

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

ESCUELA DE POSGRADO



**ESTUDIO DE UBICACIÓN DE LAS UNIDADES BÁSICAS OPERATIVAS DEL
CUERPO GENERAL DE BOMBEROS VOLUNTARIOS DEL PERÚ: CASO
LIMA METROPOLITANA Y CALLAO**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAGÍSTER EN GESTIÓN
DE LA INGENIERÍA**

AUTOR

José Antonio Morales Mere

ASESOR

Wilmer Jhonny Atoche Díaz

Enero, 2021

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo reducir el tiempo de respuesta a emergencias (TRE) del Cuerpo General de Bomberos Voluntarios del Perú (CGBVP) en Lima Metropolitana y Callao. Para ello, se describe la problemática actual del CGBVP y la Intendencia Nacional de Bomberos del Perú, institución encargada del manejo de recursos para la operatividad del CGBVP. En esta problemática, se identifica que la distribución de recursos es un factor que afecta el TRE en el que el 90% de los incidentes son atendidos en menos de 19.5 minutos. Al desarrollar un diagnóstico a la ubicación de recursos del CGBVP, se observa que el comportamiento del TRE es afectado por elementos externos tales como el crecimiento del parque automotor, la velocidad promedio de viaje y el crecimiento de emergencias atendidas. Adicionalmente, se desarrolla un diagnóstico a la cobertura actual y a las zonas de demanda por tipo de emergencia. En base a esta información, se elabora un modelo de optimización por límite de cobertura y un modelo de optimización por metas. En cada modelo, se consideran dos escenarios de evaluación en una región de análisis basada en la distancia de Manhattan. El primero consiste en determinar la configuración de estaciones en condiciones ideales, es decir, sin considerar las estaciones existentes en la región evaluada. El segundo escenario, consiste en evaluar la configuración de las estaciones que se deberán agregar o reubicar a las estaciones existentes. Luego, el resultado de cada modelo en ambos escenarios es evaluado en base al cumplimiento del estándar internacional NFPA 1720, considerando que el 90% de los incidentes sean atendidos en menos de 9 minutos. Finalmente, se concluye que ambos modelos presentan resultados óptimos en el diseño y en el análisis de sensibilidad en ambos escenarios. Además, se evidenció que el modelo de optimización por metas permite incluir variables políticas, económicas y sociales para obtener un modelo con un resultado holístico.

Palabras clave

Tiempo de respuesta a emergencias, optimización por límite de cobertura, optimización por metas, Cuerpo General de Bomberos Voluntarios del Perú, NFPA.



DEDICATORIA

Le dedico esta investigación a mis padres, hermana y amigos quienes me demuestran su amor y cariño. La vida es una y llena de adversidades, pero las personas a quienes amamos nos inspiran a vivir esta aventura incierta.

- José Antonio Morales Mere



AGRADECIMIENTOS

Por su contribución técnica y social durante la presente investigación:

MBA, Ing. Alfonso Panizo Otero
Comandante Departamental Lima Sur
del Cuerpo General de Bomberos
Voluntarios del Perú

Por su contribución con la información requerida para la presente investigación:

Brig. Mayor Eduardo Valcárcel Hidalgo
Jefe del Departamento de Informática
del Cuerpo General de Bomberos
Voluntarios del Perú

- José Antonio Morales Mere

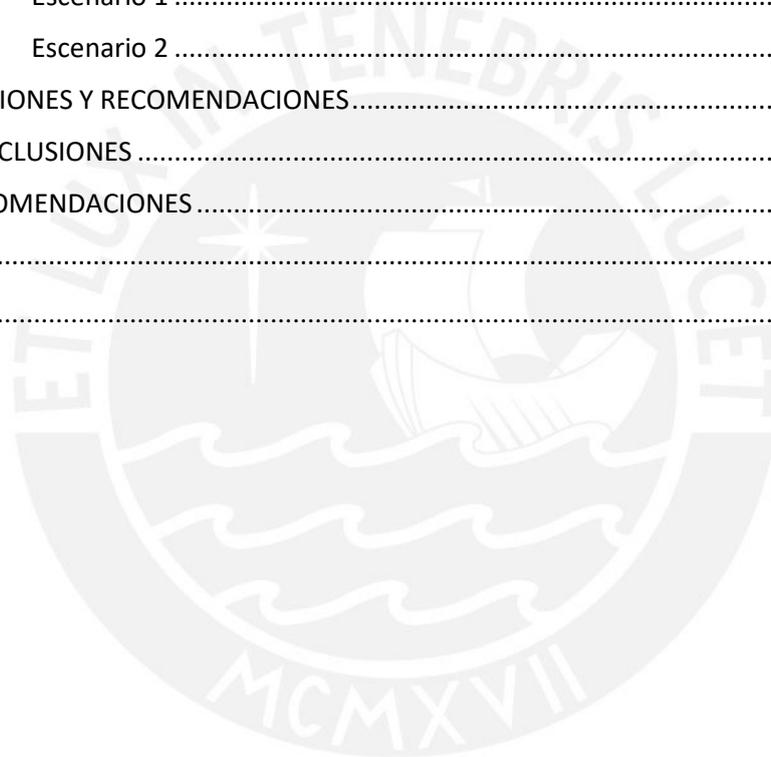
ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE ANEXOS	xii
INTRODUCCIÓN	1
1. MARCO TEÓRICO.....	2
1.1 ANTECEDENTES	2
1.1.1 Caso Nanjing, China (2019)	2
1.1.2 Caso California, Estados Unidos (2013).....	2
1.1.3 Caso Estambul, Turquía (2011)	3
1.1.4 Caso Dubai, Emiratos Árabes (1998).....	3
1.1.5 Caso Bochum, Alemania (2014)	4
1.2 BASES TEÓRICAS.....	4
1.2.1 Analítica de negocios.....	4
1.2.1.1 Entendimiento del negocio	6
1.2.1.2 Entendimiento de los datos	6
1.2.1.3 Preparación de datos	7
1.2.1.4 Modelado	8
1.2.1.5 Evaluación	8
1.2.1.6 Implementación	9
1.2.2 Investigación de operaciones.....	9
1.2.2.1 Etapas de análisis	10
1.2.2.2 Programación lineal.....	11
1.2.2.3 Programación entera.....	12
1.2.2.4 Optimización por metas	12
1.2.2.5 Distribución Física.....	13
1.2.2.6 AMPL	14
1.2.3 Evaluación de desempeño	15
1.2.3.1 Gráfica de Pareto.....	15
1.2.3.2 Análisis Percentil	16
2. PROBLEMÁTICA.....	17
2.1 CUERPO GENERAL DE BOMBEROS VOLUNTARIOS DEL PERÚ	17
2.1.1 Visión.....	17
2.1.2 Misión.....	17
2.1.3 Objetivos generales del CGBVP	18
2.1.4 Estrategias	18

2.1.5	Objetivos estratégicos	18
2.1.6	Organización.....	19
2.1.7	Recursos	20
2.2	INTENDENCIA NACIONAL DE BOMBEROS DEL PERÚ.....	21
2.2.1	Política institucional	21
2.2.2	Misión.....	22
2.2.3	Funciones	22
2.2.4	Objetivos estratégicos	23
2.2.5	Acciones estratégicas	23
2.2.6	Presupuestos de inversión	23
2.3	DISTRIBUCIÓN ACTUAL DE RECURSOS	25
2.4	TIEMPO DE RESPUESTA	28
2.4.1	Tiempo de respuesta en incendios.....	28
2.4.2	Tiempo de respuesta en emergencias médicas	29
2.4.3	Estándares internacionales	30
3.	DIAGNÓSTICO.....	32
3.1	EVOLUCIÓN URBANA Y DEL SERVICIO DE RESPUESTA A EMERGENCIAS	32
3.1.1	Crecimiento del parque automotor	32
3.1.2	Velocidad promedio de viaje en Lima y Callao.....	32
3.1.3	Evolución de registros de emergencia atendidas por el CGBVP	33
3.1.4	Comportamiento del tiempo de repuesta del CGBVP	34
3.1.5	Evolución de la velocidad de viaje del CGBVP	36
3.2	COMPORTAMIENTO ACTUAL DEL SERVICIO DE RESPUESTA A EMERGENCIAS	36
3.2.1	VARIABLES DE ANÁLISIS	37
3.2.1.1	Ocurrencias por distrito	37
3.2.1.2	Tiempo de respuesta.....	39
3.2.2	INCENDIOS.....	40
3.2.2.1	Cobertura actual con autobombas.....	40
3.2.2.2	Cobertura actual con unidades aéreas.....	41
3.2.2.3	Zonas con alta demanda	42
3.2.2.4	Zonas con demanda de recursos especiales	44
3.2.2.4.1	Unidades aéreas.....	44
3.2.2.4.2	Unidades puesto de comando	45
3.2.2.4.3	Unidades cisterna.....	47
3.2.3	EMERGENCIAS MÉDICAS	48
3.2.3.1	Cobertura actual.....	48

3.2.3.2	Zonas con alta demanda	50
3.2.4	RESCATES.....	52
3.2.4.1	Cobertura actual.....	52
3.2.4.2	Zonas con alta demanda de accidentes vehiculares	53
3.2.4.3	Zonas con alta demanda de rescates	54
3.2.5	MATERIALES PELIGROSOS	56
3.2.5.1	Cobertura actual.....	56
3.2.5.2	Zonas con demanda de recursos especiales	57
3.3	RESULTADOS DEL DIAGNÓSTICO.....	58
4.	MODELAMIENTO DEL PROBLEMA.....	60
4.1	ESCENARIOS DE ANÁLISIS.....	60
4.1.1	ESCENARIO 1: UBICACIÓN SIN CONSIDERAR ESTACIONES EXISTENTES.....	60
4.1.2	ESCENARIO 2: UBICACIÓN CONSIDERANDO ESTACIONES EXISTENTES	60
4.2	MODELOS	60
4.2.1	MODELO DE LÍMITE DE COBERTURA.....	60
4.2.1.1	Variables, índices y notaciones	60
4.2.1.2	Estimación de matriz T_{ij}	61
4.2.1.3	Restricciones	63
4.2.1.4	Supuestos	63
4.2.1.5	Función objetivo	64
4.2.2	OPTIMIZACIÓN POR METAS	64
4.2.2.1	Variables, índices y notaciones	65
4.2.2.2	Estimación de matrices de tiempo t_{ijav} y t_{ijmax}	65
4.2.2.3	Restricciones	67
4.2.2.3.1	Minimizar el costo a un presupuesto.....	67
4.2.2.3.2	Límite de Cobertura en tiempo promedio	67
4.2.2.3.3	Límite de cobertura en tiempo máximo.....	68
4.2.2.3.4	Alcanzar una cantidad objetivo de estaciones requeridas.....	68
4.2.2.3.5	Minimizar el exceso de cobertura.....	69
4.2.2.3.6	Restricciones estructurales	69
4.2.2.4	Supuestos	69
4.2.2.5	Función objetivo	70
5.	RESULTADOS	71
5.1	ESCENARIO 1: UBICACIÓN SIN CONSIDERAR ESTACIONES EXISTENTES.....	71
5.1.1	Resultados del modelo de límite de cobertura	71
5.1.2	Resultados del modelo de optimización por metas.....	73

5.1.3	Análisis comparativo de ambos modelos.....	76
5.2	ESCENARIO 2: UBICACIÓN CONSIDERANDO ESTACIONES EXISTENTES	77
5.2.1	Resultados del modelo de límite de cobertura	77
5.2.2	Resultados del modelo de optimización por metas.....	79
5.2.3	Análisis comparativo de ambos modelos.....	82
5.3	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	83
5.3.1	MODELO LÍMITE DE COBERTURA.....	83
5.3.1.1	Escenario 1	83
5.3.1.2	Escenario 2	85
5.3.2	MODELO OPTIMIZACIÓN POR METAS.....	88
5.3.2.1	Escenario 1	88
5.3.2.2	Escenario 2	90
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	93
6.1	CONCLUSIONES	93
6.2	RECOMENDACIONES.....	98
	REFERENCIAS.....	100
	ANEXOS.....	103



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ciclo del modelo de CRISP-DM	6
Figura 2 Formato de gráfico de Pareto	15
Figura 3 Organigrama operacional del CGBVP en Lima y Callao	20
Figura 4. Ubicación de las UBO distribuidas en sectores de Lima Metropolitana y Callao	26
Figura 5. Capacidad de las UBO con unidades básicas según sectores de Lima Metropolitana y Callao.....	27
Figura 6. Capacidad de las UBO con unidades especiales según sectores de Lima Metropolitana y Callao	28
Figura 7 Crecimiento de incendio sobre el tiempo, desde el inicio del incendio hasta su extinción.....	29
Figura 8 Probabilidad de supervivencia en víctimas que sufrieron un ataque cardíaco cuando se desarrolló RCP	30
Figura 9 Parque automotor en circulación en Lima y Callao	32
Figura 10 Pronóstico de velocidad promedio de vehículos públicos y particulares con y sin proyectos de red vial.....	33
Figura 11 Reducción de emergencias médicas confirmadas del 2014 al 2019	33
Figura 12 Evolución de registros de emergencias confirmadas no médicas del 2014 al 2019 ...	34
Figura 13 Comportamiento del percentil del tiempo de respuesta en el CGBVP de 2014 a 2019	35
Figura 14 Evolución del tiempo de respuesta en el CGBVP de 2014 a 2019	35
Figura 15 Evolución de la velocidad de viaje del CGBVP de 2014 a 2019	36
Figura 16 Puntos representantes de registros encontrados en 1 Km ²	37
Figura 17 Diagrama de Pareto por ocurrencias de emergencias en el periodo de 2014 a 2019	37
Figura 18 Mapa de calor de emergencias atendidas en Lima Metropolitana y Callao	39
Figura 19 Tiempo de respuesta alcanzado en percentil 90.....	40
Figura 20 Distribución de cajas y bigotes de porcentaje de incendios atendidos por autobombas en menos de 10 minutos.....	40
Figura 21 Mapa de calor con incendios atendidos en menos de 10 minutos.....	41
Figura 22 Distribución de cajas y bigotes de porcentaje de incendios atendidos por unidades aéreas en menos de 10 minutos.	42
Figura 23 Mapa de calor con incendios atendidos por unidades aéreas en menos de 10 minutos.	42
Figura 24 Distribución de cajas y bigotes de incendios atendidos en Lima Metropolitana y Callao.....	43
Figura 25 Mapa de calor con incendios atendidos en Lima Metropolitana y Callao	44
Figura 26 Distribución de cajas y bigotes de incendios atendidos por unidades aéreas.	44
Figura 27 Mapa de calor con incendios atendidos por unidades aéreas.....	45
Figura 28 Distribución de cajas y bigotes de incendios atendidos por unidades puesto de comando	46
Figura 29 Mapa de calor con incendios atendidos por unidades puesto de comando.....	46
Figura 30 Distribución de cajas y bigotes de incendios atendidos por unidades cisterna.	47
Figura 31 Mapa de calor con incendios atendidos por unidades cisterna.....	48
Figura 32 Distribución de cajas y bigotes de porcentaje de emergencias médicas atendidas en menos de 8 y 4 minutos.	49
Figura 33 Mapa de calor con emergencias médicas atendidas en menos de 8 minutos.....	49

Figura 34 Mapa de calor con emergencias médicas atendidas en menos de 4 minutos.....	50
Figura 35 Distribución de cajas y bigotes de emergencias médicas atendidas en Lima Metropolitana y Callao.....	51
Figura 36 Mapa de calor con emergencias médicas atendidas en Lima Metropolitana y Callao.....	51
Figura 37 Distribución de cajas y bigotes de porcentaje de rescates atendidos en menos de 10 minutos.....	52
Figura 38 Mapa de calor con rescates que lograron ser atendidos en menos de 10 minutos. ..	53
Figura 39 Distribución de cajas y bigotes de porcentaje de accidentes vehiculares atendidos en Lima Metropolitana y Callao	54
Figura 40 Mapa de calor con accidentes vehiculares atendidos en Lima Metropolitana y Callao.....	54
Figura 41 Distribución de cajas y bigotes de porcentaje de rescates atendidos en Lima Metropolitana y Callao.....	55
Figura 42 Mapa de calor con rescates atendidos en Lima Metropolitana y Callao	55
Figura 43 Distribución de cajas y bigotes de porcentaje de emergencias con materiales peligrosos atendidas en menos de 10 minutos.....	56
Figura 44 Mapa de calor de emergencias con materiales peligrosos atendidos en menos de 10 minutos.....	57
Figura 45 Distribución de cajas y bigotes de incidentes atendidos por unidades MATPEL	57
Figura 46 Mapa de calor de incidentes atendidos por unidades MATPEL	58
Figura 47 Evaluación de la velocidad promedio de viaje en cada cuadrante de Lima y Callao...	61
Figura 48 Extracto del código Python para la obtención de la matriz Tij.....	62
Figura 49 Obtención de la matriz Tij.....	62
Figura 50 Estimación de velocidad de viaje en cada cuadrante por distintos métodos de agrupación.....	66
Figura 51 Cálculo de matrices de tiempo para cada método de agrupación de velocidad	66
Figura 52 Extracto del código Python que ejecuta el almacenamiento de matrices en MS Access	67
Figura 53 Mapa de resultados del modelo de límite de cobertura en escenario 1.....	72
Figura 54 Mapa de resultados del modelo de optimización por metas en el escenario 1.....	75
Figura 55 Mapa de resultados del modelo de límite de cobertura en escenario 1.....	78
Figura 56 Mapa de resultados del modelo de optimización por metas en el escenario 2.....	81
Figura 57 Análisis de sensibilidad por tiempo alcanzado en percentil 90 y percentil alcanzado en tiempo menor o igual a 9 minutos en el escenario 1	85
Figura 58 Análisis de sensibilidad por tiempo alcanzado en percentil 90 y percentil alcanzado en tiempo menor o igual a 9 minutos en el escenario 2	87
Figura 59 Análisis de sensibilidad por tiempo alcanzado en percentil 90 y percentil alcanzado en tiempo menor o igual a 9 minutos en el escenario 1	90
Figura 60 Análisis de sensibilidad por tiempo alcanzado en percentil 90 y percentil alcanzado en tiempo menor o igual a 9 minutos en el escenario 2	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Presupuesto anual asignado para la implementación de nuevas estaciones y remodelación de las existentes (monto en soles).....	24
Tabla 2 Presupuestos de inversión para proyectos de estaciones de bomberos, 2015 – 2017 (monto en soles)	24
Tabla 3 Tiempo de respuesta según la demografía.....	31
Tabla 4 Distritos con mayor demanda del servicio de emergencias del CGBVP	38
Tabla 5 Resultados del modelo de límite de cobertura en escenario 1	71
Tabla 6 Resultado de metas según prioridades y costo de inversión, sin considerar estaciones existentes	73
Tabla 7 Comparativo entre los resultados obtenidos en ambos modelos en el escenario sin considerar estaciones existentes	76
Tabla 8 Resultados del modelo de límite de cobertura en escenario 2	77
Tabla 9 Resultado de metas según prioridades y costo de inversión, considerando estaciones existentes	79
Tabla 10 Comparativo entre los resultados obtenidos en ambos modelos en el escenario en el que se consideran las estaciones existentes.....	82
Tabla 11 Criticidad de estaciones en el escenario 1 del modelo límite de cobertura.....	83
Tabla 12 Criticidad de estaciones en el escenario 2 del modelo límite de cobertura.....	85
Tabla 13 Criticidad de estaciones en el escenario 1 del modelo optimización por metas.....	88
Tabla 14 Criticidad de estaciones en el escenario 2 del modelo optimización por metas.....	90



ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1 LISTADO DE RECURSOS DEL CGBVP	103
ANEXO 2 BASE DE DATOS.....	107
ANEXO 3 CÓDIGO PYTHON	111
ANEXO 4 CÓDIGO AMPL.....	114



INTRODUCCIÓN

Actualmente el Cuerpo General de Bomberos Voluntarios del Perú (CGBVP) es el departamento encargado del servicio de respuesta a emergencias. Para garantizar la operatividad de los recursos necesarios, el Estado peruano creó la Intendencia Nacional de Bomberos del Perú. Por lo tanto, se tienen dos instituciones que trabajan de manera articulada para finalmente, atender de manera adecuada a los ciudadanos cuando su vida se encuentre en riesgo.

A través de los últimos años, se ha visto el crecimiento demográfico en Lima Metropolitana y Callao. Tal como lo relata la historia del CGBVP, el incremento de población en esta región conllevó al aumento de emergencias, por ello, los ciudadanos iniciaron organizaciones para crear estaciones de bomberos voluntarios. Dentro de estas iniciativas, los municipios participaban donando locales para instalar estas estaciones. Es decir, las compañías de bomberos existentes no han sido ubicadas estratégicamente por el CGBVP para optimizar el servicio ofrecido. A pesar de ello, actualmente no existe una política de decisión para asignar la ubicación de una nueva estación o para reubicar o clausurar las estaciones de bomberos existentes.

Tal como indican diversas investigaciones, el tiempo de respuesta es un factor clave que puede llegar a ser determinante para reducir las consecuencias de una emergencia. En tal sentido, existen estándares internacionales como el NFPA 1720 el cual establece que, para un área urbana, el TR debe ser menor a 9 minutos el 90% de las veces.

En el primer capítulo se expone el marco teórico donde se describen investigaciones similares en China (2019), Alemania (2014), Estados Unidos (2013), Turquía (2011), Emiratos Árabes (1998). Además, se describen las bases teóricas que la presente investigación requirió. Luego, el segundo capítulo describe la problemática actual, las instituciones que participan en el caso (el CGBVP y la INBP) y la distribución actual de recursos. Adicionalmente, se establece el tiempo de respuesta requerido según el tipo de emergencia y se presenta el estándar internacional NFPA 1720. Posterior a ello, en el tercer capítulo se desarrolla un diagnóstico a las condiciones actuales. En él se describe la evolución urbana y el efecto en el servicio de respuesta a emergencias, donde se evalúa el crecimiento del parque automotor, la velocidad promedio de viaje en Lima y Callao, la evolución de las emergencias atendidas, el comportamiento del tiempo de respuesta y la evolución de la velocidad de viaje de los vehículos de emergencia. Además, se expone el comportamiento actual del servicio, donde se describe la cobertura actual por cada tipo de emergencia. Luego, en el cuarto capítulo se desarrolla el modelamiento del problema en base a dos modelos y dos escenarios de análisis. A continuación, en el quinto capítulo se exponen los resultados obtenidos en cada escenario, haciendo un análisis comparativo de ambos modelos. Además, en el mismo se elabora un análisis de sensibilidad para evaluar la robustez alcanzada en el resultado de cada modelo. Finalmente, en el sexto capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones obtenidas de la investigación.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 ANTECEDENTES

El presente capítulo pretende mostrar una síntesis de investigaciones que comparten los objetivos de la tesis. Por ello, se expone un resumen de cada una, resaltando la metodología y resultados obtenidos:

1.1.1 Caso Nanjing, China (2019)

La investigación titulada "*Location optimization of urban fire stations: Access and service coverage*", elaborada por Yao y otros autores, busca la solución al problema de ubicación de estaciones de bomberos en la ciudad de Nanjing, China. El objetivo de la investigación es mitigar el daño a la vida y a la propiedad ante una eventual emergencia mediante la reducción del tiempo de respuesta del departamento de bomberos de la ciudad. Para ello, propone un modelo de optimización con dos objetivos: el acceso y la cobertura del servicio de emergencia.

En cuanto al desarrollo del objetivo de accesibilidad, el autor propone la metodología de problema de p-mediana (PMP, por sus siglas en inglés), este método permite minimizar las distancias y tiempos de viaje desde la estación de bomberos hasta los lugares con mayor riesgo de incendio. Mientras que, para el objetivo de cobertura el autor aplica el problema de cobertura por conjunto de ubicaciones (LSCP, por sus siglas en inglés), con ella, evalúa la eficiencia de las estaciones existentes y busca identificar nuevas ubicaciones.

En esta investigación se elaboraron dos escenarios durante el estudio empírico. En el primero, se asumió que no hay estaciones de bomberos en la ciudad. Con esta premisa, el autor pudo determinar la cantidad mínima de estaciones mediante el objetivo de cobertura. Luego, mediante un cuadro de Pareto analizó las mejoras de acceso (segundo objetivo) según la cantidad de estaciones instaladas. En el segundo escenario, determinó la cantidad mínima de estaciones adicionando estaciones mientras mantiene todas o algunas de las estaciones existentes. Finalmente, observó que un trabajo futuro puede incluir más objetivos y restricciones tales como: maximizar el servicio disponible y estaciones de segunda respuesta, respectivamente. Adicionalmente, concluyó que pueden adoptarse métodos estocásticos para considerar la incertidumbre de la ubicación y tiempo de emergencias, Además, observó que se puede incluir factores para estimar el riesgo de incendio tales como: densidad poblacional, uso de instalaciones y tipo de estructuras.

1.1.2 Caso California, Estados Unidos (2013)

La investigación titulada "*Optimising the spatial location of urban fire stations*", elaborada por Murray, expone la planificación estratégica de la respuesta y protección contra incendios según el estándar establecido por *National Fire Protection Association* (NFPA). Como caso de estudio, el autor examina el sistema de respuesta a emergencias de la ciudad Elk Grove, California basándose en el tiempo de respuesta ante incendios. Para ello, propuso optimizar la cantidad y la ubicación de las estaciones de bomberos con el objetivo de minimizar los costos de implementar y mantener estaciones.

El estándar de NFPA establece que el 90% de las atenciones de respuesta a emergencias deben atenderse en un tiempo no menor a 9 minutos. Para estos dos principios, el autor expone el modelamiento de cobertura de umbral. Este se define como la combinación del problema de

ubicación por cobertura máxima (MCLP, por sus siglas en inglés) y LSCP. El modelo que desarrolló cuenta con la función objetivo de minimizar la cantidad de estaciones de bomberos necesarias y complementa la evaluación con restricciones de representación espacial, disponibilidad de la estación y la ubicación de las estaciones existentes.

