de comparación. Pero, la cantidad de sucesos cubiertos hubiese sido mayor en 2020 al incorporar minutos o bases adicionales. Estas propuestas hubiesen acercado las ambulancias tanto al centro, el cual tenía una alta actividad precisamente en las zonas que ya estaban mal cubierta y que mantuvieron la actividad, así como a las periferias, las cuales habían ganado actividad frente a lo previsto debido a las políticas de contención de la COVID-19.

Este artículo presenta una serie de limitaciones que pueden ser objeto de futuras líneas de investigación. Por un lado, se han valorado todos los sucesos de la misma manera, suponiendo que todos pueden ser atendidos desde cualquier base (mismos recursos) y que todos deben ser atendidos en el mismo tiempo máximo. Una segmentación de servicios permitiría conocer con más detalle el nivel de servicio del SAMUR, si bien la gran mayoría de sucesos son de los mismos tipos y sí pueden ser atendidos por todas las bases. Por otro lado, se ha considerado que todas las bases tienen recursos ilimitados para atender los sucesos. Se puede ampliar el estudio mediante el cálculo de segundas mejores asignaciones o determinar cuál es el área de

cobertura compartida entre varias bases y cuáles son propias de cada una de ellas, por tiempo máximo previsto de acceso al suceso.

Finalmente, en este estudio se ha supuesto que los SME pueden moverse a la misma velocidad que el tráfico en situación normal. Si bien es cierto que estos servicios disponen de preferencia y pueden alterar el tráfico para ganar un poco de tiempo, en muchos lugares es, prácticamente, imposible obtener cierta velocidad adicional. En todo caso, los valores de cobertura obtenidos en este estudio pueden considerarse próximos al valor inferior de los que se pueden obtener en la realidad (escenario pesimista). Otros estudios con el uso de registros GPS de los SME permitiría obtener unos resultados más realistas que, además, podrían ser la base para estudios más detallados con el fin de identificar puntos y tramos problemáticos de cara a proponer soluciones.

Agradecimientos: Esta investigación forma parte del proyecto PID2020-116656RB-I00 (NEWGEOMOB) financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y del proyecto PCI2020-120706-2 (DARUMA) financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea NextGenerationEU/PRTR, dentro del programa internacional EIG-CONCERT-JAPAN. Los autores también agradecen la financiación recibida de la Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología de Panamá (SENACYT) para la realización de esta investigación y al SAMUR-PC por facilitar datos necesarios para la realización de este artículo.

Declaración responsable: Los autores declaran que no existe conflicto de interés con relación a la publicación de este artículo. Onel Pérez-Fernández se ha encargado de la coordinación del artículo, así como del diseño y la conceptualización de la investigación y metodología. Borja Moya-Gómez ha contribuido a la definición de los aspectos metodológicos, la redacción del artículo, la construcción de la base de datos y la revisión general del artículo.

