

# Uso de simulación de eventos discretos y algoritmos genéticos para estimar los recursos necesarios para responder oportunamente en el sistema de emergencias médicas en Bogotá

Leonar G. Aguiar M<sup>a, b, \*</sup>, Rafael R. Rentería<sup>c</sup>, Jorge Catumba-Ruiz<sup>d</sup>, José O. Barrera<sup>e</sup>,  
Johan M. Redondo<sup>f</sup>

<sup>a</sup> Facultad de Medicina, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

<sup>b</sup> Departamento de Medicina Interna, Hospital Universitario San Ignacio, Bogotá, Colombia

<sup>c</sup> Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Bogotá, Colombia

<sup>d</sup> International Research Center for Applied Complexity Sciences, Bogotá, Colombia

<sup>e</sup> Secretaría Distrital de Salud, Bogotá, Colombia

<sup>f</sup> Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas, Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia

**\* Autor de  
correspondencia**

laguiar@javeriana.edu.co

## Citación

Aguiar M LG, Rentería RR, Catumba-Ruiz J, Barrera JO, Redondo JM. Uso de simulación de eventos discretos y algoritmos genéticos para estimar los recursos necesarios para responder oportunamente en el sistema de emergencias médicas en Bogotá. *Medwave* 2022;22(03):002100

## DOI

10.5867/medwave.2022.03.002100

## Fecha de envío

Feb 17, 2021

## Fecha de aceptación

Mar 2, 2022

## Fecha de publicación

Apr 13, 2022

## Palabras clave

Emergency Medical Services, Ambulance Reallocation, Ambulance response time, Computer simulation

## Correspondencia a

Transversal 4 #42-00 Bogotá, Colombia

## Resumen

### Introducción

Bogotá cuenta con un sistema de emergencias médicas de ambulancias públicas y privadas que responden a incidentes de salud. No se conoce, sin embargo, su suficiencia en cantidad, tipo y ubicación de recursos demandados.

### Objetivos

A partir de los datos del sistema de emergencias médicas de Bogotá, Colombia, se buscó primero caracterizar la respuesta pre hospitalaria en paro cardíaco. Luego, con el modelo se buscó determinar cuál sería el menor número de recursos necesarios para responder antes de ocho minutos, teniendo en cuenta su ubicación, número y tipo.

### Métodos

Se obtuvo una base de datos de incidentes reportados en registros administrativos de la autoridad sanitaria distrital de Bogotá (de 2014 a 2017). A partir de esa información, se diseñó un modelo híbrido basado en la simulación de eventos discretos y algoritmos genéticos para establecer la cantidad, tipo y ubicación geográfica de recursos, conforme a frecuencias y tipología de los eventos.

### Resultados

De la base de datos, Bogotá presentó 938 671 envíos de ambulancias en el período. El 47,4% de prioridad alta, 18,9% media y 33,74% baja. El 92% de estos correspondieron a 15 de 43 códigos de emergencias médicas. Los tiempos de respuesta registrados fueron mayores a lo esperado, especialmente en paro cardíaco extra hospitalario (mediana de 19 minutos). En el modelo planteado, el mejor escenario requirió al menos 281 ambulancias, medicalizadas y básicas en proporción de 3:1 respectivamente para responder en tiempos adecuados.

### Conclusiones

Los resultados sugieren la necesidad de incrementar los recursos que responden a estos incidentes para acercar estos tiempos de respuesta a las necesidades de nuestra población.

## IDEAS CLAVE

- ◆ Los tiempos de respuesta pre hospitalario en paro cardiorrespiratorio extra hospitalario en el análisis de la ciudad fueron mayores de lo recomendado internacionalmente.
- ◆ La simulación de eventos discretos y algoritmos genéticos son una estrategia de optimización de recursos y mejora del desempeño de los sistemas de emergencias médicas.
- ◆ La información analizada solo tuvo en cuenta los despachos de ambulancias del sistema de emergencias médicas, que son de dominio público.
- ◆ Es necesario incluir tiempos de respuesta combinados en futuros estudios.

## INTRODUCCIÓN

El cambio en las características de la pirámide poblacional generado por el aumento de esta en el rango de personas adultas, un mayor número de comorbilidades asociadas, así como muchos otros factores, han generado un cambio en los últimos años de los requerimientos a los diferentes sistemas de emergencias médicas por parte de la población [1]. Asimismo, el politraumatismo y el paro cardíaco extrahospitalario son entidades clínicas conocidas con alto impacto en mortalidad, morbilidad, costo y frecuencia. Es por ello que se han convertido en entidades trazadoras o indicadores de desempeño para evaluar los diferentes sistemas de emergencias médicas en el mundo [2,3]. En el caso del politraumatismo y el paro cardíaco extra hospitalario, se conoce que con intervalos de respuesta menores a cinco minutos con un desfibrilador e inicio de reanimación cardiopulmonar se puede evitar una muerte por cada ocho casos atendidos oportunamente (NNT = 8) [2].

El tiempo de respuesta en emergencia se ha vuelto el principal indicador de desempeño de los sistemas de emergencias médicas. Es definido como el tiempo entre la notificación del incidente y la llegada de la ambulancia al sitio de este. La Asociación Nacional de Protección contra Incendios (NFPA) a través de la norma de operaciones médicas de emergencia (NFPA 1710) y la norma de criterio de tiempos de respuesta (NFPA 1720), así como en varias publicaciones científicas, han propuesto que los tiempos de respuesta ideales en emergencia deben ser de ocho minutos o menos [3,4].

Los tiempos de respuesta reportados son muy variados en cada ciudad en el mundo, y se encuentran relacionados con las diferentes características de cada sistema de emergencias médicas encontrándose rangos que van desde 4 a 28 minutos, donde en algunos lugares de Asia, Latinoamérica y África han sido superiores a ocho minutos. Destacan ciudades como Belo Horizonte (21 minutos), Atenas (29 minutos), Sao Paulo (27 minutos), Baltimore (25 minutos), Chicago (10 minutos), Seattle (seis minutos), Melbourne (ocho minutos) y Ámsterdam (15 minutos) [1,5].