Considerando el crecimiento de la ciudad, el autor limitó el planteamiento del problema a que al menos del 80% de las atenciones, sean respondidas en un tiempo no menor a 5 minutos. Para ello, determinó la cantidad total de estaciones que deben ser añadidas bajo distintos escenarios. Cada escenario consideró cierta cantidad de estaciones reubicadas de tal manera que puede determinar el costo de mantenimiento y reubicación para estaciones nuevas y existentes. Finalmente, el autor concluyó que la tendencia de costo anual es contar con 16 estaciones: mantener la ubicación de 2, reubicar 7 y agregar 7 estaciones más.

1.1.3 Caso Estambul, Turquía (2011)

La investigación titulada "Siting new fire stations in Istanbul: A risk-based optimization approach", elaborada por Çatay, formula el problema de optimización considerando un modelo dinámico de cobertura múltiple basado en el riesgo de incendios. El autor identifica que la naturaleza de las emergencias varía según los riesgos de cada sector. Por ello, el objetivo principal de la investigación fue optimizar la cobertura de estaciones de bomberos según los riesgos identificados.

La normativa indicada por la autoridad local establece cuatro niveles de riesgo. Y, para cada uno de ellos, requiere cierto periodo tiempo de llegada para la primera, segunda y tercera respuesta según lo requiera el nivel de riesgo. Con estas restricciones, el autor propuso un modelo de doble cobertura con apoyo en periodos de tiempo. El objetivo de la función desarrollada fue maximizar el peso promedio del número total de regiones demandadas cubiertas según el nivel de riesgo. Para determinar el valor de riesgo, utilizó la información estadística de emergencias del año 2004 al 2008.

Actualmente, existen 64 estaciones de bomberos en la ciudad, lo que da una cobertura de 61.4% según los tiempos de atención establecidos. La Brigada Contra Incendios de Estambul, planteó implementar nuevas estaciones en dos etapas. La primera etapa contó con una adición de 28 nuevas estaciones y la segunda, 26. Al aplicar el modelo de optimización, se el autor halló las ubicaciones de estas estaciones de tal manera que, en la primera etapa llegó a cubrir el 81.7% según los tiempos de atención. Mientras que, la segunda alcanzó el 90.2%. Finalmente, el autor concluyó que el modelo optimiza la cobertura máxima para un planeamiento estratégico.

1.1.4 Caso Dubai, Emiratos Árabes (1998)

La investigación titulada "A multi model for locating fire stations", elaborada por Badri y otros autores, desarrolla un planeamiento estratégico proyectado al año 2005 y considera al servicio de respuesta a emergencias como un sistema sociotécnico complejo. Es decir, identifica que los tomadores de decisión tienen distintos objetivos que determinan diferentes soluciones al problema de ubicación de estaciones de bomberos.

Desarrolló una optimización por metas que ponderaba en pesos distintos objetivos tales como la minimización de costos fijos, operativos, la distancia de viaje, el tiempo de recorrido y la maximización de la cobertura en áreas de alta demanda, entre otros. El planteamiento incluyó la delimitación de subáreas en cada distrito. Estas subáreas están definidas por límites topográficos y por zonas de baja incidencia de incendios. Por otro lado, la medición del tiempo

de respuesta se realizó evaluando los tiempos de llegada en hora normal y en tráfico por la mañana, tarde y noche.

De las posibles soluciones los tomadores de decisión concluyeron que, por razones políticas de la organización y de las municipalidades, debían priorizar el objetivo de minimizar el tiempo de respuesta. Esta decisión fue tomada en base a la proyección de crecimiento demográfico que esperaban en cada subárea. Finalmente, se puede concluir que el desarrollo de un modelo con multi objetivos aplica a sistemas complejos donde existen diversos criterios para resolver una situación.

1.1.5 Caso Bochum, Alemania (2014)

La investigación titulada “Reorganizing an existing volunteer fire station network in Germany”, elaborada por Degel y otros autores, enfrenta el problema de reducción de bomberos voluntarios y presupuesto limitado en una ciudad rural. Para ello, presenta una solución que busca mantener la calidad del servicio de respuesta de emergencia y minimizar los recursos requeridos.

La metodología aplicada, se desarrolló en base a la mínima cantidad de estaciones requeridas considerando las estaciones existentes. El autor presentó dos modelos para determinar estrategia de reducción de estaciones. El primero, determina la secuencia óptima de cierre de estaciones una a una. El segundo modelo, permite el cierre de más de una estación al mismo tiempo y, en simultáneo, considera reubicaciones de estaciones.

Como resultado, el cierre de estaciones tuvo a un incremento significativo del tiempo de respuesta promedio. Para el caso de la ciudad de Bochum, el segundo modelo cumplió los objetivos planteados. Cabe resaltar que, el análisis de sensibilidad mostró que no hay una única solución óptima para la ubicación de estaciones de bomberos. Además, mostró que hay diferentes alternativas para atender una reducción de personal voluntario o la reducción de presupuesto público.

1.2 BASES TEÓRICAS

1.2.1 Analítica de negocios

La analítica de negocios (o Business analytics por el término acuñado en el idioma inglés), es un término que se describe como el arte y la ciencia de descubrir el conocimiento, usando matemática sofisticada, aprendizaje de máquina y métodos científicos de redes junto con una gran variedad de datos y conocimiento experto, el cual soporta de manera efectiva y rápida una toma de decisión.

En términos generales, la analítica se podría definir como la ciencia del análisis lógico. Debido a la naturaleza versátil de la analítica de datos, al ser aplicada por varias disciplinas profesionales y académicas el método aplicado tenía un sentido nato de cada especialidad. Ante ello, Davenport y Harris (2007) definen la analítica de datos como “el uso extensivo de datos, análisis estadístico y cuantitativo, modelos descriptivos y predictivos y administración basada en información certera que deriven en decisiones y acciones”. Es decir, la analítica de datos es el proceso científico de transformar los datos en conocimiento para la toma de decisiones.

Adicionalmente, tal como definen Olson y Lauhoff (2019), el proceso de extraer conocimiento válido, útil y comprensible, previamente desconocido, desde datos se le conoce como “Minería de datos”. Dicho esto, se puede decir que la minería de datos es sinónimo de analítica de datos.

Toda organización cuenta con información acumulada por políticas internas o por normativas locales. Sin embargo, la mayoría de esta información no se encuentra ordenada y reunida en un formato que pueda ser rápidamente usada para ser analizada. Por lo tanto, se requiere un proceso de extracción y transformación de distintas fuentes de información. Incluso puede llegar a ser reestructurada de tal manera que un análisis pueda llevarse a cabo para obtener información relevante.

Tal como describe Liberatore y Luo (2010), la aplicación de la analítica se puede distinguir en tres categorías. Primero se tiene la analítica descriptiva que implica el uso de técnicas de representación de características generales con herramientas de visualización que pueden presentar información multidimensional y resultados estadísticos en una interfase gráfica integrada. Con ello, se describe y comprende la naturaleza de los datos analizados.

La segunda categoría es la analítica predictiva, la cual usa los datos para estimar tendencias, validar relaciones y establecer clasificaciones en base a los datos iniciales. Es decir, trata de predecir el comportamiento futuro del sistema. Este análisis requiere de métodos estadísticos como regresión lineal y logística y segmentación de datos; modelos de investigación de operaciones como heurística y simulación de modelos; e inteligencia artificial como redes neuronales.

Finalmente, la última categoría es la analítica prescriptiva que consiste en utilizar los datos para prescribir la decisión óptima que debe realizarse en el futuro. En este tipo de análisis se aplican diversos modelos de programación matemática y heurística tales como algoritmos de genética.

Actualmente existen diversos métodos para desarrollar una analítica del negocio. El método más versátil es el CRISP-DM (*Cross-Industry Standard Process for Data Mining* por sus siglas en inglés). Este modelo ofrece un ciclo de análisis de datos el cual permite una mejora continua a lo largo de la vida de la organización (ver Figura 1).

La principal característica del modelo CRISP-DM es la capacidad de adaptarse fácilmente a la naturaleza de la aplicación en la organización. Es decir, en análisis descriptivos el trabajo se centra en explorar y visualizar datos para identificar patrones de comportamiento. En esta situación, las fases de modelado, evaluación e implementación serían menos relevantes que las fases de preparación y comprensión de datos (SPSS-IBM, 2012).

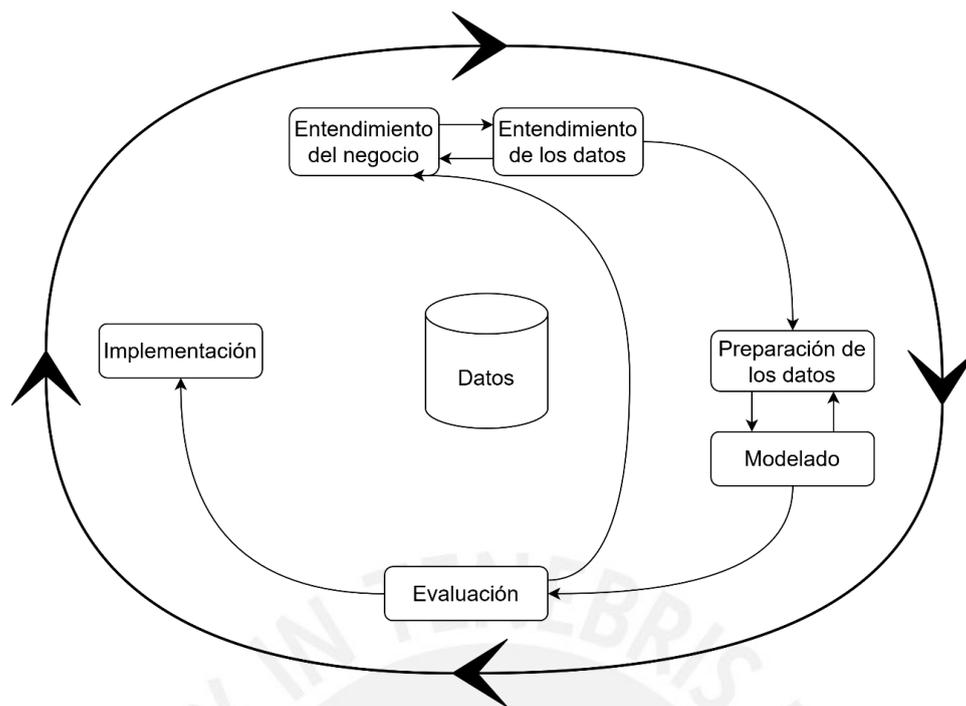


Figura 1 Ciclo del modelo de CRISP-DM

Fuente: Elaboración propia. En base a: Manual de CRISP-DM, IBM-SPSS (2012)

A continuación, se describen las etapas del modelo:

1.2.1.1 Entendimiento del negocio

En la primera etapa del modelo, se debe explorar las expectativas de la organización con respecto a la analítica a desarrollar. Para ello, se debe obtener la máxima información de los objetivos de la organización con los stakeholders. De esta manera, se reducen los posibles riesgos clarificando problemas, objetivos y recursos.

Dicho esto, se debe examinar la situación de la organización para encontrar respuestas reales que puedan tener un impacto en el resultado del proyecto de minería de datos. Las tareas iniciales son: determinar la estructura de la organización, describir el área de la organización problemática y describir la solución actual.

Una vez obtenido el objetivo acorde con la situación, se puede desarrollar una valoración de la situación considerando: los tipos de datos disponibles para el análisis, la disponibilidad del personal necesario, los principales factores de riesgo, el plan de contingencia para cada factor de riesgo. Bajo esta valoración, se puede obtener un inventario de recursos disponibles para el análisis.

1.2.1.2 Entendimiento de los datos

Esta fase implica estudiar más de cerca los datos disponibles para el análisis. Para ello, en esta fase se describen los datos. Entre las principales formas de hacerlo son en cantidad y calidad de datos, la cantidad de datos disponibles y el estado de los datos. A continuación, se describen algunas características para describir datos:

- Cantidad de datos
En la mayoría de técnicas de modelado, los tamaños de datos tienen un equilibrio relacionado. Los grandes conjuntos de datos pueden producir modelos más precisos,

pero también pueden aumentar el tiempo de procesamiento. Por ello, se puede desarrollar un conjunto de datos teniendo en cuenta el número de los registros y atributos de los datos.

- Tipos de valores
Los datos pueden incluir una variedad de formatos como numérico, categórico (*strings*) o booleano.
- Esquemas de codificación
Los valores de las bases de datos son representaciones de características como género o tipo de producto.

Parte de la naturaleza de los datos es que estos contengan errores de codificación, valores perdidos u otro tipo de incoherencia que podría perjudicar el análisis. Para ello, se puede desarrollar una verificación de la calidad de los datos antes de ejecutar el modelado. A continuación, se describen los tipos de problemas que se pueden encontrar:

- Datos perdidos que incluyen valores vacíos.
- Errores de datos que suelen ser errores tipográficos al ingresar un nuevo registro
- Errores de mediciones que se introducen correctamente, pero se basan en un esquema de mediciones incorrecto.
- Incoherencias de codificación que suelen incluir unidades no estándar de medidas o valores incoherentes.
- Metadatos erróneos que incluyen errores entre el significado aparente de un campo incluido en un nombre o definición de campo.

1.2.1.3 Preparación de datos

La preparación de los datos es uno de los aspectos más importantes y que con frecuencia demanda más tiempo en la analítica de datos. Esta preparación suele variar dependiendo de la organización y sus objetivos, sin embargo, se listan las tareas más comunes:

De acuerdo con el manual CRISP-DM, la tarea de limpieza de datos implica observar más de cerca los problemas en los datos a incluir en el análisis. Para los datos perdidos, pueden excluirse los registros o reemplazarlos con un valor estimado. Los errores de datos pueden ser excluidos o utilizarse recursos lógicos para descubrir errores manuales. Las incoherencias de codificación pueden ser tratadas con un esquema de codificación para ser convertidos y sustituir los valores errados. Los metadatos ausentes o erróneos pueden ser examinados manualmente en los campos sospechosos para luego comprobar el significado correcto.

Hay casos en los que se requiere construir nuevos datos en base a los campos existentes. Para ello, la construcción de datos se basa en la derivación de atributos (columnas o características) y en la generación de registros (filas). Los softwares de modelamiento ofrecen múltiples formas de construir datos utilizando nodos de registro y operaciones con campos.

Es común contar con varios orígenes de datos para el mismo conjunto de análisis. Si estos datos contienen un identificador común, se puede fusionar utilizando este campo. Los métodos básicos para la integración es la fusión y la adición de datos. La fusión implica unir dos conjuntos de datos con registros similares, pero con atributos diferentes. Los datos se fusionan utilizando el mismo identificador clave en cada registro. Los datos resultantes aumentan las columnas. En cambio, la adición de datos implica integrar dos o más conjuntos de datos con atributos similares, pero con registros diferentes. Los datos se integran en función de los campos similares.

1.2.1.4 Modelado

En esta fase se incorporan las herramientas analíticas a los datos que se han preparado y los resultados arrojan posibles soluciones a los problemas planteados en la fase inicial de comprensión del negocio. Debido a la naturaleza de la organización, se puede optar por usar una gran variedad de técnicas de modelado. Por lo general, se utilizan más de un método para solucionar un problema desde diferentes puntos de vista.

Un paso importante antes de generar el modelo es tener en cuenta cómo se comprobarán los resultados del modelo. La primera parte para generar un diseño de comprobación global es describir los criterios de “bondad” de un modelo. La segunda parte es definir los datos en los que se comprobarán estos modelos. Siendo la bondad de un modelo calculado por la tasa de error de un modelo concreto o con criterios de facilidad de interpretación, distribución o tiempo de procesamiento necesario.

Al terminar de generar los modelos necesarios se pueden describir tres tipos de información que puede utilizarse para la toma de decisiones en la analítica de datos:

- Configuración de parámetros que incluye las notas que se han tomado sobre los parámetros que producen mejores resultados. Por ejemplo, los árboles de decisión se pueden controlar ajustando la profundidad del árbol, divisiones y otros ajustes.
- Los modelos reales producidos. La generación de modelos según los parámetros introducidos y evaluando los resultados obtenidos para volver a introducir nuevos parámetros.
- Descripciones de resultados de modelos, incluyendo problemas de datos y rendimiento que hayan ocurrido durante la ejecución del modelo y exploración de los resultados.

Una vez obtenido un conjunto de modelos iniciales, se puede determinar cuáles son los más precisos o eficaces para considerarse finales. Ello se puede describir con un método de valoración basado en criterios preestablecidos. En este punto se puede utilizar gráficos de evaluación o nodos para analizar la efectividad de los resultados

1.2.1.5 Evaluación

Luego de desarrollar los modelos técnicamente correctos y efectivos en función a los criterios establecidos en la analítica, se pueden obtener dos resultados. El primero engloba los modelos finales seleccionados en la fase anterior. El segundo son las conclusiones o interferencias obtenidas en los modelos y en el proceso de analítica. A estos se les describe como descubrimientos.

En esta etapa, se formaliza la evaluación en base a si los resultados obtenidos cumplen los criterios de rendimiento establecidos por la organización. Este paso requiere una clara comprensión de los objetivos de la organización, por lo que debe estar seguro de incluir factores de toma de decisiones en la evaluación.

Las metodologías eficaces de revisión suelen incluir tiempo para analizar los aciertos y errores del proceso de evaluación. La analítica de datos es igual, una parte fundamental del modelo CRISP-DM es aprender de la propia experiencia para que los proyectos de analítica de datos sean más efectivos. Es decir, el proceso de evaluación y modelamiento tiene una naturaleza cíclica que aumenta potencialmente el éxito de la analítica.

Posterior a la evaluación, se dispone de dos opciones:

- Continuar con la fase de desarrollo. La siguiente fase incorpora los resultados del modelo a la organización. Incluso si los resultados no han sido satisfactorios, se puede utilizar la fase final para elaborar un informe final para la organización.
- Volver y refinar o sustituir los modelos. Si se encuentra que los resultados son casi óptimos, pero no lo suficiente, se considera el desarrollo de otro modelado. Puede utilizar los conocimientos adquiridos en esta fase para refinar los modelos y reproducir mejores resultados.

En este punto, la decisión incluye la precisión y relevancia de los resultados del modelo. Si los resultados se adaptan a los objetivos de la analítica de datos, puede pasar a la fase de implementación.

1.2.1.6 Implementación

La implementación es el proceso que consiste en utilizar los nuevos conocimientos para implementar mejoras en la organización. Puede significar una integración formal como la aplicación del modelo de CRISP-DM que produce resultados erróneos que se leen en una base de datos. Además, la implementación puede significar que utilice los conocimientos adquiridos en la analítica de datos para aplicar modificaciones en la organización.

En general, la fase de implementación de CRISP-DM incluye dos tipos de actividades. La primera es la planificación y control de la implementación de los resultados. La segunda, la finalización de tareas de presentación como la producción de un informe final y la revisión del proyecto. Dependiendo de las necesidades de la organización, es posible completar una o varias fases de implementación.

En cuanto a la implementación en la organización, se debe dirigir información concreta a las personas adecuadas:

- A la gerencia quienes son los tomadores de decisión, se les debe brindar la información sobre las recomendaciones y modificaciones propuestas con breves explicaciones acerca de cómo afectan estos cambios. Asumiendo que aceptan los resultados de la analítica de datos, es necesario notificar a las personas que implementarán esas modificaciones.
- A los expertos de bases de datos. Las personas que mantienen las bases de datos de clientes, recursos y materiales, deben saber cómo se utiliza la información de las bases de datos y conocer qué atributos se pueden añadir a las bases de datos en proyectos futuros.

En la implementación de los resultados del modelo, el trabajo de analítica puede ser continuado. Es decir, el modelo se puede evaluar periódicamente para asegurar su eficacia y realizar mejoras continuas.

1.2.2 Investigación de operaciones

La naturaleza de la investigación de operaciones se desarrolla en torno al método científico. Es un proceso que comienza por la observación y formulación del problema, lo cual incluye el conocimiento y manejo de la información. Luego, es la construcción de un modelo, generalmente matemático, con el cual se intenta describir la esencia del problema real.

Una de las características más importantes de la investigación de operaciones es que busca una solución óptima para el problema descrito. Además, este problema puede incluir distintos

componentes de la organización. Es decir, esta herramienta permite encontrar la mejor solución en un problema complejo considerando los objetivos globales de la organización (Hillier & Lieberman, 2010).

1.2.2.1 Etapas de análisis

A continuación, se describen las seis etapas más resaltantes de un análisis de investigación de operaciones, la cual describe Hillier y Lieberman (2010):

A. Definición del problema de interés y recolección de datos relevantes

En la primera etapa se identifica la naturaleza del problema, se determinan los objetivos apropiados, las restricciones sobre lo que es posible hacer, las interrelaciones del área en estudio con otras áreas de la organización, los diferentes cursos de acción posibles, los límites de tiempo para tomar una decisión, entre otros.

Se debe identificar la política de la organización con la cual se va a medir los resultados de la evaluación. Por ello, la perspectiva debe mantenerse desde un punto de vista gerencial.

Uno de los aspectos más importantes a tomar en cuenta es la recolección de datos del problema. Para ello, se requiere de una base de datos implementada y correctamente mantenida para rastrear datos vitales del problema. En casos donde los datos son extensos, se tienen técnicas de extracción de datos, los cuales buscan describir la información para poder tomar decisiones adecuadas.

B. Formulación de un modelo matemático que represente el problema

Una vez definido el problema, la siguiente etapa consiste en reformularlo de manera conveniente para su análisis. La forma convencional es mediante la construcción de un modelo matemático que represente la esencia del problema.

En tal sentido, la representación idealizada de la búsqueda de solución se le llama función objetivo, la cual está expresada por variables de decisión. También se encuentran limitaciones de las variables expresadas casi siempre en desigualdades. Estas limitaciones han sido llamadas restricciones. Finalmente, las constantes encontradas en las ecuaciones que describen las restricciones y la función objetivo se llaman parámetros del modelo.

C. Desarrollo de un procedimiento basado en computadora para derivar una solución para el problema a partir del modelo

Al contar con la formulación del modelo matemático del problema en estudio, la siguiente etapa es desarrollar un procedimiento para obtener el resultado a través de herramientas informáticas. Uno de los términos utilizados en esta etapa es "satisfizar", lo cual refiere a satisfacer y optimizar de tal manera que la solución sea lo suficientemente buena para el problema que enfrenta (Eilon, 1972).

Posterior a ello, se desarrolla un análisis posóptimo para evaluar supuestos futuros y evaluar el comportamiento de los resultados. Parte de este análisis implica desarrollar un análisis de sensibilidad para determinar qué parámetros del modelo son críticos.

D. Prueba del modelo y mejoramiento de acuerdo con las necesidades

La presente fase tiene como objetivo la eliminación de errores del modelo que tienen el potencial de afectar los resultados considerablemente. Este tiende a ser una fase repetitiva de prueba y mejoramiento hasta llevar el modelo a un resultado aceptable.

En esta etapa se puede examinar nuevamente la formulación del problema y al compararla con la formulación del modelo se pueden identificar errores. Además, se puede ampliar la verificación del modelo al ingresar nuevos valores de los parámetros de entrada y/o de las variables de decisión. Con ello, se comprueba la adaptabilidad del modelo en base a los resultados obtenidos.

E. Preparación para la aplicación del modelo prescrito por la administración

En el caso de un modelo de uso repetitivo, las organizaciones optan por un sistema informático que integre programas y bases de datos para ejecutar el modelo cuando sea necesario. Este sistema interactivo brinda un soporte para la toma de decisiones de la administración al usar los nuevos datos y el modelo desarrollado previamente.

F. Implementación

La etapa de implementación aborda la entrega del modelo a la organización. Esta entrega incluye el asesoramiento de los desarrolladores del modelo y la verificación de que los resultados sean considerados en la operación. Para ello, se desarrollan capacitaciones en los niveles administrativos y operativos de la organización específicamente en las partes que interactúan en el modelo.

En el periodo de uso del modelo, es fundamental continuar con la retroalimentación del funcionamiento y si los supuestos instaurados en la idealización del problema se mantienen. En caso haya desviaciones significativas, el modelo debe ser revisado para evaluar modificaciones pertinentes.

1.2.2.2 Programación lineal

La programación lineal es la interpretación del problema en una estructura de variables lineal. Esto incluye que todas las funciones matemáticas tales como la función objetivo y restricciones deben ser funciones lineales. Además, la terminología “programación” incurre a la planeación de actividades para obtener un resultado óptimo. Es decir, la solución que alcance la meta descrita entre todas las alternativas factibles desarrolladas en el modelo.

Uno de los aspectos más importantes en la programación lineal son los supuestos del modelo. Desde una perspectiva de modelamiento, estas suposiciones se construyen de tal manera que los datos del modelo puedan ser representados en funciones lineales. A continuación, se describen los supuestos generales de la programación lineal, descrito por Hillier y Lieberman (2010):

A. Proporcionalidad

Este supuesto elimina cualquier exponente diferente de 1 para las variables en cualquier término de las funciones. Ya sea la función objetivo o en las restricciones funcionales del modelo de programación lineal. Para ello, se debe asumir que la contribución de las variables en la función objetivo debe mantenerse proporcional al aumento de la variable.

B. Aditividad

El supuesto establece que “cada función de un modelo de programación lineal (ya sea de la función objetivo o de las restricciones) es la suma de las contribuciones individuales de las actividades respectivas.

C. Divisibilidad

En un modelo de programación lineal las variables pueden tomar cualquier valor, incluso valores no enteros, con el objetivo de satisfacer las restricciones funcionales y de no negatividad. Por ello, estas variables no están limitadas a valores enteros y pueden tomar valores fraccionales.