Bibliografía

- Abdelkarim, A. (2019). Integration of location-allocation and accessibility models in GIS to improve urban planning for health services in Al-Madinah Al-Munawwarah , Saudi Arabia. *Journal of Geographic Information System*, 11(6), 633-662. <https://doi.org/10.4236/jgis.2019.116039>
- Al-Sabbagh, T.A. (2020). GIS location-allocation models in improving accessibility to primary schools in Mansura city-Egypt. *GeoJournal*, 5. <https://doi.org/10.1007/s10708-020-10290-5>
- Arias-Molinares, D., Romanillos, G., García-Palomares, J.C., & Gutiérrez, J. (2021). Exploring the spatio-temporal dynamics of moped-style scooter sharing services in urban areas. *Journal of Transport Geography*, 96(July). <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2021.103193>
- Ayuntamiento de Madrid (n.d.). *Salir por Madrid*. <https://www.esmadrid.com/zonas-de-marcha-en-madrid>
- Ayuntamiento de Madrid (2015, July 7). *La población flotante de la ciudad de Madrid*. Barómetro de la economía de la ciudad de Madrid. <https://www.madrid.es/UnidadesDescentralizadas/UDCObservEconomico/BarometroEconomia/2015/Tercer trimestre/Ficheros/Monografico.pdf>
- Ayuntamiento de Madrid (2020a). *Oficina de apoyo a las áreas de actividad económica*. https://economia.madrid.es/FWProjects/economia/contenidos/Ficheros/UR5463-SR-UR-Distritos_20200428.pdf
- Ayuntamiento de Madrid (2020b, September 2). *Estado de la movilidad de la ciudad de Madrid*. <https://transparencia.madrid.es/FWProjects/transparencia/Movilidad/Trafico/Informe sMovilidad/Ficheros/InformeMovilidad2020.pdf>
- Ayuntamiento de Madrid (2020c, September 5). *Accidentes de tráfico*. Accidentes y víctimas de tráfico urbano por Día de la semana y Hora de ocurrencia. <https://www.madrid.es/portales/munimadrid/es/Inicio/El-Ayuntamiento/Estadistica/Areas-de-informacion-estadistica/Trafico-transportes-y-comunicaciones/Accidentes-de-trafico/Accidentes-de-trafico/?vgnnextfmt=default&vgnnextoid=d3a67e6f34969210VgnVCM2000000c20>
- Azarmand, Z., & Neishabouri, E. (2009). Location allocation problem. In H. Hekmatfar & R. Farahani (Eds.), *Facility Location: Concepts, Models, Algorithms and Case Studies, Contributions to Management Science* (pp. 93-101). <https://doi.org/10.1007/978-3-7908-2151-2>
- Azizan, M.H., Lim, C.S., Hatta, W.A., Lutfi, W.M., & Gan, L.C. (2012). Application of

OpenStreetMap data in ambulance location problem. In *Proceedings - 2012 4th International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks, CICSyN 2012* (pp. 321-325). <https://doi.org/10.1109/CICSyN.2012.66>

Barros, C., Moya-Gómez, B., & Gutiérrez, J. (2019). Using geotagged photographs and GPS tracks from social networks to analyse visitor behaviour in national parks. *Current Issues in Tourism, 0*(0), 1-20. <https://doi.org/10.1080/13683500.2019.1619674>

Bolouri, S., Vafaeinejad, A., Alesheikh, A.A., & Aghamohammadi, H. (2018). The ordered capacitated multi-objective location-allocation problem for fire stations using spatial optimization. *ISPRS International Journal of Geo-Information, 7*(2). <https://doi.org/10.3390/ijgi7020044>

Bolouri, S., Vafaeinejad, A., Alesheikh, A., & Aghamohammadi, H. (2020). Minimizing response time to accidents in big cities: a two ranked level model for allocating fire stations. *Arabian Journal of Geosciences, 13*(16). <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05728-6>

Buzai, G., & Baxandale, C. (1995). Modelos de localización-asignación aplicados a servicios públicos urbanos: análisis espacial de centros de atención primaria de Salud (CAPS) en la ciudad e Luján, Argentina. *Cuadernos de Geografía | Revista Colombiana de Geografía, 20*(2), 109-

123. <https://doi.org/http://www.uacm.kirj.redalyc.redalyc.org/articulo.oa?id=281821988009>

Church, R., & ReVelle, C. (1974). The maximal covering location problem. *Papers of the Regional Science Association, 32*(1), 101-118. <https://doi.org/10.1007/BF01942293>

Comunidad de Madrid. (2019, June 5). Jornada Escolar.