Bogotá, capital de la república de Colombia, tiene una población estimada de 7 333 415 habitantes, y su sistema de

emergencias médicas se compone de ambulancias privadas, así como de ambulancias públicas. El sistema de ambulancias públicas funciona a través del Número Único de Seguridad y Emergencias (NUSE123) que usa la línea de emergencias 123. Este transfiere las llamadas al centro operativo de la Dirección de Urgencias y Emergencias en Salud (DUES) con un código que tipifica el incidente y una prioridad preestablecida al código en tres niveles de prioridad (alta, media o baja). De los 96 códigos de tipificación prehospitales del Número Único de Seguridad y Emergencias (para octubre de 2017), 43 corresponden a incidentes en salud que son tipificados cuando se recibe una llamada al sistema de emergencias médicas, derivándola a la Dirección de Urgencias y Emergencias en Salud. Allí se determina el estado clínico del paciente, se le asigna y despacha los diferentes recursos necesarios según el incidente en salud.

Hoy en día no se conocen los tiempos de respuesta del sistema de emergencias médicas a los politraumatismos y al paro cardíaco extrahospitalario en Bogotá. Tampoco se sabe cuál es el número de ambulancias que deberían estar disponibles para responder en los tiempos esperados a las diferentes emergencias que se pueden presentar. Por este motivo es imprescindible estimar de la mejor forma los recursos necesarios para responder dentro del sistema de emergencias médicas y ayudar a generar un rendimiento óptimo. Ello se logra idealmente si cada caso es atendido por la ambulancia asignada a la estación más cercana, pero que en situaciones reales la demanda de ambulancias fluctúa a través del tiempo y el espacio. Además, se adicionan múltiples variables que terminan influyendo en el proceso. Los modelos de simulación de eventos discretos (DES) son una forma de metodología de modelado basada en computadora que permite de manera intuitiva y flexible simular comportamientos dinámicos de sistemas complejos e interacciones entre individuos, poblaciones y sus entornos [6]. Ello nos permite proporcionar información objetiva sobre sistemas y políticas, generando posibles modelos que sean cercanos a la realidad [1].

El objetivo de la investigación buscó caracterizar la respuesta prehospitales del sistema público de ambulancias, principalmente del politraumatismo y el paro cardíaco extrahospitalario, y determinar a través de la propuesta metodológica la cantidad de ambulancias básicas y medicalizadas necesarias para responder oportunamente a las necesidades del sistema de

emergencias médicas. La pregunta de investigación fue ¿cuál es el número de recursos necesarios para responder a las características de las emergencias del sistema de emergencias médicas de Bogotá de manera oportuna (antes de ocho minutos), considerando la ubicación, número y tipo de recursos? En este orden de ideas, el alcance del proyecto busca ayudar a establecer los recursos necesarios para responder oportunamente a las emergencias y ser una herramienta para optimizar el sistema de emergencias médicas y en un futuro, poder ayudar a disminuir los tiempos de respuesta prehospitolaria.

## MÉTODOS

Se realizó un diseño con aplicación de simulación basada en computadora, que usó la totalidad de los reportes de incidentes de salud del sistema de emergencias médicas de ambulancias públicas. Su fuente de información se obtuvo de la guía de tipificación de incidentes vigente y de las bases de datos de los años 2014 a 2017 del Sistema Integrado de Seguridad y Emergencias de Bogotá en los que despachó por lo menos un recurso definido como ambulancia médica o básica. El programa que se usó para la programación simulación de eventos discretos y algoritmos genéticos fue Python en su versión 3.7. Se analizaron los tiempos de respuesta prehospitolaria, según los códigos del Número Único de Seguridad y Emergencias (Anexo 1), desde el inicio de la atención hasta la llegada del recurso al sitio del incidente.

Las variables usadas fueron tipo de recurso de ambulancia, cantidad de recursos disponibles, fecha y hora de ingreso de la llamada al Número Único de Seguridad y Emergencias, tiempo de respuesta, tiempo de desplazamiento a la escena, tiempo de atención pre hospitalaria (comprendiendo la atención desde el inicio hasta que finalizar la atención), tiempo de permanencia en la escena, tiempo de desplazamiento y de permanencia en la institución hospitalaria.

Debido a la extensión geográfica de la ciudad de Bogotá, la dispersión de los incidentes de emergencia no presenta un patrón puntual marcado, mediante los cuales se logren construir inferencias importantes de la dinámica espaciotemporal de los eventos de emergencia. En conformidad con lo anterior y para construir una base robusta que capture la dinámica e incidencia de estos eventos en las diferentes zonas de la ciudad, se realizó una disección espacial a partir de polígonos denominados unidades de planeación zonal. Se trata de una división administrativa usada por el distrito para el desarrollo de medidas y estrategias de intervención públicas. Para el análisis de la información inicial, se describió los tiempos de respuesta de los indicadores trazadores y se analizaron según código prehospitolario. La unidad básica de análisis geográfico fue unidad de planeación zonal.

A partir de las estadísticas recolectadas en cada unidad de planeación zonal, se realizó un análisis exploratorio de los datos reales. Desde este comportamiento se propone la generación de eventos aleatorios mediante los cuales se pudiesen generar

todas las situaciones de emergencia en el distrito, conservando los patrones de comportamiento presentados en los datos reales. Por lo tanto, se generó un modelo con múltiples escenarios pseudoaleatorios, considerando algunos factores espaciotemporales tales como promedios de incidentes por cada año, cada día y hora del día. De igual manera, se calcularon frecuencias relativas por hora, discriminado por tipo de incidente y prioridad para reproducirlos a partir de estos cálculos, en cada una de las zonas a partir del sistema de emergencias médicas. Estas frecuencias nos ayudan a simular eventos o actividades separadas y discretas, que ocurren en un instante de tiempo (en muchas ocasiones sujeto a ciertos valores de probabilidad), y que alteran el estado del sistema. Particularmente, esta técnica es utilizada en la asignación de ambulancias para la simulación de incidentes de emergencia con resultados importantes en la reducción de tiempos en las respuestas del sistema de emergencias médicas en un territorio. Ello, desde la definición de una ubicación geográfica óptima de las ambulancias [7,8], o rediseño del sistema de emergencias médicas de la ciudad, desde los resultados obtenidos por la simulación [9].

Además de la creación de los incidentes, para esta simulación fue necesario establecer un sistema de prioridad de atención conforme a la premura con la que debe responder el sistema de emergencias médicas ante cada situación. Esto implica asignar las ambulancias mejor dotadas a los incidentes más graves y complejos, y las unidades básicas para atender las situaciones más leves. Como se trató de una simulación de un sistema real, se requirió considerar algunos elementos importantes sobre la asignación del recurso. En otras palabras, si existió un incidente de mayor grado de severidad, y no existió disponibilidad de ambulancias con las mejores dotaciones, el modelo de simulación asignó al siguiente recurso disponible con la mejor capacidad de atención. En caso contrario, buscó de manera sucesiva hasta agotar el inventario de unidades medicalizadas.