D. Certidumbre

Este supuesto refiere a los parámetros del modelo. Para ello, se considera que los valores asignados a los parámetros son constantes conocidas. Si bien en problemas reales, este supuesto casi nunca se cumple, se requiere realizar un análisis de sensibilidad para identificar los parámetros sensibles. Es decir, aquellos que con un cambio mayor a un valor, demanda el cambio del modelo lineal.

1.2.2.3 Programación entera

Una limitación de la programación lineal es el supuesto de divisibilidad. Esta limitación impide la aplicación de la programación lineal en problemas que requieren valores enteros en las variables de decisión. Ante ello, se plantea la programación lineal entera la cual añade una restricción de indivisibilidad en todas las variables. Con ello, se limita a variables enteras que puedan satisfacer las demás restricciones y encontrar la solución óptima al problema.

Otra naturaleza en los problemas reales, son las variables de decisión las cuales tienen un estado binario. Los problemas de programación entera pueden tener este tipo de variables las cuales permiten desarrollar una restricción limitadas a dos posibles resultados: 1 o 0.

1.2.2.4 Optimización por metas

La programación u optimización por metas fue desarrollada por Charnes y Cooper en 1955 (Jones & Tamiz, 2016; Tamiz y otros autores, 1995). Esta programación tiene por objetivo alcanzar metas o niveles de logro para determinados objetivos. Tal como establece Klietnik y otros autores (2015), la planificación estratégica es fundamental para el éxito de una organización. Por lo tanto, la dirección de las organizaciones tiene que proporcionar procesos de toma de decisiones y, considerando que las decisiones tienen un enfoque multicriterio, el método más utilizado para resolver este tipo de problemas de decisión es la aplicación de la programación multiobjetivo o la optimización por metas.

Es posible representar matemáticamente la optimización por metas con una función objetivo lineal por medio de dos variables auxiliares positivas para cada objetivo (Winston, 2009):

- d_i^+ corresponde a la desviación positiva o variable de exceso en cuanto al cumplimiento de la meta i , $i = 1, \dots, n$.
- d_i^- corresponde a la desviación negativa o faltante sobre el nivel requerido para la meta i , $i = 1, \dots, n$.

Además, se cumple que $d_i^+ d_i^- = 0$ con i , $i = 1, \dots, n$. Es decir, no es posible que una variable de desviación positiva y una variable de desviación negativa pertenezcan de forma simultánea a la

solución básica, ya que en ningún caso se puede exceder y ser inferior a la meta. Dicho esto, el problema de optimización multiobjetivo se puede escribir de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} & \min \sum_{i=1}^n w_i (d_i^+ + d_i^-) \text{ sujeto a} \\ & Z_i(x) + d_i^- - d_i^+ = Z_{i,meta} \quad i = 1, \dots, n \\ & x \in X, d_i^+, d_i^- \geq 0, i = 1, \dots, n \end{aligned} \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde w_i es el nivel de ponderación de la meta i .

1.2.2.5 Distribución Física

Tal como describe (Anbuudayasankar y otros autores, 2014), la alta competencia del mercado ha obligado a las organizaciones a enfocarse en sus sistemas logísticos. La logística es un negocio de planificación para la gestión de materiales, servicios, sistemas informáticos y flujos de capital. La logística puede ser definida como “la provisión de bienes y servicios desde una cadena de suministro a varios puntos de demanda” (Eilon, 1977). El transporte efectivo de los bienes y servicios posee una gran variedad de retos en los tres niveles de planificación: estrategia, táctico y operacional. En el caso de la localización de la cadena de suministro es un problema de planificación estratégica, el problema del tamaño de la flota, carga mixta es táctico y, el ruteo y el cronograma de transporte es un problema operacional. A continuación, se describen los problemas clásicos de ruteo:

A. Problema del vendedor ambulante

El problema del vendedor ambulante (o TSP por sus siglas en inglés) es uno de los problemas de ruteo más usados. Este ejercicio está inspirado en el problema de un vendedor ambulante el cual debe visitar una serie de casas (nodos) y retornar al mismo punto de partida. El objetivo de dicho problema es minimizar la distancia recorrida. Se le puede definir como: “Dado determinado arreglo de N nodos y las distancias entre cada par de nodos, encontrar la ruta tal que cada nodo sea visitado exactamente una vez y que la distancia recorrida sea la mínima” (Ganesh y Narendran, 2005). A partir de este caso, se ha desarrollado un problema similar considerando a múltiples vendedores (mTSP por sus siglas en inglés).

B. Problema de ruta de vehículos

El problema de ruta de vehículos (VRP por sus siglas en inglés) es el mismo planteamiento que el mTSP, a excepción que el vendedor es reemplazado con un vehículo el cual cuenta con una capacidad de carga en cada vehículo especificado.

El VRP puede ser usado en distintos campos como en la logística industrial de la cadena de suministros, servicios postales, transporte público, recojo y disposición de residuos, entre otros. Tal como establece Anbuudayasankar, el reto es recolectar la información, analizarla y encontrar una solución óptima, la cual pueda ser implementada en la aplicación real.

C. Problema de localización

Tal como indica Robusté (2014), la localización de los recursos e instalaciones dentro de una red logística es una decisión estratégica que determina de forma sustancial la relación coste-

servicio del sistema logístico global. En esta planificación, se determinan el número, la localización y el tamaño de los centros de distribución que debe atender cierta región geográfica. Los factores que condicionan la localización de almacenes o plantas pueden agruparse en:

- Producción: ubicación cerca de la materia prima para reducir el costo de transporte de estas.
- Mercado: productos con sustitutos muy competitivos.
- Intervención de la administración: precio del suelo, ayuda de inversión, préstamos a bajo interés, entre otros.
- Naturaleza del negocio

Los criterios que decidirán la optimalidad de una localización se basarán en costos de:

- Proximidad a la demanda, a las materias primas o proveedores, a los potenciales trabajadores, a los servicios de suministro.
- Suelo, impuestos y construcción.
- Efectos legales y ambientales

En base a las condiciones del modelo, existen distintos métodos aplicables basados en la minimización de la suma de costos de transporte:

- 1) La localización estática con un centro de distribución se puede desarrollar con tres métodos, principalmente. El método gráfico de Weber el cual permite ubicar de manera gráfica de dos dimensiones evaluar la ubicación de un centro conociendo la demanda y el costo de transporte. El segundo método es el de centro de gravedad, considera la proporcionalidad de la demanda en un sistema de coordenadas X e Y. El tercer método incluye la iteración del cálculo del centro de gravedad considerando que las coordenadas X e Y no son independientes entre sí.
- 2) La localización estática con multicentros. Es un problema complejo porque los centros no son independientes, sino se encuentran restringidos a la demanda por atender y a la ubicación y capacidad de otros centros. Para ello, se puede desarrollar por medio de cuatro métodos: por agrupación (*cluster analysis*) el cual responde por criterios de cobertura, por un algoritmo iterativo si se conoce el número de centros que deben ubicarse, por un modelo analítico en base a una función objetivo con una filosofía de aproximaciones continuas, por programación matemática

1.2.2.6 AMPL

Tal como lo indica la página oficial (2021), AMPL es una herramienta computacional creada en Bell Labs en 1985. Es una herramienta sofisticada de modelamiento que soporta el ciclo completo del modelado: desarrollo, prueba, implementación y mantenimiento.

Cuenta con un lenguaje para el modelamiento que permite describir información a optimizar por medio de variables, objetivos y restricciones. Además, cuenta con un lenguaje de comandos para interactuar con modelos y analizar resultados y, un lenguaje de codificación para manipular información y para implementar modelos de optimización iterativos.

Una de las principales características en cuanto al potente lenguaje de modelamiento es que soporta gran cantidad de arreglos y arreglos de operadores. Los modelos de AMPL permiten usar arreglos de gran cantidad de tuplas, colecciones de arreglos indexados sobre arreglos. Lo que el manejo de gran cantidad de registros puede desarrollarse de una manera simple al

describirlo en el modelo. Además, cuenta con una sintaxis para expresiones aritméticas, lógicas y condicionales, operaciones de sumatorias y otras iteraciones. Otra de las características de AMPL es su capacidad de resolver problemas lineales y cuadráticos con variables continuas y enteras.

AMPL incluye robustos métodos de optimización (Fourer y otros autores, 1990). Para resolver problemas lineales y cuadráticos convexos para continos y enteros mixtos, cuenta con solucionadores como CPLEX (IBM), Gurobi y Xpress. Mientras que, para problemas no lineales y continuos, cuenta con: CONOPT, Ipopt, KNITRO, MINOS y SNOPT; y para problemas enteros mixtos: Bonmin, Couenne y KNITRO.

1.2.3 Evaluación de desempeño

Para conocer el desempeño de un proceso, debe ser evaluado bajo unas métricas. Estas pueden ser derivaciones de un diagrama de flujo o proceso, las cuales representen el estado actual del proceso. A continuación, se presentan herramientas usadas para este tipo de análisis:

1.2.3.1 Gráfica de Pareto

Vilfredo Pareto, fue un científico italiano del siglo XIX quien desarrolló su trabajo estadístico en analizar las desigualdades de los datos y propuso que la mayor parte de una actividad es la consecuencia de pocas causas. El concepto de Pareto establece que el 80% de los problemas de un proceso, son ocasionados por el 20% de los factores. Es decir, al identificarse el 20% (las pocas causas) que tienen el 80% de impacto en un proceso determinado, es posible reducir la falla de una manera eficiente. Si bien el porcentaje varía en cada situación, en la mayoría de los casos se encontrará la relación indicada.

Estos pocos factores que influyen en la mayoría de los problemas se pueden identificar con la gráfica de Pareto. Tal como se muestra en la Figura 2, es una gráfica de barras en el que la serie de datos es ordenada de manera decreciente según la frecuencia de datos. Esta gráfica tiene dos ejes verticales. En el eje primario, muestra el rango de datos de frecuencia. Mientras que, en el eje secundario, muestra el porcentaje acumulado de la frecuencia. Este porcentaje acumulado, identifica los pocos factores que requieren atención inmediata (Krajewski, Ritzman y Malhotra 2013).

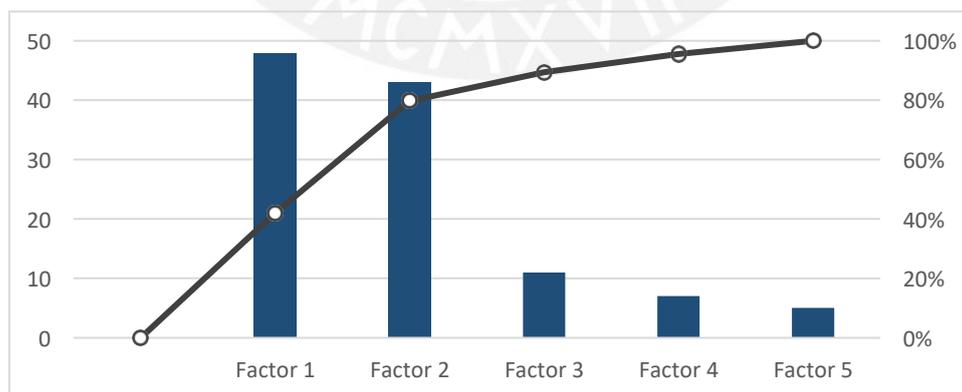


Figura 2 Formato de gráfico de Pareto
Fuente: Elaboración propia

1.2.3.2 Análisis Percentil

Ciertos arreglos de datos tienen una naturaleza de distribución anormal. Tal como evidencian diversos autores, la media aritmética no es adecuada para medir la tendencia central. Puede inducir una falsa percepción del tipo de distribución del arreglo de datos Bornmann y Mutz (2011).

Tal como lo describen Bornmann y Mutz, siendo A un arreglo de N registros, y siendo $n_A(k)$ el número de registros en el arreglo A que pertenecen a la Clase k . Entonces, el rango percentil para el arreglo A , es definido como:

$$R(A) = \sum_{k=1}^k x_k \frac{n_A(k)}{N} \quad \text{Ecuación 2}$$

Dicho esto, el valor de $R(A)$ depende no solo de A , sino de la referencia del arreglo S , la clase K usada y su valor. Este indicador no solo permite una gran flexibilidad sino gran subjetividad, puede adoptar un arreglo de referencia, clases o valores.

El análisis percentil desarrollado por Rousseau (2012), establece que este análisis es estrictamente congruente con los indicadores de desempeño promedio. Por lo tanto, si $R(A) > R(B)$, entonces $R(A') > R(B')$. Por lo tanto, al agregar o retirar un registro del arreglo, el desempeño calculado de $R(A')$ y $R(B')$ se verá afectado directamente por el registro modificado. Esta relación prueba que R es un indicador estrictamente congruente al desempeño promedio.

Además, Bornmann y Mutz propone el cálculo de un valor esperado (VE) que permite comparar el rendimiento de las de los valores obtenidos en un arreglo utilizando una única medida. La ventaja de este valor es que no sólo se abandona la media aritmética, sino que también se dan umbrales para el rendimiento mínimo, medio y máximo de los valores del registro.

En otras palabras, el VE de X es una media ponderada de los posibles valores que puede tomar X , mientras que cada valor se pondera por la frecuencia relativa, como aproximación que X asuma ese valor.

2. PROBLEMÁTICA

En el presente capítulo se aborda la problemática del sistema de respuesta a emergencias la cual se desarrolla por el Cuerpo General de Bomberos Voluntarios del Perú (CGBVP) y administrado por la Intendencia Nacional de Bomberos del Perú (INBP).

El problema se describe con la distribución de los recursos en las áreas de estudio, tanto las Unidades Básicas Operativas y los vehículos de emergencia. Esta información se basa en una consulta a la base de datos del Sistema de Gestión Operativa (SGO) de la Dirección de Informática del CGBVP, realizada el día 15 de junio de 2020.

Luego, se presenta el requerimiento de los tiempos de respuesta para incendios y emergencias médicas y la criticidad según las consecuencias de cada evento. Finalmente, se aborda el tiempo de respuesta recomendado por otros estándares internacionales.

2.1 CUERPO GENERAL DE BOMBEROS VOLUNTARIOS DEL PERÚ

El Cuerpo General de Bomberos del Perú (CGBVP) es un Organismo Público Descentralizado del Ministerio del Interior. Es la autoridad competente en materia de prevención, control y extinción de incendios y materiales peligrosos, donde la vida de las personas, el medio ambiente o la propiedad privada o pública estén en peligro (Poder Ejecutivo, 2016).

Desde la creación de las primeras estaciones en el año 1860, el CGBVP se ha expandido a lo largo del país en función a la iniciativa de los ciudadanos y municipios. Esta iniciativa está sustentada en las políticas de seguridad promulgadas por el estado para con sus ciudadanos y la necesidad del sector privado de proteger sus activos (Coz, 2010).

2.1.1 Visión

El MININTER (Plan Estratégico Sectorial Multianual (PESEM) 2016-2021 Actualizado, 2016) ha elaborado en el Plan Estratégico Sectorial Multianual (PESEM) 2016 – 2021. Este documento cuenta con una visión sectorial que ha sido elaborada mediante la identificación de variables estratégicas y el escenario apuesta del sector, el cual se describe como:

“Ciudadanía segura en la que prevalece la convivencia pacífica, dentro de un marco de confianza, tranquilidad y paz social, que contribuye a una mejor calidad de vida”.

2.1.2 Misión

De acuerdo con el Plan Operativo Institucional, elaborado por el CGBVP (2016), la misión institucional define la razón de ser de la entidad en el marco de las competencias y funciones establecidas en la ley de su creación y de acuerdo con los criterios de modernización del Estado y a la metodología recomendada. Esta misión es:

“El Cuerpo General de Bomberos Voluntarios del Perú es la autoridad competente en materia de prevención, control y extinción de incendios y materiales peligrosos, realiza acciones de atención de accidentes vehiculares y emergencias médicas, rescate y salvataje de vidas expuestas a peligro. Brinda sus servicios de manera voluntaria a toda la comunidad debido a su vocación de servicio, sensibilidad social, entrega y disciplina”.

2.1.3 Objetivos generales del CGBVP

Según lo establece el DL N°1260, el CGBVP tiene los siguientes objetivos:

- 1) Promover, realizar y coordinar acciones de prevención de incendios y accidentes en general, que puedan poner en peligro la vida de las personas, el medio ambiente y la propiedad privada o pública.
- 2) Desarrollar acciones que permitan combatir, controlar y extinguir incendios, rescatar y salvar personas expuestas a peligro por incendios o accidentes en general, atendiendo las emergencias derivadas de los mismos y prestando atención y asistencia oportuna en la medida de sus posibilidades
- 3) Participar en las acciones de primera respuesta en salvamento de las personas en caso de desastres de origen natural o antropogénico, bajo los lineamientos establecidos en el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y el Sistema Nacional de Seguridad Ciudadana.

2.1.4 Estrategias

De acuerdo con el PESEM, se expone la variable estratégica “Afectados y damnificados por la ocurrencia de emergencias”. Siendo el diagnóstico que “en el año 2015, el tiempo de respuesta promedio en minutos de atención de emergencia fue de 14 minutos en promedio”.

En dicho documento, cada variable estratégica cuenta con un escenario exploratorio, este se define como “un escenario el cual es el mayor cambio que se ha dado para la variable estratégica”. Para la variable descrita, el documento establece “en el año 2021, el tiempo de respuesta promedio en minutos de atención de emergencia será de 8 minutos”.

Sin embargo, el documento no registra un método para lograr dicha reducción del tiempo de atención de emergencias. Y, como se expone en el acápite 2.26 Presupuestos de Inversión, la administración de la Intendencia Nacional de Bomberos del Perú no ha ejecutado proyectos de implementación de nuevas estaciones que permitan reducir el tiempo de atención a emergencias. Además, tal como expone J. Coz en el libro titulado “Historia del Cuerpo de Bomberos Voluntarios del Perú al cierre del milenio” (2010), la creación de las estaciones de bomberos son el producto del esfuerzo de la organización de voluntarios y de otros actores interesados que finalmente, por disponibilidad de espacio, se consigna la ubicación de una estación de bomberos.

Por lo tanto, se evidencia que no existe una política de ubicación de estaciones de bomberos que permita recoger los objetivos del tiempo mínimo de atención a emergencias y las necesidades de la región de cobertura.

2.1.5 Objetivos estratégicos

Según expone el PESEM, se establece las siguientes acciones estratégicas:

- 1) Prevenir y atender riesgos, emergencias y desastres, brindando una respuesta eficaz y eficiente a la población, salvaguardando su medio de vida y el medio ambiente.
- 2) Integrar las centrales de emergencias del CGBVP, Policía Nacional del Perú (PNP) y Servicio de Atención Móvil de Urgencia (SAMU) mediante una central de emergencias única a nivel regional y nacional.
- 3) Implementar Centros de Operaciones de Emergencias (COEM) del Sector Interior que permita efectivizar las coordinaciones intra e intersectoriales.

2.1.6 Organización

De acuerdo con lo establecido por el Reglamento Interno de Funcionamiento, elaborado por el CGBVP (2017), según el DL N°1260, la organización del CGBVP se compone por:

1) Comando Nacional

El Comando Nacional tiene sede en la Capital de la República y sus disposiciones son de cumplimiento obligatorio para los bomberos, sin perjuicio de las atribuciones de dirección del Comandante General. Lo conforman:

- a) Dirección del Comando Nacional
Está presidido por el Comandante General. Las resoluciones, directivas y demás documentos que expida son de estricto cumplimiento para todos los órganos dependientes del Comando Nacional y miembros del CGBVP.
- b) Órganos de Línea
Está compuesto por la Dirección General de Operaciones, Dirección General de Voluntariado, Dirección General de Formación Académica, Dirección General de Prevención, Investigación y Desarrollo.
- c) Órganos de Asesoramiento
Está compuesto por la Dirección General de Gestión Institucional, Dirección de Asesoría Jurídica, Dirección de Imagen Institucional.

2) Órganos Autónomos

- a) Consejo Nacional de Disciplina
Es el órgano encargado de la administración de la administración de justicia del CGBVP.
- b) Inspectoría General
Es el órgano encargado de programar y ejecutar las acciones de control interno relacionadas con el correcto uso de los recursos de la institución, la correcta aplicación de los reglamentos, procedimientos y normas del CGBVP.

3) Órganos Desconcentrados

Son instancias del CGBVP que cumplen las acciones de operación y coordinación.

- a) Comandante Territorial
Son los jefes operativos que dependen de la Vice Comandancia General. Tienen por misión dirigir, liderar y comandar emergencias grandes y/ desastres naturales.
- b) Comandancia Departamental (CD)
Son órganos operativos del CGBV y están distribuidas según una geografía territorial. Tienen por misión cumplir los objetivos y fines institucionales en el ámbito de su jurisdicción, a través de sus brigadas y Unidades Básicas Operativas. Cada CD puede contar con un máximo de 6 brigadas y un máximo de 20 UBO. Cada brigada puede contar entre 3 y 6 UBO.
- c) Unidades Básicas Operativas (UBO)
Las UBO agrupan a los bomberos voluntarios. Se pueden clasificar como Compañía de Bomberos o Estación de Bomberos.
- d) De las Elecciones
Es el órgano asignado a velar por el proceso electoral del Comandante General.

En cuanto a Lima Metropolitana y Callao, los Órganos Desconcentrados operan bajo la dependencia del Comando Nacional. Las UBO están distribuidas según se muestra en la Figura 3.

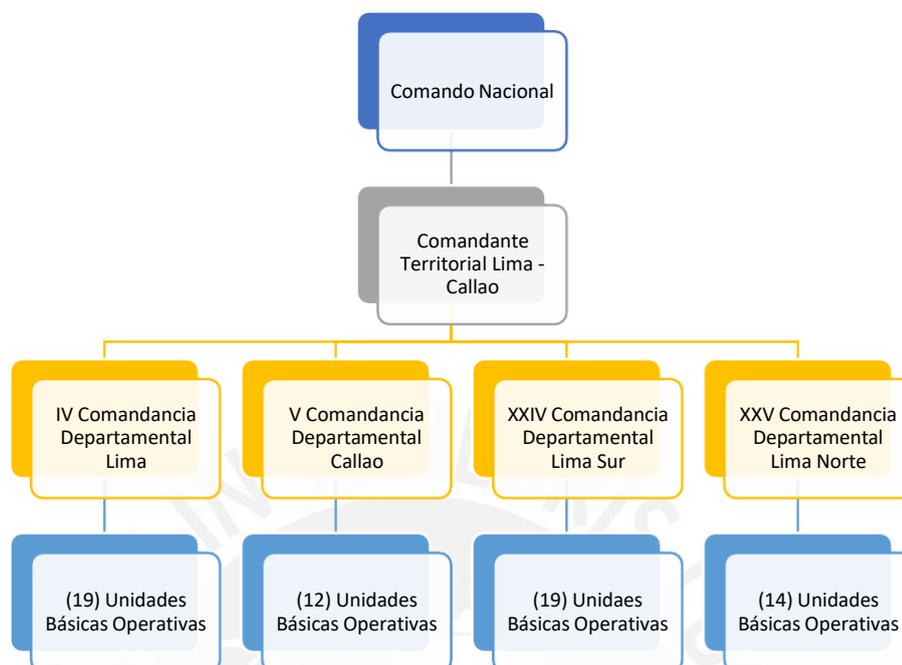


Figura 3 Organigrama operacional del CGBVP en Lima y Callao
 Extraído de: http://www.bomberosperu.gob.pe/portal/net_comando_comandancia.aspx

2.1.7 Recursos

Las UBO cuentan con ciertas unidades las cuales han sido asignadas por la Comandancia Departamental a la que pertenecen. De acuerdo con los registros de la Dirección de Comunicaciones, el CGBVP cuenta con las siguientes unidades:

1) Unidades para atención de emergencias médicas

Asignadas para cualquier emergencia donde la vida de una persona se encuentre en peligro. Dentro de esta categoría, se tienen los siguientes tipos de unidades:

- a) Ambulancia
 Unidades de espacio reducido con equipamiento limitado para el traslado inmediato de un paciente.
- b) Médica
 Unidades de gran espacio con equipamiento especializado para dar soporte de vida durante el traslado de un paciente.
- c) SAMU
 Unidades bajo la jurisdicción del Ministerio de Salud que integran la flota de unidades médicas a disposición del CGBVP.

2) Unidades para atención de rescate

Asignadas para emergencias donde una persona se encuentra atrapada y requiere el movimiento de una masa por medio de equipo especializado. Dentro de esta categoría, se tienen los siguientes tipos de unidades:

- a) Rescate
Unidades para labores de rescate de accidentes de vehículos livianos y pesados, en altura, en ascensor, en espacios confinados, zanjas y masas de agua.
 - b) Rescate Ligera
Unidades para labores de rescate en accidentes vehiculares en vehículos livianos, en altura y en ascensor.
- 3) Unidades para atención de incendios
- Asignadas para emergencias donde se requiere controlar y extinguir un incendio. Las unidades están equipadas con un sistema de bombeo y una cisterna de agua.
- 4) Unidades especiales
- a) Aéreas
Unidades con alcance para atender emergencias de altura. Estas pueden ser:
 - i) Escala. Unidades con escalera telescópica con una capacidad reducida de bombeo de agua.
 - ii) Snorkel. Unidades con brazo articulado con una capacidad reducida de bombeo de agua.
 - iii) Plataforma. Unidades con brazo telescópico con mayor capacidad de bombeo de agua.
 - b) Unidades MATPEL
Asignadas para emergencias con materiales peligrosos donde se requiere personal y equipamiento especializado.
 - c) Unidades eléctricas
Asignadas para emergencias que requieran atención especializada por riesgo eléctrico.
 - d) Unidades Puesto de Comando
Asignadas para emergencias de gran magnitud. Cuentan con equipo especializado para la gestión de emergencias.
 - e) Unidades de Cisterna
Asignadas para incendios con suministro de agua limitado en la red de hidrantes. También son asignadas cuando hay un incendio de gran magnitud.