<https://www.comunidad.madrid/servicios/educacion/jornada-escolar#:~:text>

Condeço-Melhorado, A., Mohino, I., Moya-Gómez, B., & Palomares-García, J. C. (2020). The Rio Olympic Games : A Look into City Dynamics through the Lens of Twitter Data. *Sustainability, 12*(7003), 16. <https://doi.org/10.3390/su12177003>

De Cáceres, A.M., & De la Hoz, D. (2009). Efectos sobre la movilidad dinámica territorial de Madrid. *Urban, 1*(14), 58-71. <http://polired.upm.es/index.php/urban/article/view/307/309>

Dibene, J. C., Maldonado, Y., Vera, C., de Oliveira, M., Trujillo, L., & Schütze, O. (2017). Optimizing the location of ambulances in Tijuana, Mexico. *Computers in Biology and Medicine, 80*, 107-115. <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2016.11.016>

Dirección General de tráfico (2020, September 4). *Estadísticas de tráfico*. Anuario estadístico del 2020. <https://www.dgt.es/menusecundario/dgt-en-cifras/dgt-en-cifras-resultados/dgt-en->

[cifras-detalle/?id=00819](https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.08.002)

Eaton, D.J., Daskin, M.S., Simmons, D., Bulloch, B., & Jansma, G. (1985). Determining emergency medical service vehicle deployment in Austin, Texas. *Interfaces*, 15(1), 96-108.

<https://doi.org/10.1287/inte.15.1.96>

Frade, I., & Ribeiro, A. (2015). Bike-sharing stations: A maximal covering location approach. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 82, 216-227.

<https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.09.014>

García-Palomares, J.C., Gutierrez-Puebla, J., & Mínguez, C. (2015). Identification of tourist hot spots based on social networks: A comparative analysis of European metropolises using photo-sharing services and GIS. *Applied Geography*, 63, 408-417.

<https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.08.002>

Glodeanu, A., Gullón, P., & Bilal, U. (2021). Social inequalities in mobility during and following the COVID-19 associated lockdown of the Madrid metropolitan area in Spain. *Health & Place*, 70, 102580. <https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2021.102580>

Google (2020, September 2). *Informes de Movilidad Local*. Informe de Movilidad Local sobre el COVID-19.

https://www.gstatic.com/covid19/mobility/2022-08-28_ES_Community_of_Madrid_Mobility_Report_es.pdf

GoogleMap. (2022, September 1). Google. <https://www.google.com/maps/@40.3965955,-3.6048402,12.08z/data=!5m1!1e1>

Hunter, R.F., Garcia, L., de Sa, T.H., Zapata-Diomedí, B., Millett, C., Woodcock, J., Pentland, A. 'Sandy', & Moro, E. (2021). Effect of COVID-19 response policies on walking behavior in US cities. *Nature Communications*, 12, (1). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23937-9>

Instituto Nacional de Estadística de España (2020, September 5). *Estadística experimental*. Estudios de movilidad 2020-2021.

https://www.ine.es/experimental/movilidad/experimental_em4.htm#tablas_resultados

Jia, H., Ordóñez, F., & Dessouky, M. (2007). A modeling framework for facility location of medical services for large-scale emergencies. *IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)*, 39(1), 41-55. <https://doi.org/10.1080/07408170500539113>

Lasa, N., Gómez, J., Padilla, J., García, J., & Gorosiaga A.S.M. (2020). *Las consecuencias psicológicas de la Covid-19 y el Confinamiento*. <https://consaludmental.org/centro-documentacion/consecuencias-psicologicas-covid19-confinamiento/>