Desde el momento de la asignación de la ambulancia para la atención de un incidente, el modelo de simulación estableció un tiempo promedio de atención (estos datos fueron tomados del análisis espaciotemporal de los incidentes por unidad de planeación zonal), en el cual la unidad no podía ser reasignada hasta no completar el ciclo de actividades relacionadas a su asignación previa. A medida que se generó un número considerable de incidentes, fue necesario establecer una estrategia central de control que administró de manera adecuada la asignación de las ambulancias. Por ello, se realizó un apilamiento de los eventos para asignar las ambulancias conforme a la prioridad de atención que este requirió. A medida que se desocuparon estas, fueron dirigidas de inmediato a las zonas donde eran requeridas. En consideración con lo anterior, se utilizaron los principios de la teoría de cola [10–12], usando el principio FIFO (*First In, First Out*), donde el primer incidente de emergencia generado fue el primero en atenderse cuando las ambulancias estaban disponibles. Además de permitir la priorización al modelo de simulación, la aplicación de la teoría de colas y su proceso de apilamiento permite inferir un resultado determinante para la toma de decisiones en el sistemas de emergencias médicas, a

partir de la valoración del tiempo promedio de apilamiento por incidente y el tiempo estándar de atención de este [10,11], y para estimar la cantidad de unidades faltantes para cumplir con la calidad de la atención. Por último, la aplicación de la teoría de colas en este modelo de simulación permite establecer cuáles son las proporciones de ambulancias (básicas y medicalizadas), minimizar la cantidad promedio de incidentes apilados, y la reducción del promedio de atención según los estándares del servicio médico de emergencia [12].

La asignación de las ambulancias en la simulación se realizó de acuerdo con la prioridad de los incidentes. En prioridad alta se asignó ambulancia medicalizada, prioridad media se ordenó ambulancia básica y a los incidentes de prioridad baja no se concedió este recurso. Si al momento de asignarse el recurso no existió disponibilidad del tipo correspondiente a la prioridad del incidente, se envió una del otro tipo, si la hubiera disponible. Desde la llegada del recurso al lugar del incidente, se concedió a la ambulancia el tiempo restante para la finalización de la atención del incidente a partir del tiempo promedio de los registros de la Dirección de Urgencias y Emergencias en Salud entre la llegada del recurso a la escena y el cierre del incidente (tener disponible nuevamente el recurso). No se simuló sus traslados a instituciones hospitalarias, pero se incluyó este para finalizar cada incidente.

El tiempo de desplazamiento de los recursos se calculó teniendo en cuenta la distancia entre la ambulancia y el incidente, a la velocidad promedio establecida de la ciudad de Bogotá, de acuerdo a las cifras de la Secretaría Distrital de Movilidad (27 kilómetros por hora) de esta ciudad. No se consideran averías o eventos anormales de los recursos. Tampoco cambios de turno, horas de almuerzo o mantenimientos. La simulación de eventos discretos se ejecutó para la semana con mayor volumen de incidentes. Para cada unidad de tiempo en la simulación se verificó el estado del incidente, aparición de nuevos incidentes, asignación en la cola, se registró hora de asignación y llegada, así como el cálculo del tiempo de finalización. Cuando se dio por finalizado el evento, se cambió el estado del recurso a disponible para una posible nueva asignación.

Complementando el modelo simulación de eventos discretos, se usó un proceso de optimización controlado por algoritmos genéticos [13], para validar la idoneidad de los escenarios simulados resultantes de la simulación de eventos discretos. Este proceso de validación consiste en aplicar el operador de cruzamiento de manera pareada a 20 réplicas o escenarios, simulados generados por la simulación de eventos discretos. De cada pareo, se obtiene un escenario que mezcla los mejores valores

de tiempo de llegada, efectividad en asignación, cantidad de eventos no atendidos, y cantidad promedio de incidentes atendidos por ambulancia (donde los mejores valores son aquellos que tienen mayor similitud y menos dispersión con los datos reales). Es decir, el algoritmo seleccionó el escenario con mejores parámetros descritos previamente y luego repitió este hasta completar todas las combinaciones entre los escenarios, y hasta tener el escenario más adecuado comparando en total 2000 escenarios con diferentes combinaciones o configuraciones [14]. De estos se seleccionó la configuración que tenga el mejor ajuste a los criterios ponderados de toda la simulación como la solución óptima del problema.

## RESULTADOS

Para la ciudad de Bogotá entre enero de 2014 y octubre de 2017 fueron despachados recursos a través de la Dirección de Urgencias y Emergencias en Salud a 938 671 incidentes (Tabla 1), en los que fue considerado necesario el envío de una ambulancia. De estos incidentes el 47,4% se consideró de prioridad alta, 18,9% de prioridad media y el 33,7% de prioridad baja.

En la Figura 1 se muestra el acumulado de los eventos, estos tuvieron la misma tendencia en su comportamiento separado por cada año en la mayoría de los códigos. De los 96 códigos para tipificar la totalidad de los incidentes de seguridad y emergencias del Número Único de Seguridad y Emergencias, 43 correspondieron a incidentes en salud. De estos últimos, 15 códigos correspondieron a 91,3% de todos los eventos en salud del periodo de interés. Estos fueron los usados para el modelo simulación de eventos discretos (Figura 2).

En cuanto al comportamiento en el periodo de 2014 a 2017 del código prehospitario 613 que representa al politraumatismo y el paro cardíaco extrahospitalario, se realizó un análisis exploratorio de datos. A partir de la curtosis y asimetría de estos en el boxplot, se obtuvo un patrón de similitud en la concentración de los incidentes entre los cuartiles Q1 y Q3 al paso del tiempo. De igual forma, vemos como en la Figura 3 la curtosis ha venido haciéndose cada vez menor en el tiempo, lo cual muestra que el sistema cada vez es más disperso en los tiempos de respuesta a este código. Asimismo, se observa una tendencia de aumento de la mediana, la cual para 2017 fue de 19 minutos.

En cuanto a la metodología simulación de eventos discretos y árboles genéticos se generaron 2000 configuraciones que fueron evaluadas y combinadas hasta obtener el modelo óptimo.

