

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
ÉNFASIS EN TRÁNSITO Y TRANSPORTE

Análisis, modelación y formulación de estrategias de operación orientadas a abordar el problema de localización y relocalización de grúas en la ciudad de Bogotá D.C.

Jack David Hurtado Casquete
Ingeniero Industrial

Bogotá, D.C., 23/07/2021



Análisis, modelación y formulación de estrategias de operación orientadas a abordar el problema de localización y relocalización de grúas en la ciudad de Bogotá D.C.

Tesis para optar por el título de Magister en Ingeniería Civil con énfasis en Tránsito y Transporte

PhD. Carlos Felipe Urazán Bonells
Director

Bogotá, D.C., 23/07/2021

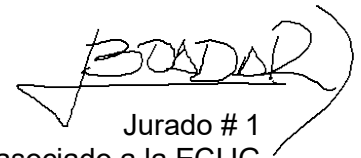


Nota de aceptación

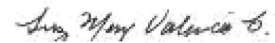
El trabajo de grado “Análisis, modelación y formulación de estrategias de operación orientadas a abordar el problema de localización y relocalización de grúas en la ciudad de Bogotá D.C.”, presentado para optar por el título de Maestro en Tránsito y Transporte cumple con los requisitos establecidos y recibe nota aprobatoria



PhD. Carlos Felipe Urazán Bonells
Director de la tesis



Jurado # 1
Docente asociado a la ECIJG



Jurado # 2
Docente asociado a la ECIJG

Tabla de contenido

I.	INTRODUCCIÓN	6
II.	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	7
III.	JUSTIFICACIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	7
IV.	DIAGNOSTICO GENERAL DEL PROBLEMA	8
V.	OBJETIVOS	11
	<i>Objetivo general</i>	11
	<i>Objetivos específicos</i>	11
1.	MARCO TEÓRICO	12
	1.1. <i>Descripción de actividades de los ESVS</i>	12
	1.2. <i>Clasificación de problemas de localización</i>	13
	1.3. <i>Medidas de desempeño</i>	17
	1.4. <i>Software de simulación y análisis de información</i>	19
	1.5. <i>Técnicas de verificación y validación</i>	22
2.	METODOLOGÍA	23
3.	ANÁLISIS DEL SISTEMA REAL	24
4.	ANÁLISIS DE DATOS	25
	4.1. <i>Recepción de la solicitud</i>	25
	4.2. <i>Asignación y despacho de la grúa</i>	30
	4.3. <i>Atención del evento y traslado del vehículo</i>	32
5.	MODELO DE SIMULACIÓN	34
	5.1. <i>Variables y parámetros del modelo</i>	36
	5.2. <i>Supuestos del modelo</i>	37
	5.3. <i>Elaboración del modelo</i>	38
6.	RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN	43
	6.1. <i>Ubicación de la flota</i>	43
	6.1.1. <i>Política 1, Una estación - Patio de Álamos</i>	43
	6.1.2. <i>Estaciones múltiples:</i>	46
	6.2. <i>Políticas de relocalización</i>	50
	6.2.1. <i>Política 2: Cola más grande</i>	50
	6.2.2. <i>Política 3: Retorno a la estación de inicio</i>	50
	6.2.3. <i>Política 4: Probabilidad de ocurrencia más alta</i>	50
	6.3. <i>Tamaño de la flota y tiempos de respuesta</i>	51
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	52
	7.1. <i>Localización</i>	52
	7.2. <i>Construcción del modelo y proceso de atención</i>	53
	7.3. <i>Tamaño de la flota</i>	53
	7.4. <i>Calidad de la información</i>	54
	7.5. <i>Trabajos futuros</i>	54
	REFERENCIAS	56
	ANEXOS	63

Figura: 1 Diagrama de Funcionamiento ESVS, (Henderson/Mason, 2004).....	13
Figura: 2 Georreferenciación solicitud grúas 2016 y 2017	26
Figura: 3 Solicitudes por hora	28
Figura: 4 Solicitudes por día de la semana	28
Figura: 5 Solicitudes por mes.....	29
Figura: 6 Tabla ANOVA demanda entre meses	29
Figura: 7 Comparación de la media de solicitudes por día mediante prueba de Tukey	30
Figura: 8 Solicitud por tipo de vehículo	30
Figura: 9: Concentración y ubicación solicitudes grúas 2016-2017	31
Figura: 10 Tiempo de respuesta	32
Figura: 11 Ubicación de traslado y descarga	33
Figura: 12 Tiempo total de servicio	33
Figura: 13: Diagrama de flujo del proceso.....	35
Figura: 14: Modelo del sistema en ARENA (1 - Estación)	43
Figura: 15: Ubicación UPZ 116	44
Figura: 16: Descripción módulos Arena	45
Figura: 17: Diagrama de flujo algoritmo ADD	47
Figura: 18: Modelo del sistema en ARENA (15 - Estaciones)	48
Figura: 19: Ubicación 15 UPZ – Estaciones.....	49
Figura: 20: Modelo base para implementación políticas 2 a 4.....	51
Figura: 21: Escenarios en Process Analyzer.....	51
Tabla 1 Resumen georreferenciación solicitud de servicios por localidades.....	27
Tabla 2: Medidas de rendimiento del modelo propuesto	45
Tabla 3: 15 UPZ Seleccionadas mediante ADD como estaciones.	47
Tabla 4: Resultados Process Analyzer	52

I. Introducción

La ciudad de Bogotá afronta permanentes retos derivados de su crecimiento económico, el fuerte aumento de la propiedad, el uso de automóviles y motocicletas entre otros, lo que tiene como resultado una mayor congestión, siniestros de tráfico y contaminación del aire. Adicionalmente la distribución espacial de los lugares de trabajo y la población presentan como resultado un desequilibrio territorial (Guzman, Arellana, & Alvarez, 2020), que contribuye a desmejorar las condiciones del tránsito siendo un reflejo de ello el aumento de los tiempos de desplazamiento en toda la ciudad.

La Secretaría Distrital de Movilidad (SDM) dentro de sus funciones cuenta con la obligación de propender por la mejora de las condiciones de movilidad de la ciudad y para tal fin se apoya en la Policía Nacional, mediante la firma de un convenio interinstitucional por medio del cual se dispone de personal en vía para realizar las actividades de autoridad de tránsito.

Dentro de las actividades de control asignadas a la Policía Metropolitana de Tránsito de Bogotá, se encuentran la atención de siniestros viales donde se hayan presentado personas lesionadas, los cuales derivan en un proceso de inmovilización de los vehículos implicados. En este orden de ideas, y con la finalidad de contar con los mecanismos suficientes para concluir el procedimiento de inmovilización, la SDM realiza un contrato de concesión, otorgando a un privado la operación del servicio de traslado de vehículos desde el lugar donde se presenten los siniestros hasta los parqueaderos autorizados.

Al observar detenidamente los parámetros, actores y operación del concesionario de grúas de la ciudad de Bogotá, se puede percibir una gran similitud con sistemas de atención de emergencias, los cuales son un caso de estudio común dentro de las investigaciones asociadas a problemas de optimización y en ciertos casos abordan problemas típicos de transporte como el ruteo de vehículos y localización de instalaciones, con la finalidad de mejorar parámetros de operación o disminuir costos. En la operación del actual concesionario, se puede evidenciar la existencia de muchas variables que afectan la capacidad del servicio y, por lo tanto, el tiempo de respuesta para la atención a un evento.

Sin embargo, siendo decisiones como las de localización y relocalización unas de las tareas más complejas que puede presentar la operación de un sistema que tiene un comportamiento similar a los que realizan atención de emergencias médicas, aspectos como los cambios de turno, el agotamiento y reducción de la habilidad mental que se puede presentar en días de alta demanda, sumado con los cambios rápidos del entorno hacen necesario que los operadores se apoyen en metodologías que les permitan obtener adecuadas soluciones al decidir qué ubicaciones establecer para los vehículos en servicio.

Teniendo en cuenta lo anterior, en el presente trabajo se desarrolló un modelo de simulación de eventos discretos que permite evaluar políticas de relocalización aplicables a la concesión de grúas. Evidenciando que, la aplicación de estas puede generar menores tiempos de respuesta en la atención de solicitudes, al igual que la mejora y análisis exhaustivo de la información existente.

II. Metodología de la investigación

La metodología a utilizar se clasifica como cuantitativa, teniendo en cuenta que se pretende mediante el análisis de datos previamente recopilados y almacenados por el concesionario durante los últimos años de operación, realizar un modelo representativo del sistema propuesto, iniciando el proceso con la revisión y depuración de los datos suministrados, seguido de los análisis estadísticos necesarios para desarrollar la construcción y posterior validación del modelo planteado, mediante el cual se pretende determinar los parámetros de operación enunciados en los objetivos. Basado en lo anterior a continuación, se describen las etapas y actividades intervinientes con la finalidad de dar cumplimiento a los objetivos planteados.

III. Justificación y planteamiento del problema

La Secretaría Distrital de Movilidad (SDM) dentro de sus funciones cuenta con la obligación de propender por la mejora de las condiciones de movilidad de la ciudad y para tal fin se apoya en la Policía Nacional, mediante la firma de un convenio interinstitucional cuyo objeto es *“aunar esfuerzos para coordinar y cooperar mutuamente para ejercer el control y regulación de tránsito y transporte en el Distrito Capital, a través del cuerpo especializado de tránsito de la Seccional de Tránsito y Transporte de Bogotá, propendiendo por la seguridad vial y en general, por el fortalecimiento de las condiciones de movilidad del Distrito”*, por medio del cual se dispone de personal en vía para realizar las actividades de autoridad de tránsito operativa (SDM, 2017).

Dentro de las actividades de control asignadas a la Policía Metropolitana de Tránsito de Bogotá, se encuentran la identificación y sanción de los comportamientos anteriormente descritos, mediante la imposición de órdenes de comparendo que, dependiendo de las circunstancias o infracción pueden conllevar a la inmovilización de vehículos de acuerdo a lo estipulado en el Código Nacional de Tránsito y Transporte (Ley 769, 2002; modificada parcialmente por la Ley 1383, 2010) y la atención de siniestros viales donde se hayan producido lesiones en personas; en este orden de ideas y con la finalidad de concluir el proceso sancionatorio a los conductores y/o propietarios de vehículos, la SDM realiza un contrato de concesión por medio de procesos licitatorios, otorgando a un privado la operación del servicio de traslado de vehículos desde el lugar donde se presenta la sanción hasta los parqueaderos autorizados (Patios) en los cuales son retenidos, el tiempo que tardan en acreditar el lleno de requisitos para proporcionar su salida (SDM, 2017). (Marsh & Schilling, 1994)

Son varios problemas de organización y toma de decisiones a los que se debe afrontar la Policía Metropolitana de Tránsito y el concesionario de grúas y patios, con el ánimo de proporcionar un servicio eficiente acorde con las necesidades de la ciudad; teniendo en cuenta que el 12 de septiembre de 2017, la SDM manifestó públicamente la intención de mejorar las condiciones de prestación del servicio de grúas y patios por medio de la apertura del proceso licitatorio SDM-LP-052-2017, que buscaba modernizar y mejorar el control en la prestación de este servicio, mediante la exigencia de nuevas herramientas tecnológicas, competencias y perfiles de los operadores de grúas e indicadores de gestión (SDM, 2017);

Este proceso licitatorio se dio por culminado el 23 de enero de 2018 con la firma del contrato de concesión 114 de 2018, el cual tiene un plazo de ejecución de 10 años contados a partir del 01 de abril de 2018 y el total de su de talle puede ser encontrado en: "<https://www.contratos.gov.co/consultas/detalleProceso.do?numConstancia=17-1-179925>" (SDM, 2019).

Dentro de los detalles del proceso, es clave resaltar que el contrato de concesión se fundamenta su Anexo 1: "*Documento técnico del servicio*", dentro del cual, se establecen todos los requisitos contractuales en cuanto a cumplimiento de indicadores de servicio "niveles de servicio" y penalizaciones por incumplimiento de los mismos, como por ejemplo porcentajes de eventos programados no atendidos y sobrepasos de tiempos de respuesta para eventos solicitados por demanda, que permite a la SDM realizar deducciones sobre el porcentaje de participación del concesionario, en los pagos realizados por los usuarios objeto de la sanción (SDM, 2019).

En este sentido, si el operador de esta concesión desea hacer de su labor una actividad rentable, deberá dar relevancia a aspectos como la proyección, programación, gestión y control de sus recursos, afrontando la toma de decisiones como:

- El número y tipo de grúas a utilizar.
- La localización de los puntos desde los cuales deberán ser distribuidas las grúas.
- La regla de asignación para la distribución de las grúas cuando se presente un evento a atender.
- La ubicación donde se deben relocalizar las móviles cuando una zona se encuentre desatendida por efecto de la utilización de las que allí operan, entre otros (Su & Shih, 2002).

Lo anterior, teniendo en cuenta que existen diversos factores de incertidumbre que pueden conducir a una complejidad adicional en la administración de sistemas. Esta incertidumbre se puede relacionar con la frecuencia y ubicación geográfica de los eventos que se presentan a lo largo del día, la disponibilidad de equipos para la atención y su capacidad, factores que influyen al decidir cuál debe ser enviado a realizar la atención de una solicitud, sumado a los tiempos de viaje y procesos internos como (tiempo de envío, tiempo de preparación del equipo, tiempo de servicio en el sitio y traslado) que pueden llegar a ser altamente variables debido a externalidades como la congestión o gravedad del incidente. Todos estos factores dificultan predecir, el número de equipos requeridos, el cual debe ser equilibrado con los objetivos a cumplir debido a que generalmente tienen un alto costo y por ende debe propenderse en lograr una adecuada localización con el fin de mejorar la capacidad de respuesta del sistema (Moeini, Jemai, & Sahin, 2015), prestando una oportuna y adecuada atención evitando desperdiciar tiempo en la asignación o traslados que pueden ser definitivos en el cumplimiento de los indicadores de gestión (L. Aboueljinane, Sahin, & Jemai, 2013).

IV. Diagnostico general del problema

Los sistemas de atención a emergencias son un caso de estudio común dentro de las investigaciones asociadas a problemas de optimización y en ciertos casos abordan

problemas típicos de transporte como el ruteo de vehículos y localización de instalaciones, con la finalidad de mejorar parámetros de operación o disminuir costos, no obstante, el desarrollo continuo de herramientas tecnológicas que aumentan cada día la capacidad de procesamiento de información devela nuevas alternativas en la busca de mejoras continuas dentro de la operación de estos sistemas, comportamiento que no es de extrañar teniendo en cuenta que está en juego la pronta atención a personas (Rodríguez, Osorno, & Maya, 2016).

Sin embargo, a pesar de la evolución de las herramientas y con ellas los métodos de solución, no existe un estándar que pueda predecir cuál es más efectivo que otro, hecho que es reforzado constantemente en la literatura especializada en el tema (L. Aboueljinane et al., 2013), lo que conlleva a centrarse en la clasificación más general establecida, que son las soluciones obtenidas mediante modelos matemáticos exactos, metaheurísticas y modelos de simulación, donde se encuentran múltiples casos de estudio y desarrollo de modelos según las necesidades del sistema a tratar (Borshchev & Filippov, 2004).

Al observar detenidamente los parámetros, actores y operación del concesionario de grúas de la ciudad de Bogotá, se puede percibir una gran similitud con los sistemas de atención de emergencias descritos anteriormente, y es de allí donde nace la motivación de abordar una solución a problemas que continuamente se evidencian en la prestación de este servicio en la ciudad, si bien existen fallas en circunstancias elementales que podrían considerarse básica coordinación de recursos, también se puede evidenciar que hay tareas que no se han realizado y que sin duda al ser resueltas podrían otorgar grandes beneficios no solo para la ciudadanía en general, sino también de carácter económico para el operador de la concesión y la SDM, al traducirse en menores costos de operación y mayor cobertura de incidentes (SDM, 2017).

En la operación del actual concesionario, se puede evidenciar la existencia de muchas variables en la operación que afectan la capacidad del servicio y por lo tanto, el tiempo de respuesta para la atención a un evento, algunas de ellas por ejemplo pueden ser la ubicación de los patios de parqueo, cantidad de recursos (grúas por tipo y personal en general), programación de turnos, al igual que decisiones a nivel estratégico (largo plazo) y operativo (corto plazo) (Rodríguez et al., 2016; Yang, Yun, Yu-hui, & Hao, 2013), tomadas por la gerencia de la concesión y operadores, también pueden afectar el nivel de servicio, teniendo en cuenta que este se considera como la proporción de incidentes atendidos en un tiempo inferior a T_s (Marsh & Schilling, 1994).

Definiendo la localización como: La ubicación de un vehículo en un punto fijo, de tal manera que se encargue de una zona de atención, a la cual debe volver al finalizar la prestación de un servicio y la relocalización, por otro lado, cuando se cambia la ubicación asignada a un vehículo con el propósito de mejorar en tiempo real la cobertura del Servicio. Mientras que los problemas de localización suelen ser resueltos a nivel estratégico, los problemas de relocalización son principalmente de nivel operativo y deben ser resueltos en un corto periodo de tiempo, motivo por el cual generalmente estos últimos se consideran más complejos que los de localización (Yang et al., 2013). Este proceso de asignación de vehículos, actualmente se realiza en forma manual, es decir, el operador de turno en una sala de radio donde se reciben las solicitudes, de acuerdo con su experiencia informa a las grúas cual debe ser su próximo destino.

Sin embargo, siendo decisiones como las de localización y relocalización unas de las tareas más complejas que puede presentar la operación de un sistema que tiene un comportamiento similar a los que realizan atención de emergencias médicas, aspectos como los cambios de turno, el agotamiento y reducción de la habilidad mental que se puede presentar en días de alta demanda, sumado con los cambios rápidos del entorno hacen necesario que los operadores se apoyen en metodologías que les permitan obtener adecuadas soluciones al decidir qué ubicaciones establecer para los vehículos en servicio (Yang et al., 2013).

V. Objetivos

Objetivo general

Analizar, modelar y formular estrategias de operación orientadas a abordar el problema de localización y relocalización de grúas en la ciudad de Bogotá D.C.

Objetivos específicos

- Definir el método de solución del problema de localización de grúas en la ciudad, basado en la revisión y análisis del estado del arte de las metodologías existentes para la solución de este tipo de problemas.
- Analizar los incidentes de tránsito que requirieron atención del servicio de grúas para ser removidos de la vía, para las solicitudes registradas por el concesionario en los años 2016 y 2017.
- Construir un modelo de simulación que represente de manera fiable las condiciones de operación y funcionamiento propuesto para el concesionario de grúas de la ciudad.
- Determinar el número mínimo de móviles con las que debería contar el concesionario, la ubicación y método de relocalización que debe ser utilizado en busca de minimizar los tiempos de respuesta en la atención de incidentes mediante el método de simulación utilizado.

1. Marco Teórico

Para la elaboración del presente trabajo de grado se realizó una revisión de las investigaciones en los campos de localización y relocalización de Vehículos destinados a la atención de Servicios de Emergencias (ESV), entre los cuales se encuentran los Sistemas de atención de Emergencias Médicas (SEM), control de incendios (Fire Systems) y atención de incidentes en fallas de prestación de Servicios Públicos (ESP), teniendo en cuenta consideraciones como técnicas, objetivos y modelos utilizados con la orientación de resolver problemas como la determinación del número de vehículos a utilizar y la localización de los lugares de despacho.

Gran parte de esta literatura se centra en los Servicios de Emergencia Médicas (SEM), los cuales han tenido un mayor desarrollo teniendo en cuenta su importancia en el objetivo de preservar la vida de las personas, que hace necesario establecer protocolos claros y efectivos de atención, para de esta forma cumplir con estándares gubernamentales y/o contractuales previamente definidos. En las secciones siguientes se presenta una descripción básica de sus actividades, clasificación por tipo de problemas, medidas de desempeño utilizadas para evaluar las soluciones, así como los tipos de software de simulación y análisis de la información, terminando con las técnicas de verificación y validación, utilizadas para garantizar la veracidad de los resultados obtenidos.

1.1. Descripción de actividades de los ESVS

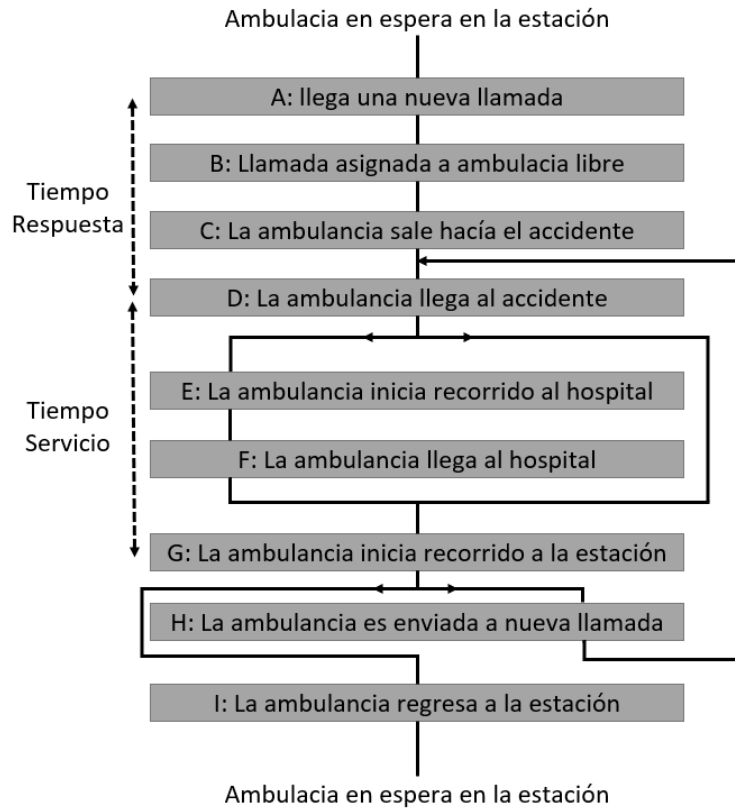
Sin importar la particularidad de los ESVS “*Emergency Service Vehicle System*”, existen una serie de actividades principales que los caracteriza a todos en su funcionamiento; estas tienen origen en la generación de un evento o incidente que da como resultado el requerimiento de un vehículo de asistencia en el lugar de ocurrencia, y su ejecución se divide en dos grupos: actividades centrales y actividades externas (L. Aboueljinnane et al., 2013).