2.2 INTENDENCIA NACIONAL DE BOMBEROS DEL PERÚ

La Intendencia Nacional de Bomberos del Perú (INBP) es creada bajo el DL N°1260 en el año 2016. Previamente a este año, la administración de los recursos era administrada por el mismo CGBVP. En tal sentido, la INBP, ejerce rectoría en materia de prevención, control y extinción de incendios, atención de accidentes, rescate urbano y apoyo en incidentes con materiales peligrosos.

2.2.1 Política institucional

La política institucional de la INBP que establece en el Plan Estratégico Institucional 2018 – 2020, es “Una gestión institucional orientada a resultados al servicio del ciudadano”.

En cuanto a los lineamientos de la política como entidad pública en planeamiento, la INBP desarrolla una política de planeamiento la cual se basa en establecer objetivos institucionales claros, medibles, alcanzables y acordes con las Políticas Nacionales y Sectoriales. Entre ellas se listan las más resaltantes para la presente investigación:

- Establecer la “Misión” (razón de ser) de la entidad y conocer la demanda ciudadana a la que debe responder en correspondencia con esa misión.
- Determinar los bienes y servicios que le corresponde producir para satisfacer la demanda.
- Determinar el tamaño de las “brechas” de satisfacción, cobertura y calidad entre la “demanda ciudadana” y la “oferta pública o privada”.
- Identificar y estudiar las fortalezas y debilidades internas de la entidad.
- Analizar y elegir las alternativas de acción más adecuadas para el cierre de las brechas identificadas.
- Diseñar las “Estrategias” para alcanzar los resultados e impactos que se establecen para los próximos años.
- Detallar y programar las actividades o tareas necesarias para alcanzar los resultados e impactos.
- Diseñar los indicadores cuantitativos y cualitativos de producto que servirán para analizar el desempeño en el logro de los resultados e impactos.

2.2.2 Misión

La misión que establece la INBP, refleja los dos principios fundamentales de la institución, rol rector de los entes que intervienen en incendios y emergencias y su responsabilidad de asistir al CGBVP:

“Rectoría y soporte logístico y administrativo en el marco del sistema de seguridad ciudadana en materia de prevención, control y extinción de incendios, atención de accidentes, rescate urbano y apoyo en incidentes con materiales peligrosos a los actores involucrados y Cuerpo General de Bomberos Voluntarios del Perú actuando con eficacia, eficiencia oportunidad y transparencia.”

2.2.3 Funciones

De acuerdo con el DL N°1260, las funciones que ejerce la INBP son:

- 1) Proponer, al Ministerio del Interior, la Política Nacional del servicio público de Bomberos.
- 2) Proporcionar, conforme al presupuesto institucional, los bienes y servicios necesarios que requiera el CGBVP para el cumplimiento de sus funciones establecidas en el presente decreto legislativo, entre otras que requiera la participación de los integrantes del CGBVP.
- 3) Coordinar con el CGBVP la elaboración del presupuesto del pliego para cubrir los requerimientos de bienes y servicios.
- 4) Aprobar, a propuesta del CGBVP, las normas técnicas, sobre control y extinción de incendios y rescate urbano.
- 5) Determinar y uniformizar, a propuesta del CGBVP, los criterios técnicos de los procedimientos, equipos, indumentaria y especificaciones técnicas que se utilizan para la prestación del servicio público de Bomberos.
- 6) Administrar los bienes y servicios otorgados al CGBVP.

- 7) Formular advertencias, recomendaciones, recordatorios de sus deberes legales a las entidades públicas o privadas, para la adopción de medidas preventivas o correctivas, según corresponda.
- 8) Participar en la ejecución de la Política Nacional de Seguridad Ciudadana de acuerdo con sus competencias y colabora en su preservación.
- 9) Aprobar el Reglamento sobre la administración de bienes y servicios otorgados al CGBVP.

2.2.4 Objetivos estratégicos

Los objetivos estratégicos institucionales para el periodo 2018-2020 que han sido establecidos por el INBP, están orientados a cumplir con las políticas descritas y las funciones establecidas en el DL N°1260. A continuación, se listan los objetivos estratégicos de interés para la presente investigación:

- 1) Fortalecer un apropiado marco jurídico en materia de prevención, control y extinción de incendios, atención de accidentes, rescate urbano y apoyo en incidentes con materiales peligrosos en beneficio de la sociedad.
- 2) Optimizar la provisión de recursos estratégicos para el CGBVP.

2.2.5 Acciones estratégicas

Las acciones estratégicas relevantes a la presente investigación que cuenta la INBP, establecidas por el DL N°1260, son:

- 1) Plataforma de comunicaciones para la provisión de recursos estratégicos efectiva y garantizadas para el CGBVP.
- 2) Sistemas de control y fiscalización implementados y otros proveídos al CGBVP.
- 3) Alianzas estratégicas para la provisión de recursos estratégicos implementadas que favorezcan al CGBVP.

2.2.6 Presupuestos de inversión

A lo largo de los últimos 10 años, tal como se registra en el portal de Transparencia Económica del Ministerio de Economía y Finanzas (2020), tanto el CGBVP y el INBP han destinado el presupuesto anual de prevención y atención a emergencias en el mantenimiento y adquisición de equipamiento. En este sentido, la administración del servicio de respuesta a emergencias identificó la necesidad de mejorar la infraestructura de las estaciones de bomberos con el objetivo de mejorar la capacidad de respuesta en los años 2015, 2016 y 2017.

La Tabla 1 muestra el presupuesto asignado para esta mejora, donde se alcanzó un presupuesto de S/ 665,027.00 para la implementación de nuevas estaciones y S/ 356,557.00 para la remodelación de las estaciones existentes.

Tabla 1 Presupuesto anual asignado para la implementación de nuevas estaciones y remodelación de las existentes (monto en soles)

Año	Presupuesto anual en prevención y atención de incendios, emergencias médicas, rescates y otros	Presupuesto asignado a la implementación de nuevas estaciones	Presupuesto asignado a la remodelación de estaciones
2021	77,075,110.00	0.00	0.00
2020	73,472,338.00	0.00	0.00
2019	107,114,460.00	0.00	0.00
2018	86,091,463.00	0.00	0.00
2017	72,633,043.00	479,813.00	140,755.00
2016	36,217,493.00	161,214.00	215,802.00
2015	55,977,943.00	24,000.00	0.00
2014	94,703,911.00	0.00	0.00
2013	115,620,351.00	0.00	0.00
2012	84,563,931.00	0.00	0.00
TOTAL	803,470,043.00	665,027.00	356,557.00

Fuente: Elaboración propia. En base al Ministerio de Economía y Finanzas (2020).

Dicho esto, en el periodo de 2015 a 2017 la administración del servicio de respuesta a emergencias asignó un presupuesto para mejorar la infraestructura de 20 estaciones de bomberos por un total de S/ 1,021,584.00. A continuación, se listan los proyectos de inversión con los montos finales asignados a cada uno. De esta lista, se observan dos montos atípicos de aproximadamente S/ 240,000.00 para la construcción de las estaciones N° 55 y N° 37. Excluyendo estos presupuestos atípicos, se observa que el presupuesto promedio asignado es aproximadamente S/ 30,000.00 para los proyectos de implementación y remodelación.

Tabla 2 Presupuestos de inversión para proyectos de estaciones de bomberos, 2015 – 2017 (monto en soles)

Año	Proyecto	Monto (en soles)
2017	Construcción del local para el cuartel de la Compañía de Bomberos Brigadier CBP Héctor R. Lanegra Romero N° 55 de Ferreñafe	241,605.00
2017	Construcción del cuartel de la Compañía de Bomberos N° 37 Nuestra Señora de las Mercedes	238,208.00
2017	Mejoramiento de la cobertura de la Compañía de Bomberos N°117 Bellavista - Sullana - Piura	3,424.00
2017	Ampliación y mejoramiento de la cobertura de la Compañía de Bomberos N° 87 Aguas Verdes - Tumbes	14,101.00
2017	Ampliación y mejoramiento de la cobertura de la Compañía de Bomberos N°51 Chulucanas - Piura	17,950.00

2017	Ampliación y mejoramiento de la cobertura de la Compañía de Bomberos N° 151 Morropón - Piura	11,457.00
2017	Rehabilitación y mejoramiento de la infraestructura de la Compañía de Bomberos N° 90 - Tupac Amaru Inca	4,208.00
2017	Rehabilitación y mejoramiento de la infraestructura de la Compañía de Bomberos N°82 - Nazca	1,202.00
2017	Rehabilitación y mejoramiento de la infraestructura de la Compañía de Bomberos N°38 - Salvadora Chíncha	1,638.00
2017	Ampliación y mejoramiento de la cobertura de la Compañía de Bomberos N° 89 Zarumilla - Tumbes	11,457.00
2017	Ampliación y mejoramiento de la cobertura de la Compañía de Bomberos N° 67 Talara - Piura	1,880.00
2017	Rehabilitación y mejoramiento de la infraestructura de la Compañía de Bomberos N° 171 - Ofelia Banchemo de Datorre	5,958.00
2017	Rehabilitación y mejoramiento de la infraestructura de la Compañía de Bomberos N° 152 - Marcona	12,136.00
2015 - 2017	Mejoramiento e implementación de la Compañía de Bomberos N° 69 - Manuel Ugarte y Moscoso, distrito de Jaén, provincia de Jaén - Cajamarca	76,312.00
2016 - 2017	Mejoramiento del servicio de atención de emergencias de la Compañía de Bomberos N° 147 del distrito de Satipo, provincia de Satipo - Junín	55,526.00
2017	Mejoramiento de la prestación de servicios de la Compañía de Bomberos Santiago Antúnez de Mayolo N° 84, distrito de Huaraz, provincia de Huaraz - región Ancash	99,224.00
2016 - 2017	Mejoramiento e implementación de la Compañía de Bomberos N° 148 del distrito de Curahuasi, provincia de Abancay - Apurímac	57,030.00
2016 - 2017	Mejoramiento de los servicios de atención en emergencias de la Compañía de Bomberos N° 153 de Andahuaylas, provincia de Andahuaylas - Apurímac	69,224.00
2016 - 2017	Instalación del servicio de atención contra incendio y emergencias de la Compañía de Bomberos Voluntarios de Pichanaqui, distrito de Pichanaqui - Chanchamayo - Junín	79,544.00
2016	Mejoramiento de la prestación de servicios de la Compañía de Bomberos N° 162 de la ciudad de Rioja, distrito de Rioja, provincia de Rioja - San Martín	19,500.00

Fuente: Elaboración propia. En base al Ministerio de Economía y Finanzas (2020).

2.3 DISTRIBUCIÓN ACTUAL DE RECURSOS

En el presente acápite, se pretende exponer la distribución actual de las Unidades Básicas Operativas (UBO) y los vehículos básicos y especiales de emergencia en Lima Metropolitana y Callao. Los vehículos básicos son aquellos vehículos que cuentan con el equipamiento necesario para atender un incendio (vehículo autobomba), un accidente que requiere un rescate (vehículo de rescate) y una emergencia médica (ambulancia o unidad médica).

Para ello, se ha sectorizado la región de análisis en los sectores: Lima Centro, Lima Sur, Lima Este, Lima Norte y Callao (INEI, 2014). En cuanto a la distribución de las UBO, la Figura 4 muestra la ubicación de las UBO distribuidas en estos sectores.

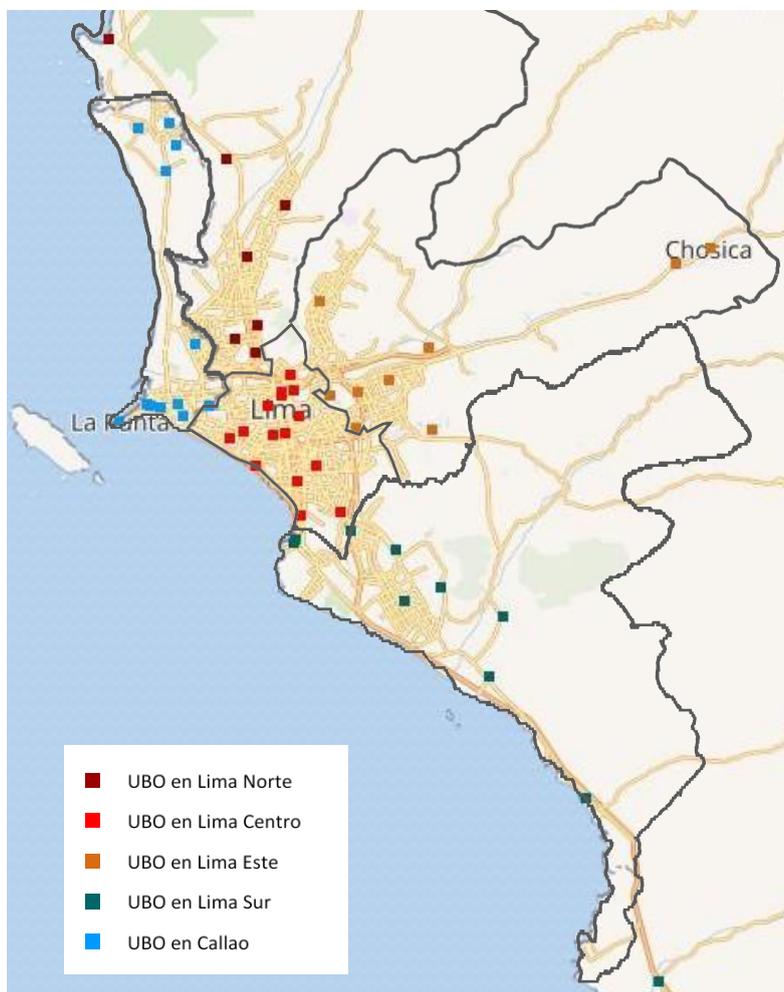


Figura 4. Ubicación de las UBO distribuidas en sectores de Lima Metropolitana y Callao
Fuente: Elaboración propia. En base al registro del CGBVP (2020).

Al evaluar la distribución de los vehículos básicos de emergencia en las UBO ubicados en Lima Norte y Lima Centro, según la información provista del Sistema de Gestión Operativa (CGBVP, 2010) del CGBVP, se observa que cuentan con al menos un vehículo asignado y operativo (ver Anexo A). En Lima Sur, todas las UBO cuentan con al menos una vehículo autobomba y unidad médica. Sin embargo, al menos el 80% de las UBO cuentan con un vehículo de rescate asignado. En Lima Este, sólo el 89% de las UBO cuentan con un vehículo básico asignado (autobomba, rescate y unidad médica). Y, en la provincia del Callao todas las UBO cuentan con al menos un vehículo autobomba, el 92% cuenta con al menos una unidad médica y sólo el 50% cuenta con un vehículo de rescate. La Figura 5, muestra la capacidad de las UBO con vehículos básicas de emergencia en los sectores descritos.



Figura 5. Capacidad de las UBO con unidades básicas según sectores de Lima Metropolitana y Callao
Fuente: Elaboración propia. En base al registro del CGBVP (2020)

Con respecto a las unidades especiales, se observa una distribución heterogénea en los sectores establecidos (Ver Anexo B). En la provincia del Callao, sólo el 50% de las UBO de este sector cuentan con un total de 9 unidades especiales. En Lima Norte, sólo el 29% de las UBO concentran con un total de 4 unidades especiales. En Lima Este, el 33% de las UBO cuentan con un total de 6 unidades especiales. En Lima Sur, el 50% de las UBO disponen de un total de 6 unidades especiales. El sector con mayor cantidad de unidades especiales es Lima Centro. El 87% de las UBO cuenta con al menos una unidad. Estas UBO, tienen un total de 21 unidades especiales. La Figura 6, muestra la distribución de las unidades especiales en los sectores descritos.

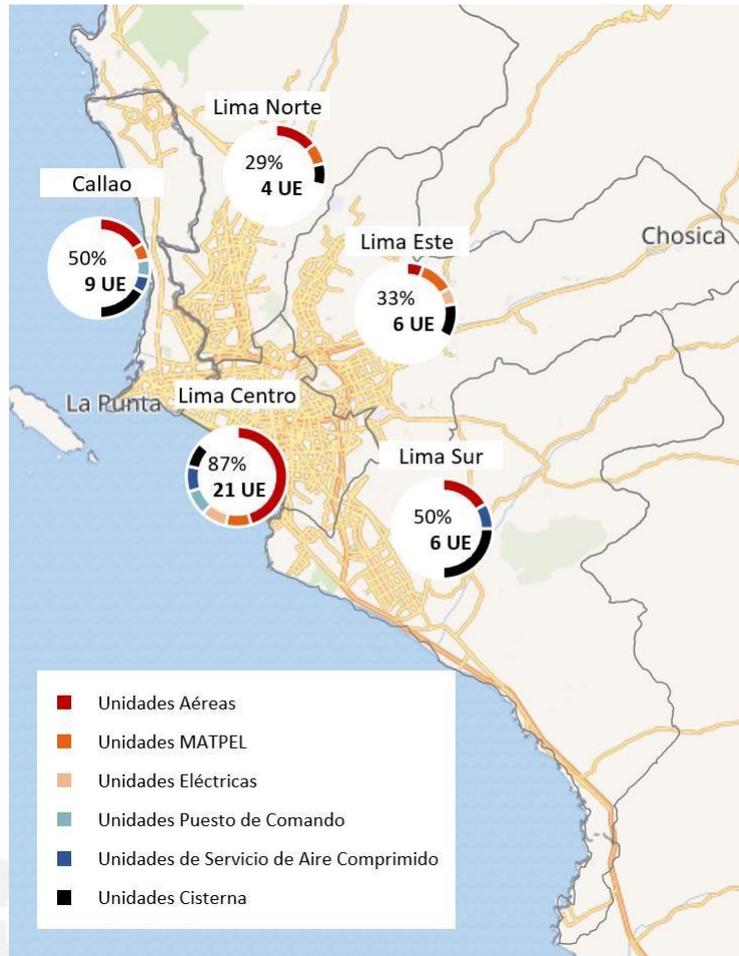


Figura 6. Capacidad de las UBO con unidades especiales según sectores de Lima Metropolitana y Callao Fuente: Elaboración propia. En base al registro del CGBVP (2020).

2.4 TIEMPO DE RESPUESTA

La responsabilidad fundamental del servicio de respuesta a emergencias es brindar una respuesta efectiva en el menor tiempo posible luego de reportarse una emergencia. El tiempo es un factor crítico para la supervivencia de una víctima y para la reducción de las pérdidas materiales durante un incendio. Tal como establece Johnson y Price (2008), a continuación, se describe las características del tiempo de respuesta según el tipo de emergencia.

2.4.1 Tiempo de respuesta en incendios

El escenario crítico durante un incendio es el fenómeno llamado *flashover*. Tal como lo define Custer (2008), es un fenómeno que ocurre durante el crecimiento de un incendio el cual al alcanzar aproximadamente 600°C y la radiación a objetos no incendiados es aproximadamente 20 kW/m². Por lo tanto, en estas condiciones puede llegar a propagar el fuego a todos los objetos de una habitación. En base a ello, (Johnson & Price, 2008) desarrollan una estimación del tiempo de cada elemento de la respuesta ante un incendio y lo compara en base al tiempo del *flashover*.

Durante la etapa previa al *flashover*, los bomberos pueden desarrollar actividades iniciales de búsqueda y rescate de víctimas por el incendio. Sin embargo, luego de ocurrir este fenómeno, la temperatura del incendio es más elevada y el humo se mueve con mayor velocidad. Por lo

tanto, estas labores iniciales pueden ser más complejas considerando que la estructura puede verse afectada. Asimismo, se requiere una mayor cantidad de bomberos para las actividades secundarias de extinción de incendio. Cabe resaltar que, el tiempo hasta el *flashover* puede prolongarse por medio del uso de rociadores automáticos.

Dependiendo del tamaño de la habitación, los objetos contenidos en ella y la cantidad de oxígeno disponible, un incendio puede alcanzar el *flashover* en un intervalo de tiempo de 2 a 10 minutos. Siendo la mayor frecuencia registrada entre 4 y 10 minutos. El crecimiento del incendio es exponencial, es decir, el incendio se duplica en intensidad y temperatura por cada segundo en que se propaga libremente a otros objetos. Este comportamiento se grafica en la Figura 7.

Cabe resaltar que, la detección del incendio y la alerta a la central de emergencias es un tiempo que no es posible controlar. Sin embargo, a partir del despacho de la unidad, el tiempo de viaje y la instalación de la unidad de respuesta, sí es posible controlar.

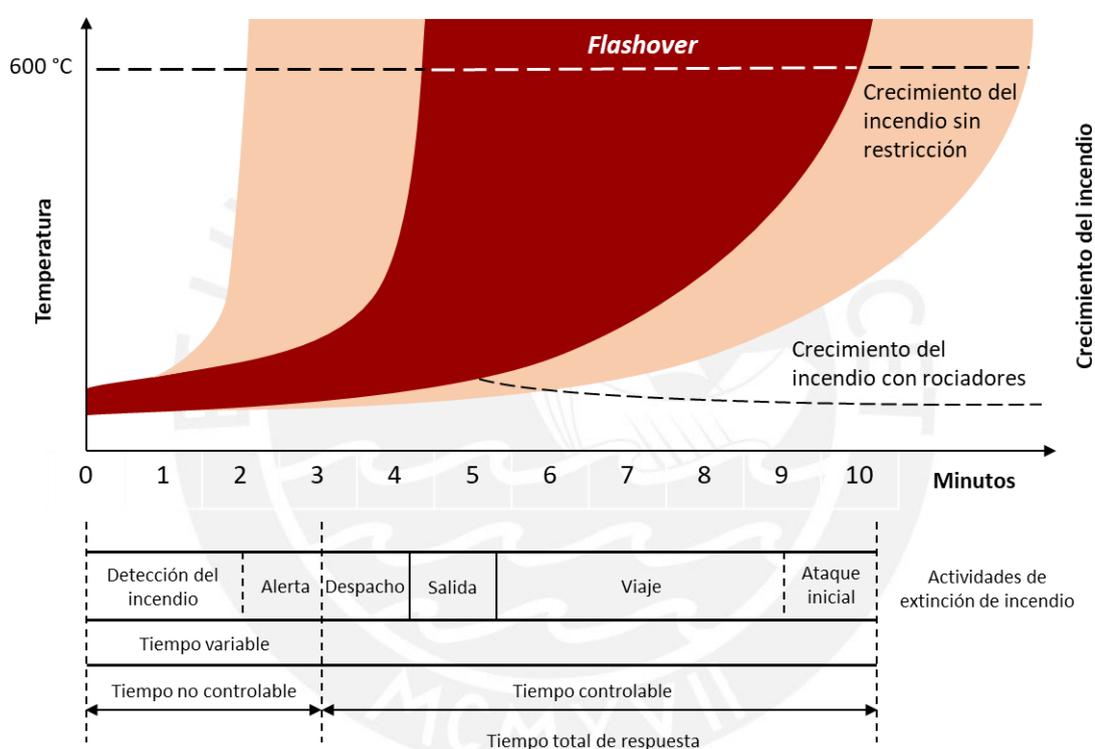


Figura 7 Crecimiento de incendio sobre el tiempo, desde el inicio del incendio hasta su extinción. Extraído de “GIS for Fire Station Locations and Response Protocol” (2008), ESRI

2.4.2 Tiempo de respuesta en emergencias médicas

El tiempo de llegada para cualquier tipo de emergencias médicas también es un factor importante. Tal como concluye Pons y otros autores (2005), en cualquier tipo de emergencia médica existe una mayor probabilidad de supervivencia para casos en los que el tiempo de respuesta ha sido menor a 4 minutos. Asimismo, tal como establece American Heart Association (2015), el caso más crítico es un paro cardíaco que requiere una reanimación cardiopulmonar (RCP). La Figura 8, muestra la probabilidad de supervivencia para un adulto el cual ha sufrido un ataque cardíaco y se le aplicó RCP.

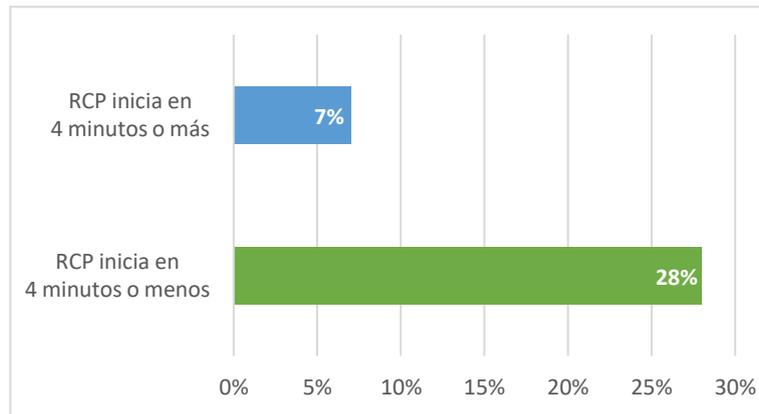


Figura 8 Probabilidad de supervivencia en víctimas que sufrieron un ataque cardiaco cuando se desarrolló RCP.

Extraído de: *"Heartsaver Manual"*, American Heart Association, (2015).