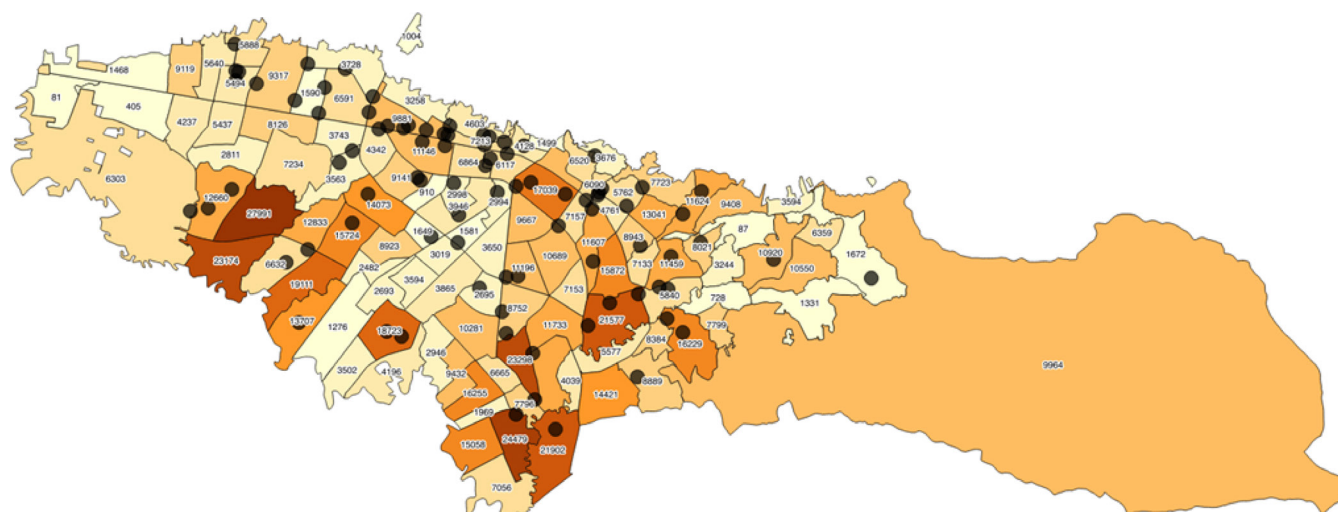
**Tabla 1.** Prioridad de incidentes según año, periodo de 2014 a 2017.

Prioridad incidente	2014 (N = 296 493)	2015 (N = 270 903)	2016 (N = 215 239)	2017 (N = 156 036)
Alta	144 497 (48,7%)	133 630 (49,3%)	104 108 (48,4%)	70 245 (45,0%)
Media	56 651 (19,1%)	45 714 (16,9%)	36 085 (16,8%)	37 861 (24,3%)
Baja	93 031 (31,4%)	89 838 (33,2%)	73 880 (34,3%)	47 539 (30,5%)
Sin dato	2 314 (0,8%)	1721 (0,6%)	1 166 (0,5%)	391 (0,3%)

Fuente: preparado por los autores a partir de los resultados del estudio.



**Figura 1.** Incidentes por UPZ acumulados 2014 a 2017.



En puntos de color negro están ubicadas las instituciones prestadoras de servicios de salud, públicas y privadas, en 2017. Asimismo, en la figura se evidencia la concentración de los incidentes según frecuencia en cada unidad de planeación zonal (siendo mayor en colores más oscuros).

UPZ: unidad de planeación zonal.

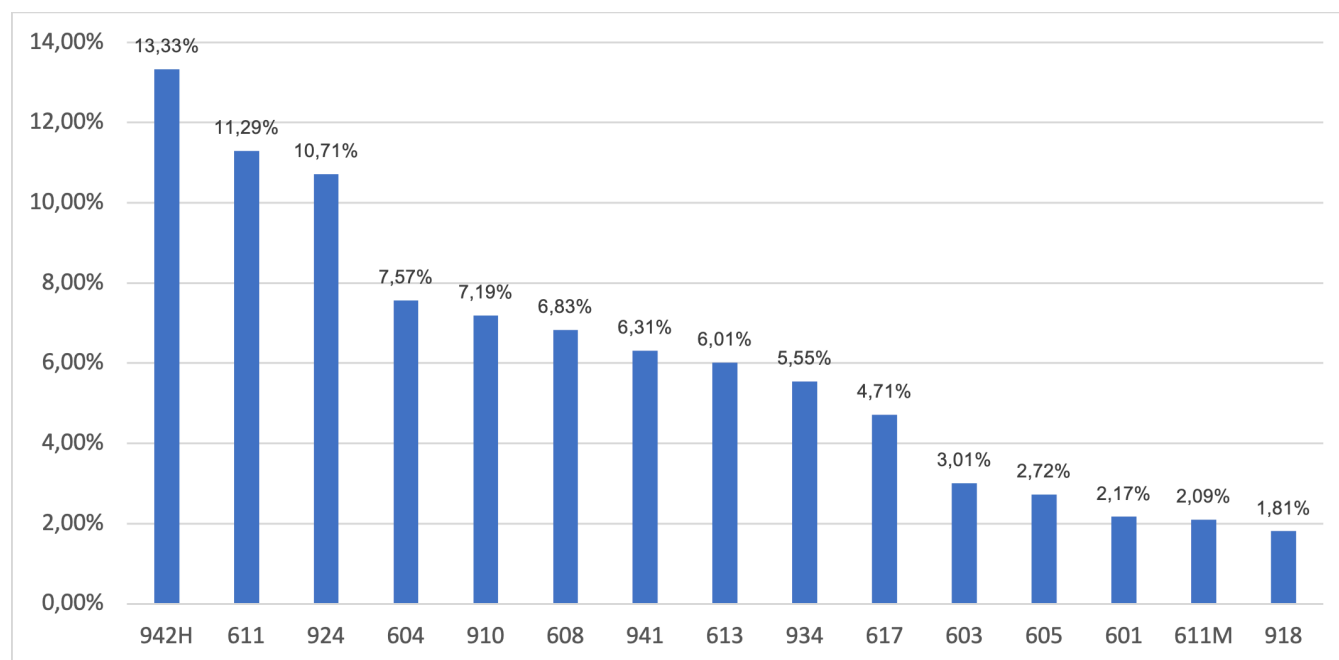
Fuente: preparado por los autores a partir de los resultados del estudio.