Las actividades centrales son normalmente realizadas por operarios y despachadores que se encuentran en un centro de mando o central de comunicaciones, y las actividades externas por la tripulación de los ESV con el objetivo de brindar una adecuada atención al evento asignado:

1. Detección y reporte del evento; recepción de llamadas.
2. Perfilación del evento; solicitar localización y condiciones del evento. En esta etapa se busca depurar las llamadas para evitar responder a eventos falsos o de respuesta inmediata innecesaria.
3. Análisis de la severidad de la situación, decisión de enviar o no un vehículo. En caso de envío también se determina el tipo de vehículo y se realiza la asignación dependiendo de las reglas establecidas por cada ESVS.
4. Atención del evento por parte de la tripulación del ESV.
5. En caso de ser necesario realizar el traslado de víctimas, materiales o equipos a un lugar determinado por la central o previamente definido.
6. Para terminar se libera el ESV después de realizar el transporte y entrega de víctimas, materiales o equipos y se reubica donde informe la central para responder a próximos eventos.(Brotcorne, Laporte, & Semet, 2003; Junior, 2005; Ortega, 2013).

En la *Figura: 1 Diagrama de Funcionamiento ESVS*, (Henderson/Mason, 2004), se muestran las actividades principales realizadas en un ESVS, necesarias para entender su funcionamiento y objetivos, así como la identificación del tiempo de respuesta y servicio que ayudan a explicar los pasos claves para el desarrollo de modelos de simulación (Henderson & Mason, 2004), p.8).

Figura: 1 Diagrama de Funcionamiento ESVS, (Henderson/Mason, 2004)



Fuente: Traducido de Henderson/Mason, 2004.

Del diagrama de flujo de la *Figura: 1 Diagrama de Funcionamiento ESVS*, (Henderson/Mason, 2004), es posible evidenciar que los ESVS cuentan con dos acciones que afectan el desempeño del sistema, la primera de estas se presenta en (C) cuando el vehículo es despachado a atender un evento, y por ende el número de ESV disponibles en el sistema disminuye. La segunda acción se da en (G) cuando los vehículos terminan la atención de eventos y se encuentran nuevamente disponibles para ser utilizados, dependiendo del protocolo definido, pueden considerarse disponibles mientras realizan el recorrido a la ubicación asignada como la implementación de (Henderson & Mason, 2004) o disponibles luego de llegar a la base como lo modela (Sudtachat, Mayorga, & Mclay, 2016) al definir esta disponibilidad como un estado de cumplimiento dentro de una cadena de Markov.

1.2. Clasificación de problemas de localización

Pueden encontrarse en la literatura varios tipos de clasificación para los problemas de localización de ESVS, la primera de ellas es basada en los objetivos que puede presentar cada sistema de emergencias en estudio y se relaciona con su accesibilidad, adaptabilidad

y disponibilidad (Daskin & Dean, 1983). Los objetivos de accesibilidad se basan en la capacidad de los proveedores del servicio médico en trasladar pacientes a los centros de atención. La adaptabilidad se centra en la calidad del servicio que puede llegar a verse afectada por las fluctuaciones del sistema, como los cambios en la disponibilidad de vehículos o variaciones de volumen y ubicación de la demanda. Los criterios de disponibilidad buscan realizar una mezcla de los anteriores intentando mejorarlos con la introducción de pequeñas variaciones (Moeini et al., 2015).

Otra clasificación frecuente se basa en la naturaleza de la solución propuesta, donde se encuentran cuatro tipos de modelos: estáticos, multi-cobertura, estocásticos y dinámicos, los cuales han evolucionado a lo largo del tiempo gracias a las mejoras en las herramientas disponibles para la implementación de las soluciones propuestas (Ortega, 2013).

Modelos Estáticos

(Moeini et al., 2015) definen como modelos estáticos aquellos que no tienen en cuenta las posibles fluctuaciones del sistema, estos se remontan a los inicios de implementaciones que pretendían obtener mejoras en los ESVS siendo (Toregas, ReVelle, & Bergman, 1971), los primeros en formular un modelo de localización de ambulancias, definido como modelo de cobertura de conjuntos de locaciones "*Location Set Covering Model*". El objetivo de este modelo era minimizar el número de ambulancias requerido para cubrir todos los puntos de demanda; sin embargo, este modelo penaliza a los usuarios del sistema por generar soluciones costosas dado el número de vehículos requeridos para realizar la atención, sumado a restricciones en la ubicación debido a que solo permite localizar un vehículo por estación de servicio (Moeini et al., 2015).

Posterior a (Toregas et al., 1971), (Church & Velle, 1974) introducen el problema de localización con cobertura máxima "*Maximal Covering Location Problem*", el cual busca maximizar la población cubierta del modelo LSC, esto teniendo en cuenta, un número predefinido de ambulancias en el sistema. A pesar de las intenciones de mejorar el LSC por medio de MCLP, ambos modelos comparten como se mencionó anteriormente, deficiencias entorno a la captura de la complejidad de los ESVS, como por ejemplo el modelado de eventos simultáneos o generados en unidades de tiempo muy cortas, para lo que sería necesario poder cubrir las zonas con más de un vehículo disponible para la atención.

En la práctica, los modelos estáticos presentan carencias debido a que es poco probable que proporcionen una solución que brinde la suficiente cobertura cuando los vehículos son enviados a atender un evento. Debido a estas carencias surge la necesidad de desarrollar modelos probabilísticos, los cuales pueden reflejar el hecho de que los vehículos de emergencia están ocupados por fracciones de tiempo, y se vuelven inasequibles una vez que se encuentran en atención de un evento pudiendo ser considerados como servidores que operan dentro de un sistema de colas (Gendreau, Laporte, & Semet, 2001).

Modelos Multi - Cobertura

Estos modelos surgen por la necesidad de superar los inconvenientes resultantes de la aplicación de modelos estáticos, buscando incorporar la programación jerárquica y multiobjetivo sobre el modelo MCLP, mediante la minimización del número requerido de vehículos para alcanzar la cobertura deseada, y maximizar la cobertura múltiple de los puntos de demanda dada la cantidad de vehículos disponibles (Ortega, 2013).

La primera de estas formulaciones la realiza (Daskin & Dean, 1983), mediante la construcción del problema de cobertura de conjunto de objetivos jerárquicos HOSC “*Hierarchical Objective Set Covering*”, logrando obtener mejores resultados que con el modelo MCLP bajo condiciones de alta demanda, mediante la maximización del número de puntos cubiertos, y a su vez procurando disminuir el número de vehículos utilizados. No obstante, presenta el inconveniente de privilegiar soluciones donde se produce una alta ocupación de los vehículos (Moeini et al., 2015).

Modelos Estocásticos

El “*Maximum Expected Covering Location Problem*” (MEXCLP), fue formulado por (Daskin & Dean, 1983) y se considera uno de los primeros modelos estocásticos en implementarse con éxito en varias aplicaciones como la de (Goldberg et al., 1990), quienes abordan el problema de ubicar vehículos médicos de emergencia en Tucson, AZ.

El MEXCLP es una extensión del modelo HOSC, donde se implementa el cálculo de la probabilidad de ocupación de vehículos, mediante el uso de un supuesto de independencia en la operación del sistema. Adicionalmente propone una heurística para la localización de vehículos, basada en el análisis del efecto del cambio en el número de vehículos disponibles, sobre la cobertura de la demanda permitiendo realizar una optimización de forma iterativa (M. Van Buuren, Aardal, Mei, & Post, 2012). Para (Ortega, 2013), la importancia del MEXCLP radica en la inclusión del componente probabilístico en el modelo propuesto.

Posteriormente (ReVelle & Hogan, 1989) y (ReVelle, 1991), introducen los modelos de “*Maximum Availability Location Problem*” (MALP I & MALP II), que consisten en dos versiones de un mismo modelo probabilístico que busca maximizar la cobertura de la demanda, con una probabilidad (α). Estos modelos estiman la fracción de ocupación de cada estación y basados en dicha estimación, efectúan la localización de un número dado de vehículos. Mientras que el modelo MALP I asume que la fracción de tiempo ocupado es la misma para todos los móviles, el modelo MALP II relaja esta restricción (Ortega, 2013).

En 1993 (Ball & Lin, 1993), desarrollan el modelo conocido como “*Reliability Perspective*” (Rel-P), donde a través de un enfoque de confiabilidad del sistema para lograr la ubicación de vehículos de servicios de emergencia, una falla dentro del sistema se interpreta como la incapacidad de un vehículo para responder a un evento dentro del tiempo establecido, y basándose en la determinación de un límite de confianza superior para establecer la probabilidad de dicha falla, se aplica un modelo de optimización mediante programación entera resaltando que las soluciones obtenidas en su aplicación, permiten la posibilidad de ubicar más de un vehículo en una misma estación (Ball & Lin, 1993; Ortega, 2013).

Modelos Dinámicos

Las políticas de asignación que utilizan la redistribución de los ESV se denominan políticas dinámicas o políticas de asignación dinámica, mientras que las políticas que no, son referidas como políticas estáticas o políticas de asignación estática (Maxwell, Henderson, & Topaloglu, 2009).

En la actualidad las investigaciones sobre la operación de ESVS, se orientan principalmente a los modelos dinámicos debido a su capacidad para captar la complejidad de estos sistemas, permitiendo alcanzar un máximo de llamadas dentro del umbral de tiempo establecido. En relación con los modelos anteriores, estos no buscan un equilibrio estático,

sino más bien contribuir a que los sistemas logren una reubicación de sus recursos en tiempo real (V. Buuren, 2011).

Las primeras referencias de un modelo dinámico son de (Gendreau, Laporte, & Semet, 1997), en su trabajo *“Solving an ambulance location model by tabu search”*, donde responden al problema de relocalización de vehículos que ya había sido detectado en un trabajo previo por (Kolesar & Walker, 1972), mediante su modelo DDSM *“Dynamic Double Standard Model”*, el cual consiste en realizar un proceso de relocalización para mantener la cobertura de todas las zonas cuando una móvil es enviada a atender un evento, permitiendo de esta manera que el sistema se anticipe al despacho de la siguiente móvil, para que el proceso de relocalización se pueda ejecutar de forma simultánea con la atención de un evento o reporte entrante (V. Buuren, 2011). La diferencia con los problemas iniciales de localización reside en que este procedimiento es dinámico, y se debe relocalizar los ESV de forma periódica conforme los vehículos son despachados y dejan zonas sin cobertura al movilizarse a los eventos asignados (Ortega, 2013).

Otro enfoque, también propuesto por (Gendreau et al., 2001), consiste en utilizar una heurística de *“búsqueda Tabú”* que permite maximizar la demanda cubierta como mínimo dos veces, asumiendo penalizaciones producidas por efecto de la relocalización de las móviles. Estas penalizaciones tienen la finalidad de evitar que se trasladen vehículos a bases o estaciones demasiado lejanas o que se ejecuten bucles sucesivos de vehículos entre un mismo par de estaciones (Ortega, 2013).

(Maxwell, Restrepo, Henderson, & Topaloglu, 2010), formulan en su trabajo *“Approximate Dynamic Programming for Ambulance Redeployment”*, un modelo de simulación de operaciones de ESVS para evaluar el rendimiento de una determinada directiva de asignación, y utilizar este modelo en una programación dinámica aproximada conocida como (ADP), en un contexto que permite calcular políticas de redistribución con una serie de ventajas, en comparación con otros métodos hasta la fecha propuestos, mediante la captura del comportamiento aleatorio del sistema a través de la estructura de programación dinámica. A pesar de ser un método computacionalmente intenso, la mayor parte del cómputo se realiza con anterioridad a las operaciones que se ejecutan en tiempo real para de esta manera, conseguir que los cálculos durante la operación del sistema sean rápidos, encontrando que las políticas resultantes generan mejores resultados que políticas estáticas sub-óptimas y marginalmente mejores que las políticas estáticas casi óptimas proporcionadas por modelos estáticos, multi-cobertura y estocásticos (V. Buuren, 2011; Maxwell et al., 2009, 2010).

Modelos de simulación

Los modelos de simulación hacen referencia al proceso de diseñar y crear un réplica computarizada de un sistema con el fin de imitar sus operaciones o características, buscando mejorar la comprensión de su comportamiento para un conjunto determinado de condiciones (Kelton, 2014).

Las simulaciones son una parte importante en la investigación de los ESVS, porque proporcionan información gráfica muy ilustrativa y apreciada por los administradores de estos sistemas, haciendo fácil mostrar el efecto de ciertas decisiones en tiempo real (Henderson & Mason, 2004). Adicionalmente son una valiosa herramienta para evaluar diversas políticas de despliegue, mediante la utilización de módulos específicos

proporcionados por una serie de paquetes de software, basados en el uso de Meta-heurísticas como búsqueda - Tabu, búsqueda por dispersión, algoritmos genéticos o simulado recocido para explorar diversidad de opciones en la entrada de los sistemas, como el número de ESV en cada ubicación establecida y a su vez tratar de converger de forma rápida y fiable a una combinación óptima o casi óptima con respecto a las medidas de desempeño adoptadas (L. Aboueljinane et al., 2013), p.13).

En el mercado se encuentra un paquete de simulación desarrollado por (Henderson & Mason, 2004) que en su primera versión fue nombrado como “*BartSim*”, y concebido con la intención de brindar soporte y facilidad de interpretación a los administradores del servicio de ambulancias de *St. Johns en Auckland, Nueva Zelanda*, posteriormente refinado para su aplicación en la ciudad de *Melbourne, Australia* y comercializado a la fecha bajo el nombre de SIREN “*Simulation for Improving Response times in Emergency Networks*” (V. Buuren, 2011), p.54).

BartSim, es un paquete de simulación que incorpora la variación del tiempo durante el transcurso del día para modelar los recorridos de los ESV. Mediante el análisis detallado de la red de transporte de *Auckland*, los autores lograron incorporar un precálculo de tiempos de viajes, basados en una heurística que determina trayectorias y tiempos mínimos para todos los arcos y nodos de la red de transporte, permitiendo de esta manera reducir la sobrecarga computacional asociada a realizar estos cálculos durante el proceso de simulación, también utiliza directamente los datos reales registrados en las bases de datos de *St. Johns*, para evaluar el comportamiento del sistema y permitir comparaciones entre estrategias alternativas en la operación del servicio de ambulancias, que son visualizadas mediante un subsistema de información geográfica (SIG), desarrollado dentro BartSim (Henderson & Mason, 2004).

Como se mencionó anteriormente, BartSim, es el punto de partida para el desarrollo comercial de (Henderson & Mason, 2004), conocido como SIREN. Este paquete de software fue diseñado para la ciudad de *Melbourne, Australia* e incorpora una serie de funcionalidades adicionales para la toma de decisiones de los ESVS, como evaluación de ubicaciones de bases, permitiendo realizar modificaciones sobre estas con la finalidad de mejorar los tiempos de respuesta de todo el sistema (Henderson & Mason, 2004).

La información sobre el desarrollo de SIREN es escasa, sin embargo, su sitio web oficial se menciona en “*Ambulance Service Planning: Simulation and Data Visualisation*” de (Henderson & Mason, 2004), y es posible evidenciar que su comercialización se basa en la integración de varios paquetes como Optima Predicción y Optima Life, consultar <http://www.optimal-decision.com> y <https://www.intermedix.com/optima>.

1.3. Medidas de desempeño

De acuerdo con el estudio de (L. Aboueljinane et al., 2013), existen tres tipos principales de medidas de desempeño utilizadas en el desarrollo de modelos de simulación de ESVS, los relacionados con la puntualidad, con la tasa de supervivencia de pacientes en emergencias médicas y los que involucran costos de operación. Sin embargo, se resalta que la mayor parte de la investigación en el campo se ha centrado en las medidas de puntualidad que se pretende abordar en el desarrollo del presente trabajo y hacen referencia a:

1.3.1. Tiempo de respuesta

Se define como el período entre la recepción de una llamada y la llegada del primer ESV al lugar donde se presenta el evento que se debe atender. Esta medida de desempeño es la más utilizada en los ESVS, debido a que desde la óptica de los pacientes es la que mejor representa el servicio recibido y dependiendo de la orientación del estudio puede ser calculada de diferentes formas, como el tiempo medio de respuesta, el nivel de cobertura para un determinado objetivo de tiempo de servicio T , o la cobertura dentro de un tiempo que excede un máximo T , que es un indicador de retrasos excesivamente largos que deben minimizarse (Marsh & Schilling, 1994; Peleg & Pliskin, 2004).

1.3.2. Tiempo de envío

Se define como el tiempo transcurrido entre el recibo de una llamada y la asignación de un ESV para la atención del evento. Este componente hace parte del tiempo de respuesta y evalúa la eficiencia de las operaciones centrales de ESVS, en contraposición a los factores exógenos a los que se ven abocadas las operaciones externas como la localización de los eventos y las condiciones variables del tráfico (L. Aboueljinane et al., 2013).

1.3.3. Tiempo de ida y vuelta

Es el tiempo transcurrido entre la recepción de una llamada y la llegada del ESV con el paciente al hospital de destino, convirtiéndose en un importante parámetro en caso de que el paciente requiera un rápido tratamiento médico (L. Aboueljinane et al., 2013). Para el caso del sistema objeto de análisis dentro de las especificaciones contractuales se establece un tiempo máximo en el que debe ser realizado el traslado de los vehículos inmovilizados al patio autorizado (SDM, 2017).

1.3.4. Tiempo de espera

Tiempo transcurrido en la cola por un evento, para ser atendido cuando no existen ESV disponibles que puedan realizar la atención. Este puede ser interpretado como el tamaño de la cola del ESVS (L. Aboueljinane et al., 2013).

1.3.5. Tasa de utilización de los ESV

Puede considerarse como la fracción del tiempo de servicio sobre el total de trabajo de un ESV. Normalmente los ESVS se diseñan para tener una tasa de utilización baja y de esta manera asegurar que un equipo de rescate, estará disponible para la atención de un evento urgente. Sin embargo, esta debe ser razonablemente equilibrada entre los ESV, con la finalidad de asegurar la equidad entre los diferentes operarios del sistema y garantizando que no hay equipos sub o sobre utilizados (L. Aboueljinane et al., 2013; Rodríguez et al., 2016).

1.3.6. Kilometraje total

Es la distancia total recorrida por un ESV, desde el lugar de salida hasta la llegada a destino. Se utiliza como medida de la eficacia de las políticas de despacho y las rutas elegidas (L. Aboueljinane et al., 2013).

1.3.7. Porcentaje de arribos tardíos

Es el porcentaje de servicios que se atendieron por fuera de un tiempo límite o la falta de respuesta a una llamada en un tiempo de espera superior al permitido (L. Aboueljinane et al., 2013; Rodríguez et al., 2016).

Por fuera de las diferentes medidas de puntualidad enunciadas, se resalta el nivel de preparación de las zonas, considerado como un indicador de desempeño utilizado para evaluar la capacidad que se tiene en una zona para atender los eventos potenciales. La manera más sencilla de definir el nivel de preparación es: Como una relación entre el número de ESV disponibles en una zona en un tiempo determinado, sobre el número de habitantes de dicha zona o la probabilidad de ocurrencia de un evento dentro de la misma. Así el nivel de preparación es un indicador que posibilita comparar los resultados de aplicar diferentes políticas de relocalización en un tiempo determinado (Andersson & Värbrand, 2007).

1.4. Software de simulación y análisis de información

Para la implementación de modelos de simulación de ESVS resaltan algunos software y herramientas de soporte en toma de decisiones como Arena - Rockwell, Service Model - ProModel, ILOG CPLEX Optimization Studio de IBM, Visual Basic para Excel y FICO Xpress Optimizer.

Para (Ingolfsson, Erkut, & Budge, 2003), uno de los beneficios de utilizar herramientas de simulación es la disminución del tiempo necesario para el desarrollo de modelos y la capacidad integrada en muchos de los software para la generación de variables aleatorias, análisis de múltiples escenarios y resultados de los modelos.

Arena, es un software de modelado y simulación de diferentes áreas de negocio, diseñado para analizar el impacto de los cambios que suponen los complejos y significativos rediseños asociados a la cadena de suministros, procesos, logística, distribución y almacenaje y sistemas de servicio. Posee gran flexibilidad y cubre gran cantidad de aplicaciones a modelar con cualquier nivel de detalle o complejidad (Bradley, 2007). Este es utilizado en estudios como los realizados por (L. Aboueljinane, Jemai, & Sahin, 2012), quienes, a través de la simulación de eventos discretos buscan lograr la disminución de tiempos de respuesta en los servicios de ambulancia de Val-de-Marne, Francia y modelar todo el sistema de emergencias en “*A simulation study to improve the performance of an emergency medical service: Application to the French Val-de-Marne department, (2014)*”, para así determinar configuraciones alternativas que permitan lograr mejoras sobre todo el sistema, al igual que (Sudtachat et al., 2016), quienes utilizan la simulación de eventos discretos para validar un modelo de programación de enteros, basado en cadenas de Markov que maximizan la cobertura del servicio de ambulancias del condado de Hanover en Virginia EU.

Otro software de modelación de eventos discretos utilizado en la simulación de estos sistemas es **ProModel**, que hace parte de las alternativas comerciales utilizadas para este tipo de implementaciones al contar con herramientas de análisis y diseño que, unidas a la animación de los modelos bajo estudio, permiten al analista conocer mejor el problema y alcanzar resultados más confiables respecto de las decisiones a tomar. Su principal enfoque es a los procesos de fabricación de uno o varios productos, líneas de ensamble y de transformación, entre otros. Sin embargo, la compañía desarrolladora ofrece otros paquetes, como MedModel y ServiceModel, diseñados para simulación de sistemas médicos y de servicios, respectivamente, aunque sin ser la especialidad del software es posible realizar buenas simulaciones de operaciones de servicios (García Dunna, García Reyes, & Cárdenas Barrón, 2013).

La aplicación más relevante implementada con ProModel para ESVS encontrada durante la construcción del marco teórico fue: La realizada por (Ingolfsson et al., 2003) en “*Simulation of single start station for Edmonton EMS*”, cuya finalidad era validar los cambios propuestos por el departamento de Servicios Médicos de Emergencia de la Ciudad de Edmonton, Canadá, los cuales consistían en reducir el número de bases dispuestas para la ubicación de las ambulancias del sistema, con el objetivo de minimizar tiempos muertos en actividades como la limpieza y reabastecimiento de equipos, mejorar el control de horas extras mediante la posibilidad de realizar cambios de turno más rápidamente y simultáneamente evaluar diversas alternativas de operación a las propuestas e implementadas inicialmente.

Es posible encontrar en la literatura un número importante de aplicaciones desarrolladas o resueltas mediante **CPLEX Optimization Studio** de IBM, el cual es un conjunto de herramientas para modelar y resolver problemas de optimización, mediante un Entorno de Desarrollo Integrado (IDE), un motor de optimización matemática (CPLEX), para problemas de planificación, un motor de programación de restricciones (CP), para problemas de programación y un conjunto de API (Python, Java, C #, etc.), para modelar, resolver e integrar soluciones de optimización (IBM, 2016).