2.4.3 Estándares internacionales

El estándar NFPA 1720 (2020), contiene recomendaciones para la organización y desarrollo de operaciones contra incendios, emergencias médicas e incidentes especiales atendidos por departamentos de bomberos voluntarios. El estándar acuña las siguientes definiciones para establecer el tiempo de atención a una emergencia:

- 1) Tiempo de despacho
Es el tiempo transcurrido desde la central de emergencias recibe la llamada del incidente y recopila la información suficiente para decidir qué unidades despachar. El tiempo de despacho es contado hasta que las unidades requeridas fueron notificadas de la emergencia.
- 2) Tiempo de salida
Es el tiempo transcurrido desde la aceptación de la notificación del incidente hasta el momento en el que el vehículo de emergencia asignado sale de la estación.
- 3) Tiempo de viaje
Es el intervalo de tiempo que comienza cuando una unidad se dirige al incidente y termina cuando llega a la escena.
- 4) Tiempo de ataque inicial
Es el intervalo de tiempo que comienza cuando una unidad arriba a la escena hasta que inicia el ataque inicial o intervención para el control del incidente.
- 5) Tiempo total de respuesta
Es el tiempo transcurrido desde el despacho de la unidad hasta el inicio del ataque inicial o intervención para control del incidente.

Además, el estándar recomienda que el tiempo de aceptación de las unidades debe ser menos de 90 segundos para incendios y operaciones especiales. Mientras que, para emergencias médicas el tiempo debe ser de 60 segundos. Todas estas ocurrencias, al menos el 90% de las veces.

En cuanto al tiempo de respuesta, establece un criterio basado en la densidad poblacional para determinar el tiempo de respuesta de las unidades de emergencia. La Tabla 3, muestra los tiempos de respuesta para cada zona según la densidad poblacional.

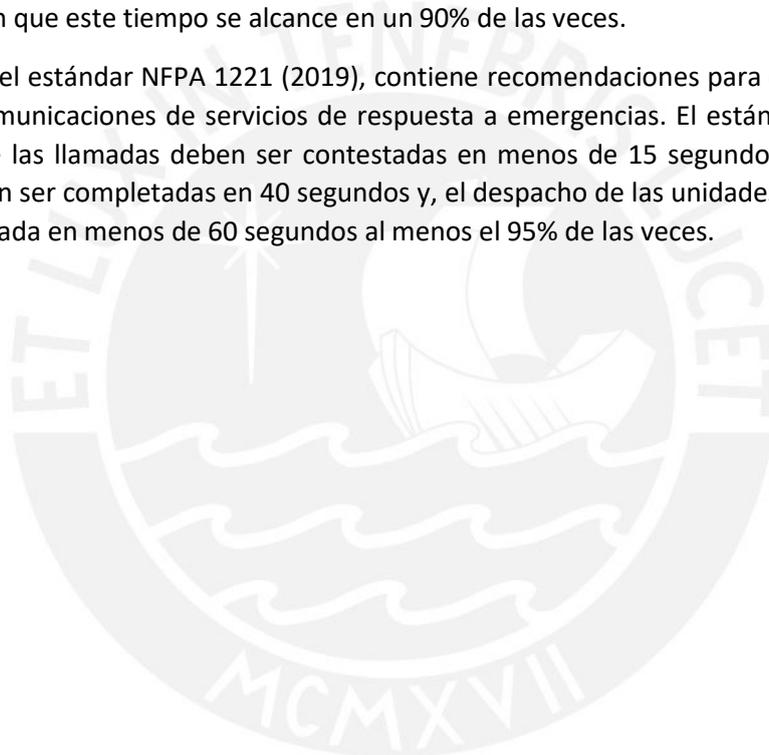
Tabla 3 Tiempo de respuesta según la demografía

Área de demanda	Demografía	Tiempo de respuesta (minutos)	Objetivo (%)
Área urbana	> 385 personas/ km ²	9	90
Área suburbana	195 - 385 personas/ km ²	10	80
Área rural	< 195 personas/ km ²	14	80
Área remota	Distancia de viaje > 13 km	Depende de la distancia de viaje	90

Fuente: Elaboración Propia. En base a: NFPA 1720 “Standard for the Organization and Deployment of Fire Suppression Operations, Emergency Medical Operations, and Special Operations to the Public by Volunteer Fire Departments”

Cabe resaltar que, el estándar recomienda el análisis para riesgos especiales. Este análisis debe determinar una clasificación y un tiempo de respuesta para cada clase, sin embargo, el objetivo se mantiene en que este tiempo se alcance en un 90% de las veces.

Por otro lado, el estándar NFPA 1221 (2019), contiene recomendaciones para el desarrollo del sistema de comunicaciones de servicios de respuesta a emergencias. El estándar recomienda que el 95% de las llamadas deben ser contestadas en menos de 15 segundos, el 99% de las llamadas deben ser completadas en 40 segundos y, el despacho de las unidades de emergencia debe ser realizada en menos de 60 segundos al menos el 95% de las veces.



3. DIAGNÓSTICO

A continuación, se desarrolla el diagnóstico del problema en función a dos características. La primera, es la evolución urbana y el crecimiento de la demanda de emergencias atendidas por el CGBVP en Lima y Callao en la ventana de tiempo del 2014 al 2020. La segunda, es el comportamiento actual de la atención del CGBVP en el espacio geográfico de Lima y Callao.

3.1 EVOLUCIÓN URBANA Y DEL SERVICIO DE RESPUESTA A EMERGENCIAS

3.1.1 Crecimiento del parque automotor

Lima y Callao presentan uno de los mayores crecimientos del parque automotor en el Perú. Tal como registra SUNARP (2020), en los últimos 9 años Lima y Callao han tenido un crecimiento anual aproximado de 5.2% (ver Figura 9). Esta situación, conlleva a una ciudad caótica con una gran congestión vehicular. Este concepto es confirmado por la compañía TomTom (2020) la cual ubica a la ciudad de Lima en el puesto 7 a nivel mundial y puesto 2 en Sudamérica del ranking de ciudades con más tráfico del 2019.

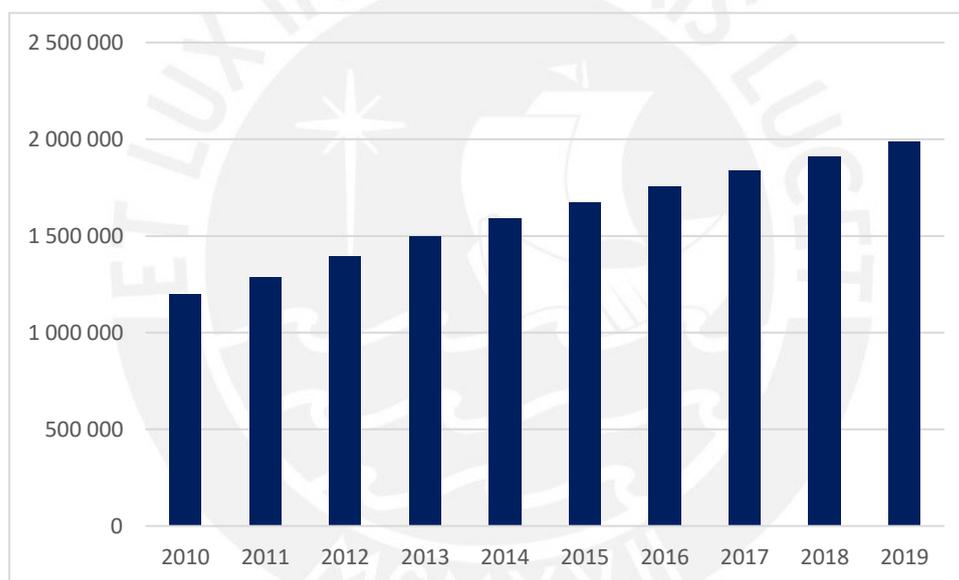


Figura 9 Parque automotor en circulación en Lima y Callao

Fuente: Elaboración propia con datos de Superintendencia Nacional de los Registros Públicos

3.1.2 Velocidad promedio de viaje en Lima y Callao

Los efectos del crecimiento del parque automotor y, principalmente, factores sociopolíticos como la falta de una adecuada gestión municipal, tienen como consecuencia la reducción de velocidad promedio en Lima y Callao (Dextre & Avellaneda, 2013; Flores y otros autores, 2018). Como parte del planeamiento urbanístico de la ciudad de Lima y Callao, en el 2013 el Estado actualizó el Plan Maestro para el Transporte Urbano del Área Metropolitana de Lima y Callao a través de la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA). En este documento, se desarrolla una proyección de velocidad promedio de viaje en Lima y Callao de 18.54 Km/h al año 2019 (ver Figura 10). Además, en el gráfico se observa el crecimiento del parque automotor indicado en el acápite anterior con el fin de evidenciar los efectos del flujo vehicular y el impacto en la velocidad promedio en la ciudad.

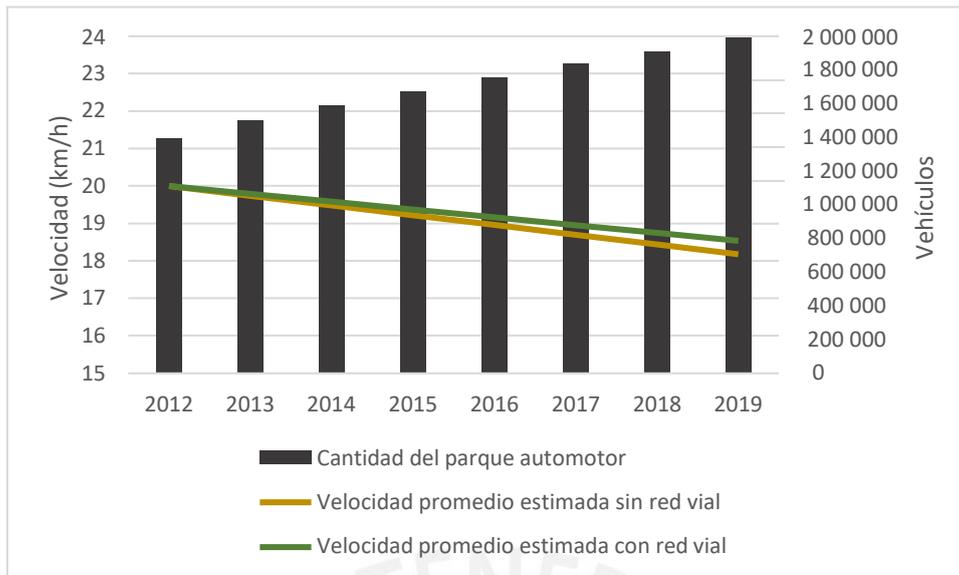


Figura 10 Pronóstico de velocidad promedio de vehículos públicos y particulares con y sin proyectos de red vial

Fuente: Elaboración propia. Basado en la encuesta de recolección de información básica del transporte urbano en el área metropolitana de Lima y Callao (2013)

3.1.3 Evolución de registros de emergencia atendidas por el CGBVP

Según los registros de emergencias atendidas confirmadas por el CGBVP en Lima y Callao (ver Figura 11), existe una reducción de 39% en atenciones médicas en el año 2019 tomando como base al año 2014. Se estima que esta disminución es debido al incremento de demanda del Servicio de Atenciones Médicas de Urgencia (SAMU) administrado por el Ministerio de Salud.

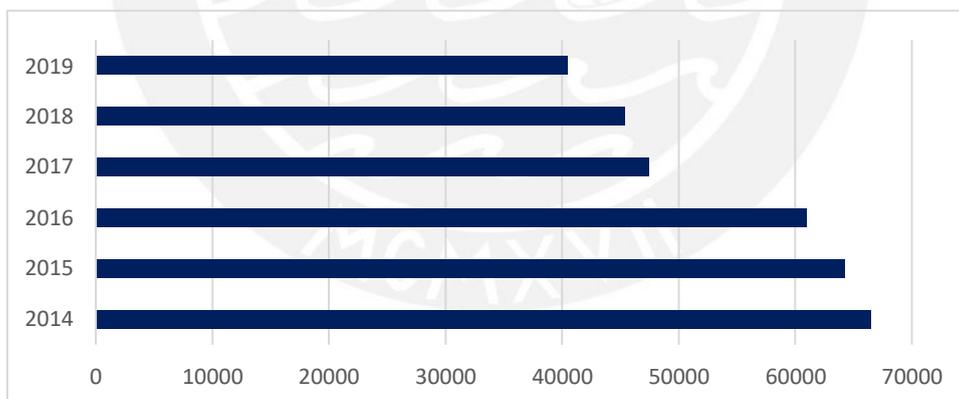


Figura 11 Reducción de emergencias médicas confirmadas del 2014 al 2019

Fuente: Elaboración propia con datos del Cuerpo General de Bomberos Voluntarios del Perú

Por otro lado, el Figura 12 muestra la evolución de emergencias confirmadas que fueron atendidas por el CGBVP del año 2014 a 2019. Se observa un incremento de 79% en atenciones de rescate, 40% en atenciones de materiales peligrosos y 19% en incendios.

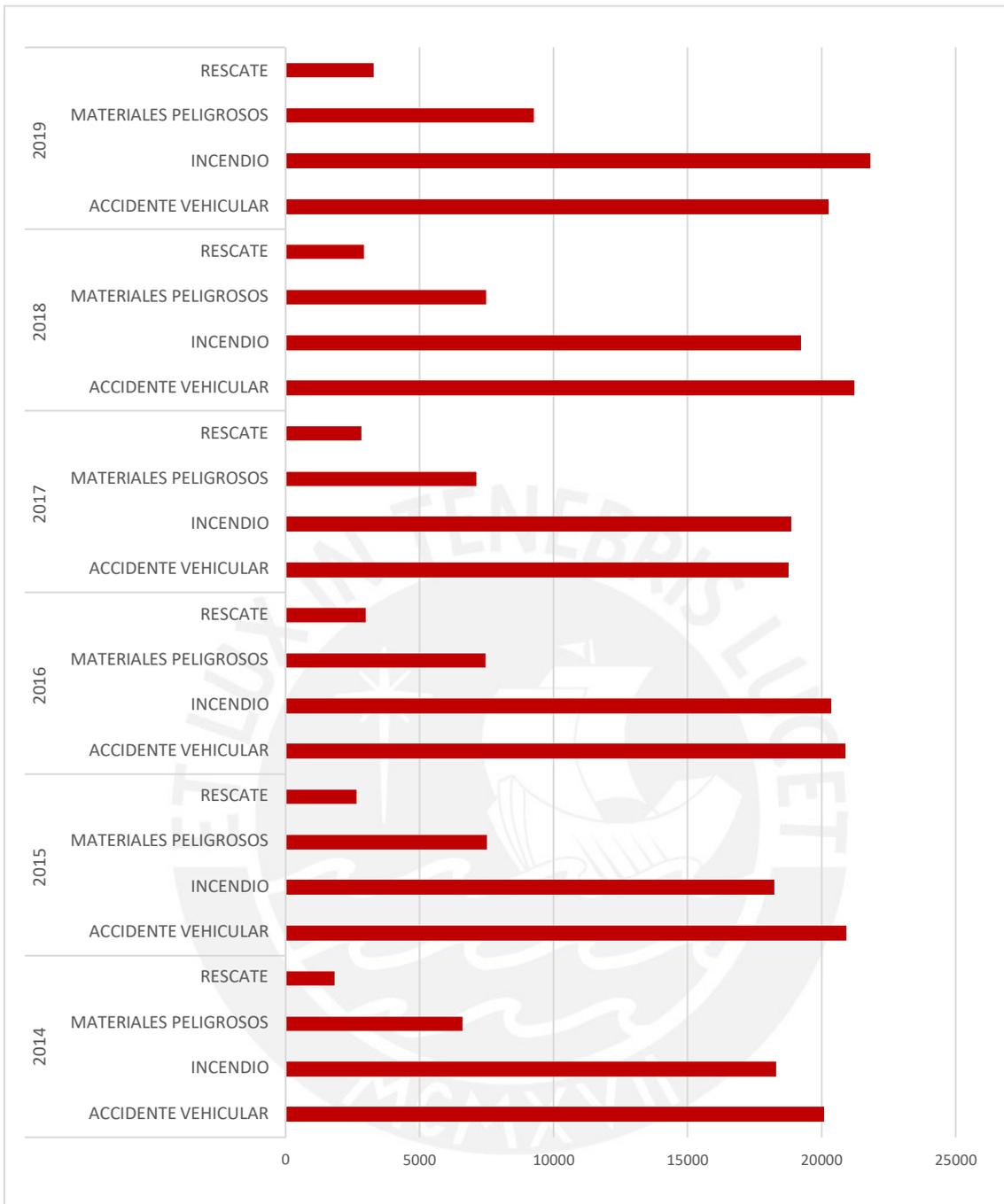


Figura 12 Evolución de registros de emergencias confirmadas no médicas del 2014 al 2019
Fuente: Elaboración propia con datos del Cuerpo General de Bomberos Voluntarios del Perú

3.1.4 Comportamiento del tiempo de repuesta del CGBVP

El análisis percentil representa la cantidad de veces (percentil) que un evento alcanza un determinado valor. Es un método de análisis confiable que expone el comportamiento de un evento sin considerar registros poco frecuentes cuyo valor puede afectar el resultado (Bornmann & Mutz, 2011). En el caso del CGBVP, se observa que en el percentil 90, el tiempo de respuesta alcanza los 19 minutos. En el Figura 13 se observa el comportamiento del tiempo de respuesta desde el año 2014 a 2019 no ha sufrido variación significativa.

Cabe resaltar que esta información es obtenida directamente de los registros de emergencias del CGBVP, es decir, el tiempo de respuesta es un valor real obtenido durante las atenciones de emergencia.

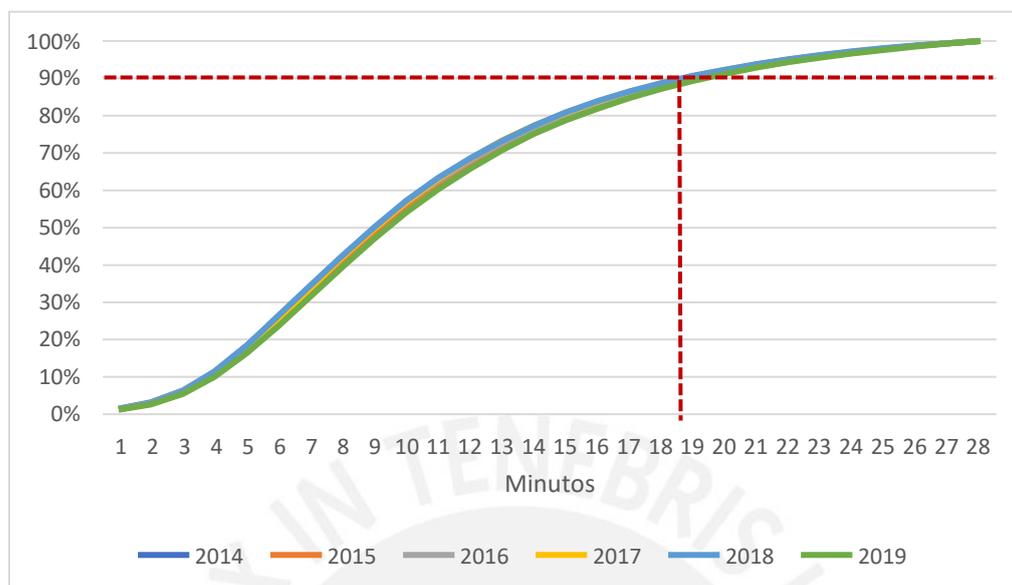


Figura 13 Comportamiento del percentil del tiempo de respuesta en el CGBVP de 2014 a 2019
Fuente: Elaboración propia con datos del Cuerpo General de Bomberos Voluntarios del Perú

Por otro lado, considerando la reducción de atención de emergencias médicas a partir del año 2017, el tiempo de respuesta en el percentil 90 se reduce levemente de 19 minutos a 18.5 minutos (ver Figura 14). Sin embargo, en el 2019 el tiempo de respuesta se eleva hasta alcanzar 19.5 minutos. El Figura 14 también muestra la comparación del tiempo de respuesta promedio con el tiempo alcanzado en el percentil 90. Se observa una alta variación debido a los pocos eventos que fueron atendidos en muy corto tiempo. Estos eventos son los que afectan la percepción del tiempo de respuesta.

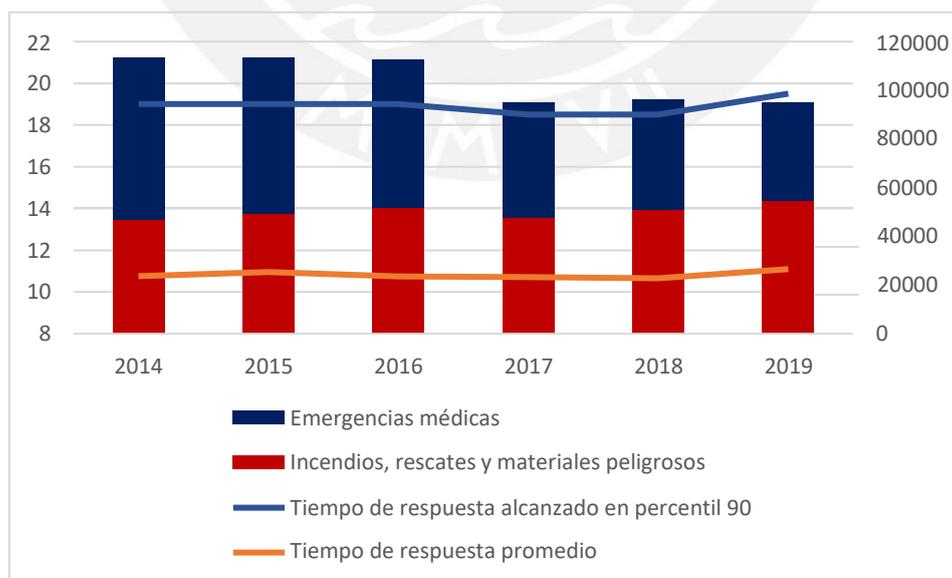


Figura 14 Evolución del tiempo de respuesta en el CGBVP de 2014 a 2019
Fuente: Elaboración propia con datos del Cuerpo General de Bomberos Voluntarios del Perú

3.1.5 Evolución de la velocidad de viaje del CGBVP

La velocidad de viaje en vehículos de emergencia del CGBVP es un valor estimado a partir del tiempo de respuesta y la distancia entre coordenadas de la estación y el lugar de la emergencia. En el Figura 15 se observa la evolución de la velocidad de viaje desde el año 2014 a 2019. Además, se compara la velocidad alcanzada en el percentil 90 y la velocidad promedio mostrando la afección de los pocos casos que fueron atendidos con rapidez. El Figura 15 incluye la estimación de velocidad promedio en el transporte público y privado que puede alcanzar con el proyecto de red vial.

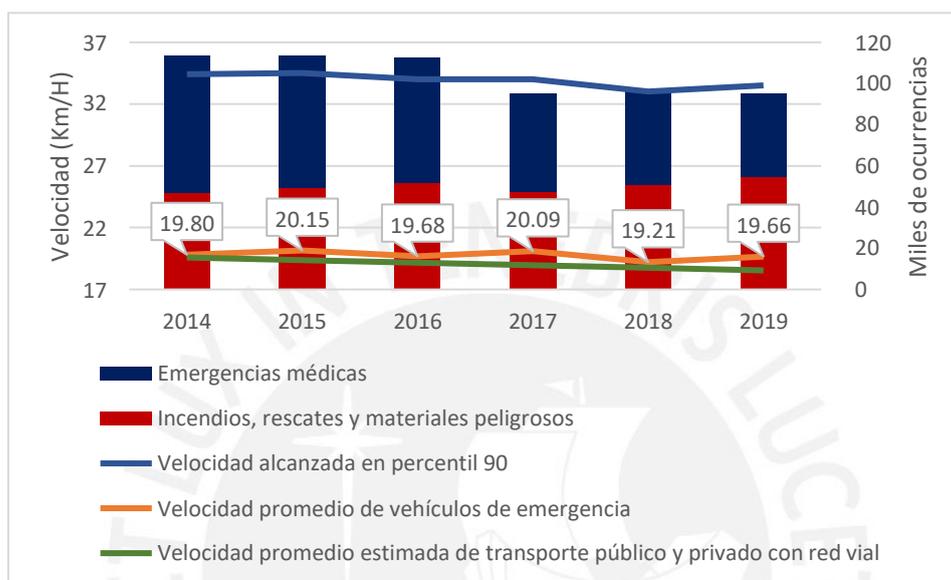


Figura 15 Evolución de la velocidad de viaje del CGBVP de 2014 a 2019

Fuente: Elaboración propia con datos del Cuerpo General de Bomberos Voluntarios del Perú

3.2 COMPORTAMIENTO ACTUAL DEL SERVICIO DE RESPUESTA A EMERGENCIAS

El presente acápite desarrolla un diagnóstico de los incendios, emergencias médicas, rescates y otras atenciones que requieren unidades especiales. El análisis describe la cobertura actual, las zonas de alta demanda y las zonas de demanda de recursos especiales.

Los análisis descritos, se desarrollan en base a la analítica de los registros de emergencia del CGBVP del año 2014 a junio 2020. Para analizar estos datos, se ha utilizado el software libre KNIME Analytics Platform V4.1.3 en una laptop Core i7 con un procesador de 2.6 GHz y 8 GB de memoria RAM; por lo que el tiempo para finalizar el análisis fue de 7.7 minutos.

En el proceso de análisis se eliminaron registros de emergencias sin geolocalización, sin registro de llegada a la emergencia y los datos atípicos en el tiempo de respuesta, distancia recorrida y velocidad de viaje.

Para esta etapa, se creó una matriz de puntos georreferenciados los cuales están separados 1 Km entre sí. En tal sentido, en este capítulo estos puntos representan el comportamiento de los registros encontrados en 1 Km², cobertura de un punto de la matriz (ver Figura 16).