Así se logró una relación de 3:1 en los tipos de ambulancias medicalizadas y básicas (Figura 4).

Una vez creada la configuración, se procedió a almacenar el evento en la pila diseñada con teoría de colas bajo el principio

*First In, First Out.* Además del almacenamiento, se realizó un proceso de priorización de selección del evento bajo este mismo principio, donde se estableció la distribución en cuartiles de los tiempos de cada incidente almacenado. De tal manera, que

**Figura 2.** Distribución de los principales códigos prehospitalarios de salud. Bogotá de 2014 a 2017.

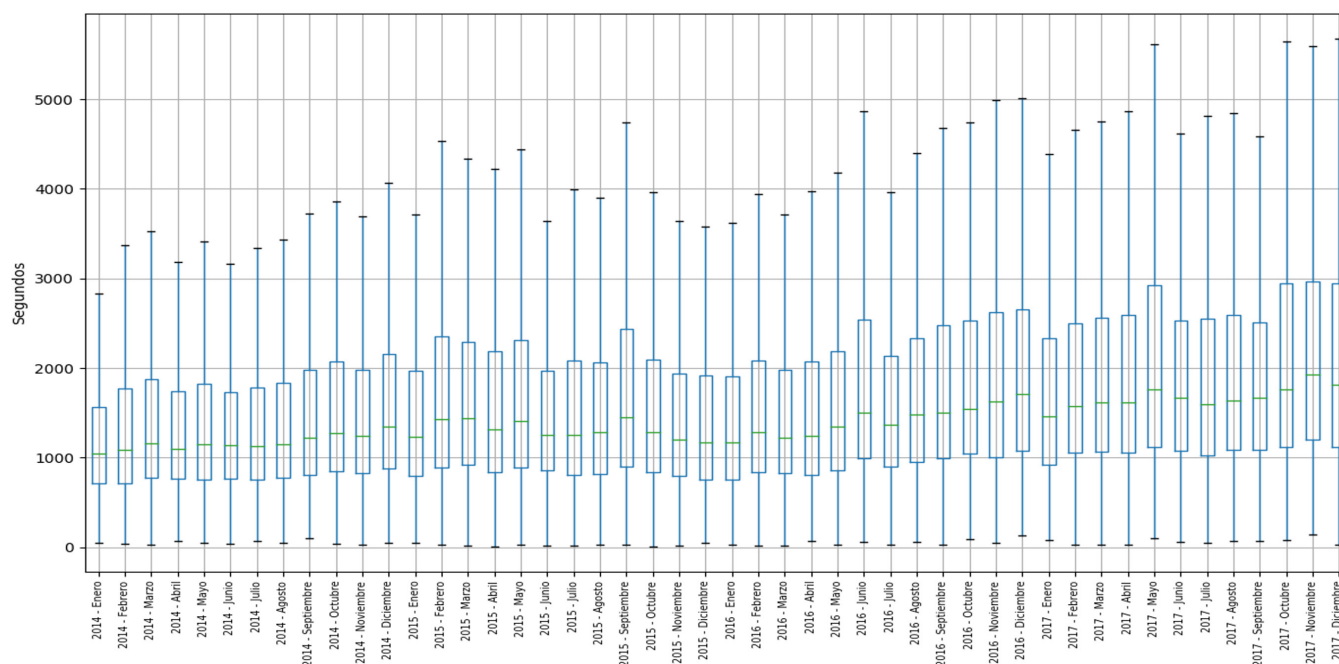


Códigos de atención prehospitalaria: (601) ataque cerebral vascular, (603) convulsión, (604) evento respiratorio, (605) dolor torácico, (608) heridas accidentales, (611) maltrato, (611M) maltrato a la mujer, (613) inconsciente paro, (617 – síntomas gastrointestinales, (910) lesiones personales, (918) intento de suicidio, (924) enfermo, (934) riña, (941) trastorno mental, (942H) accidente de tránsito con heridos.

Fuente: preparado por los autores a partir de los resultados del estudio.

**Figura 3.** Gráfico de cajas y bigotes que muestra el comportamiento de los tiempos de respuesta en el periodo de 2014 a 2017 para el código 613 inconsciente/paro.

613

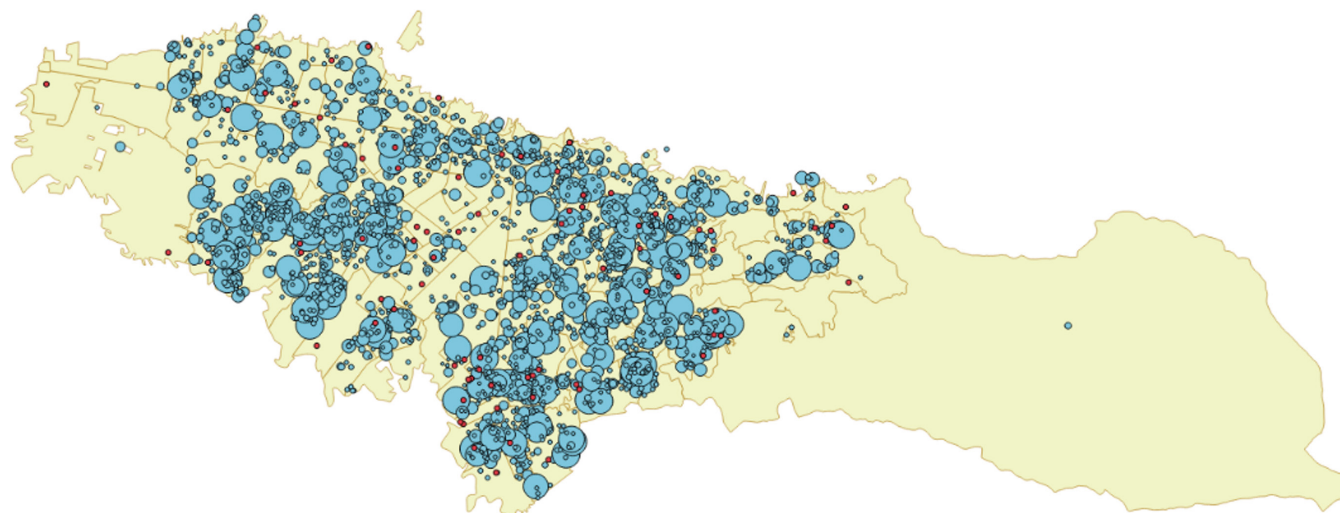


Fuente: preparado por los autores a partir de los resultados del estudio.