Por ejemplo (Naoum-Sawaya & Elhedhli, 2013), implementan mediante Matlab y resuelven con CPLEX, un modelo de optimización estocástica de dos etapas para el problema de redistribución de ambulancias, que minimiza el número de reubicaciones en un horizonte de planificación, manteniendo un nivel de servicio aceptable en el ESVS de la región de Waterloo, Ontario Canadá. (Nair & Miller Hooks, 2009), analizan los datos de llamadas del ESVS de Montreal, Canadá y resuelven programas de enteros a gran escala para un problema de múltiples objetivos en conflicto mediante CPLEX, igualmente (Cheu, Huang, & Huang, 2008), resuelve la formulación de un modelo de programación de enteros que optimiza la asignación simultánea de múltiples tipos de vehículos de servicio de emergencia, entre un conjunto de estaciones candidatas para llegar a un análisis del rendimiento de todo el sistema de forma probabilista.

Menos utilizados, pero con gran capacidad de resolver problemas de optimización matemática de acuerdo con (FICO, 2017). **FICO Xpress Optimizer**, es un solucionador de problemas de programación lineal, que combina, facilidad de uso con velocidad y flexibilidad. Pudiendo interconectarse a través de una consola de línea de comandos Console Optimizer, con una aplicación de interfaz gráfica llamada IVE y una biblioteca a la cual es posible acceder desde todas las plataformas de programación principales como C/C++, .NET, Java y Visual Basic para aplicaciones (VBA); FICO proporciona acceso completo y de alto rendimiento a estructuras de datos internas de su Optimizer y una flexibilidad total para manipular los problemas y personalizar el proceso de optimización.

FICO Xpress Optimizer, es utilizado por (Degel, Wiesche, Rachuba, & Werners, 2014), en la resolución de un modelo de optimización simultánea, propuesto como apoyo a la toma de decisiones para la reorganización de los ESVS de la ciudad de Bochum, Alemania, mediante el cual se pretendía determinar que estaciones cerrar gradualmente para llegar a un número adecuado, conservando los niveles de servicio e interactuando con restricciones como la minimización del número de reubicaciones necesarias para garantizar cobertura del sistema.

Para la obtención y análisis de la información generada en el desarrollo de los modelos de simulación implementados en ESVS, se evidencia la utilización de Sistemas de Información Geográfica (SIG), con la finalidad de lograr representaciones más precisas de los eventos, teniendo en cuenta, el grado de detalle que brinda el tratamiento de la información mediante estas herramientas. Ejemplos de esta información son las variaciones de velocidad y tiempos de viaje sobre las redes de transporte para diferentes franjas horarias por días, día de la semana, zonas y horarios de demanda, recursos disponibles en bases o desplazamiento e información geográfica relacionada con centros de traslado (Rodríguez et al., 2016). Entre los SIG más utilizados para analizar problemas de localización y relocalización de ESVS se encuentran TeleAtlas, Google Maps y ArcGIS.

Schmid en "*Solving the dynamic ambulance relocation and dispatching problem using approximate dynamic programming*", utilizó una red de carreteras real accesibles en automóvil proporcionada por **Teleatlas** para la ciudad de Vienna, capital de Austria, adicionalmente la ubicación de hospitales y pacientes fue geocodificada mediante sus direcciones asignándolas a la unión más cercana de la red de carreteras, también utilizó los datos de tráfico en automóvil para estimar variaciones dependientes del tiempo, en los tiempos de viaje para cada enlace de la red, a través del transcurso del día (Schmid, 2012).

Lo anterior, es tan solo un ejemplo de lo que según Tele Mart, puede realizar una de sus variadas aplicaciones, para el caso Tele Atlas, es una implementación SIG de escritorio, web y empresarial donde es posible seleccionar áreas geográficas en los formatos de archivo y proyecciones que mejor se adapten a cada usuario, junto con otras fuentes de datos espaciales, tabulares, demográficos, consumidores y negocios que permiten visualizar y respaldar procesos de toma de decisiones como en el caso de la aplicación TIFAR diseñada por (V. Buuren, 2011), como una herramienta de soporte a la toma de decisiones para el ESVS de la ciudad Holandesa de Amsterdam.

Geocode, es el nombre de la extensión de **ArcGis**, que permite realizar el proceso de geocodificación en este software, una de sus mayores ventajas radica en la posibilidad de construir diferentes geocodificadores, dependiendo las reglas de descripción necesarias e incorporadas en las estructuras de datos, junto a las del área geográfica, en la cual se realizará su aplicación.

De acuerdo con ESRI, el fabricante de este software, la geocodificación es el proceso de transformar una descripción de una ubicación en una ubicación de la superficie de la Tierra. Las ubicaciones que se obtienen se transforman en entidades geográficas con atributos, que se pueden utilizar para la representación cartográfica o análisis espacial.

El Geocode, introducido como una extensión de ArcGis por ESRI, junto con otras de sus múltiples funcionalidades es utilizado en diversos casos de estudio en problemas de localización no solo de servicios médicos, sino también aplicaciones de negocios y entidades oficiales con la finalidad de lograr entender mejor los conjuntos de datos espaciales y a su vez desarrollar análisis que permitan soportar la toma de decisiones, una muestra de ello es el trabajo elaborado por (Peleg & Pliskin, 2004) "*A geographic information system simulation model of EMS: reducing ambulance response time*", donde mediante la utilización de diversas funciones de ArcGis se realiza una simulación de tiempos de respuesta para los servicios de ambulancia en los distritos de Laquis y Carmel en Israel.

1.5. Técnicas de verificación y validación

Según (Kelton, 2014), la verificación es la tarea de garantizar que el modelo se comporta de la forma deseada mediante la evaluación de su exactitud e implementación, mientras que el proceso de validación tiene como objetivo, asegurar que el modelo de simulación es una representación precisa del sistema para la meta prevista del estudio, mediante la utilización de varias técnicas como animación y pruebas estadísticas (Kleijnen, 1995). Con respecto a los modelos de simulación en ESVS, es posible evidenciar en los diferentes estudios desarrollados algunas de las siguientes técnicas de verificación y validación:

1.5.1. Animación

Mediante la visualización en un SIG (Henderson & Mason, 2004), muestran gráficamente los movimientos de llamadas a través de la red vial en un color que indique su prioridad y su asignación a un vehículo con el fin de comprobar si las reglas de envío, las rutas escogidas y el proceso de rescate son los esperados. Estas animaciones son revisadas con el personal y directivas del ESVS permitiendo comprobar por parte de estos si los movimientos y tareas eran correctos y acorde con el desempeño del sistema, promoviendo la credibilidad del modelo para una más sencilla aprobación de las directivas y adaptación a los cambios propuestos por parte del personal.

1.5.2. Validez cara a cara

Esta técnica mezclada con la animación es la utilizada por (Henderson & Mason, 2004) como se mencionó anteriormente; sin embargo, otros autores como (Silva & Pinto, 2010; Su & Shih, 2002), utilizan esta técnica de validación que consiste en contar con operarios, especialistas y directivos de ESVS, que evalúen la concepción del modelo y comportamiento de las salidas comparado con el sistema real.

1.5.3. Rastros

Utilizada por (Ingolfsson et al., 2003), con la finalidad de evidenciar los movimientos de vehículos y la ocurrencia de cada acontecimiento en el modelo (generación de llamadas, asignación de vehículos, tiempos de viaje, selección de hospitales y cambios de turno), para de esta forma validar la correcta lógica del modelo.

1.5.4. Análisis de sensibilidad

Consiste en cambiar los valores de entrada o parámetros del modelo para determinar si la salidas se comporta de la forma esperada, esta técnica es utilizada por diferentes investigadores entre ellos (Schmid, 2012), quien en su modelo de ADP, implementa cambios en los volúmenes de solicitudes diarios y tamaño de flota y (Zhen, Wang, Hu, & Chang, 2014), quienes evalúan el impacto sobre el tiempo de respuesta y planes de despliegue de ambulancias producido por la variación de parámetros como la tasa de arribo entre solicitudes, número de ambulancias, número de bases y cantidad de hospitales.

1.5.5. Implantación modular

También utilizada por (Silva & Pinto, 2010), junto a la validez cara a cara con la finalidad de verificar el modelo propuesto mediante la implementación y posterior ejecución de cada componente de forma independiente, para así comprobar la consistencia de las respuestas de salida contra el comportamiento de la respectiva parte del sistema evaluada.

1.5.6. Validación de datos históricos

Usualmente los datos históricos de los ESVS, son utilizados para la creación de los modelos de simulación, generando medidas de desempeño que posteriormente son comparadas entre sí para determinar la fiabilidad del funcionamiento (L. Aboueljinane et al., 2013). No obstante, surge el interrogante sobre la calidad y fiabilidad de la información utilizada debido a que comúnmente el registro de los servicios solicitados es realizado en forma manual, presentando en muchos casos errores tipográficos o se encuentran incompletos.

2. Metodología

El presente trabajo se realizó basado en los lineamientos brindados en la bibliografía por (Kelton, 2014; P. Baldwin, Eldabi, & J. Paul, 2004), para la construcción de modelos de simulación que son:

- **Formulación del problema:** Durante esta etapa se contextualiza el problema, se identifica su justificación y se formulan los objetivos donde se debe ser conciso en las medidas de rendimiento consideradas para determinar la calidad y éxito del modelo propuesto, para posteriormente definir qué tipo de sistema se pretende modelar con sus respectivas características y componentes.
- **Recopilación y análisis de datos:** Se utilizan los datos recopilados por el concesionario de grúas durante los años 2016 y 2017, para mediante su análisis comprender con detalle cuál es su modelo de operación y de esta forma definir que componentes serán incluidos en el modelo de simulación con la finalidad de representar el sistema propuesto.
- **Diseño del modelo:** Basado en los objetivos y medidas de rendimiento propuestas se definen los resultados que debe arrojar el modelo, para proseguir con la construcción e implementación. La construcción tiene en cuenta mediante la utilización de diagramas de flujo todas las relaciones lógicas, interacciones, funciones de probabilidad basadas en los datos históricos y variables que describen de forma completa el modelo.
- **Verificación de modelos y validación:** La verificación puede considerarse como la tarea de asegurar que el modelo se comporta de la manera prevista (depurar el modelo). Por otro lado, la validación es la tarea de garantizar que el modelo se comporta igual que el sistema real o propuesto para el caso. Una forma típica de realizar estos procesos, es mediante la creación de una amplia variedad de situaciones diferentes en las que la lógica del modelo pueda llegar a fallar, para de esta forma determinar si existen inconsistencias, de igual manera es preciso resaltar que no hay un solo método aceptado para tal fin y aunque se trata la verificación y validación como dos tareas separadas, la diferencia entre las dos es usualmente imperceptible.
- **Diseño de escenarios y análisis de resultados:** En este punto se realizan experimentos con el modelo, los cuales pueden llevar al diseño de tres tipos de escenarios: candidatos, comparativo y predictivo. En el análisis de candidatos se busca realizar una serie de variaciones sobre el modelo inicial sin comprometer su lógica y estructura básica, buscando encontrar alternativas de diseño funcionales que permitan saltar al análisis comparativo, para posteriormente en este evaluar un conjunto finito de los

diseños propuestos y compararlos para identificar la mejor opción entre estos. Por último, el análisis predictivo trata solamente algunos o el mejor diseño obtenido en el análisis comparativo y sobre este se calcula el rendimiento real de dicho sistema en pro de cumplir con los objetivos requeridos.

3. Análisis del sistema real

Para analizar el proceso de asignación de grúas en la ciudad de Bogotá, se utilizará como referencia las actividades desarrolladas por el concesionario a cargo durante los años 2016 y 2017, en los eventos originados por siniestros de tránsito con personas lesionadas, esto debido a que en la fecha de formulación del presente trabajo de grado son los datos recopilados y disponibles que proporcione el concesionario. El servicio prestado, es la asignación de grúas a todos los requerimientos realizados por la Policía Metropolitana de Tránsito de la ciudad de Bogotá, en donde se presentaron heridos por siniestros de tránsito, este servicio debe ser prestado durante las 24 horas del día, todos los días de la semana, sin excepción alguna.

El proceso de prestación del servicio inicia con la solicitud vía radioteléfono del Policía de Tránsito que atiende el siniestro, a una central de radio operada por funcionarios de la misma Policía de Tránsito quienes se encuentran en una sala con personal de la concesión de grúas. Al momento de recibir la solicitud, se disponen a comunicarla a éstos, para que determinen entre las móviles disponibles, cual está en condiciones de atender el evento. En este instante se registra la hora y ubicación del evento, así como el tipo de vehículo a trasladar.

Dependiendo del vehículo que debe ser remolcado, se determina el tipo de grúa que se debe asignar. La concesión cuenta con dos tipos de grúa para atender estas solicitudes, ganchos para vehículos pesados y maniobras de desvolcamiento y planchones para vehículos livianos tipo automóvil, motocicletas, tricimoviles y bicicletas. Posterior a esto, se registra la hora de asignación de la grúa, funcionario de Policía de Tránsito solicitante y en caso de haber cancelaciones la novedad de esta pero no el motivo, ni hora del reporte, que generalmente se aduce a conciliación entre las partes involucradas en el siniestro.

Finalmente se registra la hora de llegada de la grúa al evento, lugar a donde se traslada el vehículo inmovilizado y la hora de descarga, que representa el momento en que la grúa vuelve a estar disponible para la siguiente atención.

Al realizar la consulta con los operadores del concesionario y mediante la revisión de la documentación del proceso licitatorio, se logró evidenciar en (SDM, 2019), que mediante el Anexo técnico del proceso licitatorio la SDM solicita un total de 120 grúas basados en los datos de inmovilizaciones por infracciones de tránsito desde el 2010; sin embargo, no se devela ninguna metodología de cálculo o análisis realizado para llegar a tal conclusión y lograr determinar el número mínimo de grúas requeridas para cumplir con el indicador de 30 minutos de tiempo máximo de respuesta a cada solicitud realizada.

Durante los diálogos sostenidos con los operarios de las grúas y el personal que realiza la programación y asignación a los eventos atendidos, estos manifiestan que gran parte de los inconvenientes en sus actividades tiene origen en los tiempos que requieren para

realizar la entrega de los vehículos en los patios de destino, los cuales pueden llegar hacer de horas, debido a que estos son operados por personal de seguridad de la Fiscalía General de la Nación teniendo en cuenta que, al momento de ser inmovilizado el vehículo por estar implicado en un siniestro de tránsito con lesionados, se convierte en material probatorio de una investigación penal.

Al observar el proceso de atención de manera detalla, también se logra evidenciar que otra de las falencias radica en la falta de control de la flota por parte de los programadores y radio operadores, esto debido a que en muchos casos las grúas no son propiedad de la concesión, sino que están integradas a esta mediante un contrato de afiliación, contemplado dentro de la estructura organizacional y admisible dentro de las condiciones otorgadas por la SDM al concesionario (SDM, 2019), generando que en ocasiones los operarios de las grúas, no notifiquen su disponibilidad a la central de comunicaciones y programadores para dedicarse a realizar servicios de inmovilización por infracciones al tránsito, legales pero desconocidos por los supervisores del concesionario, hasta el momento en que los vehículos inmovilizados son entregados en los patios administrados por la concesión. Esta falta de control sobre la flota puede llegar a verse reflejada en sobre costos de operación, como recorridos innecesarios, excesivos tiempos muertos de algunos equipos y horas extras de personal con carga laboral adicional por falta de una adecuada programación de turnos, problema que no será tratado en este documento pero que evidentemente requiere ser evaluado para conseguir una adecuada utilización de todos los recursos disponibles.

4. Análisis de datos

A continuación, se presenta el análisis descriptivo de la información proporcionada por el concesionario para el periodo comprendido entre enero de 2016 y noviembre de 2017, la cual representa un total de 25.572 solicitudes de servicio. Para este análisis se divide el proceso de atención en tres etapas, la primera es la recepción de solicitud de servicio, seguido de una segunda etapa de asignación y despacho, para terminar con una tercera etapa de prestación del servicio y traslado.

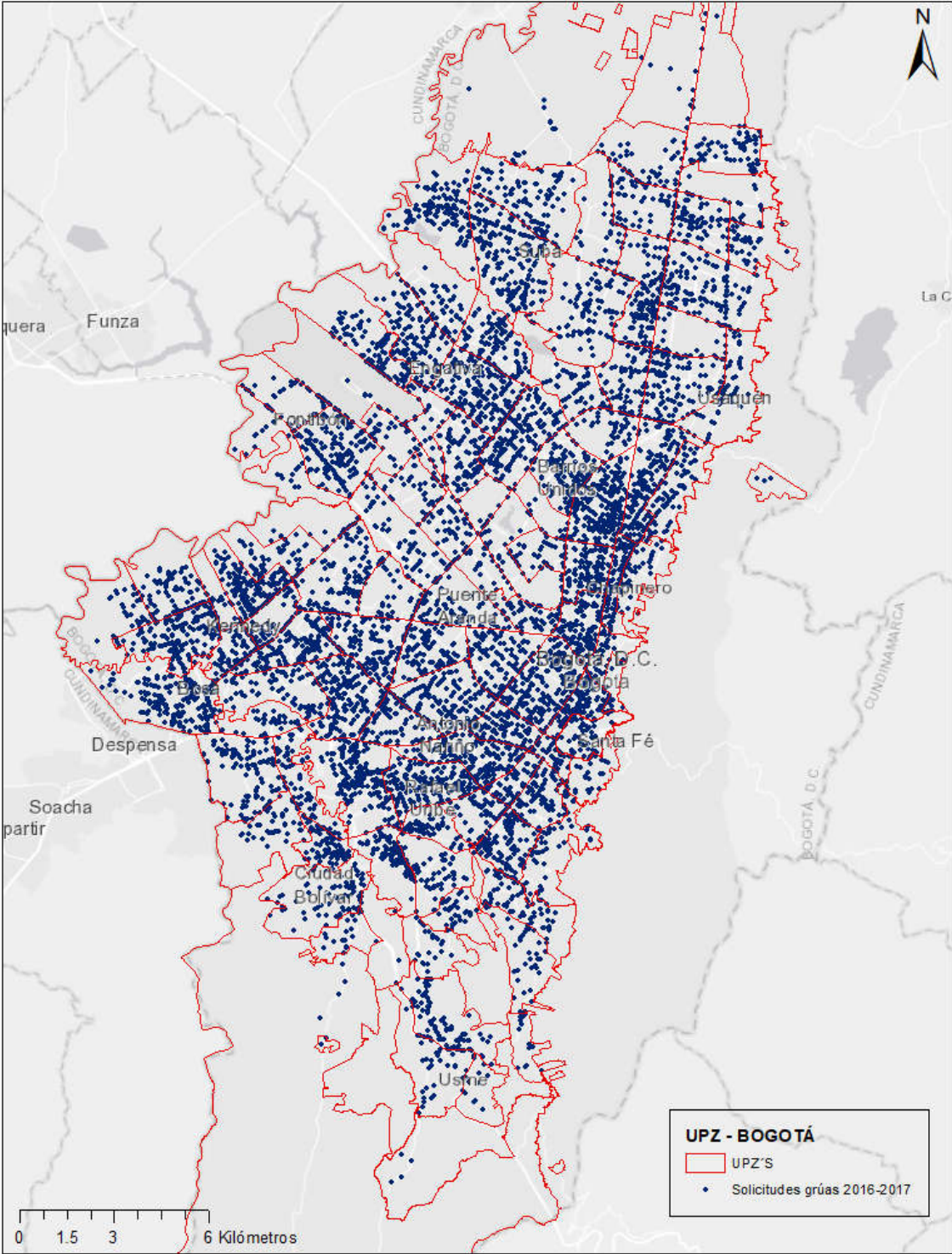
4.1. Recepción de la solicitud

Esta es atendida por un funcionario de la Policía de Tránsito asignado a un área geográfica específica, normalmente una o dos localidades de la ciudad. Mediante radios de comunicación directa el personal en vía interactúa con esta central para solicitar el servicio, en el mismo instante este operador se dirige hacia el personal de la concesión que trabaja en las mismas instalaciones, para indicar la información primaria requerida, la cual se compone de hora, fecha, lugar del evento, tipo de vehículo a trasladar, funcionario solicitante de la Policía de Tránsito en vía y sala de radio.

Esta información inicial del evento recopilada por el concesionario, permitió analizar el comportamiento temporal y geográfico de la demanda para las 25.572 solicitudes registradas en las tablas de datos proporcionadas; sin embargo, es oportuno resaltar que no se evidencio un procedimiento establecido para el registro de estas direcciones por parte del concesionario, hecho que dificulto el proceso de georreferenciación, teniendo que realizar múltiples tareas de depuración y organización de los datos mediante Excel,

requiriendo una inversión de tiempo y esfuerzo considerable para finalmente lograr su estandarización, mediante servicios en línea de Google Maps y BatchGeo, junto a las funciones de geocodificación del Software ArcGis *Figura: 2 Georreferenciación solicitud grúas 2016 y 2017.*

Figura: 2 Georreferenciación solicitud grúas 2016 y 2017



Fuente: Elaboración propia

La localidad de la ciudad con mayor número de solicitudes es Kennedy con un 14.76%, seguida de Suba, Puente Aranda y Engativá sumando entre las cuatro un 44.63% del total de las solicitudes recibidas por el concesionario como se muestra en el *Tabla 1 Resumen georreferenciación solicitud de servicios por localidades*, igualmente se evidencia que dentro de los 25.572 registros existe al menos una solicitud para cada una de las 113 UPZ de la ciudad.