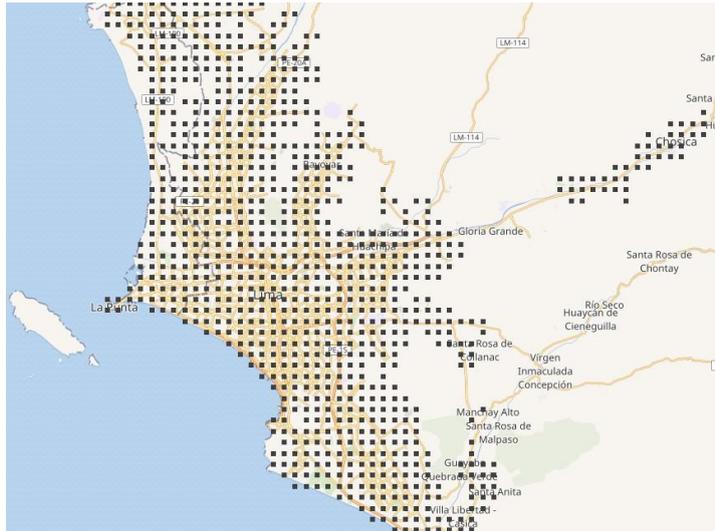


Figura 16 Puntos representantes de registros encontrados en 1 Km²
Fuente: Elaboración propia

3.2.1 VARIABLES DE ANÁLISIS

A continuación, se evalúan a nivel general dos variables que permiten analizar la cobertura actual del servicio de respuesta a emergencias:

3.2.1.1 Ocurrencias por distrito

La variable de ocurrencias por distrito permite analizar las zonas de Lima Metropolitana y Callao con mayor demanda. En tal sentido, el distrito de Cercado de Lima es la región con mayor registro de emergencias (8.6%), y el distrito del Callao es la segunda región con más incidencias registradas (6.5%). Al analizar un diagrama de Pareto (ver Figura 17), se observa que hay 23 que acumulan el 80% de la demanda en Lima Metropolitana y Callao.

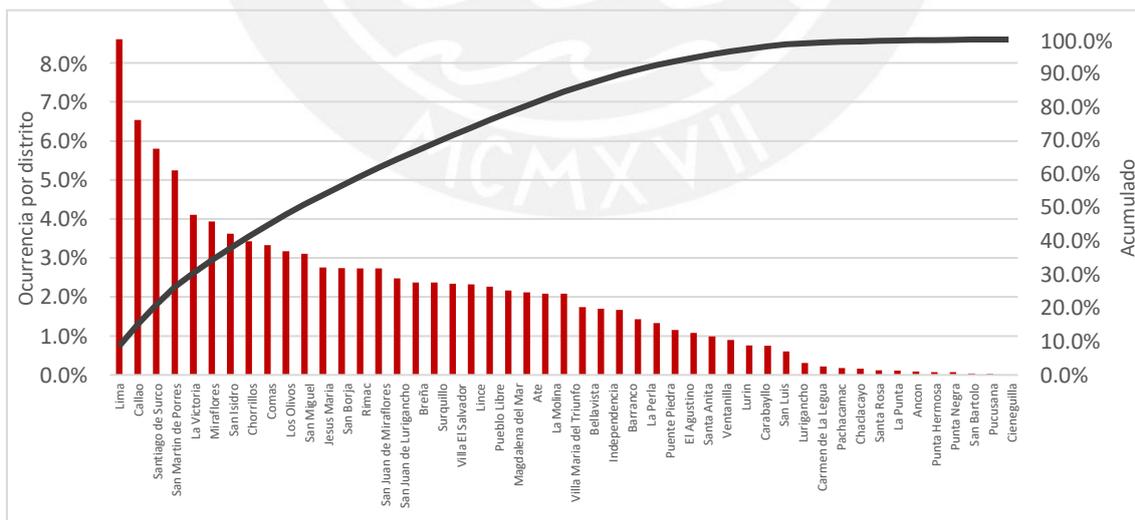


Figura 17 Diagrama de Pareto por ocurrencias de emergencias en el periodo de 2014 a 2019

La siguiente tabla, lista los 23 distritos con mayor demanda de servicio de emergencias del CGBVP en Lima y Callao y la densidad poblacional (INEI 2017). Sin embargo, se observa que no hay una proporcionalidad entre la demanda registrada y la densidad poblacional.

Tabla 4 Distritos con mayor demanda del servicio de emergencias del CGBVP

N°	Distrito	Demanda	Densidad Poblacional (hab/km ²)
1	Lima	8.6%	12,277
2	Callao	6.5%	8,999
3	Santiago de Surco	5.8%	10,119
4	San Martín de Porres	5.2%	20,136
5	La Victoria	4.1%	19,367
6	Miraflores	3.9%	8,617
7	San Isidro	3.6%	4,892
8	Chorrillos	3.4%	8,765
9	Comas	3.3%	11,194
10	Los Olivos	3.2%	21,411
11	San Miguel	3.1%	13,004
12	Jesús María	2.8%	15,931
13	San Borja	2.7%	11,494
14	Rímac	2.7%	13,939
15	San Juan de Miraflores	2.7%	18,389
16	San Juan de Lurigancho	2.5%	8,810
17	Breña	2.4%	23,566
18	Surquillo	2.4%	26,852
19	Villa El Salvador	2.3%	13,807
20	Lince	2.3%	16,447
21	Pueblo Libre	2.3%	17,653
22	Magdalena del Mar	2.2%	15,453
23	Ate	2.1%	8,648

Fuente: Elaboración propia. En base a INEI 2017.

A continuación, con la información provista del CGBVP, se ha elaborado un mapa de calor que representa las emergencias atendidas por los bomberos voluntarios en la región de análisis:

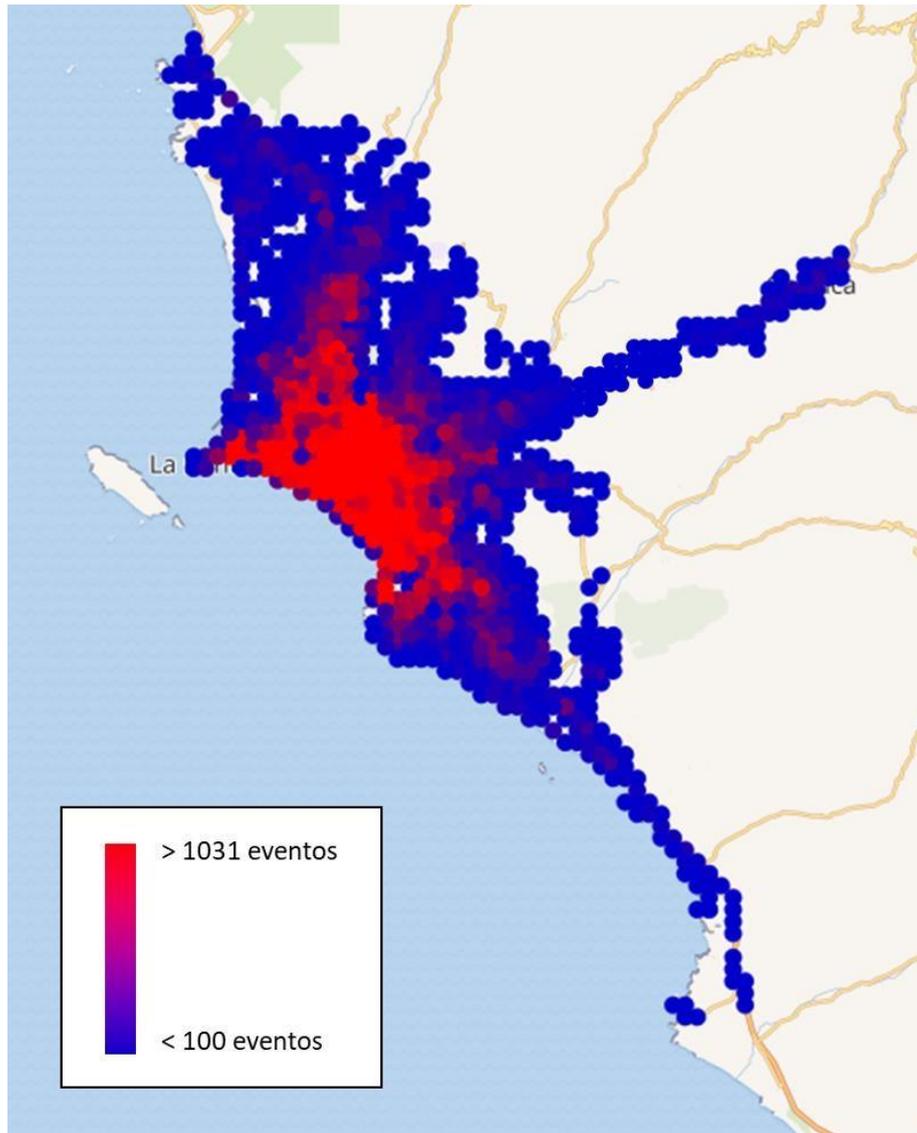


Figura 18 Mapa de calor de emergencias atendidas en Lima Metropolitana y Callao
Fuente: Elaboración propia. Datos: Registros de emergencia del CGBVP, 2014 – junio de 2020.

3.2.1.2 Tiempo de respuesta

Tal como se muestra en el Figura 15, el tiempo de respuesta en Lima Metropolitana y Callao en el percentil 90 es de 19.5 minutos en el año 2019. Al analizar el comportamiento del tiempo de respuesta alcanzado en el percentil 90, se observa que todos los distritos están por encima de los 12 minutos.

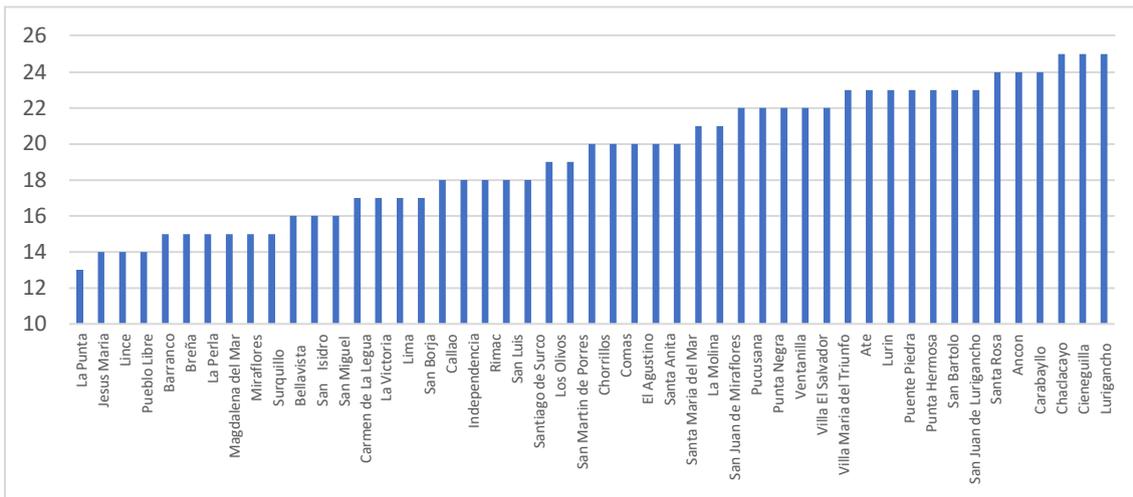


Figura 19 Tiempo de respuesta alcanzado en percentil 90

Fuente: Elaboración propia. Datos: Registros de emergencia del CGBVP, 2014 – junio de 2020.

3.2.2 INCENDIOS

El presente acápite describe la cobertura de autobombas y unidades aéreas, requeridas para la atención de incendios. Esta cobertura analiza la capacidad de tiempo de respuesta registrados en el periodo 2014 y junio de 2020. Posterior a ello, describe las zonas de alta demanda de incendios y las zonas con demanda de recursos especiales: unidades aéreas, puesto de comando y cisternas.

3.2.2.1 Cobertura actual con autobombas

El análisis de la cobertura de incendios atendidos se desarrolla en función a la recomendación del estándar NFPA 1720 para áreas suburbanas, es decir, los incendios se deben atender en menos de 10 minutos al menos el 80% de las veces (ver Tabla 3). Sin embargo, tal como se observa en la Figura 20, la mediana de los registros es sólo del 49% de las atenciones de incendios en Lima Metropolitana y Callao. Por consiguiente, la capacidad de respuesta actual para atención de incendios se encuentra en un nivel subestándar en función a la recomendación de NFPA.

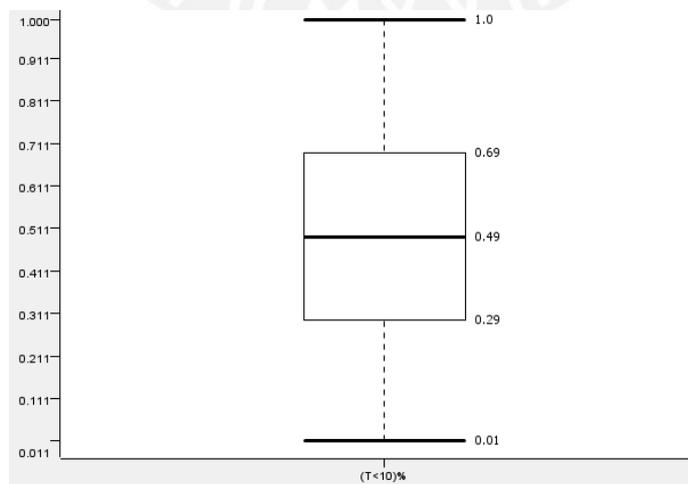


Figura 20 Distribución de cajas y bigotes de porcentaje de incendios atendidos por autobombas en menos de 10 minutos.

Fuente: Elaboración propia. Datos: Registros de emergencia del CGBVP, 2014 – junio de 2020.

Bajo este criterio, la Figura 21 muestra un mapa de calor con una gama de porcentajes de incendios que fueron atendidos en menos de 10 minutos, agrupados en cuadrantes de 1 Km². Por ello, el color azul representa un escenario optimista en el que el 100% de los incendios son atendidos en menos de 10 minutos y, el color rojo, un escenario pesimista en el que el 0% de los incendios fueron atendidos en menos de 10 minutos.

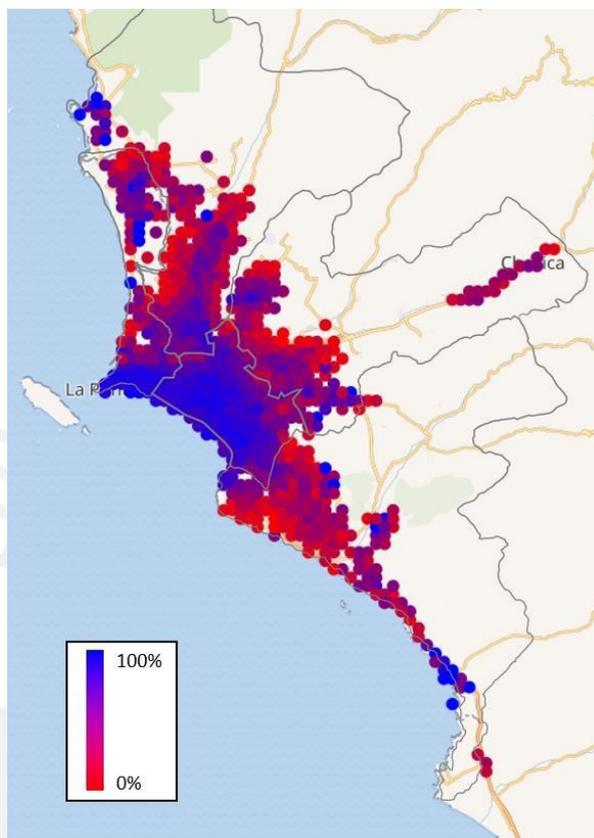


Figura 21 Mapa de calor con incendios atendidos en menos de 10 minutos
Fuente: Elaboración propia. Datos: Registros de emergencia del CGBVP, 2014 – junio de 2020.

3.2.2.2 Cobertura actual con unidades aéreas

En el caso de incendios que han requerido unidades aéreas, se observa que el 75% de las veces, se atendieron en menos de 10 minutos. Es decir, existe una leve diferencia considerando una demografía suburbana (hasta 385 habitantes/Km²). La Figura 23 muestra el mapa de calor con los incendios atendidos por unidades aéreas y las zonas con déficit de atención en color rojo.

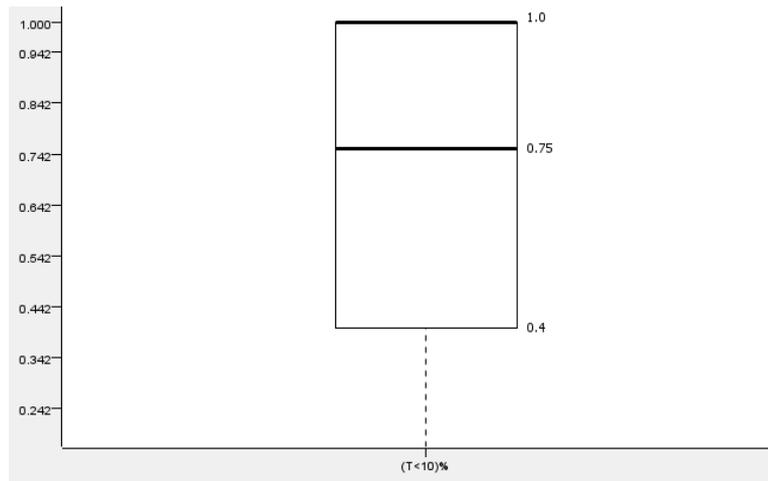


Figura 22 Distribución de cajas y bigotes de porcentaje de incendios atendidos por unidades aéreas en menos de 10 minutos.

Fuente: Elaboración propia. Datos: Registros de emergencia del CGBVP, 2014 – junio de 2020.

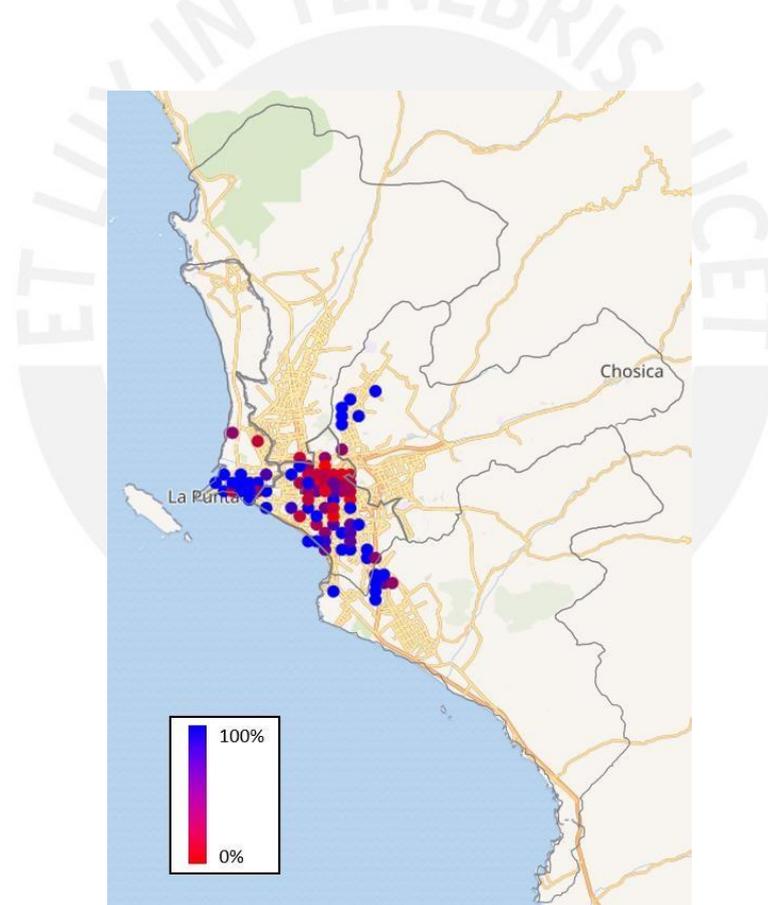


Figura 23 Mapa de calor con incendios atendidos por unidades aéreas en menos de 10 minutos.

Fuente: Elaboración propia. Datos: Registros de emergencia del CGBVP, 2014 – junio de 2020.

3.2.2.3 Zonas con alta demanda

De todos los cuadrantes establecidos, se observa en la Figura 24 que la mediana de los eventos de incendio registrados es de 32 incendios por cuadrante, en el lapso de 2014 hasta junio 2020. Además, se observa que hay valores atípicos que superan el valor máximo del cuarto intervalo intercuartil (205 eventos). Es decir, hay cuadrantes en donde se encontraron hasta 684 registros

de incendios. En la Figura 25, se muestra el mapa de calor que representa la distribución geográfica de los eventos de incendio registrados. En esta gráfica, se consideran los valores atípicos como el máximo valor encontrado en el rango intercuartil.

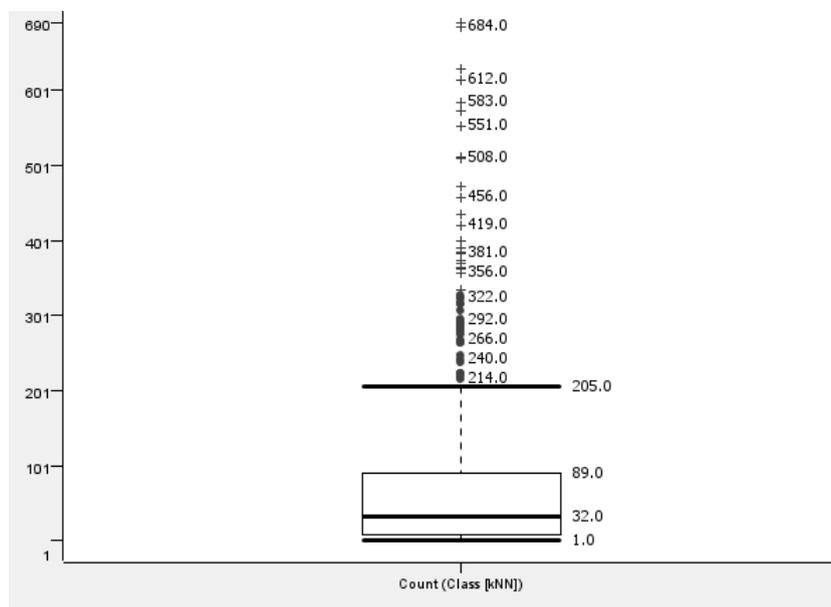


Figura 24 Distribución de cajas y bigotes de incendios atendidos en Lima Metropolitana y Callao
Fuente: Elaboración propia. Datos: Registros de emergencia del CGBVP, 2014 – junio de 2020.

Además, en la Figura 25 se observa que la zona de alta demanda de incendios se encuentra en Lima Centro y una tendencia en las zonas cercanas a este. Asimismo, se observa una demanda en dirección hacia el norte y sur de Lima Centro. Por otro lado, en la provincia de Callao, existe una zona focalizada en el límite entre los distritos de Bellavista y La Punta.

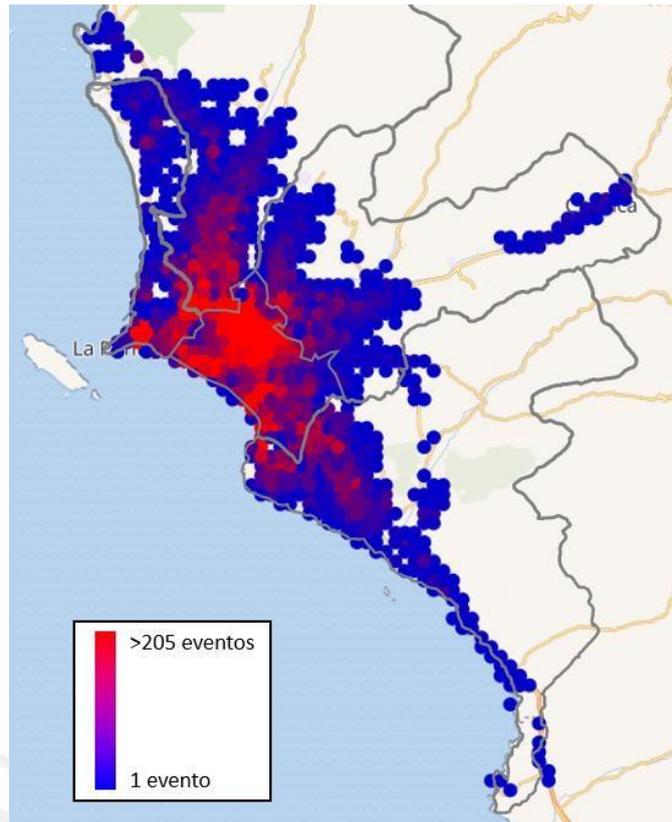


Figura 25 Mapa de calor con incendios atendidos en Lima Metropolitana y Callao.
 Fuente: Elaboración propia. Datos: Registros de emergencia del CGBVP, 2014 – junio de 2020.

3.2.2.4 Zonas con demanda de recursos especiales

3.2.2.4.1 Unidades aéreas

De acuerdo a la naturaleza del incendio, el CGBVP despacha unidades aéreas para atender emergencias con capacidad de acceder niveles de gran altura. En tal sentido, hay cuadrantes que registran hasta 40 incendios con demanda de estas unidades especiales (ver Figura 26).