desde métricas como la mediana y análisis inter e intracuartil, se obtuvo la cantidad de ambulancias requeridas para reducir el apilamiento en la cola de los incidentes. Desde estos resultados se pudo inferir que para atender por lo menos a la mitad de la población que requiere prioridad alta de atención (según la

emergencia del incidente), el tiempo necesario está por debajo de los ocho minutos. Por lo tanto, se necesitarían 120 ambulancias. En ese mismo sentido, para estimar la cantidad de ambulancias de los incidentes en cola hasta el cuartil tres serían necesarias 140 ambulancias. Y para atender más del 90% de los

**Figura 4.** Distribución de incidentes del año promedio generado por simulación y bases de ambulancias utilizadas.



En rojo se señalan los sitios de ubicación de las 100 ambulancias utilizadas en el desarrollo de la simulación de eventos discretos y los incidentes generados en azul. El tamaño de cada incidente está directamente relacionado con el tiempo de respuesta.

Fuente: preparado por los autores a partir de los resultados del estudio.

**Tabla 2.** Ambulancias necesarias según porcentaje de población con prioridad alta cubierta en tiempos menores de ocho minutos.

	Mediana	Cuartil 3	Percentil 90
Segundos de ocupación de ambulancias	14 400	16 873	33 660
Segundos entre ocurrencia de Incidentes.	120	120	120
Ambulancias requeridas	120	140	281

Fuente: preparado por los autores a partir de los resultados del estudio.

incidentes de prioridad alta se requerirían 281 ambulancias para atender estos eventos (Tabla 2).

## DISCUSIÓN

Se ha demostrado en los pacientes de prioridad alta, que su supervivencia es mayor en relación con una disminución de los tiempos de respuestas e intervenciones oportunas, encontrando diferencias estadísticamente significativas en aquellos que reciben intervención de reanimación básica o avanzada [4]. Asimismo, reducir los tiempos de respuesta de las ambulancias a cinco minutos podría casi duplicar la tasa de supervivencia de los paros cardíacos no presenciados por los equipos de ambulancias [15]. Otros autores han encontrado este beneficio en tiempos menores a cuatro minutos [16].

Los tiempos de respuesta encontrados en los pacientes con politraumatismo y el paro cardíaco extrahospitalario en el análisis de la base de datos de la ciudad fueron mayores de lo recomendado. Una mediana de 19 minutos sugiere la necesidad de un análisis del sistema de emergencias médicas y búsqueda de estrategias que ayuden a mejorar esta respuesta. Es de anotar que el registro solo incluyó las asignaciones que realmente se enviaron en este periodo, lo que podría subestimar las necesidades de la población al poder existir llamadas que no se completaron o necesidad de atenciones de prioridad alta a quienes no se enviaron los recursos por no tener la disponibilidad. Cabe mencionar que no tuvimos acceso a esta información. Asimismo, la sobreocupación de las instituciones, aunque no medida, se cree que pudo observarse en los tiempos en que las ambulancias estuvieron asociadas a los incidentes que en muchas ocasiones eran liberadas desde las instituciones de manera tardía. En consecuencia, su cambio de estatus a disponible pudo influir en mayor necesidad de ambulancias en los modelos. También fue identificado un porcentaje de pacientes de baja prioridad importante en las llamadas de emergencias, lo que puede significar una oportunidad de educación en el adecuado uso de los recursos de emergencias cuando se llama al Número Único de Seguridad y Emergencias.

Esta variabilidad importante en tiempos de respuesta en urbes con poblaciones significativas es algo ya identificado [5]. En Lima por ejemplo, 13% de los casos de alta prioridad tuvieron tiempos de respuesta pre hospitalarios menores a ocho minutos, con un promedio de 24 minutos [17] Este fenómeno fue visto en múltiples ciudades como fue descrito previamente. Ello debe llevar al análisis individual de sus procesos y de los componentes de cada sistema de emergencias

médicas, donde cada aspecto que influya en disminuir los tiempos de respuesta debe ser tenido en cuenta. Estos procesos van desde la recepción de las llamadas, organización del sistema de emergencias médicas, triage telefónico, recursos disponibles, despacho de ambulancias, tiempo de arribo, hasta la atención del caso. Así como aspectos complementarios al sistema de emergencias médicas dada por su capacidad de respuesta, conocimiento y organización. El sistema de emergencias médicas debe considerar un número adecuado de ambulancias para responder idealmente al 90% de los incidentes proyectados, con el tiempo de respuesta acorde a su prioridad (ocho minutos).

Ciertamente, las urgencias y emergencias no son un lujo de países ricos. Un sistema de emergencias médicas adecuado puede contribuir considerablemente a reducir discapacidades y defunciones evitables en los países de ingresos bajos y medios [18]. En los sistemas de emergencias médicas, como en ningún otro escenario, la comunicación eficiente y el transporte rápido son críticos, e interdependientes para lograr eficiencia en busca de mantener una mejor sobrevida. Se necesitan innovaciones para ayudar a proporcionar un mejor uso de estos recursos. Los modelos de simulación de eventos discretos y el uso de algoritmos son herramientas que pueden ayudar como complemento al supuesto de a mayor número de ambulancias y más especializadas, mejor tiempo de respuesta y atención. Es complementaria en aquellas realidades donde la única limitante es presupuestaria y se debe definir cuántos, cuáles y dónde deben estar estos recursos para ayudar a responder adecuadamente, teniendo en cuenta que los recursos son limitados.

La distribución geoespacial de los recursos como estrategia para disminuir los tiempos de respuesta son herramientas ya conocidas en el mundo [19]. Como se ha evidenciado en otros estudios, los sistemas de emergencias médicas en diferentes partes del mundo han podido ser optimizados por múltiples modelos [20]. A través de la simulación de eventos discretos, metodología que ha venido aumentado en los últimos años [6,21], se ha encontrado desde estrategias de ampliación de la flota de ambulancias con despacho óptimo según la demanda [22,23], geolocalización de los paros cardíacos [24], así como ubicación dinámica de los sitios base de ambulancias para responder a los incidentes [25]. La propuesta de este documento buscó adicionar otro mecanismo en la consecución de escenarios óptimos de ubicación y cantidad, comparando y evaluando múltiples escenarios posibles.