Tabla 1 Resumen georreferenciación solicitud de servicios por localidades

LOCALIDAD	NÚMERO DE UPZ LOCALIDAD	NÚMERO DE SERVICIOS SOLICITADOS	PORCENTAJE SOLICITUDES
KENNEDY	12	3774	14.76%
SUBA	13	2660	10.40%
PUENTE ARANDA	5	2568	10.04%
ENGATIVA	9	2412	9.43%
USAQUEN	16	1412	5.52%
FONTIBON	8	1372	5.37%
BARRIOS UNIDOS	4	1205	4.71%
TEUSAQUILLO	6	1193	4.67%
BOSA	5	1180	4.61%
CIUDAD BOLIVAR	8	1167	4.56%
CHAPINERO	5	1085	4.24%
RAFAEL URIBE URIBE	5	1035	4.05%
LOS MARTIRES	2	917	3.59%
SAN CRISTOBAL	5	879	3.44%
TUNJUELITO	2	792	3.10%
SANTA FE	5	688	2.69%
ANTONIO NARIÑO	2	631	2.47%
USME	7	470	1.84%
CANDELARIA	1	132	0.52%
TOTAL	120	25572	100.00%

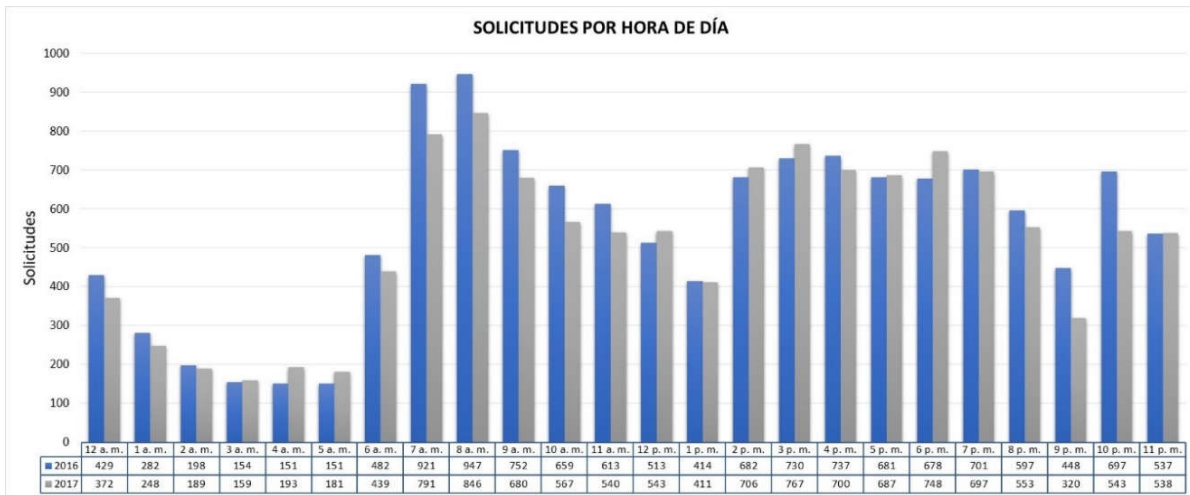
Fuente: Elaboración propia.

El análisis de la demanda también fue realizado por horas del día, días de la semana y meses del año. En la

Figura: 3 Solicitudes por hora se presenta por horas del día, mientras que en la *Figura: 4 Solicitudes por día de la semana*, se muestra el día de la semana en que fue registrada la solicitud de servicio y en la *Figura: 5 Solicitudes por mes*, para los años de estudio indicados, teniendo en cuenta que, como se manifestó anteriormente no se cuenta con la información para el mes de diciembre de 2017 y durante el proceso de estandarización de los registros se evidencio días faltantes para el mes de septiembre de 2016.

Cuando se analizó la demanda de acuerdo con la hora del día, se observó que hay mayor solicitud de servicios en el día entre las (7:00 a.m. - 8:00 p.m.), presentándose un pico de alta demanda entre las (7:00 a.m. - 9:00 a.m.) y manteniéndose estable, pero sobre niveles de solicitud altos entre las (2:00 p.m. - 7:00 p.m.). Este comportamiento es similar para cada año acorde con la *Figura: 3 Solicitudes por hora*.

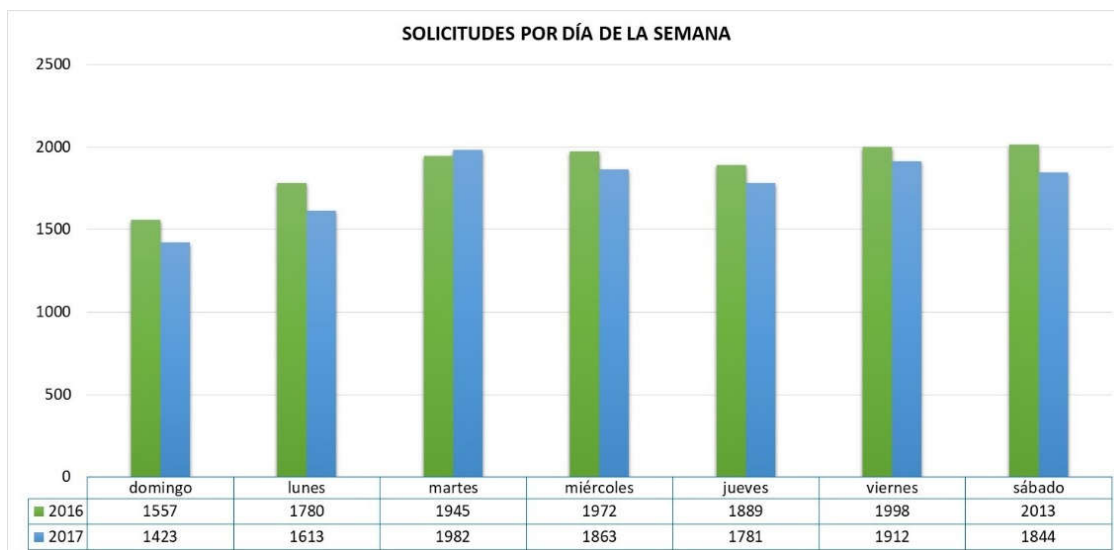
Figura: 3 Solicitudes por hora



Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, se realizó el análisis de la demanda por días de la semana como se muestra en la *Figura: 4 Solicitudes por día de la semana*, mostrando que las mayores diferencias se presentan entre los días domingo y martes con un 3.7% menos solicitudes para el domingo. Utilizando un análisis de varianza (ANOVA), para determinar la existencia de diferencias estadísticas significativas entre la cantidad de servicios solicitados por días de la semana. Se obtuvo como resultado que, si existe diferencias significativas entre la cantidad de servicios solicitados por días de la semana.

Figura: 4 Solicitudes por día de la semana

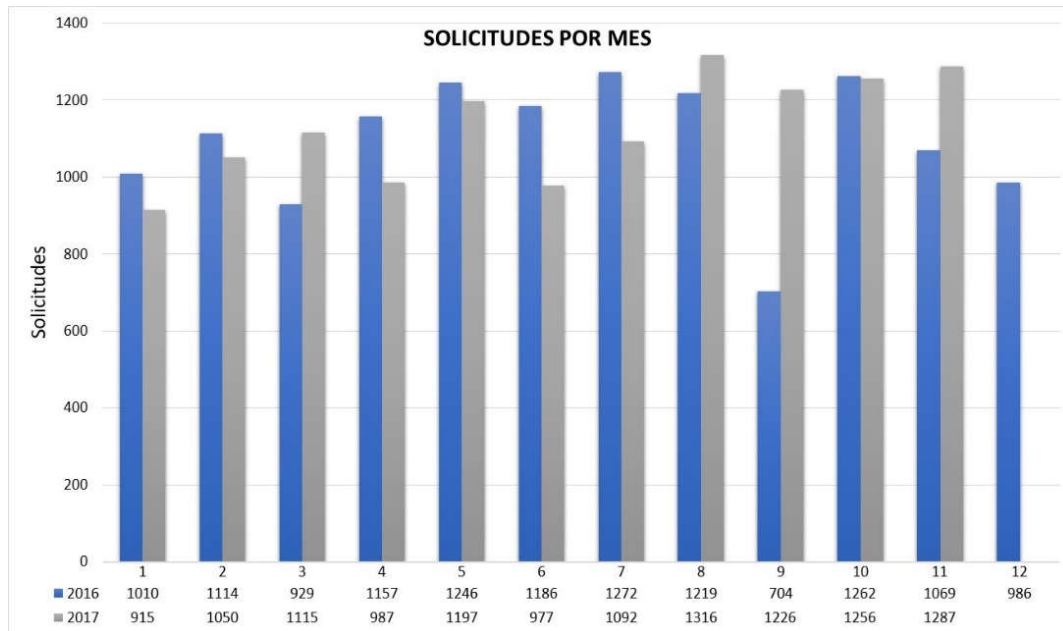


Fuente: Elaboración propia.

Al comparar la variación de la demanda en los dos años de estudio, se observa que en general el comportamiento de ésta no presenta cambios significativos. El total de servicios solicitados para el año 2016 fue de 13.154 mientras que para el año 2017 fue de 12.418, lo que equivale a una disminución del 5.6% teniendo en cuenta que para el mes de diciembre de 2017 no se presentan registros; sin embargo, la variación de la demanda por mes *Figura:*

5 Solicitudes por mes, determinada por medio de análisis de varianza *Figura: 6 Tabla ANOVA Solicitudes por mes*, muestra que los cambios en la demanda entre meses no son significativos entre sí, lo que indica que no hay diferencias estadísticas significativas entre la cantidad de servicios solicitados durante los diferentes meses de los años de estudio, aun cuando para el mes de septiembre de 2016, no se tienen registros completos y para diciembre de 2017 no se presentan registros.

Figura: 5 Solicitudes por mes



Fuente: Elaboración propia

Figura: 6 Tabla ANOVA Solicitudes por mes

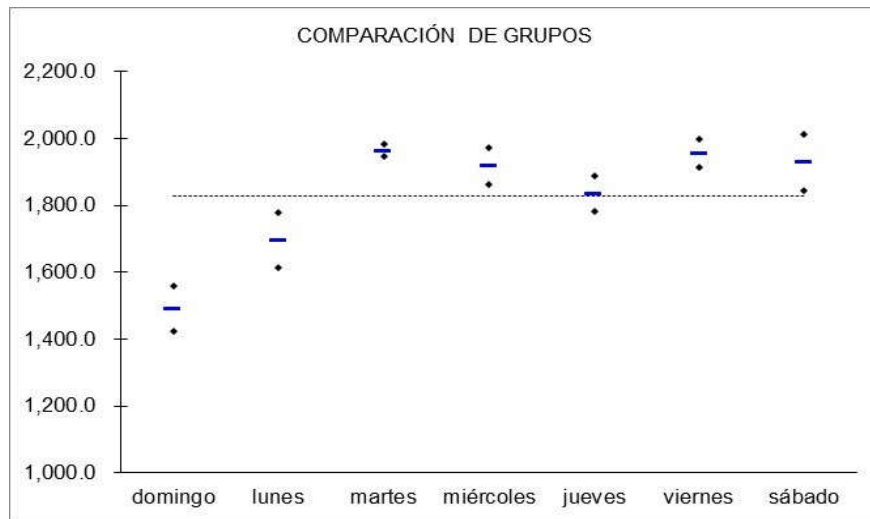
RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
2016	12	13246	1103,833333	28499,78788
2017	11	12507	1137	18052
Total general	12	25753	2146,083333	176866,0833

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	8313689,817	2	4156844,908	54,5261759	4,92396E-11	3,294536816
Dentro de los grupos	2439544,583	32	76235,76823			
Total	10753234,4	34				

Fuente: Elaboración propia

Con base en este resultado, se utilizó la prueba de Tukey *Figura: 7 Comparación de la media de solicitudes por día mediante prueba de Tukey*, para encontrar diferencias significativas entre día obteniendo como resultado que existen diferencias significativas de medias, entre los domingos y lunes con relación al resto de días, y que no existe diferencia entre las medias de solicitudes de estos dos días.

Figura: 7 Comparación de la media de solicitudes por día mediante prueba de Tukey



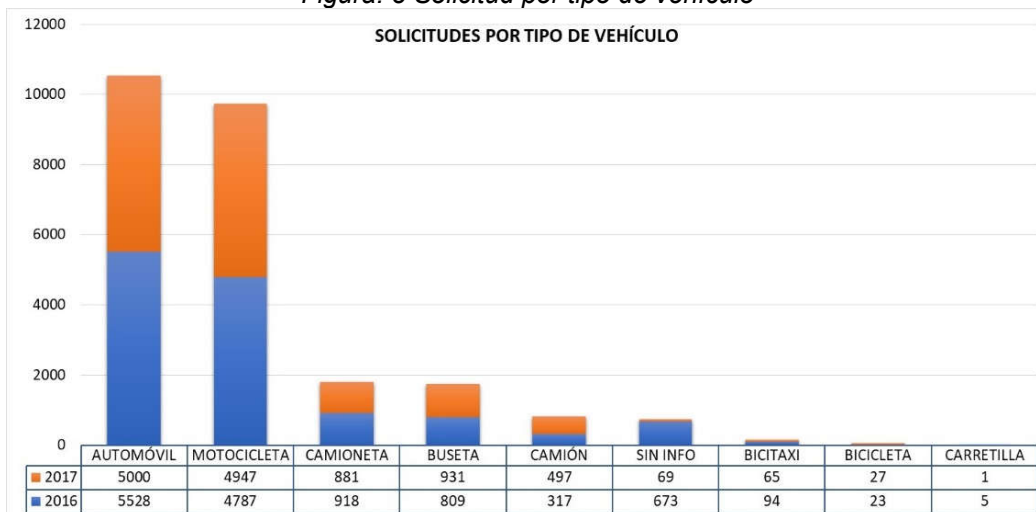
Fuente: Elaboración propia.

En conclusión, a pesar de no existir diferencia estadista significativa entre la cantidad de servicios solicitados en los diferentes meses del año, cuando se realizó el análisis por días de la semana y por horas del día el resultado fue diferente. Se observó diferencia significativa de medias entre los días domingo y lunes con relación al resto de días de la semana.

4.2. Asignación y despacho de la grúa

Como se mencionó anteriormente, el despachador recibe la solicitud por parte de un funcionario de la Policía, siguiente a esto entrega una boleta donde consigna la información básica registrada e informa la grúa asignada al evento. Para realizar esta asignación, primero debe revisar las móviles disponibles con capacidad de traslado del vehículo implicado *Figura: 8 Solicitud por tipo de vehículo*, y de estas escoger e informar a la tripulación que el considere, tiene el menor tiempo de respuesta que debe dirigirse a la ubicación indicada.

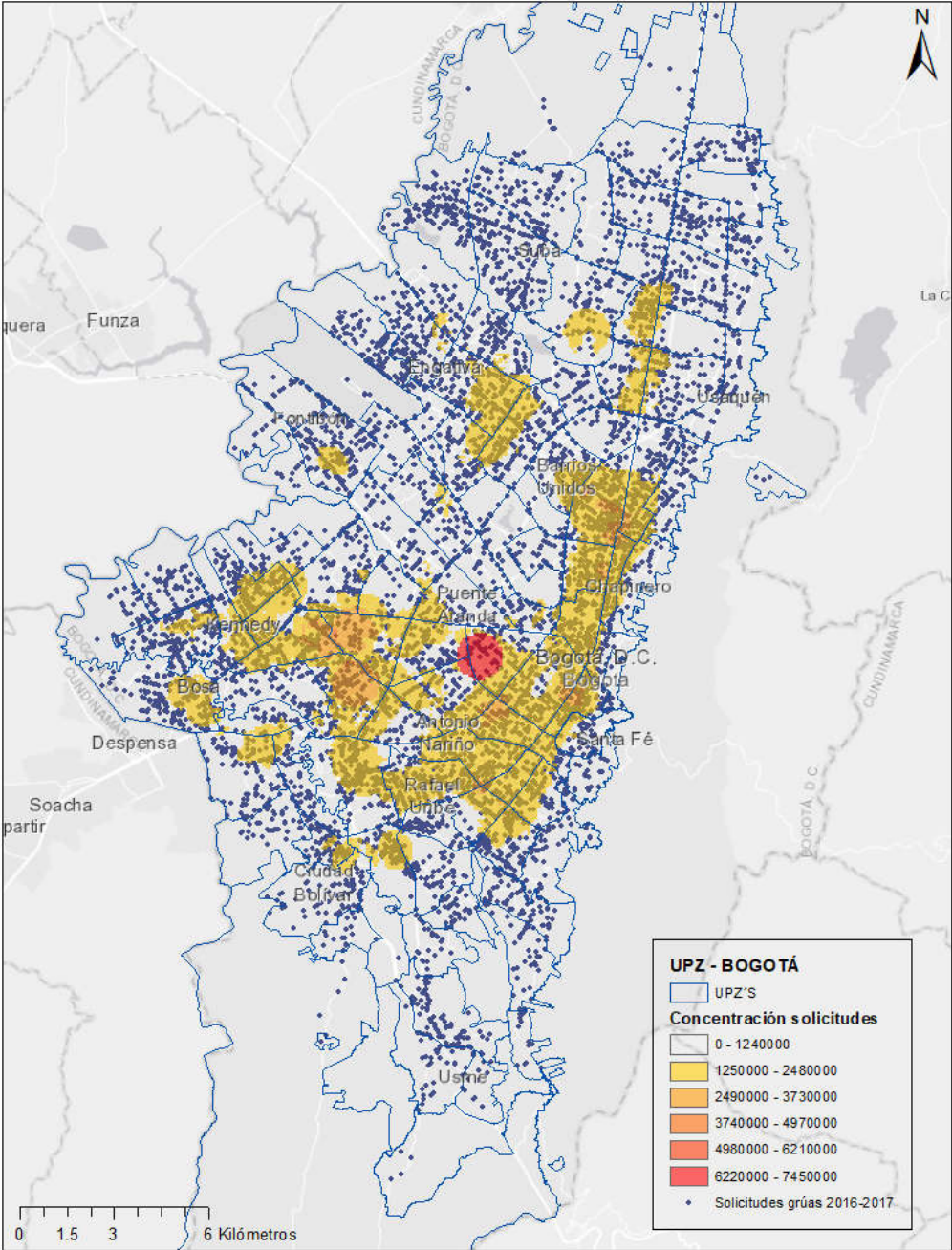
Figura: 8 Solicitud por tipo de vehículo



Fuente: Elaboración propia.

En los datos proporcionados por el concesionario para el año 2016, no se relaciona la ubicación inicial de la móvil que atiende el servicio, esta información comienza a ser recopilada y registrada en los archivos desde el 07 de enero de 2017 componiéndose de 12.344 registros, los cuales para la mayoría de los casos no contienen la dirección exacta, sino una localización general como la localidad, barrio, dirección parcial o nombre de algún lugar cercano de referencia, hecho que genero un esfuerzo adicional para lograr su georreferenciación, teniendo que optar por una estandarización dentro de la UPZ más cercana para la mayoría de estos registros.

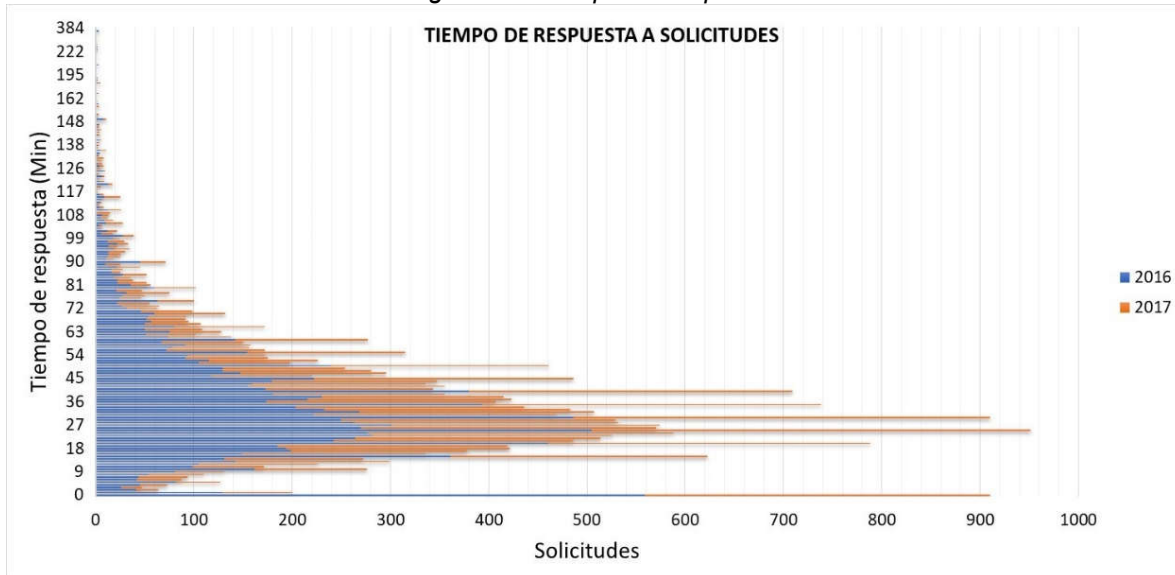
Figura: 9: Concentración y ubicación solicitudes grúas 2016-2017



Fuente: Elaboración propia.

Como ha sido mencionado con anterioridad, un indicador bastante común en los ESVS, es el tiempo de respuesta a cada solicitud, normalmente esta es considerada la medida más representativa del sistema y la resolución de estos problemas, se fundamenta en lograr una disminución de este tiempo, para el caso de la concesión de grúas de la ciudad de Bogotá, éste tiempo se estableció en 30 minutos (SDM, 2019) y como se puede observar en los registros de operación proporcionados para los dos años de operación en estudio, la media de este tiempo fue de 36 minutos con 13.339 eventos atendidos por encima de los 30 minutos *Figura: 10 Tiempo de respuesta*.

Figura: 10 Tiempo de respuesta



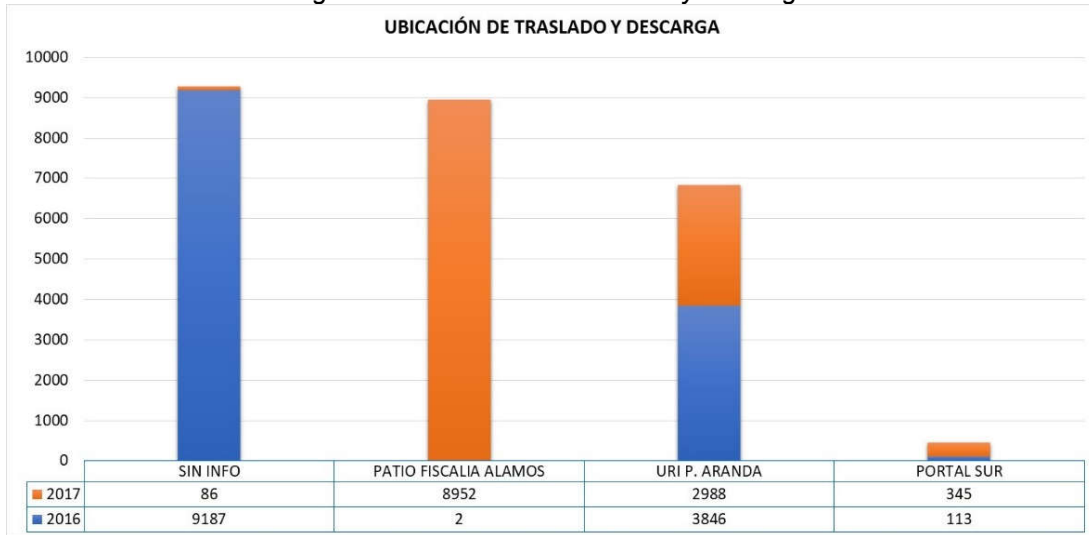
Fuente: Elaboración propia.