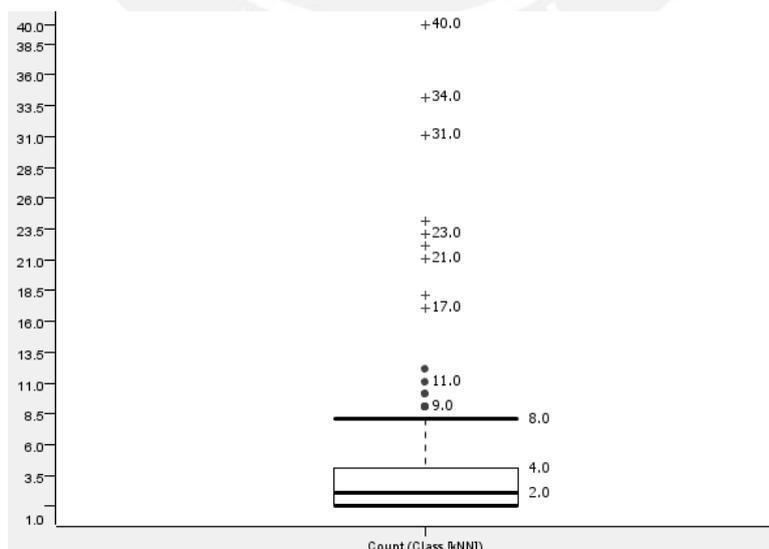


Figura 26 Distribución de cajas y bigotes de incendios atendidos por unidades aéreas.
 Fuente: Elaboración propia. Datos: Registros de emergencia del CGBVP, 2014 – junio de 2020.

La Figura 27, muestra el mapa con las zonas de demanda de unidades aéreas. En el mapa, se ha establecido los casos atípicos como el valor máximo del cuarto rango intercuartil. Es decir, los cuadrantes en rojo representan las zonas donde las unidades aéreas fueron demandadas a partir de 8 incendios a más. Se observa que, la zona de mayor demanda de unidades aéreas es en Lima Centro, en los distritos de Cercado de Lima, Miraflores, San Isidro y San Miguel.

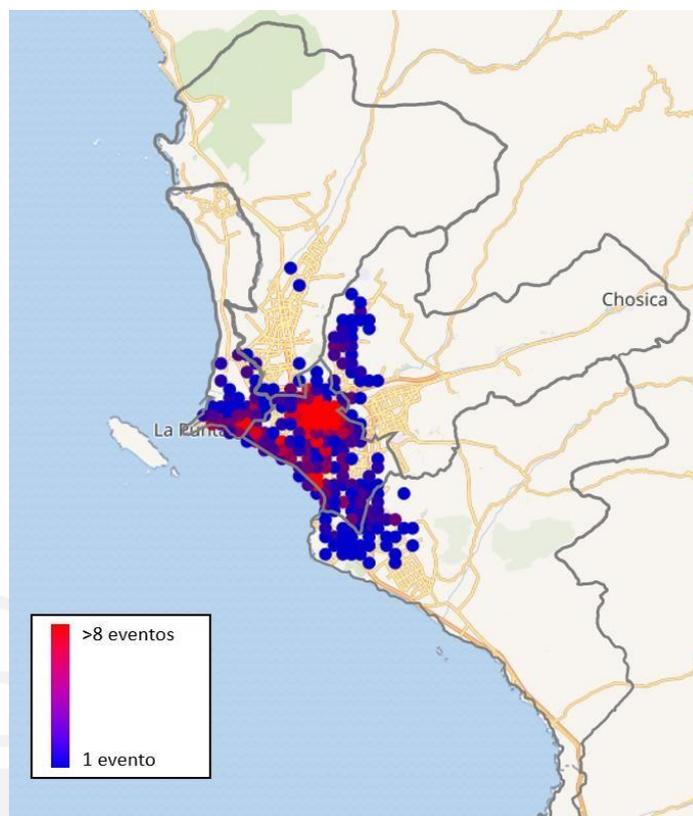


Figura 27 Mapa de calor con incendios atendidos por unidades aéreas.
Fuente: Elaboración propia. Datos: Registros de emergencia del CGBVP, 2014 – junio de 2020.

3.2.2.4.2 Unidades puesto de comando

Las unidades puesto de comando tienen la logística necesaria para la administración de un incendio de gran magnitud. En tal sentido, la cobertura por respuesta rápida no es un factor relevante para el presente análisis. Sin embargo, es importante identificar las zonas con mayor demanda de este tipo de unidad. Tal como muestra la Figura 28, los cuadrantes alcanzan hasta 6 registros de incendios en los que requirieron una unidad Puesto de Comando. En base a ello, la Figura 29 representa en un mapa de calor las zonas con alta demanda, en este caso, a partir de dos incendios. Se observa que, la zona de mayor demanda de unidades puesto de comando es en la zona centro de Lima Centro, es decir en los distritos de Cercado de Lima y en los límites de Breña y La Victoria.

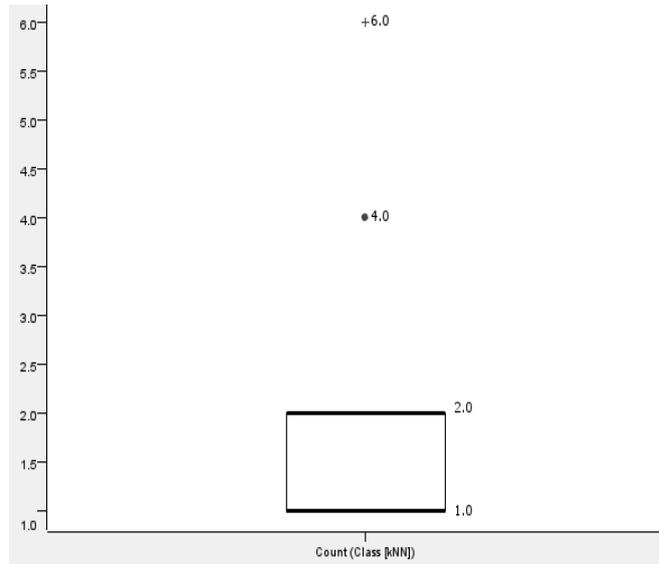


Figura 28 Distribución de cajas y bigotes de incendios atendidos por unidades puesto de comando.
 Fuente: Elaboración propia. Datos: Registros de emergencia del CGBVP, 2014 – junio de 2020.

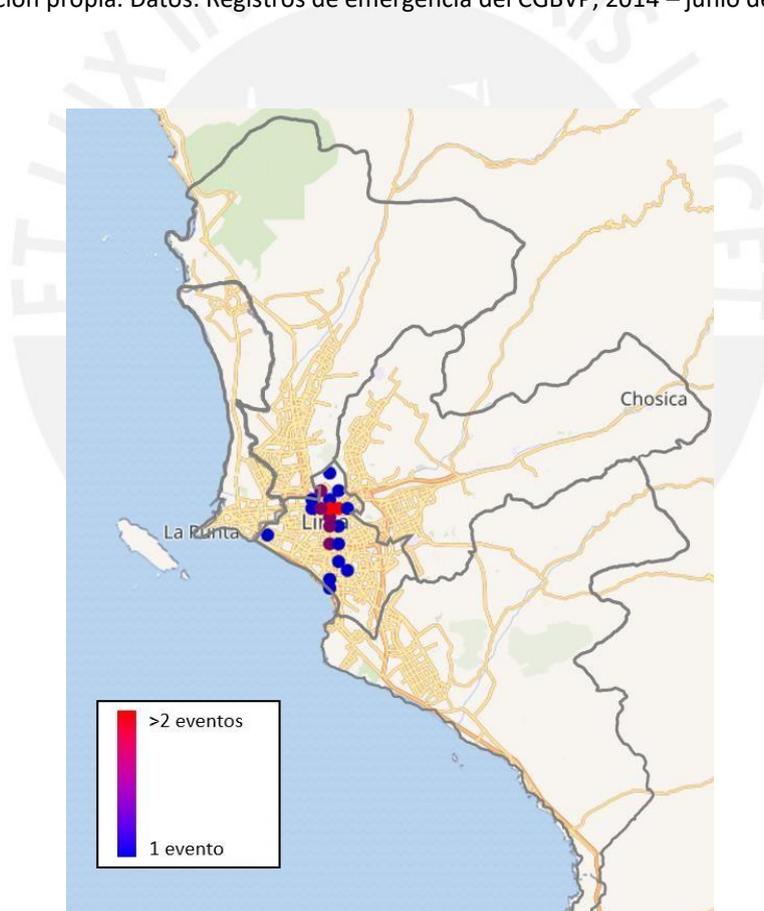


Figura 29 Mapa de calor con incendios atendidos por unidades puesto de comando.
 Fuente: Elaboración propia. Datos: Registros de emergencia del CGBVP, 2014 – junio de 2020.

3.2.2.4.3 Unidades cisterna

Las unidades cisternas trasladan el recurso más importante para la labor de los bomberos durante un incendio, el agua. Es por ello, que el presente análisis considera la demanda de estas unidades según el registro histórico del CGBVP. Tal como muestra la Figura 30, la mayoría de los cuadrantes han requerido por lo menos 2 unidades cisternas entre el año 2014 a junio de 2020. Además, se observa que hay cuadrantes donde requirieron hasta 23 veces las cisternas.

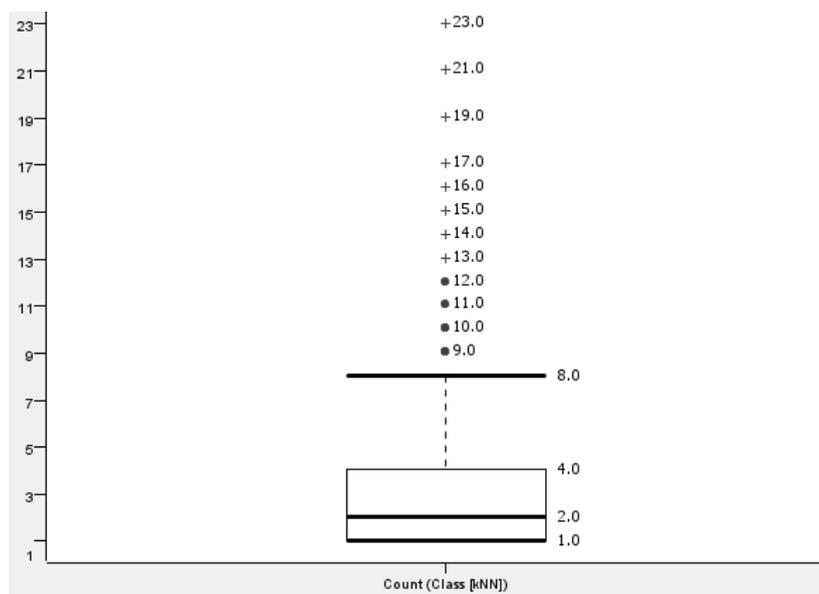


Figura 30 Distribución de cajas y bigotes de incendios atendidos por unidades cisterna.

Fuente: Elaboración propia. Datos: Registros de emergencia del CGBVP, 2014 – junio de 2020.

En la Figura 31, se muestra el mapa de calor con los registros de incendio representados en una gama de color. Donde la escala máxima está representada por el último valor del rango intercuartil, 8 eventos de incendio que requirieron unidades cisterna. Cabe resaltar que, esta escala máxima agrupa los valores poco frecuentes, pero que llegaron a requerir hasta 23 cisternas durante un incendio. Se observa que, la zona de mayor demanda de unidades cisterna es en la zona sur de Lima Norte, en los distritos de Comas, Independencia y San Juan de Lurigancho.

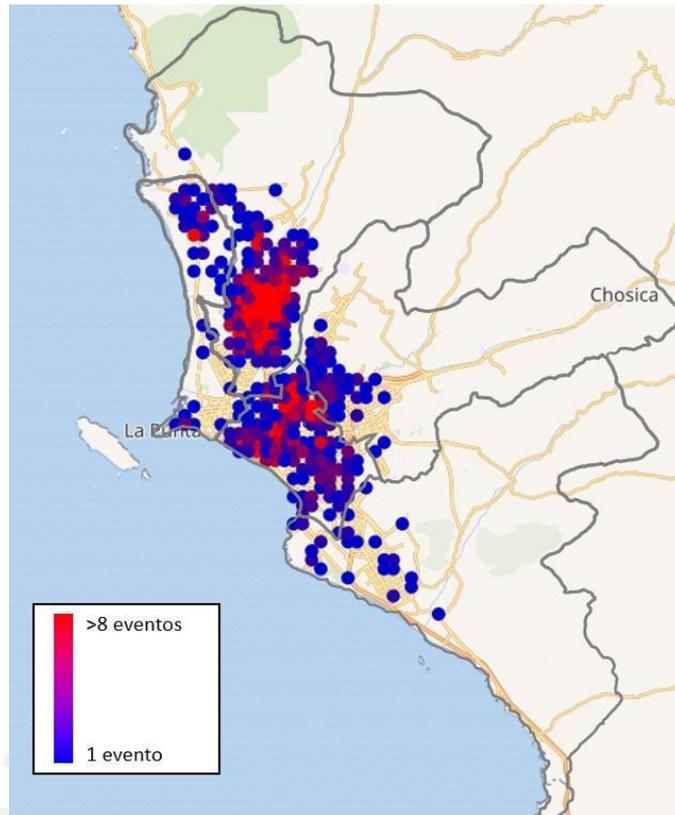


Figura 31 Mapa de calor con incendios atendidos por unidades cisterna.
 Fuente: Elaboración propia. Datos: Registros de emergencia del CGBVP, 2014 – junio de 2020.

3.2.3 EMERGENCIAS MÉDICAS

A continuación, se describe la cobertura de las unidades requeridas para la atención de emergencias médicas. Esta cobertura analiza la capacidad de tiempo de respuesta registrados en el periodo 2014 y junio de 2020. Además, incluye la descripción de las zonas de alta demanda de emergencias médicas.

3.2.3.1 Cobertura actual

La cobertura de emergencias médicas se ha analizado en base a aquellas que fueron atendidas y alcanzaron un tiempo de respuesta de 4 y 8 minutos. Dicho esto, la Figura 32 muestra el diagrama de cajas y bigotes con la distribución de registros que alcanzaron estos tiempos. Se observa que, la mediana de las emergencias atendidas en menos de 8 minutos es de 34%. Es decir, la mayoría de las emergencias que se llegan a atender en menos de 8 minutos en Lima Metropolitana y Callao es el 34% de las veces. Por otro lado, la mediana de las emergencias que se lograron atender en menos de 4 minutos es sólo el 10% de las veces.

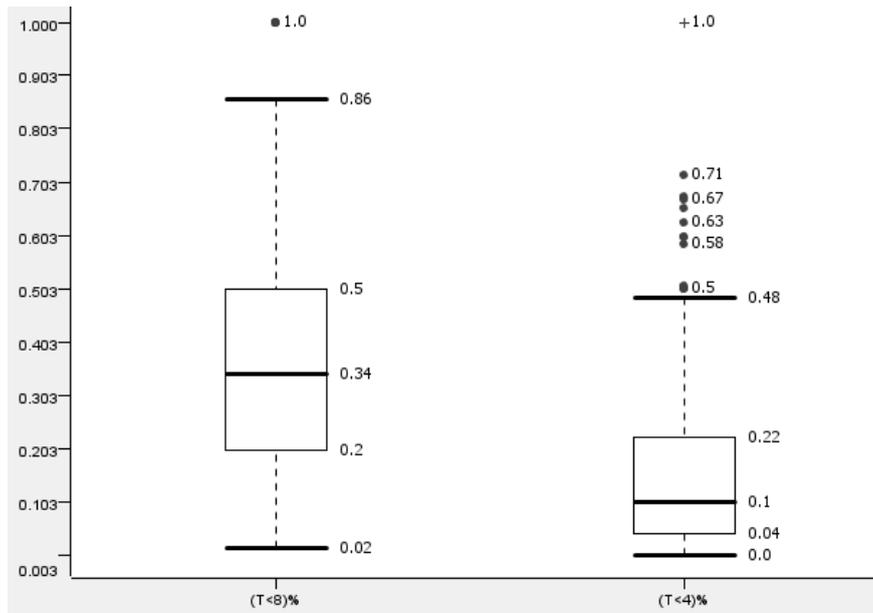


Figura 32 Distribución de cajas y bigotes de porcentaje de emergencias médicas atendidas en menos de 8 y 4 minutos.

Fuente: Elaboración propia. Datos: Registros de emergencia del CGBVP, 2014 – junio de 2020.

En tal sentido, la Figura 33 muestra un mapa de calor con los registros de emergencias médicas que lograron ser atendidas en menos de 8 minutos, agrupadas en cuadrantes de 1 Km². Asimismo, la Figura 34 muestra el mapa de calor con las emergencias médicas que lograron ser atendidas en menos de 4 minutos. La gama de color en los mapas representa el porcentaje de ocurrencia del tiempo de respuesta evaluado.

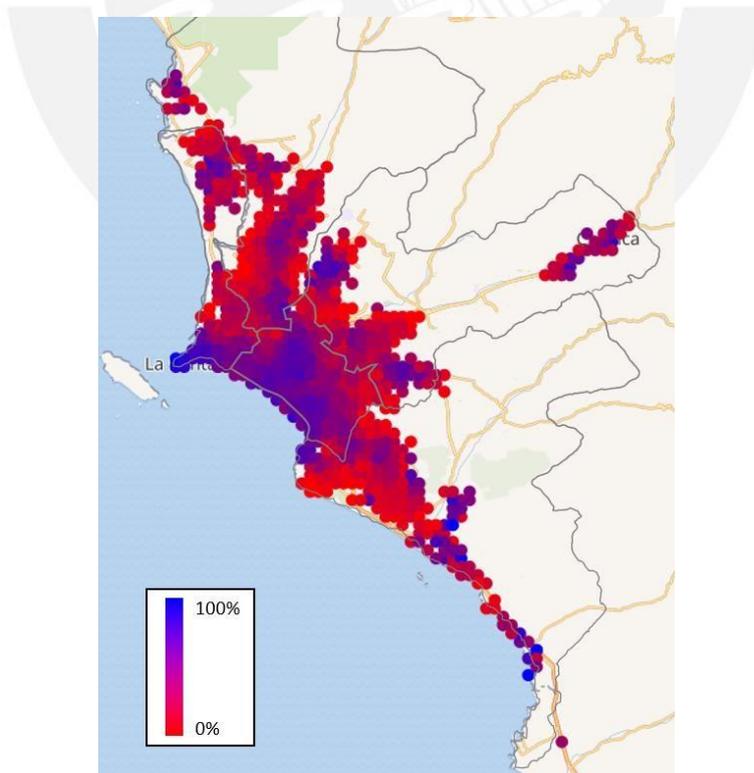


Figura 33 Mapa de calor con emergencias médicas atendidas en menos de 8 minutos.

Fuente: Elaboración propia. Datos: Registros de emergencia del CGBVP, 2014 – junio de 2020.

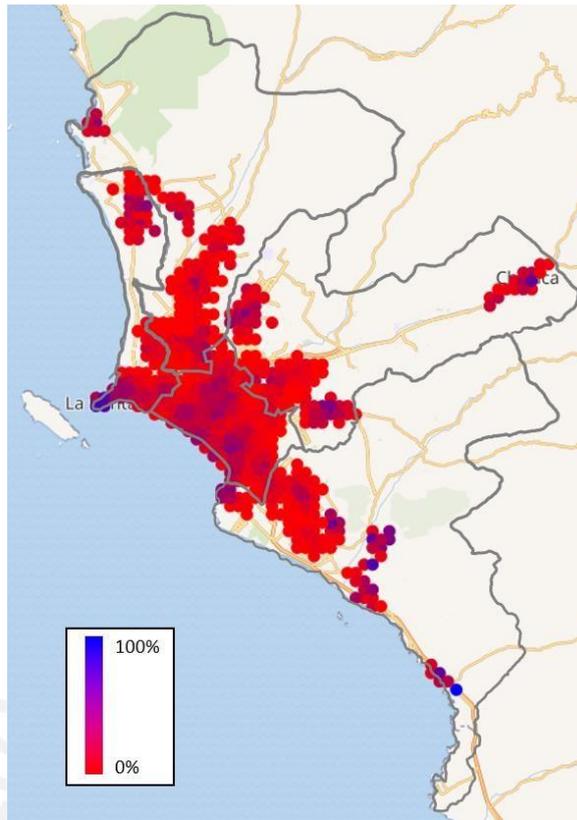


Figura 34 Mapa de calor con emergencias médicas atendidas en menos de 4 minutos.
 Fuente: Elaboración propia. Datos: Registros de emergencia del CGBVP, 2014 – junio de 2020.

3.2.3.2 Zonas con alta demanda

De todos los cuadrantes establecidos, se observa en la Figura 35 que la mediana de las emergencias médicas es de 48 incidentes por cuadrante en el lapso de 2014 hasta junio 2020. Además, se observa que hay cuadrantes en donde se encontraron hasta 2487 registros de incidentes en estos últimos 6 años. En la Figura 25, se muestra el mapa de calor que representa la distribución geográfica de los incidentes registrados. En esta gráfica, se considera que la máxima escala de valor incluye el valor máximo del rango intercuartil (535 incidentes) hasta el máximo valor encontrado en los cuadrantes (2487 incidentes).

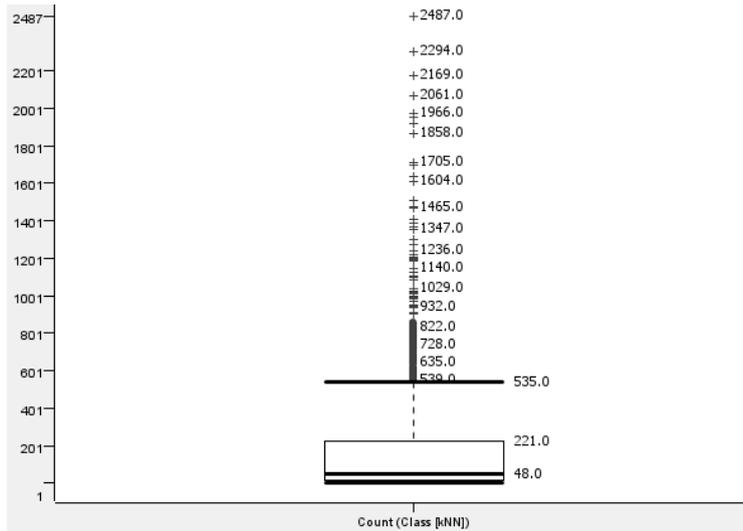


Figura 35 Distribución de cajas y bigotes de emergencias médicas atendidas en Lima Metropolitana y Callao.

Fuente: Elaboración propia. Datos: Registros de emergencia del CGBVP, 2014 – junio de 2020.

Además, en la Figura 36 se observa que la zona de alta demanda del servicio de emergencias médicas se encuentra en Lima Centro y una tendencia en las zonas cercanas a este. Asimismo, se observa una demanda en dirección hacia el norte. Por otro lado, en la provincia de Callao, existe una zona focalizada en los distritos de Bellavista y La Perla.

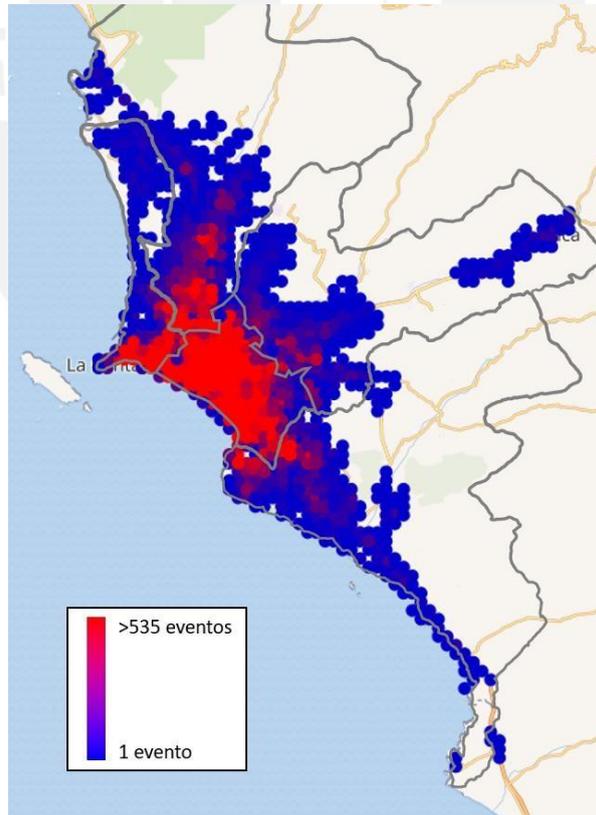


Figura 36 Mapa de calor con emergencias médicas atendidas en Lima Metropolitana y Callao.

Fuente: Elaboración propia. Datos: Registros de emergencia del CGBVP, 2014 – junio de 2020.

3.2.4 RESCATES

A continuación, se describe la cobertura de las unidades requeridas para la atención de accidentes vehiculares y rescates. Esta cobertura analiza la capacidad de tiempo de respuesta registrados en el periodo 2014 y junio de 2020. Además, incluye la descripción de las zonas de alta demanda de emergencias de rescate.

3.2.4.1 Cobertura actual

El presente análisis se desarrolla en función a la recomendación del estándar NFPA 1720 para áreas suburbanas, es decir, las emergencias de rescate se deben atender en menos de 10 minutos al menos el 80% de las veces (ver Tabla 3). Sin embargo, tal como se observa en la Figura 37, la mediana de los registros es sólo del 60% de las atenciones de incendios en Lima Metropolitana y Callao. Por consiguiente, la capacidad de respuesta actual para atención de incendios se encuentra en un nivel subestándar en función a la recomendación de NFPA.