## LIMITACIONES

Aunque la metodología de simulación de eventos discretos y el uso de algoritmos genéticos da un enfoque flexible que permite simular comportamientos dinámicos de sistemas complejos e interacciones, este estudio tiene varias limitaciones que deben ser reconocidas. Por ejemplo, solo se analizó en la ciudad los despachos de ambulancias del sistema de emergencias médicas que son de dominio público y no se incluyó en el análisis información del componente privado. Por este motivo no se conocen los tiempos de respuesta combinadas. Asimismo, dado que solo se analizó la población que recibió atención en ambulancia, no se conoce la proporción de llamadas de incidentes que necesitaban un recurso, pero no se completó el proceso de envío de este. De igual forma, fueron incluidas muchas variables que ayudaron a generar la metodología simulación de eventos discretos, pero existen variables que no fueron consideradas en este estudio. Entre dichas variables están la presencia de imprevistos, averías o eventos anormales de los recursos, cambios de turno del personal, horas de almuerzo o mantenimientos. Asimismo, la llegada a la escena, no implica estar al lado del paciente iniciando la atención, por lo que cada vez los tiempos de la "respuesta vertical" son aspectos que deberán ser tenidos en cuenta en los registros [26]. Tampoco se consideraron las ambulancias que realizaron traslados interinstitucionales, fuera de su función dentro del sistema de emergencias médicas, ni se consideró el tráfico como factor que influye de manera importante en los tiempos de respuesta.

Es necesario tener en cuenta la sobreocupación y disponibilidad de recursos en las instituciones receptoras, que faciliten mejor predicción en la disponibilidad de recursos cuando finaliza la atención en un hospital. Ello, en atención a que los tiempos de atención totales de vinculación de la ambulancia al incidente son continuos hasta que es liberada desde el hospital. Por lo tanto, tienen un impacto directo sobre la asignación de recursos y sobre el número de ambulancias que se requieren para obtener los tiempos de respuesta en niveles adecuados. Deben realizarse más estudios, idealmente que busquen respuestas, que ayuden a toma de decisiones, preferiblemente en tiempo real, y que incluyan muchas de las variables importantes en la respuesta.

## CONCLUSIONES

Los tiempos de respuesta a los politraumatismos y el paro cardíaco extrahospitalario del periodo analizado mostraron valores superiores a los recomendados.

Buscando lograr tiempos adecuados de respuesta prehospitalaria en Bogotá, la metodología simulación de eventos discretos con algoritmos genéticos ayuda a estimar de mejor manera los recursos móviles necesarios para la atención de incidentes en salud en la ciudad.

Este tipo de estrategias son una ayuda necesaria en la identificación de necesidades en salud. Asimismo, crean la necesidad de realizar estudios adicionales que usen la información

disponible, ayuden a mejorar la toma de decisiones políticas y, como consecuencia, redunden en que los tiempos de atención prehospitalaria sean cada vez más oportunos.

## Notas

### Autoría

LGAM, RRR, JCR, JOB y JMR contribuyeron de igual manera en la conceptualización, metodología, análisis de la información, preparación del documento inicial, revisión y edición del documento.

### Agradecimientos

Agradecimiento especial a la Dirección de Urgencias y Emergencias en Salud de la Secretaría Distrital de Salud de Bogotá. Asimismo al Centro de Comando, Control, Comunicaciones y Cómputo de la Secretaría Distrital de Seguridad, Convivencia y Justicia de Bogotá.

### Conflictos de intereses

Los autores completaron la declaración de conflictos de interés de ICMJE y declararon que no recibieron fondos por la realización de este artículo; no tienen relaciones financieras con organizaciones que puedan tener interés en el artículo publicado y no tienen otras relaciones o actividades que puedan influenciar en la publicación del artículo. Los formularios se pueden solicitar contactando al autor responsable.

### Financiamiento

En el presente trabajo no hubo financiamiento.

### Aspectos éticos

El proyecto de investigación fue aprobado por el comité de ética institucional de la Secretaría Distrital de Salud de Bogotá, Colombia (Ref. No. 2017EE21591).

### Declaración de acceso a datos

Disponibilidad de entrega de datos a solicitud al correo de correspondencia.

### Origen y arbitraje

No solicitado. Con revisión por pares externa con cuatro pares revisores a doble ciego.

### Idioma del envío

Español.

### Disponibilidad de los datos

Se encuentra el Anexo 1 correspondiente a los códigos prehospitalarios del área de salud usados en el Número Único de Seguridad y Emergencias (NUSE123) que corresponden al Centro de Comando, Control, Comunicaciones y Cómputo de Bogotá para octubre de 2017. El vínculo de acceso se encuentra disponible en el doi 10.6084/m9.figshare.16985377.