4.3. Atención del evento y traslado del vehículo

La tercera etapa de prestación del servicio se compone de la atención en vía por parte de los operarios de la grúa y respectivo traslado al patio asignado.

No se cuenta con información de los tiempos promedios de atención en vía de cada evento, pero se registra desde el 14 de septiembre 2016 la hora y lugar de descarga para cada móvil con un total de 16.221 registros de hora y 16.437 de ubicaciones *Figura: 11 Ubicación de traslado y descarga*, en algunos casos la falta de esta información, se puede ver reflejada en la columna novedades, cuando existe cancelación del eventos pero en otros no se registra; por ende, no es posible precisar si se trató de una cancelación o una falla en el registro de datos por parte del radio operador.

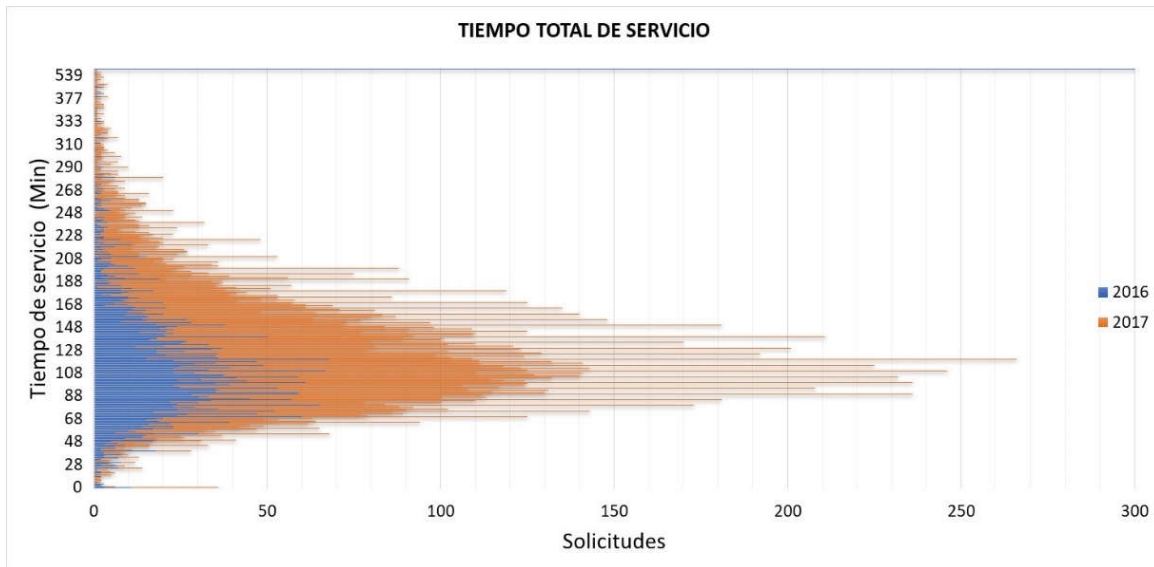
Figura: 11 Ubicación de traslado y descarga



Fuente: Elaboración propia.

Dado el contenido y estructura de la información registrada para cada evento, se decide unir estas dos etapas en la atención del servicio. Presentando para este caso de estudio como una sola etapa del proceso, la atención en vía y traslado al sitio de descarga, representados como el tiempo de servicio *Figura: 12 Tiempo total de servicio*, obtenido de la resta entre la fecha-hora de descarga y la fecha-hora de llegada al lugar del evento.

Figura: 12 Tiempo total de servicio



Fuente: Elaboración propia.

Para el año 2016, la mayor parte de la información de ubicación de traslado y descarga no se encuentra consignada, pero mediante dialogo con los operarios y coordinadores de la concesión se establece que estos registros "SIN INFO", se asocian al patio de la Fiscalía que se encontraba en el barrio de Álamos.

Para terminar la revisión y análisis exploratorio de los datos suministrados por el concesionario; es pertinente mencionar que, como se evidenció en la elaboración del marco teórico, la localización de cada una de las demandas por separado en el desarrollo de modelos de simulación, es computacionalmente poco práctica debido a la gran cantidad de llamadas recibidas por los ESVS (L. Aboueljinane et al., 2013), p.4). Por tanto, una compensación común entre el modelado preciso y razonable del tiempo computacional consiste en agregar llamadas e información de tiempo de viaje basado en su proximidad en una estructura de zona, para nuestro caso estas zonas serán 113 de las UPZ en que se encuentra dividida la ciudad de Bogotá.

5. Modelo de simulación

Para la simulación del sistema objeto de estudio en el presente trabajo de grado, se parte de la identificación de éste como un sistema dinámico de eventos discretos. Un paradigma de simulación para sistemas dinámicos de eventos discretos asume que el sistema simulado sólo cambia de estado en puntos discretos del periodo simulado. Es decir, que el modelo cambia de estado ante la ocurrencia de un evento.

Por tanto, el modelo de simulación posee un estado “S”, definido en algún instante en el tiempo. Un estado del sistema es un conjunto de datos tomados de las variables salientes del sistema, y que permite describir la evolución de este en un instante de tiempo. En un programa de simulación por ordenador, el estado se almacena en una o más variables que representan varias estructuras de datos. Así el estado, dependiendo de las necesidades particulares del modelo y el nivel de detalle incorporado, se puede definir de varias formas. Por ejemplo, si se considera una máquina, alimentada por un almacén de materia prima de trabajos. Un estado inicial del sistema es el número de trabajos en el almacén, pero esta manera de definir el estado no permite calcular los tiempos de espera, porque no se mantiene la identidad de cada trabajo individual. Para poder calcular los tiempos de entrega, se podrían considerar los distintos clientes en una cola con datos asociados a cada uno de ellos, como sus tiempos de llegada al sistema.

La evolución de estos modelos se rige por un reloj y una lista de eventos ordenados cronológicamente. Los eventos están relacionados en la lista de eventos, de acuerdo con su orden de ocurrencia. El evento que se encuentra al principio de las listas se denomina evento inminente. La programación de un evento supone que el evento está vinculado a la lista de eventos. Si un evento ocurre significa que el evento se desliga de la lista y se ejecuta. La ejecución de un evento puede cambiar el estado de las variables y posiblemente programar otros eventos en la lista.

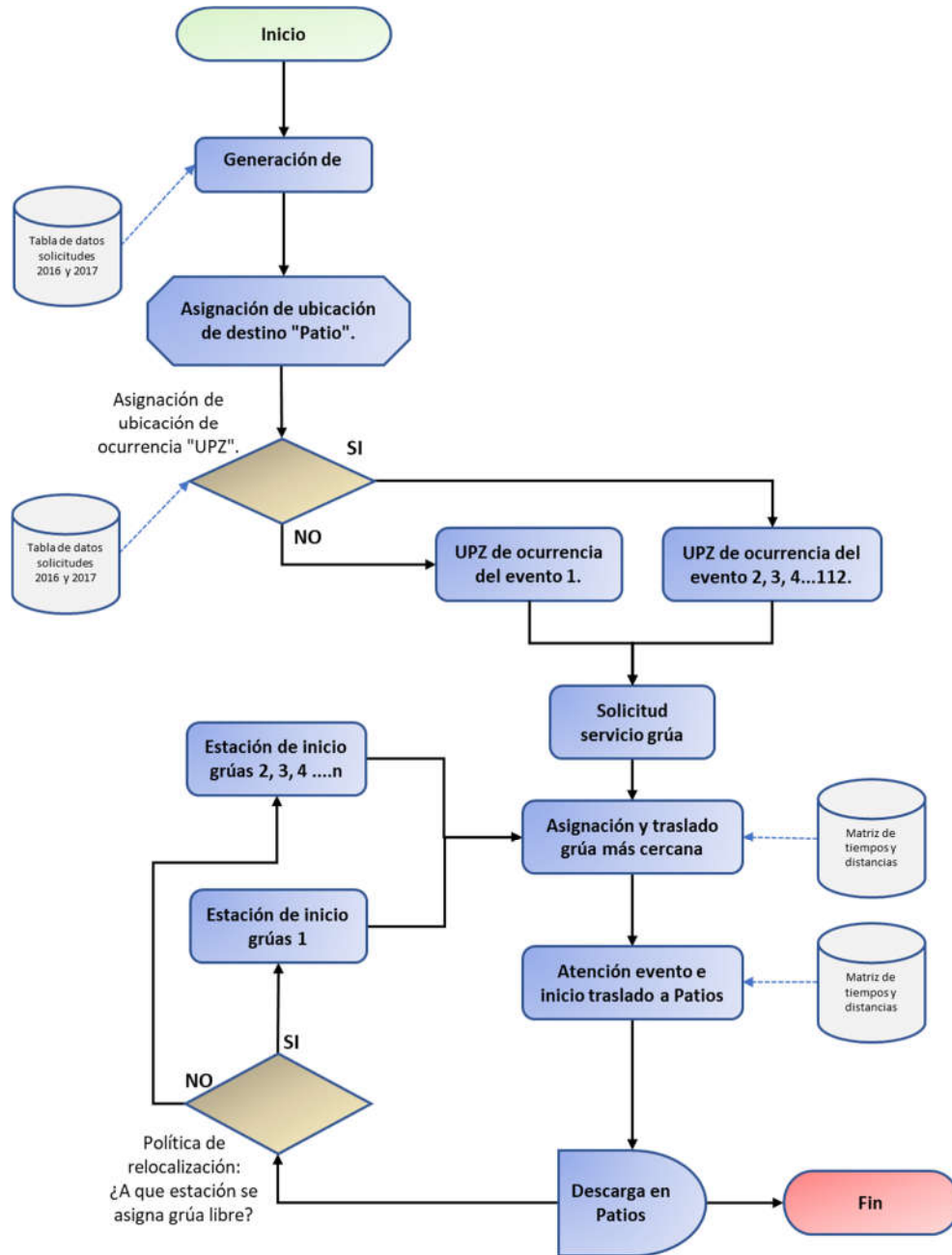
Una característica fundamental del paradigma de los eventos discretos es que nada cambia, a menos que ocurra un evento, en cuyo instante ocurre la transición a otro estado. Es decir, ante la ejecución de un evento es posible que cambie el estado, pero todo cambio de estado se produce por un evento. Entre los eventos el estado del sistema se considera constante.

Las entidades son aquellas personas, objetos, piezas, etc., reales o imaginarios, cuyos movimientos a través del sistema causan un cambio en su estado “S”. Por tanto, se consideran entidades a aquellos documentos, clientes o piezas, que son producidos o atendidos o que de cualquier otra manera influyen en el proceso. Las entidades, se pueden

entender, como objetos dinámicos que usualmente son creados, circulan por un tiempo a través del sistema y posteriormente se retiran del mismo o siempre se mantienen circulando en él. La creación de las entidades puede ser un proceso realizado de forma manual, por el modelador o automáticamente mediante el software de simulación (Kelton, 2014).

De acuerdo con lo descrito en el capítulo anterior, la atención de incidentes de tránsito se dividió en tres partes o etapas que son las mismas utilizadas en el proceso de simulación del sistema. Estas son: recepción de la solicitud, asignación y despacho de la grúa y por último la atención del evento y traslado del vehículo a los patios de inmovilización.

Figura: 13: Diagrama de flujo del proceso



Fuente: Elaboración propia.

5.1. Variables y parámetros del modelo

5.1.1. Variables exógenas

Son las independientes o de entrada del modelo. Puede considerarse que estas variables actúan sobre el sistema, pero no reciben acción alguna de parte de él.

- Tasa de llegadas (Solicitudes – Eventos/minuto): Esta variable corresponde al número de servicios o solicitudes de grúas que realiza la Policía de Tránsito.
- Vehículos (Grúas): Corresponde a los equipos de transporte que realizan atención de las solicitudes ejecutando el respectivo traslado entre las diferentes ubicaciones.
- Tiempos de viaje (minutos): se define como el periodo de tiempo que tardan las grúas en trasladarse de una ubicación a otra. Este tiempo se calculó a través del servicio de trayectos de Google Mapas entre la franja horaria considerada como de máxima demanda en el sistema (7:00 a 9:00 de la mañana, ver
- Figura: 3 Solicitudes por hora) y entre los centroides de cada UPZ utilizada.
- Distancia entre ubicaciones (Km): Teniendo en cuenta que, para la utilización de transportadores en Arena es necesario definir una distancia entre las diferentes ubicaciones (llamadas estaciones en el modelo), junto con una velocidad determinada para los transportadores (grúas), éstas se determinaron, mediante la matriz de tiempos, hallada en Google Mapas y se establecieron velocidades de recorrido fijas para las grúas con y sin carga.
- Tiempo de atención (minutos): se define como el tiempo que tarda un equipo en realizar la atención de un evento, es posible realizar variaciones sobre el modelo. Para el caso se estableció como una demora de cero minutos, debido a que cuando la grúa llega al evento, la Policía de tránsito ya ha realizado los procedimientos debidos para que el vehículo pueda ser transportado, esto no se da en todos los casos, pero es de resaltar, que no se cuenta con información de estos tiempos cuando se presentan. Se considera que no es relevante dentro del modelo, pero su obtención puede ayudar a mejorar la precisión.
- Tiempo de espera en el patio (minutos): Tiempo promedio que deben esperar las grúas para poder realizar la descarga de vehículos en los diferentes parqueaderos o patios (Fiscalía – Álamos).

5.1.2. Variables de estado

Describen el estado de un sistema o uno de sus componentes, ya sea al comienzo, al final o durante un periodo. Estas variables interactúan con las variables exógenas del sistema y con las endógenas, de acuerdo con las relaciones funcionales supuestas para el sistema.

- Eventos en el sistema: Representa la cantidad de eventos que se encuentran en el sistema, pueden ser en espera de atención o siendo atendidos en cualquier parte del proceso.
- Eventos en cola: Representa el número de eventos pendientes por atención. Se ven reflejados por las colas en el sistema o para el caso específico, vehículos accidentados a la espera de traslado.

- Tasa de utilización de vehículos: Es una variable que permite evidenciar el porcentaje de utilización de los vehículos disponibles para prestar el servicio en el sistema (Grúas). Es representado por el porcentaje de tiempo que laboró la flota, contra el tiempo total del servicio.
- Porcentaje de utilización de la flota de vehículos: Para el sistema representado y bajo los parámetros de respuesta del modelo y software utilizado, se puede considerar como el porcentaje de tiempo que todas las grúas se encuentra en uso durante la duración de la simulación.

5.1.3. Variables Endógenas

Son las dependientes o salidas del sistema y son generadas por la interacción de las variables exógenas con las del estado, de acuerdo con las características de operación de las últimas.

- Tiempo promedio de atención (minutos): Es el tiempo promedio que se encuentra cada evento en espera de ser atendido dentro del sistema, para el caso del modelo es posible evidenciarlo como tiempo promedio de la cola en la ubicación o UPZ donde se presenta el evento.
- Cancelaciones: Teniendo en cuenta que el traslado de un vehículo implicado en un siniestro de tránsito con lesionados hace parte de un proceso judicial, no es posible realizar la cancelación del evento, porque el vehículo debe ser producto de inmovilización obligatoria. Sin embargo, podría presentarse el caso, donde la persona lesionada desista in situ, de realizar cualquier proceso judicial a futuro, para lo cual no se encuentra información dentro de las tablas de datos suministradas, motivo por el que no son consideradas las cancelaciones en el modelo.

5.1.4. Parámetros

- Tiempos (Minutos): Para lograr la representación de tiempos de atención en el modelo se utilizó el servicio de geocodificación y trayectos de Google Mapas, obteniendo una matriz de tiempos y distancias de recorrido entre las diferentes ubicaciones (centroides de las UPZ), implementadas en el modelo.
- Velocidades (Kilómetros/Hora): Se consideraron los límites actuales de velocidad en la ciudad para establecer las velocidades a simular en los transportadores vacíos y una reducción de 10 Km/h cuando realizan el transporte de vehículos atendidos.
- Distancias (Kilómetros): Dado que para el funcionamiento del modelo en Arena se requiere utilizar como impedancias las distancias más no los tiempos, estas se hallaron de forma indirecta mediante los tiempos de la matriz de trayectos y las velocidades definidas para las grúas según su tipo de desplazamiento (con o sin carga).

5.2. Supuestos del modelo

Partiendo de la consideración, que un modelo se considera una representación de la realidad y con la finalidad de conservar un nivel de complejidad adecuado que permita extrapolar sus resultados a la práctica, sea hace necesario contemplar algunos supuestos que permitan acotar su alcance y a su vez delimiten las inferencias que se obtienen a partir

de sus resultados. Por consiguiente, se presentan los supuestos que se utilizaron para la construcción del modelo de simulación propuesto:

- Como punto de inicio de la operación de las grúas, se considera la ubicación representada como patio de Álamos. Esto debido a que es el lugar donde estas pernoctan, y las tripulaciones realizan los respectivos cambios de turno, fin e inicio de jornada.
- No se incorporan cancelaciones de servicio en el modelo, teniendo en cuenta que no se cuenta con información referente a estas, para lograr determinar una probabilidad de ocurrencia dada. Adicionalmente, como se mencionó en la descripción de variables exógenas, al ser un traslado por la ocurrencia de un siniestro de tránsito con lesionados, el vehículo hace parte de la cadena de custodia de un proceso judicial, motivo que obliga su inmovilización.
- En la localización de los eventos, vehículos y estaciones, se asumió que estos se ubican en los centroides de cada UPZ.
- No se implementaron en el modelo: Tiempos o periodo de no utilización de equipos por casos típicos como fallas mecánicas, periodos de mantenimiento, ausentismo laboral de las tripulaciones (conductores y auxiliares) y retrasos por cambio de equipos después de haberse realizado la asignación.

5.3. Elaboración del modelo

En el presente capítulo se describen los pasos realizados para la construcción del modelo propuesto.

5.3.1. Generación de los eventos

El proceso de simulación para el modelo propuesto, comienza con la ocurrencia de un siniestro de tránsito en el cual se originan lesiones entre las personas involucradas, ya sean conductores de los vehículos o peatones transeúntes, estos siniestros son necesariamente atendidos por la autoridad de tránsito en vía, como lo indica el CNTT de Colombia (Ley 769 de 2002) y dan origen a la inmovilización del vehículo, en las ubicaciones autorizadas por la Fiscalía General de la Nación en cada municipio o ciudad, al momento de llegar la autoridad de tránsito asignada para la atención al lugar de los hechos, debe realizar la solicitud de la grúa para proceder a la inmovilización del vehículo.

Después de analizar los tiempos registrados en las tablas de datos donde fue compilada la información de las diferentes solicitudes, se evidenció que existe una diferencia significativa entre los días de la semana y horas del día donde se presentaron los siniestros, por lo tanto, para definir la función de probabilidad que se incorporó en el modelo se tomaron los tiempos entre solicitud para los días martes a sábado en la franja horaria de mayor volumen de solicitudes (7:00 a.m. – 9:00 a.m.).

5.3.2. Ubicación del evento

La ubicación de los eventos se estableció mediante la georreferenciación realizada para cada una de las solicitudes y su posterior asignación de UPZ de ocurrencia, la cual se incorpora en el modelo mediante un módulo de decisión que permite asignar cada evento

según su probabilidad de ocurrencia en una determinada UPZ, siendo la UPZ 89 con el 4.759% en donde se presenta el mayor número de incidentes.

5.3.3. Asignación del vehículo

En la estación de trabajo del personal del concesionario, dentro de la sala de radio de la Policía son recepcionadas las solicitudes. Mediante la visualización del GPS de cada móvil, los supervisores de turno determinan cual es la grúa libre más cercana al evento y se comunican con los tripulantes de ésta, para proporcionar la información requerida e indicar la asignación de la atención, posteriormente se informa al personal de la Policía en vía, los datos de contacto y ubicación inicial de la grúa para que estén en comunicación permanente, informando las condiciones de desplazamiento y tiempos estimados de llegada.

Teniendo en cuenta que no se ejecuta ninguna política de recirculación de las grúas que se liberan o se encuentran en espera para atención, en el modelo se estableció como criterio de asignación de las grúas, la distancia más corta al evento. Resaltando que, estas distancias fueron determinadas mediante la matriz de tiempos de viaje obtenida mediante la función de trayectos de Google Mapas y las velocidades definidas para cada estado de la grúa (con o sin carga).

5.3.4. Distancias y Tiempos de recorrido

El software Arena, escogido para realizar el modelo de simulación posee las funcionalidades respectivas para ajustar la modelación a las necesidades del sistema, ya sea mediante la construcción por medio del módulo denominado Rutas o Transporte. Mediante el módulo Rutas, es posible establecer una matriz de tiempos como impedancia entre las diferentes ubicaciones requeridas; sin embargo, este método de construcción omite la posibilidad de contar con vehículos que realicen los traslados entre ubicaciones, impidiendo para el caso de estudio que, se logre establecer los objetivos requeridos en cuanto a la cantidad de equipos necesario, media o ancho de banda que refleja su porcentaje medio de utilización y tiempos utilizados durante los traslados.

Por los motivos anteriores, se consideró que el método de construcción más adecuado del modelo era mediante los módulos de Transporte, los cuales brindan la posibilidad de establecer vehículos para ejecución de los traslados, retrasos o demoras en los procedimientos de cargue y descargue en las ubicaciones de origen-destino, sumando la posibilidad de establecer velocidades diferentes para ciertas condiciones del vehículo o trayectos; no obstante, si en la construcción del modelo se estableciesen las distancias entre las diferentes UPZ como impedancia, sería requerido que cada velocidad de traslado variara acorde con el tránsito existente entre cada punto, motivo por el cual se optó por utilizar velocidades promedio de forma fija para las grúas en trayectos con y sin carga. De forma seguida, mediante los tiempos hallados a través de la función de trayectos de Google Mapas (Ver ANEXO B), se calcularon las distancias a utilizar en la modelación. Metodología que, si bien proporciona distancias “ficticias”, permite que la impedancia real en los traslados de los vehículos sea el tiempo de recorrido obtenido mediante la función de trayectos de Google Mapas como se indicó.

5.4. Verificación

Mediante las pruebas de verificación se pretende evidenciar si el modelo de simulación refleja la concepción del sistema o proceso a replicar, que su construcción es consistente y no refleja errores dentro de su programación o estructura siendo coherente (Kleijnen, 1995). Con esta finalidad se realizaron diversas pruebas, que pretenden evidenciar la correcta

construcción del modelo propuesto mediante el análisis de los resultados obtenidos en estas condiciones evaluadas. Para el desarrollo de las pruebas de verificación, se ejecutaron simulaciones de un año con 365 días de parámetro de corrida y tiempo de calentamiento de 60 días.