- Ledesma, L., & Zurita, J. (1995). Localización de equipamientos deseables los hospitales de la provincia Del Chaco. In J. Bosque Sendra & A. Moreno Jiménez (Eds.), *Localización de equipamientos y sig* (pp. 229-248). RAMA.
- Li, X., Zhao, Z., Zhu, X., & Wyatt, T. (2011). Covering models and optimization techniques for emergency response facility location and planning: A review. *Mathematical Methods of Operations Research*, 74(3), 281-310. <https://doi.org/10.1007/s00186-011-0363-4>
- Lobo, A.V. (1984). Movilidad espacial en Madrid. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 4, 208-209.
- Mayo Clinic (2022, March 1). *Actividades seguras al aire libre durante la pandemia de COVID-19*. <https://www.mayoclinic.org/es-es/diseases-conditions/coronavirus/in-depth/safe-activities-during-covid19/art-20489385>
- McKenzie, H. (2022, May 9). *Hexagons for Location Intelligence: Why, When & How?* CARTO Blog. <https://carto.com/blog/hexagons-for-location-intelligence/>
- Ministerio de Sanidad (2020, November 7). *Actualización nº 282. Enfermedad por el coronavirus (COVID-19)*. https://www.mscbs.gob.es/profesionales/saludPublica/ccayes/alertasActual/nCov/documentos/Actualizacion_282_COVID-19.pdf
- Ministerio de transportes movilidad y agenda urbana (2020, September 2). *Resumen de movilidad*. <https://www.mitma.gob.es/ministerio/covid-19/evolucion-movilidad-big-data/movilidad-nacional>
- Moovit (2020, November 7). *Impact of coronavirus on public transit usage*. https://moovitapp.com/insights/es/Moovit_Insights_Índice_de_Transporte_Público-countries
- Moya-Gómez, B., & García-Palomares, J.C. (2017). The impacts of congestion on automobile accessibility. What happens in large European cities? *Journal of Transport Geography*, 62, 148-159. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2017.05.014>
- Namazian, Z., & Roghanian, E. (2019). A decision problem for bank branch site selection: A GIS Mapping perspective with Maximal Covering Location Problem: A case study of Isfahan, Iran. *Computers and Society*. <http://arxiv.org/abs/1909.00130>
- Nogueira, L.C., Pinto, L.R., & Silva, P.M.S. (2016). Reducing Emergency Medical Service response time via the reallocation of ambulance bases. *Health Care Management Science*, 19(1),

31-42. <https://doi.org/10.1007/s10729-014-9280-4>

Nommon (2021, September 5). *Análisis de la movilidad en España tras el fin del estado de alarma*. <https://www.nommon.es/es/noticias/page/3/>

OMS (2008). *Emergency medical services systems in the European Union*. https://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0016/114406/E92038.pdf

Páez, A., Scott, D.M., & Morency, C. (2012). Measuring accessibility: Positive and normative implementations of various accessibility indicators. *Journal of Transport Geography*, 25, 141-153. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2012.03.016>

Pons, P.T., Haukoos, J.S., Bludworth, W., Cribley, T., Pons, K.A., & Markovchick, V.J. (2005). Paramedic response time: Does it affect patient survival? *Academic Emergency Medicine*, 12(7), 594-600. <https://doi.org/10.1197/j.aem.2005.02.013>

Pons, P.T., & Markovchick, V.J. (2002). Eight minutes or less: Does the ambulance response time guideline impact trauma patient outcome? *Journal of Emergency Medicine*, 23(1), 43-48. [https://doi.org/10.1016/S0736-4679\(02\)00460-2](https://doi.org/10.1016/S0736-4679(02)00460-2)

Rajagopalan, H.K., Saydam, C., & Xiao, J. (2008). A multiperiod set covering location model for dynamic redeployment of ambulances. *Computers and Operations Research*, 35(3), 814-826. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2006.04.003>

Romanillos, G., García-Palomares, J.C., Moya-Gómez, B., Gutiérrez, J., Torres, J., López, M., Cantú-Ros, O.G., & Herranz, R. (2021). The city turned off: Urban dynamics during the COVID-19 pandemic based on mobile phone data. *Applied Geography*, 134. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2021.102524>

Salas-Olmedo, M.H., Moya-Gómez, B., García-Palomares, J.C., & Gutiérrez, J. (2018). Tourists' digital footprint in cities: Comparing Big Data sources. *Tourism Management*, 66, 13-25. <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2017.11.001>