## Referencias

- Nogueira LC, Pinto LR, Silva PMS. Reducing Emergency Medical Service response time via the reallocation of ambulance bases. *Health Care Manag Sci*. 2016;19: 31–42. <https://doi.org/10.1007/s10729-014-9280-4>
- El Sayed MJ. Measuring quality in emergency medical services: a review of clinical performance indicators. *Emerg Med Int*. 2012;2012. <https://doi.org/10.1155/2012/161630>
- Pons PT, Markovchick VJ. Eight minutes or less: does the ambulance response time guideline impact trauma patient outcome? *J Emerg Med*. 2002;23: 43–8. [https://doi.org/10.1016/s0736-4679\(02\)00460-2](https://doi.org/10.1016/s0736-4679(02)00460-2)
- Vukmir RB. Survival from prehospital cardiac arrest is critically dependent upon response time. *Resuscitation*. 2006;69: 229–34. <https://doi.org/10.1016/j.resuscitation.2005.08.014>
- Cabral EL dos S, Castro WRS, Florentino DR de M, Viana D de A, Costa Junior JF Da, RP Souza. Response time in the emergency services. Systematic review *Acta Cir Bras*. 2018;33: 1110–1121. <https://doi.org/10.1590/s0102-865020180120000009>
- Zhang X. Application of discrete event simulation in health care: a systematic review. *BMC Health Serv Res*. 2018;18: 1–11. <https://doi.org/10.1186/s12913-018-3456-4>
- Villarreal B, Granda E, Montalvo A, Lankenau S, Bastidas AC. *Proc Int Conf Ind Eng Oper Manag*. 2017; 196–204. <https://pure.udem.edu.mx/en/publications/designing-the-emergency-medical-operations-system-structure-a-cas>
- Villarreal B, Granda-Gutierrez E-M-A, Bastidas S-C, Montalvo A. Decreasing ambulance response time through an optimal base location. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*. 2017; 422–42. <https://pure.udem.edu.mx/en/publications/decreasing-ambulance-response-time-through-an-optimal-base-locationhttps://doi.org/10.1093/cj/sfx128>
- Maxwell MS, Henderson SG, Topaloglu H. Ambulance redeployment: An approximate dynamic programming approach. *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference (WSC)*. 2009. pp. 1850–1860. <https://doi.org/10.1109/WSC.2009.5429196>
- Singer M, Donoso P. Assessing an ambulance service with queuing theory. *Computers & Operations Research*. 2008;35: 2549–2560. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2006.12.005>
- Iannoni AP, Morabito R, Saydam C. An optimization approach for ambulance location and the districting of the response segments on highways. *European Journal of Operational Research*. 2009;195: 528–542. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.02.003>
- McCormack R, Coates G. A simulation model to enable the optimization of ambulance fleet allocation and base station location for increased patient survival. *European Journal of Operational Research*. 2015;247: 294–309. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.05.040>
- Rojas-trejos CA, González-velasco J, López-ramírez MA, Valle U, Industrial EDI. Optimization Model for the Location of Prehospital Care Ambulances in the city of Cali Colombia. *Int J Comb Optim Probl Informatics*. 2017;8: 64–70. <https://www.ijcopi.org/ojs/article/view/20>
- Catumba-Ruiz J, Aguiar L, Redondo JM, Renteria R, Barrera JO. A hybrid optimization method for reallocation of mobile resources. *J Phys: Conf Ser*. 2020;1702: 012013. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1702/1/012013>
- Pell JP, Sirel JM, Marsden AK, Ford I, Cobbe SM. Effect of reducing ambulance response times on deaths from out of hospital cardiac arrest: cohort study. *BMJ*. 2001;322: 1385–8. <https://doi.org/10.1136/bmj.322.7299.1385>
- Pons PT, Haukoos JS, Bludworth W, Cribley T, Pons KA, Markovchick VJ. Paramedic response time: does it affect patient survival? *Acad Emerg Med*. 2005;12: 594–600. <https://doi.org/10.1197/j.aem.2005.02.013>
- Lira M. Tiempo de respuesta en el transporte primario de prioridades I y II en el servicio de STAE-EsSalud. *Emergencias Rev la Soc española Med urgencias y Emergencias*. 2008;20: 316–321.
- Kobusingye OC, Hyder AA, Bishai D, Hicks ER, Mock C, Joshipura M. Emergency medical systems in low- and middle-income countries: recommendations for action. *Bull World Health Organ*. 2005;83: 626–31. <https://doi.org/10.1186/1474-2975-83-626>
- Ong MEH, Chiam TF, Ng FSP, Sultana P, Lim SH, Leong BS-H, et al. Reducing ambulance response times using geospatial-time analysis of ambulance deployment. *Acad Emerg Med*. 2010;17: 951–7. <https://doi.org/10.1111/j.1553-2712.2010.00860.x>
- Brotcorne L, Laporte G, Semet F. Ambulance location and relocation models. *European Journal of Operational Research*. 2003;147: 451–463. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00364-8](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00364-8)
- Wei Lam SS, Zhang ZC, Oh HC, Ng YY, Wah W, Hock Ong ME, et al. Reducing ambulance response times using discrete event simulation. *Prehosp Emerg Care*. 2014;18: 207–16. <https://doi.org/10.3109/10903127.2013.836266>
- Wu CH, Hwang KP. Using a discrete-event simulation to balance ambulance availability and demand in static deployment systems. *Acad Emerg Med*. 2009;16: 1359–1366. <https://doi.org/10.1111/j.1553-2712.2009.00583.x>
- Patel AB, Waters NM, Blanchard IE, Doig CJ, Ghali WA. A validation of ground ambulance pre-hospital times modeled using geographic information systems. *Int J Health Geogr*. 2012;11: 1–10. <https://doi.org/10.1186/1476-072X-11-42>
- Ong MEH, Tan EH, Yan X, Anushia P, Lim SH, Leong BS-H, et al. An observational study describing the geographic-time distribution of cardiac arrests in Singapore: what is the utility of geographic information systems for planning public access defibrillation? (PADS Phase I). *Resuscitation*. 2008;76: 388–96. <https://doi.org/10.1016/j.resuscitation.2007.09.006>
- Lam SSW, Zhang J, Zhang ZC, Oh HC, Overton J, Ng YY, et al. Dynamic ambulance reallocation for the reduction of ambulance response times using system status management. *Am J Emerg Med*. 2015;33: 159–66. <https://doi.org/10.1016/j.ajem.2014.10.044>
- Silverman RA, Galea S, Blaney S, Freese J, Prezant DJ, Park R, et al. The “vertical response time”: barriers to ambulance response in an urban area. *Acad Emerg Med*. 2007;14: 772–8. <https://doi.org/10.1197/j.aem.2007.04.016>

# Use of discrete event simulation and genetic algorithms to estimate the necessary resources to respond in a timely manner in the Medical Emergency System in Bogotá

## Abstract

### Introduction

Bogotá has a Medical Emergency System of public and private ambulances that respond to health incidents. However, its sufficiency in quantity, type and location of the resources demanded is not known.

### Objective

Based on the data from the Medical Emergency System of Bogotá, Colombia, we first sought to characterize the prehospital response in cardiac arrest and determine with the model which is the least number of resources necessary to respond within eight minutes, taking into account their location, number, and type.

### Methods

A database of incidents reported in administrative records of the district health authority of Bogotá (2014 to 2017) was obtained. Based on this information, a hybrid model based on discrete event simulation and genetic algorithms was designed to establish the amount, type and geographic location of resources according to the frequencies and typology of the events.

### Results

From the database, Bogotá presented 938 671 ambulances dispatches in the period. 47.4% high priority, 18.9% medium and 33.74% low. 92% of these corresponded to 15 of 43 medical emergency codes. The response times recorded were longer than expected, especially in out-of-hospital cardiac arrest (median 19 minutes). In the proposed model, the best scenario required at least 281 ambulances, medicalized and basic in a 3:1 ratio, respectively, to respond in adequate time.

### Conclusions

Results suggest the need for an increase in the resources that respond to these incidents to bring these response times to the needs of our population.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.