5.4.1. Condiciones iniciales

Se basa en ejecutar la simulación en diversas ocasiones, con unas ligeras modificaciones en los parámetros de entrada como la tasa de eventos ocurridos, capacidad de los equipos y similares, que permitan evidenciar si existe cambios lógicos junto a resultados coherentes acorde con las variaciones implementadas. Para ciertos parámetros, un pequeño cambio en su valor inicial generalmente debe producir cambios mínimos en la salida, a su vez cambios mayores se espera produzcan variaciones más abruptas en la salida y en caso de evidenciarse inconsistencias, estas deben ser evaluadas con mayor detalle (Kleijnen, 1995).

Se modificaron las condiciones iniciales de la distribución de ocurrencia los eventos de entrada al modelo, número de grúas disponibles para la atención y velocidad de transporte entre las diferentes ubicaciones. Posteriormente se verificó para estos cambios, el impacto sobre los resultados esperados de tiempos de transporte, grúas requeridas y colas del modelo.

5.4.2. Condiciones Extremas

Mediante el uso de valores extremos que pueden ser considerados como casos atípicos dentro del sistema, se realiza una revisión de las respuestas que proporciona el modelo ante estas variaciones, en busca de anomalías o errores que no serían fácilmente previsible (Kleijnen, 1995). Para la aplicación de esta prueba, se modificó la distribución de entrada al modelo, llevándola a valores relativamente grandes y ceros, condiciones que permitieron evidenciar que el modelo se comporta de forma consistente al ingresar un volumen mucho mayor de solicitudes correspondiente a una constante de 1000 ingresos de solicitudes por día. Mediante la modificación de la distribución de entrada por este valor fijo y superiores, se obtiene como resultado un aumento en los tiempos de espera para ser atendidas las solicitudes de servicio, junto como el incremento de la utilización de la flota alcanzando porcentajes superiores al 70%, y para los valores más elevados llegando a un punto crítico de no atención a solicitudes, que no pudieron ser atendidas durante el tiempo que está programado el modelo (730 días con 60 del periodo de calentamiento).

De las pruebas de condiciones extremas es posible inferir que, el comportamiento del modelo es consistente con los cambios realizados, llevando como se evidenció para el caso del aumento en los eventos de entrada porcentajes muy altos de utilización de la flota, tiempos y tamaños de colas igualmente mayores; por el contrario, con la entrada establecida en valores muy bajos, se evidencia la poca utilización de la flota, junto a tiempos y tamaños de cola mínimos.

5.5. Validación

La validación del modelo, es un procedimiento que permite generar confianza en los resultados obtenidos, mediante la evidencia que su construcción, funcionamiento y lógica son consecuentes con el sistema real. Por ende, las decisiones tomadas a partir de las evidencias del modelo pueden suponer una cercanía bastante estrecha con la realidad simulada, lo que permite que se evalúen diversos escenarios, aprender sobre sensibilidad

del sistema, fomentar el aprendizaje de los procesos intervinientes en múltiples niveles de la organización, y lo más importante puede ser las recomendaciones de mejora, junto a la provisión de posibles soluciones ante problemas que se afronten.

Los métodos de validación utilizados son:

5.5.1. Validación con personal del concesionario de grúas.

Este método de validación se basó en mostrar el comportamiento del modelo al personal del concesionario interviniente en los diferentes procesos de asignación y operación de las grúas, para que acorde con su experiencia y conocimiento del funcionamiento determinaran si la lógica, comportamiento y resultados del modelo se ajustaban a rangos razonables y objetivos dentro del sistema real (L. Aboueljinane et al., 2012, 2013).

Mediante diversas sesiones de trabajo, se presentaron a los supervisores de la operación y al director operativo de la concesión, la estructura, componentes del modelo e información utilizada junto a la explicación de su proceso de depuración y tratamiento general para lograr ser aplicada en la simulación. Es de resaltar que este personal, se encarga de la asignación de grúas a los diferentes eventos y están al tanto del número de equipos utilizados diariamente, su rotación, permisos y cargas laborales en general. De las sesiones de trabajo realizadas se produjeron comentarios y recomendaciones que permitieron afinar algunos parámetros como los tiempos de retraso o demora en las maniobras de descargue en patios, así mismo se logró concluir entre las partes que los supuestos definidos previamente, a pesar de que simplifican el proceso, logran conservar lo fundamental y permiten generar una réplica confiable del sistema.

Así mismo, se llegó al consenso que se requiere mejorar la toma de información en algunas partes del proceso, para lograr a futuro replicar comportamientos donde existen posibilidades de mejora en la operación del sistema.

5.5.2. Validación paso a paso

Este método se base en realizar un seguimiento a las diferentes etapas del modelo en orden de ocurrencia de las actividades y/o eventos, para lograr determinar si su comportamiento se presenta acorde con lo diseñado, verificando así su lógica y exactitud (L. Aboueljinane et al., 2012; Ingolfsson et al., 2003).

Durante este procedimiento se realizó la revisión de la entrada de los eventos, asignación mediante un módulo de decisión a la UPZ de ocurrencia, posterior entrada en cola y solicitud de transporte, junto a la elección de estación de destino. Al terminar esta etapa se inspeccionó para los métodos de recirculación propuestos, que las grúas se trasladaran a las ubicaciones definidas según los criterios de decisión diseñados.

Durante este procedimiento fue posible evidenciar que el modelo se comportaba según lo diseñado y su lógica corresponde a las necesidades de la simulación.

5.5.3. Conclusiones de la construcción, validación y verificación del modelo de simulación.

Mediante la revisión de la información existente en las tablas de datos proporcionadas por la concesión para los años 2016 y 2017, se realizó un acercamiento al posible diseño del modelo, posterior al análisis y determinar que parte de esta información contaba con la suficiente representatividad y confianza para ser utilizada, se procedió a diseñar el modelo

acorde con los supuestos relacionados previamente y la información proceda, logrando establecer la distribución de ocurrencia de los eventos como entrada, seguido de la georreferenciación de las solicitudes mediante un geocode de ArcGis para la ciudad de Bogotá y Google Mapas, fue posible establecer las UPZ a las cuales pertenecía cada evento y su volumen porcentual conforme a la cantidad de eventos ubicados en su interior. Información que permitió incorporar un módulo de decisión que definía la ubicación a la cual era asignada el evento y a su vez origina el traslado al patio autorizado, para los cuales también fue hallada su probabilidad de traslado como se evidencia en la *Figura: 11 Ubicación de traslado y descarga*. A continuación, se describen las diferentes conclusiones de las etapas de construcción, validación y verificación del modelo:

Solicitud del servicio:

- Mediante el análisis de los tiempos entre ocurrencia de los eventos o solicitud de servicio, se logró establecer que la distribución de entrada se comporta como una exponencial.
- Debido a que la normatividad vigente obliga que para los siniestros de tránsito con personas lesionadas se realice la inmovilización de los vehículos, no se consideraron cancelaciones luego de realizar el ingreso del evento en el modelo.

Asignación de la ubicación de ocurrencia:

- Mediante la georreferenciación de las direcciones proporcionadas en las tablas de datos donde eran consignadas las solicitudes para los años 2016 y 2017, se estableció la UPZ de ocurrencia y con la ayuda de un módulo de decisión se asignaron las ubicaciones de ocurrencia en el modelo.

Distancias, tiempos y velocidades entre ubicaciones:

- El modelo fue construido basado en los módulos de transporte que se encuentran incorporados en Arena, permitiendo incorporar vehículos para ejecución de los traslados con una respectiva matriz de distancias entre todas posibles combinaciones de trayectos.
- El modelo posee tal flexibilidad desde su construcción, que permite establecer retrasos o demoras en los procedimientos de cargue y descargue en las ubicaciones de origen-destino, de igual forma al construir la matriz de distancias de forma dependiente de la matriz de tiempos y las velocidades definidas, se logra que la impedancia real, sea dependiente de la demora en los desplazamientos.
- Se permite la posibilidad de establecer velocidades diferentes para ciertas condiciones del vehículo o trayectos, como por ejemplo cuando se encuentran en proceso de transporte con carga o vacíos, de igual forma también es posible incorporar magnitudes diferentes de velocidad entre ubicaciones deseadas en caso de contar con información adicional que permita inferir que existen tales diferencias.

El modelo de simulación propuesto, fue dado a conocer a los supervisores y jefe de operaciones del concesionario, a su vez fue sometido a los procedimientos de validación y verificación descritos, obteniendo como resultado un comportamiento lógico y acorde con el sistema replicado. Dentro de las observaciones realizadas por el personal del concesionario, se encontró conceso sobre la necesidad de mejorar la toma de información de ciertos elementos que permitirían evidenciar posibilidades de mejora; sin embargo, para los supuestos definidos se considera no producen alteración en la validez de los resultados.

6. Resultados de la simulación

El problema fue abordado con la disposición de utilizar las herramientas necesarias para lograr establecer la resolución de los objetivos planteados, a partir de esto surgió la necesidad de incorporar como entrada en el diseño las ubicaciones de las estaciones desde las cuales debían ser atendidas las solicitudes, obteniendo como resultado un modelo base con una estación principal de partida para la atención y las consiguientes propuestas de ubicación que permitiesen mejorar la capacidad de respuesta en la atención, las cuales se presentan a continuación en los respectivos modelos que que representan cada salida:

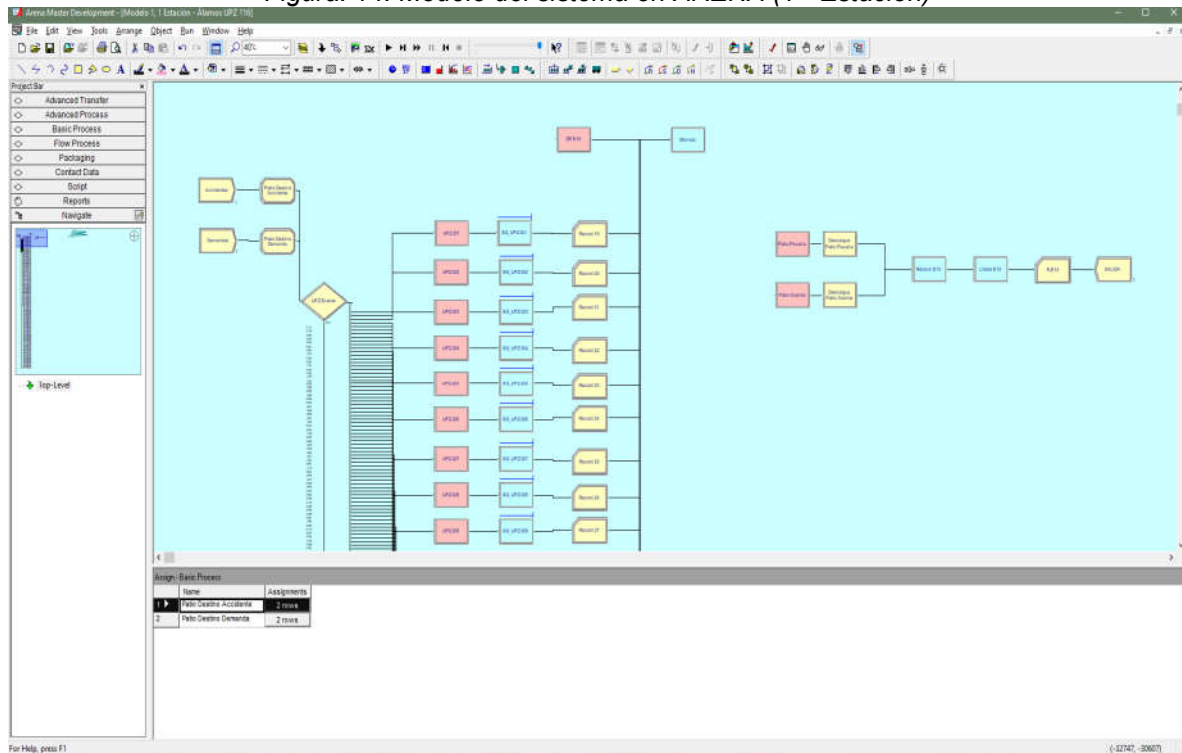
6.1. Ubicación de la flota

6.1.1. Política 1, Una estación - Patio de Álamos

Para construir el espejo del sistema con el modelo propuesto basado en los supuestos definidos, se estableció como única estación de origen para la atención la UPZ 116 donde se encuentra el Patio de Álamos *Figura: 15: Ubicación UPZ 116*, por ser la ubicación en la cual se realizan las operaciones centrales del concesionario, en este pernoctan la mayor parte de los equipos, se realizan mantenimientos, reparaciones y las tripulaciones ejecutan los cambios de turno.

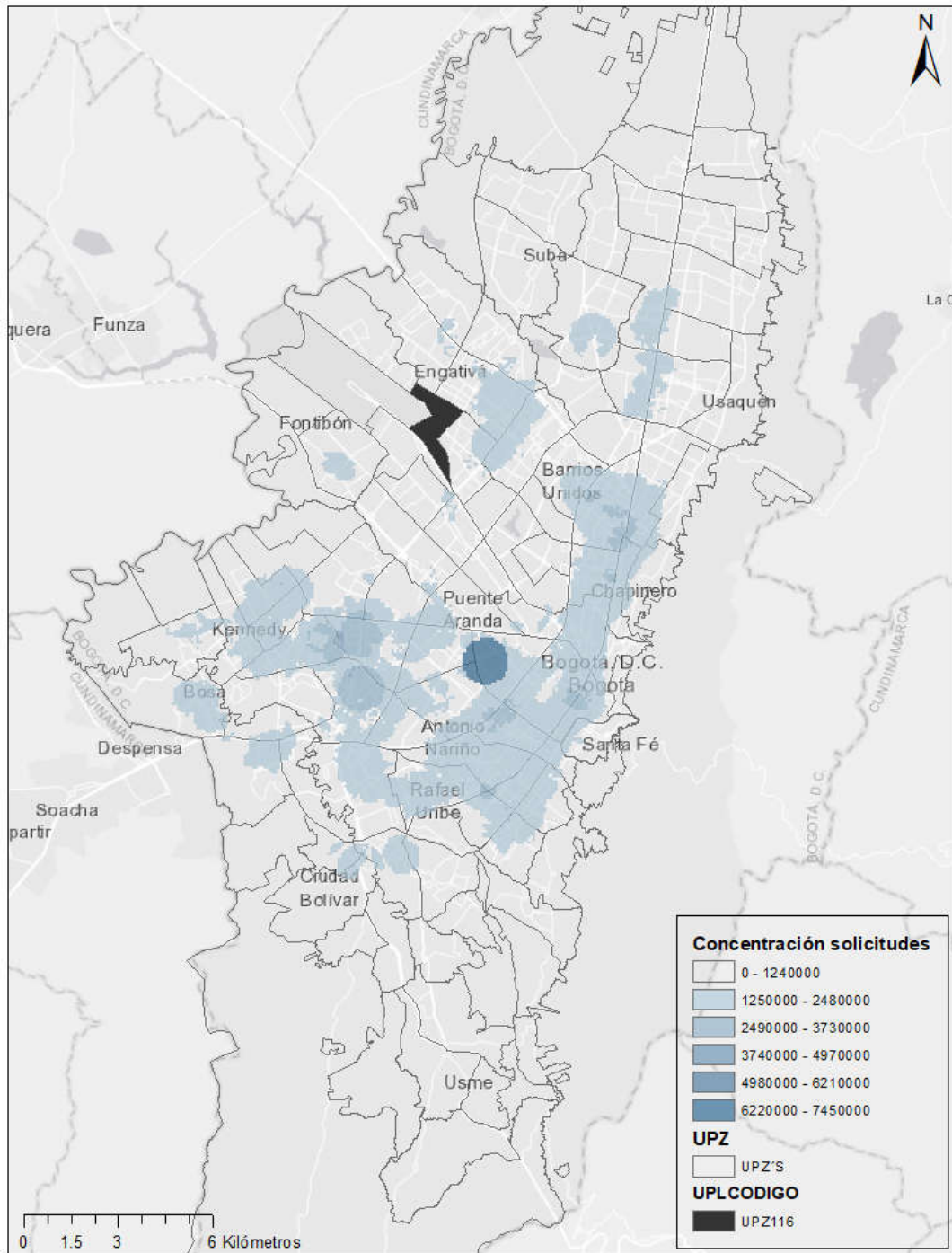
La *Figura: 14: Modelo del sistema en ARENA (1 - Estación)*, muestra la consola de edición de Arena con la implementación del modelo propuesto para 1 Estación, en el cual se replica el funcionamiento inicial del proceso de atención a las solicitudes de grúas para el traslado de los vehículos implicados en siniestros.

Figura: 14: Modelo del sistema en ARENA (1 - Estación)



Fuente: Elaboración propia.

Figura: 15: Ubicación UPZ 116



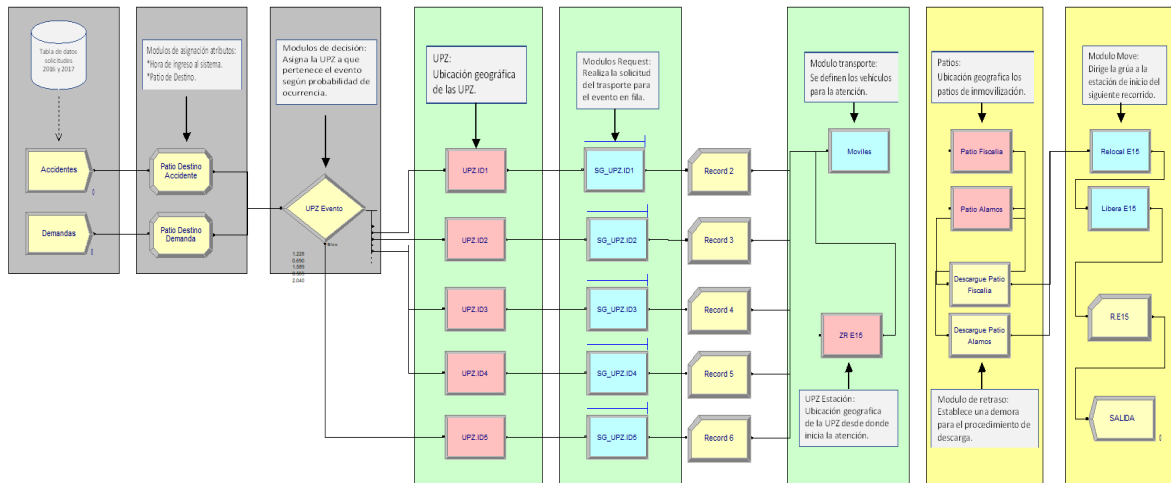
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura: 16: Descripción módulos Arena, se presentan las diferentes etapas que surte el proceso general de atención de los modelos propuestos. Este comienza con dos módulos de entrada que proveen las distribuciones de probabilidad de ocurrencia de los eventos que serán atendidos. Posteriormente se incorpora un módulo de asignación, que especifica cuál será el Patio de destino de los eventos acorde con la entrada, para luego unirse en un módulo de decisión donde conforme la probabilidad de ocurrencia de los siniestros hallada

previamente para cada UPZ como se indica en la sección 5.3.2 *Ubicación del evento*, se asigne la ubicación geográfica del siniestro. En este punto del modelo, los eventos ingresan en cola dentro de cada ubicación UPZ definida mediante un módulo de Arena denominado estación, que cumple con la finalidad de replicar la ubicación geográfica y al ser combinado con un módulo de requerimiento realiza la llamada o solicitud del transporte, para el caso, las grúas que se definieron en un módulo de transporte y se encuentran ubicadas en las estaciones desde donde comenzaran los recorridos para la atención. Los tiempos de desplazamiento desde la estación de inicio a la ubicación del evento, pueden ser vistos como la espera de los eventos en ser atendidos y son determinados por la matriz de distancias, especificada en la sección 5.3.4 *Distancias y Tiempos de recorrido* e igualmente define el tiempo que tardara la grúa en trasladar los vehículos desde las UPZ hasta los patios autorizados, para finalmente liberar la grúa y realizar retorno a la estación desde donde se inicia nuevamente la reacción. En el **Anexo C**, se presenta el reporte de resultados arrojado por Arena para el modelo realizado con una estación, referenciado como la Política número uno.

Para el caso de las demás políticas de relocalización, se incorporó un módulo decide posterior al descargue de los vehículos en los patios, siendo el punto del modelo en donde se definen las expresiones que dan lugar a cada una de las alternativas de relocalización descritas en 6.1.2 *Estaciones múltiples*

Figura 16: Descripción módulos Arena



Fuente: Elaboración propia.

En la *Tabla 2: Medidas de rendimiento del modelo propuesto*, se muestran los resultados de esta simulación.

Tabla 2: Medidas de rendimiento del modelo propuesto

NOMBRE ESCENARIO - POLÍTICA	NOMBRE ARCHIVO	Repeticiones	Replicas	Accidente. Wait Time	Demanda. Wait Time	Accidente. Tran Time	Demanda. Tran Time	Grua. Number Busy	Grua. Number Scheduled	Grua. Utilization
Modelo Propuesto 1 - Estación	18 : Modelo 1 1 Estación - Álamos UPZ 116.p	4	4	45.680	45.676	110.415	70.429	2.236	8.000	0.279

Fuente: Elaboración propia.

De estas medidas de rendimiento se resalta el tiempo de espera en atención a la solicitud (Wait Time), el promedio de grúas en uso (Grua.Number Busy) y el porcentaje de utilización (Grua.Utilización).

El *Wait Time*, nos indica el tiempo promedio que esperan los eventos en ser atendidos, siendo el resultado para este escenario simulado, de 45.6 minutos promedio por cada servicio. Este valor supera los 30 minutos que están estipulados en las obligaciones contractuales del concesionario como acuerdos de nivel de servicio y como se mencionó en el marco teórico, es una de las medidas de rendimiento más usuales en este tipo de sistemas, representado como el nivel de servicio al indicar que porcentaje de solicitudes son atendidas antes y después del tiempo establecido.

Grua.Number Busy, nos indica el promedio de grúas en uso y se encuentra directamente relacionado con el porcentaje de utilización de los equipos representado por *Grua.Utilización*, siendo este la división de los equipos en uso entre los equipos disponibles o programados *Grua.Number Scheduled*.

Las anteriores son relaciones de especial importancia dado que, normalmente los sistemas de atención a emergencias deben ser diseñados para tener una tasa de utilización baja y de esta manera asegurar que un equipo de rescate estará disponible para la atención de un evento urgente. Sin embargo, esta debe ser razonablemente equilibrada con la finalidad de asegurar que, no se sub o sobre utilicen equipos (L. Aboueljinane et al., 2013; Rodríguez et al., 2016).