SAMUR (2020, April 15). *Parque de vehículos. Ambulancias*. <https://www.madrid.es/portales/munimadrid/es/Samur/SAMUR-Proteccion-Civil/?vgnextfmt=default&vgnextoid=c88fcd1bffa010VgnVCM100000d90ca8c0RCRD&vgnextchannel=84516c77e7d2f010VgnVCM1000000b205a0aRCRD&idCapitulo=10269430&page=1>

- Schmid, V. (2012). Solving the dynamic ambulance relocation and dispatching problem using approximate dynamic programming. *European Journal of Operational Research*, 219(3), 611-621. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.10.043>
- Serra, D., & Marianov, V. (2002). *New trends in public facility location modeling* (UPF Economics and Business Working Paper No. 755).. <https://doi.org/10.2139/ssrn.563843>
- Strohmandl, J., Tomek, M., Molnár, V., Jakubčeková, J. M., Fedorko, G., & Maláková, S. (2021). Using travel times for optimization numbers of medical rescue service points—case study from Slovakia. *Sustainability*, 13(1), 1-12. <https://doi.org/10.3390/su13010207>
- Sun, C.H., Cheng, C.Y., Wang, C.H., & Hsiao, P.H. (2020). Dynamic floating stations model for emergency medical services with a consideration of traffic data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(5). <https://doi.org/10.3390/ijgi9050336>
- Talavera-Garcia, R., & Pérez-Campaña, R. (2021). Applying a pedestrian level of service in the context of social distancing: The case of the city of madrid. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(21). <https://doi.org/10.3390/ijerph182111037>
- Tassone, J., & Choudhury, S. (2020). A comprehensive survey on the ambulance routing and location problems. *Artificial Intelligence*. <http://arxiv.org/abs/2001.05288>
- TC Group Solutions (2021). *Informe retail intelligence 2021*. <https://www.tcgroupsolutions.com/recurso/informe-retail-intelligence-2021/>
- TomTom (2020, November 7). *Clasificación del índice de tráfico*. https://www.tomtom.com/en_gb/traffic-index/madrid-traffic/
- Villarreal, B., Granda-Gutierrez, E.M.A., Bastidas, S.L.A.C., & Montalvo, A. (2017). Decreasing ambulance response time through an optimal base location. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, 2017(JUL)*, 422-429. <https://pure.udem.mx/en/publications/decreasing-ambulance-response-time-through-an-optimal-base-locati>
- Wang, W., Xu, Z., Sun, D., & Lan, T. (2021). Spatial optimization of mega-city fire stations based on multi-source geospatial data: A case study in beijing. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(5). <https://doi.org/10.3390/ijgi10050282>

Wondwossen, M., & Bedasa, A. (2019). Location allocation analysis for urban public services using GIS techniques: A case of primary schools in Yeka sub-city, Addis, Ethiopia. *American Journal of Geographic Information System*, 8(1), 26-38.

<https://doi.org/10.5923/j.ajgis.20190801.03>

Yin, P., & Mu, L. (2012). Modular capacitated maximal covering location problem for the optimal siting of emergency vehicles. *Applied Geography*, 34, 247-254.

<https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.11.013>

Yu, W., Guan, M., & Chen, Y. (2020). Fire stations siting with multiple objectives and geospatial big data. *Earth Science Informatics*. <https://doi.org/10.1007/s12145-020-00539-5>

Zhou, L., Wang, S., & Xu, Z. (2020). A multi-factor spatial optimization approach for emergency medical facilities in Beijing. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(6).

<https://doi.org/10.3390/ijgi9060361>

Zhu, Y., Du, Q., Tian, F., Ren, F., Liang, S., & Chen, Y. (2016). Location optimization using a hierarchical location-allocation model for trauma centers in Shenzhen, China. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 5(10), 190. <https://doi.org/10.3390/ijgi5100190>