6.1.2. Estaciones múltiples

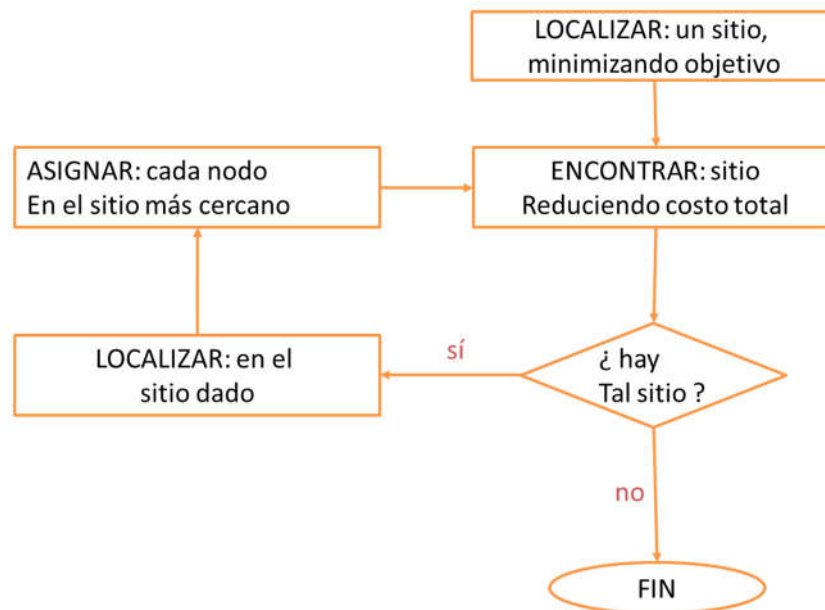
Como se mencionó en el diagnóstico del problema, no existe un estándar que pueda predecir cuál es el método de solución más efectivo para la solución de problemas de localización y relocalización como los presentados en servicios de emergencia a los cuales se asemeja el sistema en evaluación, lo que conlleva a centrar la clasificación de las soluciones de la manera más general posible, siendo estas obtenidas mediante modelos matemáticos exactos, heurísticas-metaheurísticas y modelos de simulación, donde se encuentran múltiples casos de estudio y desarrollo de modelos según las necesidades del sistema a tratar (Borshchev & Filippov, 2004).

Para el caso de la prestación del servicio de grúas en la ciudad de Bogotá, abordado en el presente trabajo de grado, se decidió realizar una combinación de métodos al determinar una posible ubicación de las UPZ, en las cuales las grúas se pueden distribuir para esperar que sean requeridas en la atención de una solicitud, buscando disminuir los tiempos de desplazamiento en la atención de cada servicio mediante un método heurístico. Seguido a esto, las estaciones y demás comportamiento del sistema se modeló con el Software Arena para determinar el requerimiento de grúas necesario en la atención y lograr tener un acercamiento de los tiempos de respuesta a cada servicio, junto con el promedio de equipos en uso y su porcentaje de utilización, medidas de rendimiento tenidas en cuenta en el primer modelo de representación del sistema.

La heurística empleada fue el algoritmo ADD, que se constituye como uno de los algoritmos para la solución de problemas de localización sin capacidades (UFLP). Este comienza considerando que, se tienen todas las instalaciones para el caso estaciones o UPZ cerradas, luego el conjunto de estaciones o posibles ubicaciones se divide en tres grupos,

un primer grupo que considera las estaciones que serán abiertas (inicialmente vacío), seguido de un segundo que considera las estaciones potencialmente cerradas y el tercero con el grupo de estaciones que definitivamente será cerrado (igualmente vacío de forma inicial). El algoritmo sigue los pasos descritos en la *Figura 17: Diagrama de flujo algoritmo ADD*. Inicialmente el primer grupo que se encuentra vacío, se va llenado a medida que el algoritmo itera, teniendo en cuenta que este busca minimizar los costos compuestos por el transporte y los asociados a la apertura de cada estación. En este punto se utilizó como costos de transporte o impedancia del algoritmo la matriz de tiempos de recorrido entre todas las UPZ, y como costo de apertura de las estaciones el tiempo de recorrido desde la UPZ 116 a cada una de las demás UPZ, debido a que en la UPZ116 se encuentran ubicados los patios donde son descargados los vehículos y por ende las grúas deben iniciar recorrido a cualquier otra ubicación desde allí, posterior a dejar cada vehículo inmovilizado. Subsiguientemente el proceso iterativo hace que las estaciones de mayor ahorro pasen al primer grupo de estaciones que serán abiertas y las de mayor costo al grupo de las que serán cerradas, terminando el proceso de iteración cuando el segundo grupo de estaciones potencialmente abiertas queda vacío.

Figura 17: Diagrama de flujo algoritmo ADD



Fuente: Elaboración propia.

Como solución a la ubicación de las estaciones de atención, el ADD proporciona 15 ubicaciones o UPZ desde donde deben reaccionar las grúas para realizar la atención de los servicios.

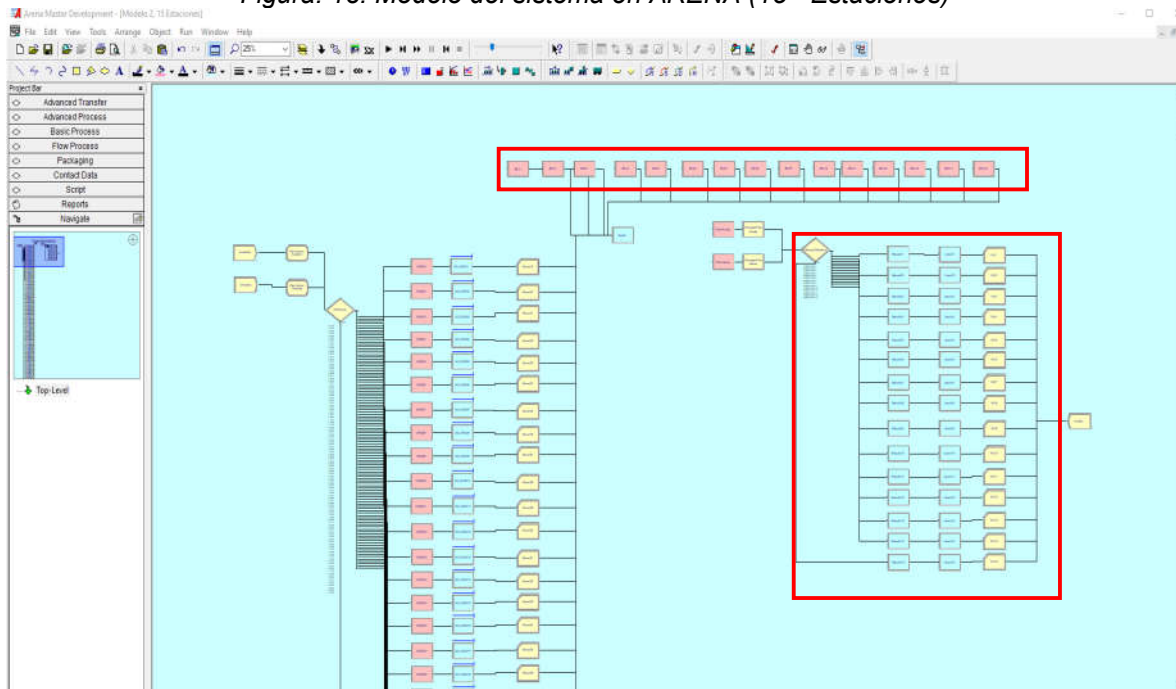
Tabla 3: 15 UPZ Seleccionadas mediante ADD como estaciones.

ID	5	19	25	33	43	51	53	72	80	85	89	100	108	111	113
UPZ	UPZ10	UPZ24	UPZ30	UPZ38	UPZ48	UPZ55	UPZ57	UPZ75	UPZ83	UPZ88	UPZ92	UPZ103	UPZ111	UPZ114	UPZ116
NOMBRE ESTACIÓN	ZR.E1	ZR.E2	ZR.E3	ZR.E4	ZR.E5	ZR.E6	ZR.E7	ZR.E8	ZR.E9	ZR.E10	ZR.E11	ZR.E12	ZR.E13	ZR.E14	ZR.E15

Fuente: Elaboración propia.

Como se ha indicado previamente, mediante el Software Arena se realiza la construcción del modelo, partiendo de la selección de 15 estaciones determinadas como potenciales ubicaciones de reacción para la atención de los incidentes, halladas a través del método heurístico de ADD. Esta modificación del modelo planteado inicialmente se muestra en la *Figura: 18: Modelo del sistema en ARENA (15 - Estaciones)*, siendo posible evidenciar las variaciones respecto a la *Figura: 14: Modelo del sistema en ARENA (1 - Estación)*, en el número de módulos tipo estaciones conectados al módulo de transporte y en el proceso de decisión incorporado luego del descargue de los vehículos en las estaciones denominadas patios y por medio del cual se indica la ubicación a la cual debe retornar cada grúa para realizar el siguiente proceso de atención.

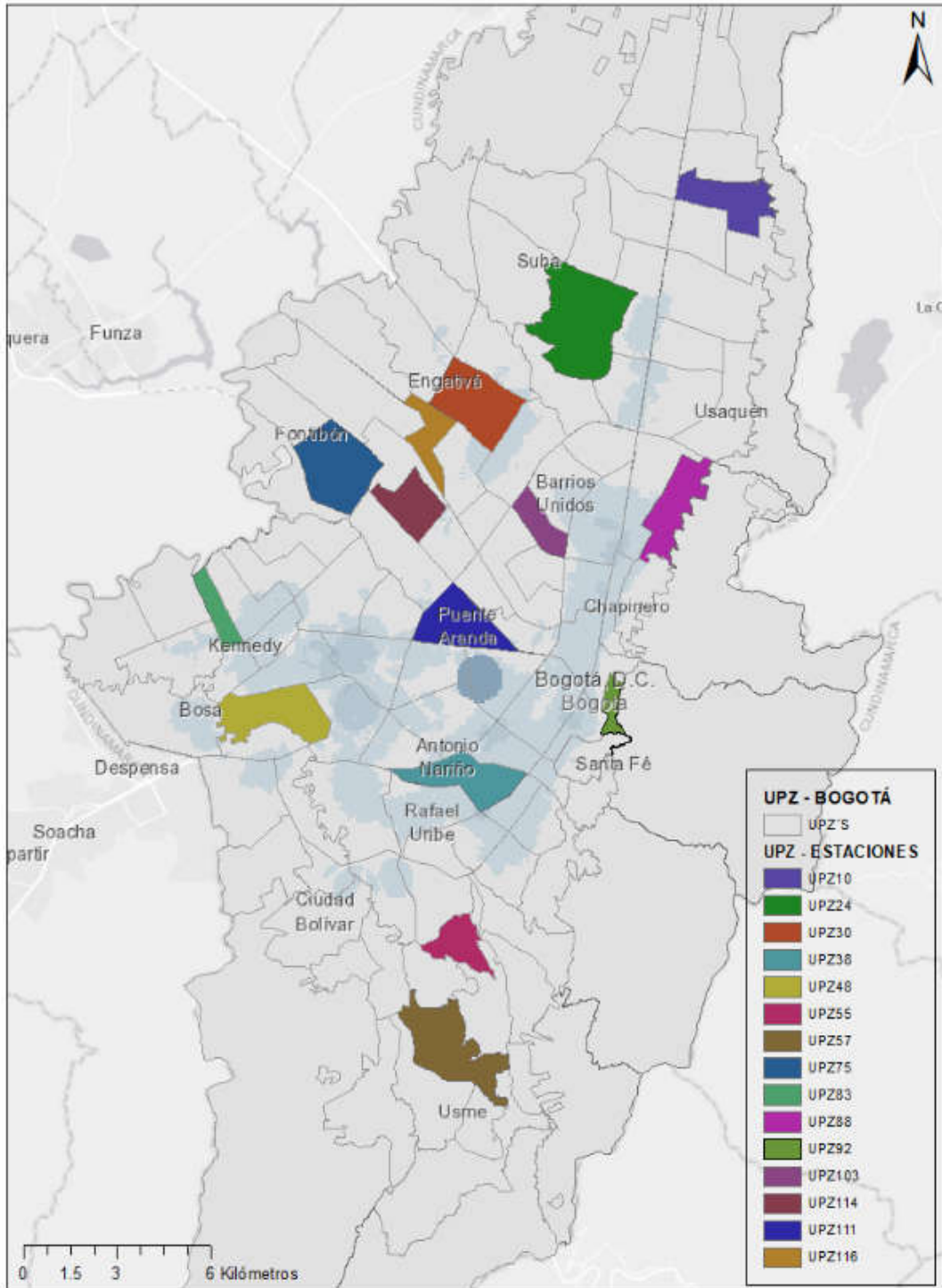
Figura: 18: Modelo del sistema en ARENA (15 - Estaciones)



Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presenta en la *Figura: 19: Ubicación 15 UPZ – Estaciones* y la *Figura: 19: Ubicación 15 UPZ – Estaciones*, que contiene el mapa con las quince UPZ seleccionadas como estaciones:

Figura 19: Ubicación 15 UPZ – Estaciones



Fuente: Elaboración propia.

Al implementar estas 15 estaciones en el modelo, se corrió la simulación en un extremo de 80 grúas, para de esta manera evidenciar, cuál era el máximo de grúas en uso y así ajustar este parámetro en las siguientes corridas dentro de rangos acordes con la utilización de los equipos. Como resultado se obtuvo un máximo de 12 grúas en uso de forma simultánea en algún instante de tiempo durante el espectro de los 730 días simulados.

De lo anterior, es posible resaltar que un número superior o igual a 12 grúas no produce ningún cambio significativo en el rendimiento del sistema, ya que este valor de grúas genera que las colas sean ceros y el número máximo de eventos en espera se comporte de igual forma.

Posterior a realizar el ajuste del número de grúas al promedio de utilización, se logra evidenciar que las colas y máximo de eventos en espera para cada ubicación comienzan a incrementar acorde con la cantidad de equipos disponibles.

6.2. Políticas de relocalización

Teniendo en cuenta que las políticas de relocalización son consideradas como el método o procedimiento establecido en el sistema, para definir la ubicación a la cual debe dirigirse la grúa o vehículo de emergencia para estar disponible y en espera del siguiente evento que debe ser atendido (Yang et al., 2013).

Como alternativas a la operación modelada con una sola estación la que será considerada como la **Política 1**, se construyeron tres políticas de relocalización para el modelo de 15 estaciones. Para estas políticas de relocalización, no se consideraron cambios de trayectoria de las móviles en recorrido hacia la estación donde debe esperar el próximo servicio, evidenciado en la literatura referente como reubicación dinámica.

6.2.1. Política 2: Cola más grande

Como primera alternativa de relocalización, se definió un proceso de evaluación con la suma de las colas de las UPZ que deberían ser atendidas por la estación más cercana, enviando la grúa que acaba de ser liberada a la estación que contiene el conjunto de UPZ con el mayor número de vehículos pendientes por atender. En el **Anexo D**, se presenta el reporte de resultados arrojado por Arena para el modelo realizado con quince estaciones, referenciado como la Política número dos.

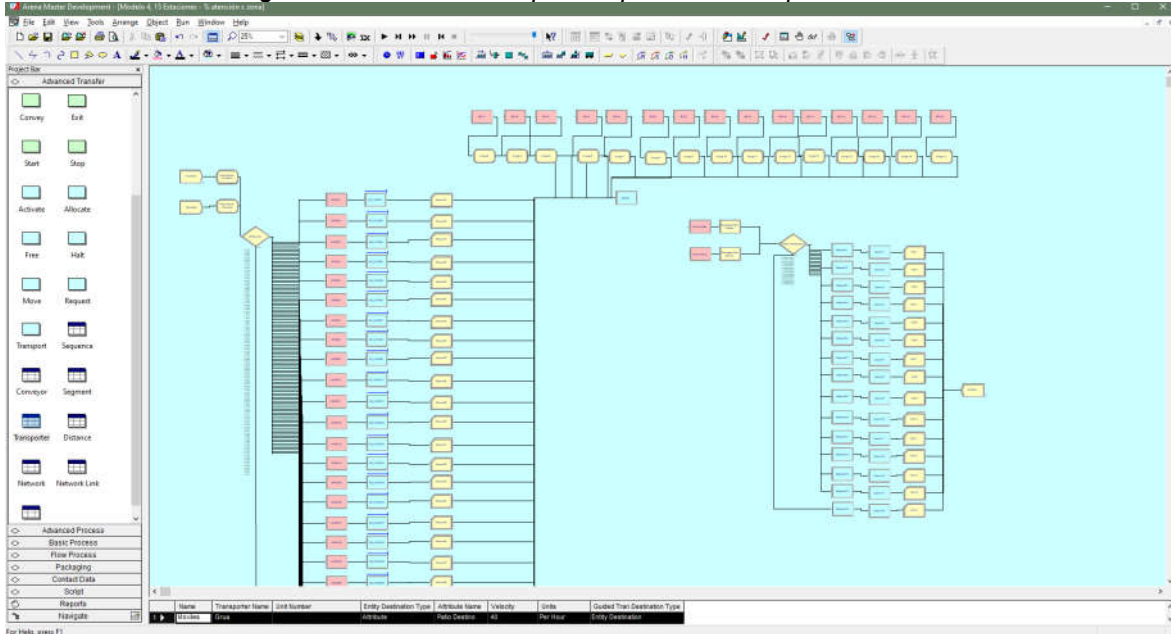
6.2.2. Política 3: Retorno a la estación de inicio

En esta política se basa en generar el retorno de la grúa a la estación donde dio origen la prestación del último servicio, indistintamente que las UPZ cubiertas por esta estación presenten colas o no. Su finalidad consiste en generar un mecanismo sencillo de reubicación, que permita a todo el personal, desde supervisores a tripulaciones, saber que se debe hacer puntualmente al terminar el servicio. Para su implementación en el modelo fue necesario incorporar un módulo de asignación que permitiera grabar la estación de origen de la grúa, y a su vez modificar el módulo de decisión que se encuentra después de los Patios y permite enviar cada grúa a la estación requerida. En el **Anexo E**, se presenta el reporte de resultados arrojado por Arena para el modelo realizado con quince estaciones, referenciado como la Política número tres.

6.2.3. Política 4: Probabilidad de ocurrencia más alta

Para implementar esta política en el modelo, se sumaron las probabilidades de ocurrencia de eventos agrupadas en las 15 estaciones, teniendo en cuenta que cada UPZ es atendida por la estación más próxima, seguido a esto, se modificó el módulo de decisión de una condición a un modo de probabilidad y se introdujo la suma de las probabilidades de ocurrencia como se describió para cada estación. En el **Anexo F**, se presenta el reporte de resultados arrojado por Arena para el modelo realizado con quince estaciones, referenciado como la Política número cuatro.

Figura 20: Modelo base para implementación políticas 2 a 4



Fuente: Elaboración propia.

6.3. Tamaño de la flota y tiempos de respuesta

La comparación de los escenarios fue realizada por medio de la herramienta de ARENA Process Analyzer, la cual permite establecer las réplicas a ejecutar en cada modelo, así como mostrar los parámetros y resultados que se desean comparar, cada uno como un posible escenario facilitando así el proceso de tratamiento de resultados al mostrar en conjunto la información requerida.

Se analizó la implementación de 4 modelos, teniendo en cuenta que cada política propuesta genera variaciones notables y por ende es considerado como un modelo nuevo. La representación inicial del sistema constituye el primer modelo. Se evidencio que, el mejor comportamiento en el sistema es producido por la **Política 4**, debido a que como se muestra en la *Figura 21: Escenarios en Process Analyzer* y la *Tabla 4: Resultados Process Analyzer*, con **2.552 ≈ 3** grúas promedio en ocupación, logra generar los tiempos de respuesta más bajos con un porcentaje de utilización de la flota de **0.319 %**.

Figura 21: Escenarios en Process Analyzer

The screenshot shows the Process Analyzer interface with a table titled 'Escenarios en Process Analyzer'. The table has columns for Scenario Properties (S, Name, Program File, Repe, Num Repe) and Responses (Accidente WaitTime, Demanda WaitTime, Accidente TrainTime, Demanda TrainTime, Grúa NumberBusy, Grúa NumberScheduled, Grúa Utilization). The data is as follows:

S	Name	Program File	Repe	Num Repe	Accidente WaitTime	Demanda WaitTime	Accidente TrainTime	Demanda TrainTime	Grúa NumberBusy	Grúa NumberScheduled	Grúa Utilization
1	Modelo Propuesto 1 - Estación	10: Modelo 1, Estación - Almacén VPD 115.p	0	4	---	---	---	---	---	---	---
2	Política 1 - 15 Estaciones	11: Modelo 2, 15 Estaciones.p	0	4	---	---	---	---	---	---	---
3	Política 2 - 15 Estaciones	21: Modelo 3, 15 Estaciones - Sistema estación de grúas.p	4	4	46.061	46.010	52.429	51.429	12.361	20.000	0.494
4	Política 3 - 15 Estaciones	9: Modelo 4, 15 Estaciones - % 400000 x 2000.p	4	4	29.440	29.204	148.551	100.335	2.552	8.000	0.319

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4: Resultados Process Analyzer

NOMBRE ESCENARIO - POLÍTICA	NOMBRE ARCHIVO	Repeticiones	Replicas	Accidente. Wait Time	Demanda. Wait Time	Accidente. Tran Time	Demanda. Tran Time	Grua. Number Busy	Grua. Number Scheduled	Grua. Utilization
Modelo Propuesto 1 - Estación	18 : Modelo 1 1 Estación - Álamos UPZ 116.p	4	4	45.680	45.676	110.415	70.429	2.236	8.000	0.279
Política 1 - 15 Estaciones	11 : Modelo 2 15 Estaciones.p	4	4	45.909	45.941	145.289	105.277	2.743	8.000	0.343
Política 2 - 15 Estaciones	22 : Modelo 3 15 Estaciones - Retorno estación de inicio.p	4	4	1.853.216	1.985.328	108.619	68.626	7.573	8.000	0.947
Política 3 - 15 Estaciones	9 : Modelo 4 15 Estaciones - % atención x zona.p	4	4	29.446	29.854	148.581	108.335	2.552	8.000	0.319

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos para cada política, es posible recomendar como tamaño de la flota apropiado un mínimo de 8 grúas en funcionamiento simultaneo de forma permanente bajo el método de relocalización contenido en la política 4. Una modificación por alguna de las otras políticas evaluadas generaría un incremento de la flota para lograr una reducción de los tiempos de respuesta por debajo de los 30 minutos, de igual forma el disminuir la flota para la Política 4 originaría un incremento superior a los 30 minutos en la atención de los eventos.

7. Conclusiones y recomendaciones

El objetivo de este trabajo se centró en la construcción de modelos de simulación que permitieran representar de manera fiable, la operación del proceso de atención de solicitudes de grúa para la inmovilización de vehículos implicados en siniestros de tránsito realizada por los funcionarios de la Seccional de Tránsito y Transporte de Bogotá, al concesionario seleccionado por la Secretaría Distrital de Movilidad para su prestación. Para conseguir esto, se realizó un proceso de depuración de la información proporcionada por el concesionario de grúas para los años 2016 y 2017, buscando ajustar la caracterización del sistema a la información existente, mediante la definición de variables, supuestos y medidas de desempeño que posteriormente se implementaron en las políticas de relocalización propuestas, para decidir la ubicación de los equipos luego de la terminación de cada servicio. Todo lo anterior, permitió realizar un análisis detallado del sistema que se ve reflejado en las conclusiones y recomendaciones expuestas a continuación.

7.1. Localización

La decisión de definir la localización en un proceso de atención como el puesto en estudio, representa un reto importante para los administradores y/o coordinadores del sistema, debido a que, de esta, se deriva gran parte de las responsabilidades contractuales, cubiertas por Acuerdos de Niveles de Servicio (ANS), que de ser incumplidos acarrear sobrecostos por el pago de multas y los requerimientos de implementación de acciones de mejora que puedan solicitarse. Partiendo de la premisa anterior, los modelos se conceptuaron buscando dar respuesta a esta ubicación y lograr encontrar un tamaño apropiado de flota que permitiera cumplir con los ANS impuestos.

Como primera medida, se elaboró el diseño conceptual de los modelos, proceso durante el cual, se evidenció que era necesario definir previamente cuantas, y cuáles deberían ser las UPZ utilizadas como estaciones, respuestas que fueron resultas durante la revisión del marco teórico y con apoyo de la implementación de la heurística ADD, diseñada para

resolver problemas de localización con las características requeridas, y obteniendo como resultado las **15 estaciones implementadas**. Resaltando que la impedancia utilizada para la aplicación de la heurística fue la matriz de tiempos entre UPZ relacionada en el **Anexo B**, por lo cual se considera que de cara al rendimiento de los modelos permite que la elección de estas estaciones mejore los tiempos de respuesta al incluirse en una adecuada política de relocalización.

Como recomendación de este apartado, se sugiere al operador de la concesión la incorporación de sistemas de información que puedan actualizarse en tiempo real mediante las condiciones de tráfico en la ciudad. Esto con la finalidad de recopilar datos que, permitan evaluar la posibilidad de realizar una variación dinámica de estaciones durante el transcurso del día y entre días, semanas y meses del año, buscando generar predicción sobre la operación, conforme se robustece la capacidad de toma de decisiones relacionada con los datos y aplicaciones de búsqueda de mejores opciones de trayectos.

7.2. Construcción del modelo y proceso de atención

Como se mencionó anteriormente, no hay un proceso definido de reubicación cuando la grúa termina la atención, establecer este proceso mediante políticas de relocalización puede ayudar a generar una mejor gestión de la flota, traduciendo esto, en menores tiempos de respuesta.

Mediante la implementación de los 4 modelos descritos:

- 6.1.1 *Política 1, Una estación - Patio de Álamos*
- 6.2.1 *Política 2: Cola más grande*
- 6.2.2 *Política 3: Retorno a la estación de inicio*
- 6.2.3 *Política 4: Probabilidad de ocurrencia más alta*

Se logró evidenciar que, el mejor comportamiento en el sistema es producido por la **Política 4**, con un promedio de tiempos de espera en los eventos para ser atendidos de **29.446 y 29.84 minutos**, siendo estos inferiores a los 30 minutos estipulados en los ANS del contrato de concesión.

7.3. Tamaño de la flota

Como resultado del análisis de las 4 políticas de relocalización, se determinó que el mejor comportamiento en el sistema producido por la **Política 4**, genera la utilización de **2.552 ≈ 3** grúas promedio en ocupación y produce los menores tiempos de respuesta, con un porcentaje de utilización de la flota de **0.319 %** y una **flota mínima de 8 grúas** en funcionamiento simultaneo.

Ahora bien, no se puede dejar de lado que el total de la solicitudes no solo son servicios a demanda para la atención de siniestros, sino que por el contrario existen más actividades ejecutadas por misionalidad desde la SDM que hacen uso del servicio de grúas, entre estas actividades se encuentran los controles programados con antelación, para los cuales se allega al contratista una serie de ubicaciones, horarios y cantidad de equipos requeridos, sumado a los traslados que deben realizarse entre los diferentes patios de la entidad y parqueaderos de la Fiscalía General de la Nación en municipios cercanos, todas estas solicitudes de acuerdo con la información de programaciones de la SDM, constituyen un promedio 40 requerimientos de servicio simultáneos de grúas durante un día común, que

dependiendo de su duración y ubicación, pueden limitar la capacidad del concesionario para atender de forma paralela a las realizadas por demanda de forma.

Se recomendó a los coordinadores operativos del servicio, adicionar el recaudo de información de los demás servicios descritos, para que mediante una evaluación de las tripulaciones requeridas por cambios de turno y novedades asociadas al día a día que pueda tener este personal, sea posible establecer con mayor certeza la totalidad de equipos requeridos. Lo anteriormente descrito evidencia que, existía información insuficiente para que la SDM estableciera en el contrato en ejecución desde el 2018 que 120 grúas debía ser el número de equipos ideal para la prestación del servicio, pudiendo en su momento limitar las posibilidades de otros oferentes en el proceso, lo cual es una discusión que no viene al caso del presente documento, pero hace resaltar la importancia de procesos de análisis, estudio y modelación de escenarios como el presentado.

7.4. Calidad de la información

Para los datos suministrados referentes a las solicitudes de 2016 y 2017, se considera que es al extremo deficiente y dificultó en gran medida las tareas de procesamiento y elaboración del modelo.

Existen partes del proceso que se pierden como dentro de una caja negra, siendo imposible extrapolar su comportamiento y por ello se deben reducir a una generalización con tiempos de retraso o mayor incertidumbre.

A partir de 2019 con el nuevo sistema de información, se cuenta con mejor calidad en la depuración de las bases de datos originadas en la operación. No obstante, existen problemas conceptuales en su diseño que impidieron fuera utilizada para la construcción de los modelos implementados.

El caso más relevante y descriptivo de estos problemas en la concepción del sistema, se ve en el hecho que no existe la posibilidad de reasignar un evento a una grúa diferente a la que inicialmente lo tomó, motivo que obliga a crear un nuevo servicio cuando se requieren realizar estos cambios, alterando totalmente los tiempos de respuesta y principalmente la cantidad de eventos que ingresan, es imposible generar un rastreo consistente de estos casos y se ha evidenciado malas prácticas entorno a este funcionamiento del sistema de información, que impiden a la fecha que estos registros puedan considerarse como un repositorio fiable de las condiciones de operación del proceso de atención.

Al tratar las bases de datos relacionadas en la atención de cada incidente, el concesionario puede mejorar el proceso de atención a cada solicitud, maximizando su cobertura y disminuyendo los tiempos de atención, por ende, esta se considera la recomendación más importante de cara a generar un cambio relativamente simple con el máximo de beneficio para todas las partes intervinientes.

7.5. Trabajos futuros

Utilizando como punto de partida el presente documento, sumado a sus referencias y anexos, es posible proyectar el inicio de investigaciones y aplicaciones relacionadas con la capacidad de respuesta en sistemas de atención de emergencia, así como profundizar en la implementación de mejoras al modelo propuesto a través de la inclusión de sistemas de información y API (Interfaz de Programación de Aplicaciones), que permitan dinamizar el proceso de respuesta, permitiendo en general una búsqueda de la optimización de los

recursos empleados y de forma paralela la prestación del servicio. Como propuestas a desarrollar se relacionan los temas siguientes:

- Cálculo de externalidades de la congestión: Se considera posible identificar y calcular las externalidades negativas, producidas por la congestión derivada de la no atención o remoción de siniestros en las vías. Mientras mayor sea la duración de la atención, igualmente se incrementa el impacto negativo. Al establecer un costo por este impacto, es posible tomar decisiones como aumentar la inversión en la optimización del proceso de atención, buscando que el beneficio de la ciudad en general prevalezca sobre los particulares que se encargan de la atención.
- Determinación de nuevas zonas para custodia de vehículos (patios): La ubicación de los patios con que actualmente cuenta la ciudad, merma las oportunidades de mejora en los tiempos de atención a solicitudes. Lograr establecer nuevas ubicaciones, supone un esfuerzo grande en el análisis normativo de usos del suelo, mezclado con el componente técnico y financiero, que debe fusionarse para establecer el equilibrio de costos a corto, mediano y largo plazo, junto a la oportunidad de una pronta atención de solicitudes, teniendo en cuenta que esto puede repercutir en una disminución de las externalidades asociadas a la congestión como se mencionó anteriormente.
- Réplica del proceso en sistemas similares y/o ciudades de menor envergadura: Se considera viable realizar una actualización de los recursos, requerimientos e impedancias de los modelos propuestos. Esto con la finalidad de replicar sistemas de atención en salud en la ciudad o implementar en ciudades de menor tamaño, donde la variabilidad del tránsito sea menor y sus resultados puedan considerarse efectivos, sin la necesidad de incorporar sistemas de información para el monitoreo del tráfico en tiempo real.

Referencias

- 769, L. N. (2002). LEY No 769. (L. N. 769, Ed.).
- Aboueljinane, L., Jemai, Z., & Sahin, E. (2012). Reducing ambulance response time using simulation: The case of Val-de-Marne department Emergency Medical service. *Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (WSC)* (pp. 1–12). doi:10.1109/WSC.2012.6465018
- Aboueljinane, L., Sahin, E., & Jemai, Z. (2013). A review on simulation models applied to emergency medical service operations. *Computers & Industrial Engineering*, 66(8), 734–750. doi:https://doi.org/10.1016/j.cie.2013.09.017
- Aboueljinane, L., Sahin, E., Jemai, Z., & Marty, J. (2014). A simulation study to improve the performance of an emergency medical service: Application to the French Val-de-Marne department. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 47(40), 46–59. doi:https://doi.org/10.1016/j.simpat.2014.05.007
- Andersson, T., & Värbrand, P. (2007). Decision support tools for ambulance dispatch and relocation. *Journal of the Operational Research Society*, 58(12), 195–201. doi:10.1057/palgrave.jors.2602174
- Ball, M. O., & Lin, F. L. (1993). A Reliability Model Applied to Emergency Service Vehicle Location. *Operations Research*, 41(33), 18–36. doi:10.1287/opre.41.1.18
- Borshchev, A., & Filippov, A. (2004). From system dynamics and discrete event to practical agent based modeling: reasons, techniques, tools. *Proceedings of the 22nd international conference of the system dynamics society* (Vol. Vol. 22.). Citeseer.
- Bradley, A. (2007). *Arena User's guide*. (R. A. Rockwell Software, Ed.). PUBLICATION ARENA-UM001D. Retrieved from

<http://www.manualsdir.com/manuals/579995/rockwell-automation-arena-users-guide.html>

Brotcorne, L., Laporte, G., & Semet, F. (2003). Ambulance location and relocation models.

European Journal of Operational Research, 147(23), 451–463.

doi:[https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00364-8](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00364-8)

Buuren, V. (2011). TIFAR Modeling Package for the Evaluation of Emergency Medical

Services: With EMS modeling results for the Amsterdam area. (C. Laroque, J.

Himmelspach, R. Pasupathy, O. Rose, & A. Uhrmacher, Eds.) *Proceedings of the*

2012 Winter Simulation Conference. Delft University of Technology, Faculty of

Electrical Engineering, Mathematics and Computer Science, Delft Institute of

Applied Mathematics. Retrieved from [uuid:1a2b614e-f31c-4ec0-8a07-](https://www.researchgate.net/publication/33db3ea1d099)

[33db3ea1d099](https://www.researchgate.net/publication/33db3ea1d099)

Cheu, R. L., Huang, Y., & Huang, B. (2008). Allocating Emergency Service Vehicles to

Serve Critical Transportation Infrastructures. *Journal of Intelligent Transportation*

Systems, 12(47), 38–49. doi:[10.1080/15472450701849675](https://doi.org/10.1080/15472450701849675)

Church, R., & Velle, C. R. (1974). THE MAXIMAL COVERING LOCATION PROBLEM.

Papers in Regional Science, 32(28), 101–118. doi:[10.1111/j.1435-](https://doi.org/10.1111/j.1435-5597.1974.tb00902.x)

[5597.1974.tb00902.x](https://doi.org/10.1111/j.1435-5597.1974.tb00902.x)

Daskin, M. S., & Dean, L. K. (1983). Location of Health Care Facilities. *Operations*

Research and Health Care (pp. 43–76). Kluwer Academic Publishers.

doi:[10.1007/1-4020-8066-2_3](https://doi.org/10.1007/1-4020-8066-2_3)

Degel, D., Wiesche, L., Rachuba, S., & Werners, B. (2014). Reorganizing an existing

volunteer fire station network in Germany. *Socio-Economic Planning Sciences*,

48(48), 149–157. doi:<https://doi.org/10.1016/j.seps.2014.03.001>

- FICO. (2017). *Xpress-Optimizer, Reference manual, Release 31.01*. (I. Fair & Company, Eds.) (p. 575). Retrieved from <https://www.fico.com/fico-xpress-optimization/docs/latest/solver/optimizer/HTML/chapter1.html>
- García Dunna, E., García Reyes, H., & Cárdenas Barrón, L. E. (2013). *Simulación y análisis de sistemas con ProModel. Segunda edición*. (PEARSON, Ed.). Retrieved from <https://jrvargas.files.wordpress.com/2015/04/libro-simulacion-y-analisis-de-sistemas-2da-edicion.pdf>
- Gendreau, M., Laporte, G., & Semet, F. (1997). Solving an ambulance location model by tabu search. *Location Science*, 5(34), 75–88. doi:[https://doi.org/10.1016/S0966-8349\(97\)00015-6](https://doi.org/10.1016/S0966-8349(97)00015-6)
- Gendreau, M., Laporte, G., & Semet, F. (2001). A dynamic model and parallel tabu search heuristic for real-time ambulance relocation. *Parallel Computing*, 27(14), 1641–1653. doi:[https://doi.org/10.1016/S0167-8191\(01\)00103-X](https://doi.org/10.1016/S0167-8191(01)00103-X)
- Goldberg, J., Dietrich, R., Ming Chen, J., Mitwasi, M. G., Valenzuela, T., & Criss, E. (1990). Validating and applying a model for locating emergency medical vehicles in Tucson, AZ. *European Journal of Operational Research*, 49(30), 308–324. doi:[10.1016/0377-2217\(90\)90402-W](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90402-W)
- Guzman, L. A., Arellana, J., & Alvarez, V. (2020). Confronting congestion in urban areas: Developing Sustainable Mobility Plans for public and private organizations in Bogotá. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 134, 321–335. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.02.019>
- Henderson, S. G., & Mason, A. J. (2004). Ambulance Service Planning: Simulation and Data Visualisation. In M. L. Brandeau, F. Sainfort, & W. P. Pierskalla (Eds.), *Operations Research and Health Care: A Handbook of Methods and Applications* (pp. 77–102). Boston, MA: Springer US. doi:[10.1007/1-4020-8066-2_4](https://doi.org/10.1007/1-4020-8066-2_4)

- IBM, C. (2016). *IBM ILOG CPLEX Optimization Studio OPL Language User's Manual*. (I. Corporation, Ed.) (12th ed., p. 168). Retrieved from https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/SSSA5P_12.7.0/ilog.odms.studio.help/pdf/opl_languser.pdf
- Ingolfsson, A., Erkut, E., & Budge, S. (2003). Simulation of single start station for Edmonton EMS. *Journal of the Operational Research Society*, *54*(13), 736–746. doi:10.1057/palgrave.jors.2601574
- Junior, J. D. (2005). SISTEMA DE APOIO À DECISÃO ESPACIAL APLICADO AO SERVIÇO DE ATENDIMENTO MÓVEL DE URGÊNCIA EM VIAS DE TRÂNSITO. *Laboratório de Transportes – Labtrans/ECV/UFSC*, (22).
- Kelton, D. W. (2014). *Simulation with Arena*. Retrieved from <https://books.google.com.co/books?id=RWlzCgAAQBAJ>
- Kleijnen, J. P. C. (1995). Verification and validation of simulation models. *European Journal of Operational Research*, *82*(52), 145–162. doi:[https://doi.org/10.1016/0377-2217\(94\)00016-6](https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)00016-6)
- Kolesar, P., & Walker, W. (1972). An Algorithm for the Dynamic Relocation of Fire Companies. Santa Monica, CA: RAND Corporation. *RAND Corporation*, (35). Retrieved from <https://www.rand.org/pubs/reports/R1023.html>
- Marsh, M. T., & Schilling, D. A. (1994). Equity measurement in facility location analysis: A review and framework. *European Journal of Operational Research*, *74*(15), 1–17. doi:[https://doi.org/10.1016/0377-2217\(94\)90200-3](https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)90200-3)
- Maxwell, M. S., Henderson, S. G., & Topaloglu, H. (2009). Ambulance Redeployment: An Approximate Dynamic Programming Approach. *Winter Simulation Conference*, WSC '09 (pp. 1850–1860). Austin, Texas: Winter Simulation Conference. Retrieved from <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1995456.1995713>

- Maxwell, M. S., Restrepo, M., Henderson, S. G., & Topaloglu, H. (2010). Approximate Dynamic Programming for Ambulance Redeployment. *INFORMS Journal on Computing*, 22(37), 266–281. doi:10.1287/ijoc.1090.0345
- Moeini, M., Jemai, Z., & Sahin, E. (2015). Location and relocation problems in the context of the emergency medical service systems: a case study. *Central European Journal of Operations Research*, 23(9), 641–658.
doi:<https://doi.org/10.1007/s10100-014-0374-3>
- Nair, R., & Miller Hooks, E. (2009). Evaluation of Relocation Strategies for Emergency Medical Service Vehicles. *Transportation Research Record*, 2137(46), 63–73.
doi:10.3141/2137-08
- Naoum-Sawaya, J., & Elhedhli, S. (2013). A stochastic optimization model for real-time ambulance redeployment. *Computers & Operations Research*, 40(45), 1972–1978.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.cor.2013.02.006>
- Ortega, O. J. P. (2013). Revisión del estado del arte en modelos de localización y relocalización de vehículos para atención de emergencias. *Elementos*, (21).
doi:<http://dx.doi.org/10.15765/e.v1i1.193>
- P. Baldwin, L., Eldabi, T., & J. Paul, R. (2004). Simulation in healthcare management: A soft approach (MAPIU). *Simulation Modelling Practice and Theory*, (25).
doi:10.1016/j.simpat.2004.02.003
- Peleg, K., & Pliskin, J. S. (2004). A geographic information system simulation model of EMS: reducing ambulance response time. *The American Journal of Emergency Medicine*, 22(5), 164–170. doi:10.1016/j.ajem.2004.02.003
- ReVelle, C. (1991). Siting Ambulances and Fire Companies: New Tools for Planners. *Journal of the American Planning Association*, 57(31), 471–484.
doi:10.1080/01944369108975521

- ReVelle, C., & Hogan, K. (1989). The Maximum Availability Location Problem. *Transportation Science*, 23(32), 192–200. doi:10.1287/trsc.23.3.192
- Rodríguez, A., Osorno, G., & Maya, P. (2016). Relocation of Vehicles Emergency Medical Services: a Review. *Ingeniería y Ciencia*, 12(4), 163–201. doi:10.17230/ingciencia.12.23.9
- Schmid, V. (2012). Solving the dynamic ambulance relocation and dispatching problem using approximate dynamic programming. *European Journal of Operational Research*, 219(50), 611–621. doi:https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.10.043
- SDM. (2017). Anexo 1 - Documento técnico del servicio. Concesión para la prestación de los servicios relacionados con (I) el traslado de vehículos al lugar que la secretaría distrital de movilidad establezca y (II) disposición de los espacios para proveer el parqueo y ejercer la custodia de aquellos vehículos que determine el Organismo de Tránsito del Distrito Capital. (S. D. de Movilidad, Ed.). SECOP I. Retrieved from <https://www.contratos.gov.co/consultas/detalleProceso.do?numConstancia=17-1-179925>, Anexo 1 Documento
- SDM. (2019). Detalle del Proceso Número: SDM-LP-052-2017. (S. D. de Movilidad, Ed.). SECOP I. Retrieved from <https://www.contratos.gov.co/consultas/detalleProceso.do?numConstancia=17-1-179925>
- Silva, P. M. S., & Pinto, L. R. (2010). Emergency medical systems analysis by simulation and optimization. *In Proceedings of the 2010 winter simulation conference*, (53), 2422–2432. doi:10.1109/WSC.2010.5678938
- Su, S., & Shih, C.-L. (2002). Resource reallocation in an emergency medical service system using computer simulation. *The American Journal of Emergency Medicine*, 20(19), 627–634. doi:10.1053/ajem.2002.35453

- Sudtachat, K., Mayorga, M. E., & Mclay, L. A. (2016). A nested-compliance table policy for emergency medical service systems under relocation. *Omega*, 58(24), 154–168. doi:<https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.06.001>
- Toregas, C., ReVelle, C., & Bergman, L. (1971). The Location of Emergency Services. *Operations Research*, 19(27). doi:10.1287/opre.19.6.1363
- Van Buuren, M., Aardal, K., Mei, R. van der, & Post. (2012). Evaluating dynamic dispatch strategies for emergency medical services: tifar simulation tool. In C. Laroque, J. Himmelpach, R. Pasupathy, O Rose, & A. Uhrmacher (Eds.), *Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference* (pp. 1–11).
- Yang, L., Yun, Y., Yu-hui, L., & Hao, P. (2013). A Chance Constrained Programming Model for Reliable Emergency Vehicles Relocation Problem. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 96(3), 671–682. doi:<https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.08.078>
- Zhen, L., Wang, K., Hu, H., & Chang, D. (2014). A simulation optimization framework for ambulance deployment and relocation problems. *Computers & Industrial Engineering*, 72(54), 12–23. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.03.008>

Anexos

Anexo A: SOLICITUDES GRÚAS 2016-2017

Anexo B: PARAMETROS MODELO ARENA

Anexo C: POLÍTICA 1 - Crystal Reports ActiveX Designer - Category Overview.rpt

Anexo D: POLÍTICA 2 - Crystal Reports ActiveX Designer - Category Overview.rpt

Anexo E: POLÍTICA 3 - Crystal Reports ActiveX Designer - Category Overview.rpt

Anexo F: POLÍTICA 4 _ Crystal Reports ActiveX Designer - Category Overview.rpt