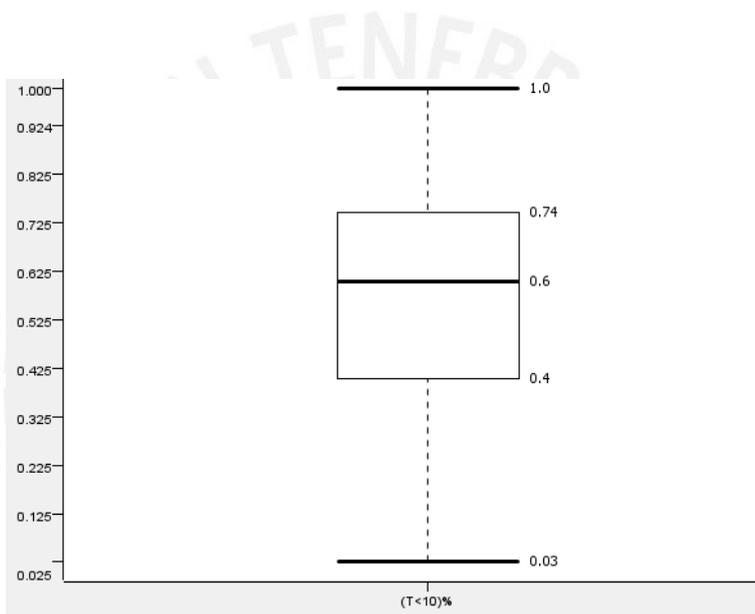


Figura 37 Distribución de cajas y bigotes de porcentaje de rescates atendidos en menos de 10 minutos. Fuente: Elaboración propia. Datos: Registros de emergencia del CGBVP, 2014 – junio de 2020.

Bajo este criterio, la Figura 38 muestra un mapa de calor con una gama de porcentajes de rescates que fueron atendidos en menos de 10 minutos, agrupados en cuadrantes de 1 Km². En este caso, el color azul representa un escenario en el que el 100% de los incidentes fueron atendidos en menos de 10 minutos y, el color rojo, un escenario en el que el 0% de los incidentes fueron atendidos en dicho tiempo.

En el mapa, se observa que los distritos que requieren mayor cobertura son, en Lima Este: Ate, Cieneguilla; en Lima Sur: Chorrillos, San Juan de Miraflores, Villa El Salvador, Punta hermosa; en Lima Norte: Puente Piedra y Comas; y, en la provincia del Callao en el límite entre Ventanilla y el distrito Callao.

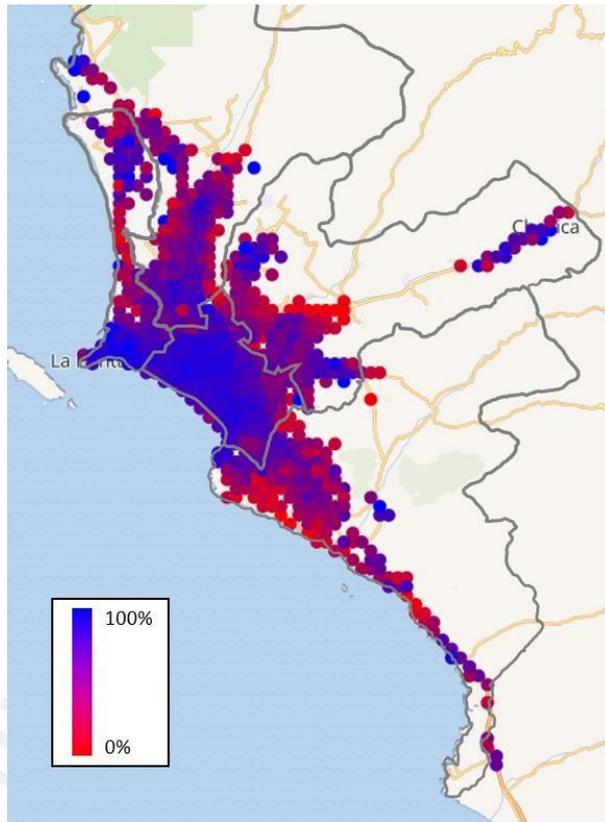


Figura 38 Mapa de calor con rescates que lograron ser atendidos en menos de 10 minutos.
Fuente: Elaboración propia. Datos: Registros de emergencia del CGBVP, 2014 – junio de 2020.

3.2.4.2 Zonas con alta demanda de accidentes vehiculares

Tal como se observa en la Figura 39, se observa que la mediana de los eventos de incendio registrados es de 35 accidentes vehiculares por cuadrante, en el lapso de 2014 hasta junio 2020. Además, se observa que hay valores atípicos que superan el valor máximo del cuarto intervalo intercuartil, 262 eventos. Es decir, hay pocos cuadrantes en donde se encontraron hasta 810 registros de este tipo de accidentes. En la Figura 40, se muestra el mapa de calor que representa la distribución geográfica de los accidentes registrados. En esta gráfica, se consideran los valores atípicos como el máximo valor encontrado en el rango intercuartil. Además, se observa que las zonas con mayor demanda de atenciones de emergencia por accidentes vehiculares son: Lima Centro y límites de Lima Norte y Callao con Lima Centro.

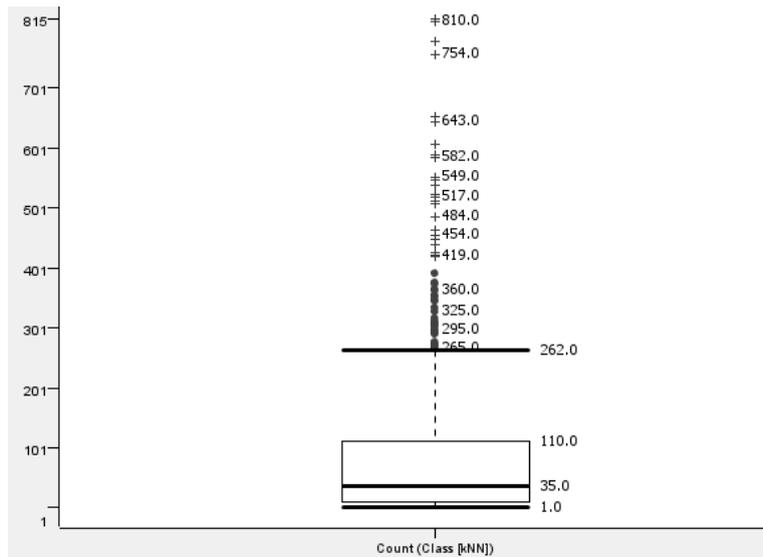


Figura 39 Distribución de cajas y bigotes de porcentaje de accidentes vehiculares atendidos en Lima Metropolitana y Callao.

Fuente: Elaboración propia. Datos: Registros de emergencia del CGBVP, 2014 – junio de 2020.

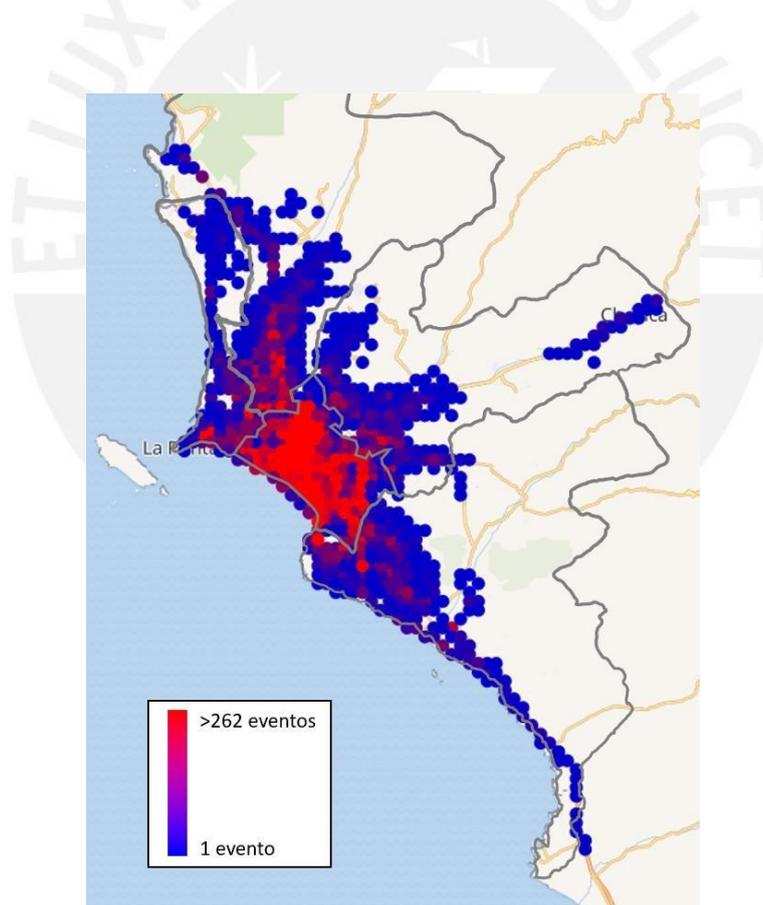


Figura 40 Mapa de calor con accidentes vehiculares atendidos en Lima Metropolitana y Callao.

Fuente: Elaboración propia. Datos: Registros de emergencia del CGBVP, 2014 – junio de 2020.

3.2.4.3 Zonas con alta demanda de rescates

Para el caso de rescates en general, la mayoría de los cuadrantes presentan 4 incidentes registrados. El máximo valor encontrado en el cuarto rango intercuartil es de 29 incidentes y, se

observa que al menos hay un cuadrante que alcanza los 222 incidentes, ver Figura 41. Dicho esto, la Figura 42 muestra el mapa de calor con la densidad de rescates realizados por el CGBVP. Se observa, que Lima Centro es la región con mayor demanda de atenciones con estas características.

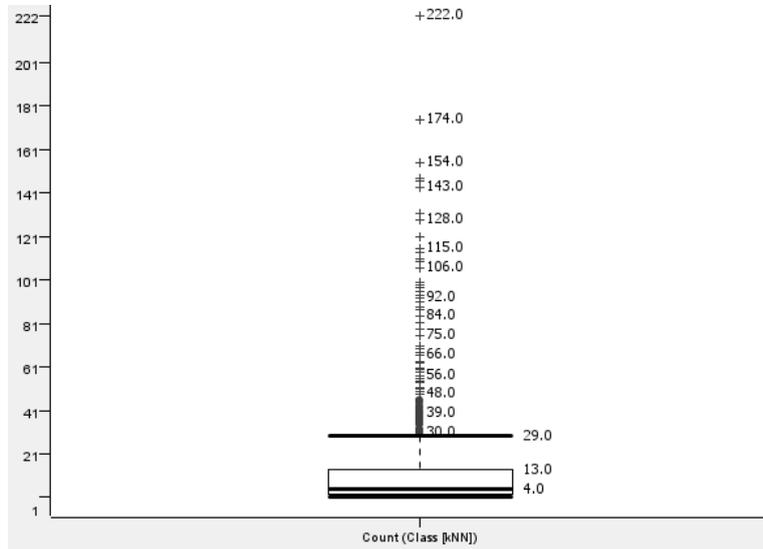


Figura 41 Distribución de cajas y bigotes de porcentaje de rescates atendidos en Lima Metropolitana y Callao.
 Fuente: Elaboración propia. Datos: Registros de emergencia del CGBVP, 2014 – junio de 2020.

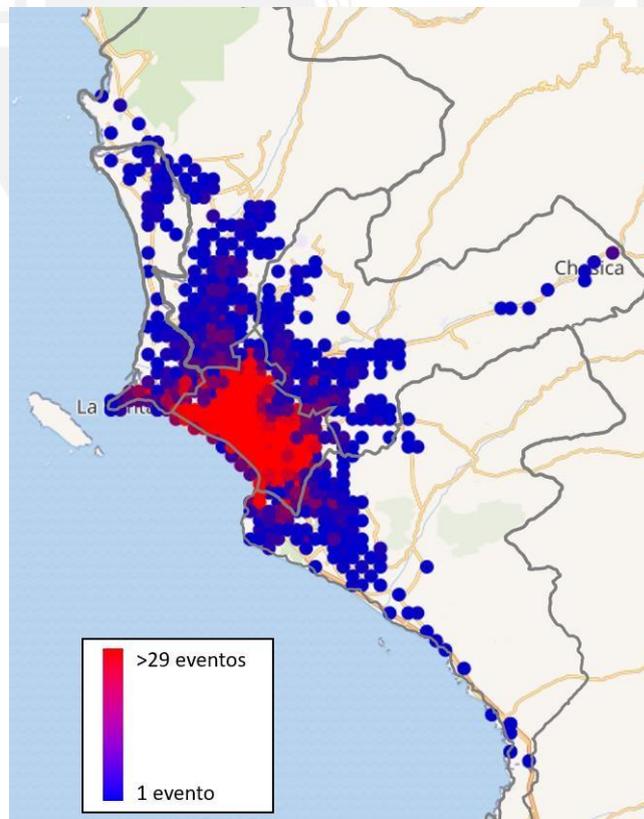


Figura 42 Mapa de calor con rescates atendidos en Lima Metropolitana y Callao.
 Fuente: Elaboración propia. Datos: Registros de emergencia del CGBVP, 2014 – junio de 2020.

3.2.5 MATERIALES PELIGROSOS

El presente acápite describe la cobertura de unidades requeridas para la atención de emergencias con materiales peligrosos. Esta cobertura analiza la capacidad de tiempo de respuesta registrados en el periodo 2014 y junio de 2020.

Posterior a ello, describe las zonas de alta demanda de emergencias con materiales peligrosos y las zonas con demanda de recursos especiales, tales como unidades MATPEL.

3.2.5.1 Cobertura actual

El presente análisis se desarrolla en función a la recomendación del estándar NFPA 1720 para áreas suburbanas, es decir, las emergencias de materiales peligrosos se deben atender en menos de 10 minutos al menos el 80% de las veces (ver Tabla 3). Sin embargo, tal como se observa en la Figura 43, la mediana de los registros es del 79% de las emergencias con materiales peligrosos en Lima Metropolitana y Callao.

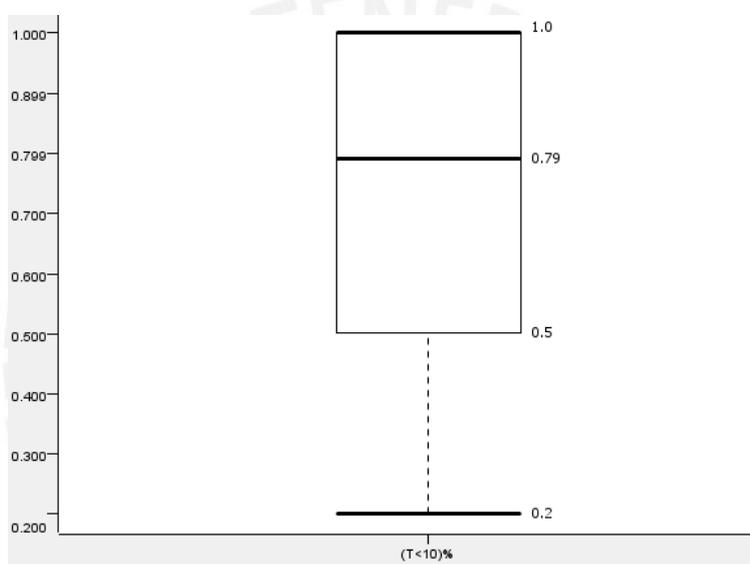


Figura 43 Distribución de cajas y bigotes de porcentaje de emergencias con materiales peligrosos atendidas en menos de 10 minutos.

Fuente: Elaboración propia. Datos: Registros de emergencia del CGBVP, 2014 – junio de 2020.

En tal sentido, las zonas donde existe una falencia en la cobertura de atenciones de materiales peligrosos están focalizados en los distritos de Rímac y el límite con Cercado de Lima, La Victoria, San Borja y Pueblo Libre, ver Figura 44.

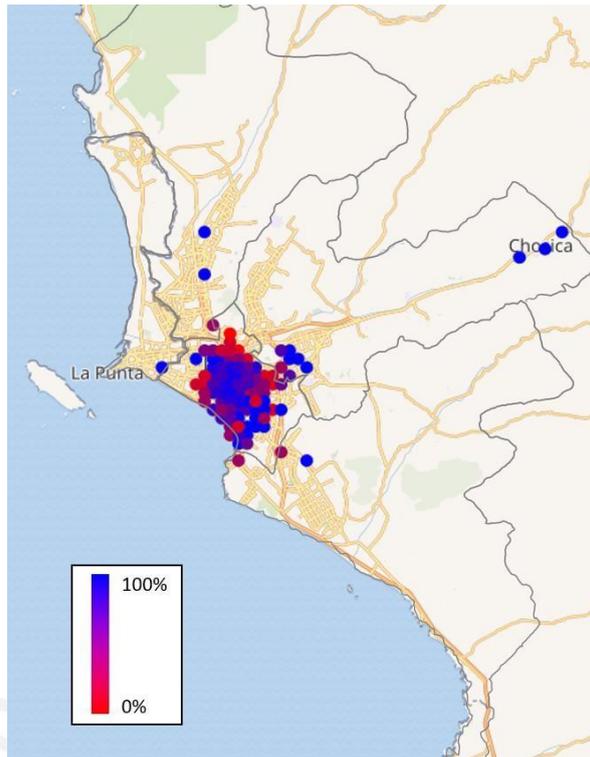


Figura 44 Mapa de calor de emergencias con materiales peligrosos atendidos en menos de 10 minutos. Fuente: Elaboración propia. Datos: Registros de emergencia del CGBVP, 2014 – junio de 2020.

3.2.5.2 Zonas con demanda de recursos especiales

En el caso de las atenciones de emergencias con materiales peligrosos, todas estas emergencias requieren una unidad específica que cuente con recursos y bomberos con el conocimiento y entrenamiento suficiente para controlar este tipo de incidentes. En la Figura 45 se observa el comportamiento de los registros de este tipo de emergencias durante los últimos 6 años.

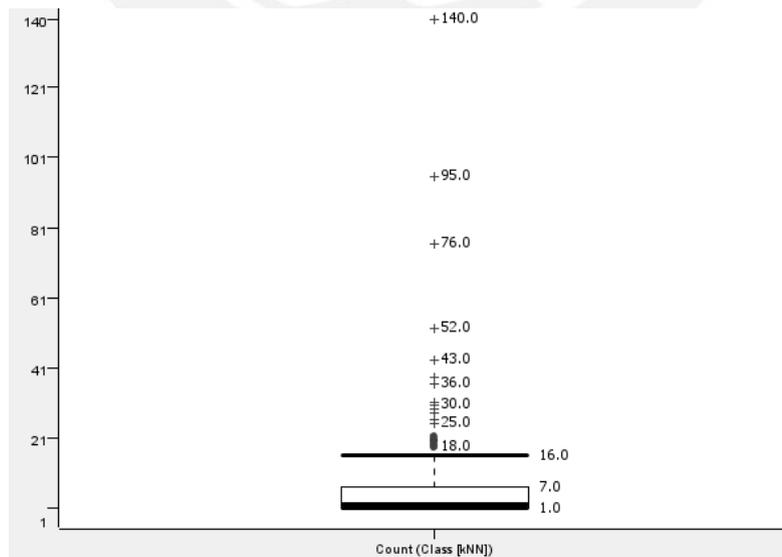


Figura 45 Distribución de cajas y bigotes de incidentes atendidos por unidades MATPEL. Fuente: Elaboración propia. Datos: Registros de emergencia del CGBVP, 2014 – junio de 2020.

En tal sentido, las zonas con alta demanda de este tipo de recursos están representados por el color rojo en el mapa de calor mostrado en la Figura 46. Se observa que el máximo valor del rango intercuartil es de 16 incidentes. En esta gráfica, se considera que los cuadrantes que alcanzaron hasta 140 incidentes en estos 6 años también están representados por el color rojo.

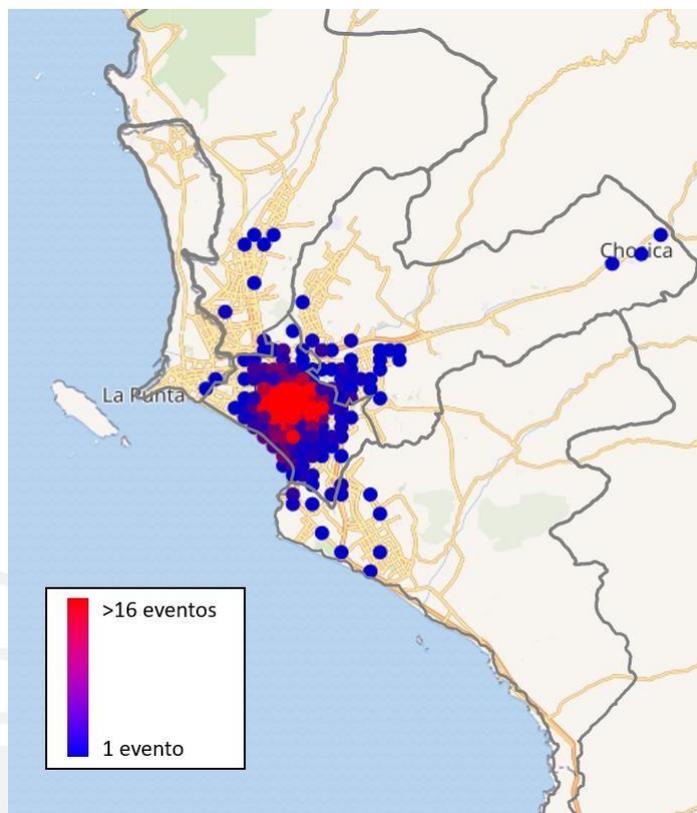


Figura 46 Mapa de calor de incidentes atendidos por unidades MATPEL.
Fuente: Elaboración propia. Datos: Registros de emergencia del CGBVP, 2014 – junio de 2020.

3.3 RESULTADOS DEL DIAGNÓSTICO

El presente diagnóstico desarrolla dos factores del problema descrito en el segundo capítulo. El primer factor es la evolución urbana y el efecto generado en la demanda del servicio de respuesta a emergencias. El segundo, es el comportamiento actual del servicio en base a la cobertura establecida por la ubicación de las estaciones y recursos disponibles, frente a la demanda del servicio.

Lima Metropolitana y Callao son las principales regiones urbanas del Perú. Una de las evidencias del crecimiento económico del país es el crecimiento del parque automotor en los últimos años (ver Figura 9). Ante esta situación, el gobierno inició el desarrollo de un plan de mejora de la infraestructura vial. Sin embargo, el plan implementa la reducción de la velocidad promedio de viaje de 20 km/h en el año 2014 a 18.5 km/h al año 2019 (ver Figura 10).

Como resultado de estas condiciones, el Figura 15 contrasta el crecimiento del parque automotor y la velocidad promedio de vehículos comerciales y vehículos de emergencia. En este gráfico se observa que, a pesar del proyecto de mejora de la infraestructura vial, la velocidad promedio de los vehículos de emergencia se ha mantenido en el rango entre 19.2 y 20.2 km/h

entre los años del 2014 y 2019. Es decir, no hay un impacto significativo en la mejora de la velocidad de viaje en vehículos de emergencia.

Otra evidencia del crecimiento urbanístico en Lima y Callao es el crecimiento demográfico dentro de sus distritos. A través de los últimos años, la demanda del servicio de respuesta a emergencias ha evidenciado este cambio demográfico en la ciudad (ver Figura 12). Sin embargo, a nivel distrital no se observa una correlación entre la densidad poblacional y la demanda del servicio (ver Tabla 4). En tal sentido, se evidencia que hay otros factores determinantes de la demanda del servicio como el tipo de construcción de las viviendas y el uso de las edificaciones (almacenes, fábricas, centros comerciales, centros de salud, centros educativos, entre otros) que puede contribuir al factor de riesgo de incendio y otras emergencias.

En cuanto a la cobertura a través de los recursos actuales se observa una situación crítica. Tal como se describe en el segundo capítulo, el CGBVP tiene como objetivo atender cualquier tipo de emergencia médica, incendio, rescate o incluso con materiales peligrosos. Sin embargo, no todas las estaciones de bomberos cuentan con vehículos para atender estas emergencias (ver Figura 5).

Al realizar consultas a los miembros de diversas compañías de bomberos y al verificarlo en la plataforma digital Sistema de Gestión Operativa (SGO) del CGBVP, se observa que hay una gran cantidad de unidades de emergencia con significativa antigüedad. Por lo tanto, se asume que la mayoría de las unidades están próximas a cumplir su tiempo de vida. Ante esta situación y, a pesar de los esfuerzos en la gestión de mantenimiento de la INBP, se ha alcanzado un punto de quiebre en el cual la INBP no logra mantener la operatividad de todas las unidades.

Es decir, las principales estaciones del Perú no cuentan con suficientes recursos para atender la demanda. Siendo una de las causales, la falta de renovación de los vehículos de emergencia. El resultado de las condiciones en los recursos existentes es que, al suscitarse una emergencia, no siempre la estación más cercana podrá asistirle. Por lo tanto, el tiempo de respuesta será mayor al tener que despachar a una unidad desde la siguiente estación más cercana.

Otro aspecto importante de la cobertura es la distribución de las unidades entre las estaciones de Lima y Callao. Tal como se observa en la Figura 5 y Figura 6, hay una concentración de unidades en los distritos de Lima Centro las cuales, a través de la labor voluntaria de los bomberos, permiten una cobertura sustancial en esta región de la ciudad en menor tiempo que el resto de Lima y Callao.

Sin embargo, debido a la expansión demográfica de Lima y Callao, en los alrededores de Lima Centro hay zonas de alta demanda con un tiempo de respuesta significativamente más alto. Esta situación se registra en la Figura 21, Figura 33 y Figura 38, donde se observa el mapa de calor con las zonas de mayor demanda de incendios, emergencias médicas y rescate, respectivamente.

Finalmente, el resultado de las condiciones identificadas en el diagnóstico es que el 90 por ciento de las emergencias son atendidas en 19.5 minutos en la región de Lima Metropolitana y Callao. Es decir, el tiempo de respuesta es más del doble que el recomendado por estándares internacionales como el NFPA 1720. A continuación, en los siguientes capítulos se desarrolla un modelamiento que busca minimizar el tiempo de respuesta mediante la optimización de la ubicación de estaciones de bomberos.

4. MODELAMIENTO DEL PROBLEMA

El presente capítulo describe dos escenarios de análisis los cuales se desarrollarán en dos modelos para buscar la solución del problema. En base a los resultados de estos modelos, se realiza un comparativo para determinar la solución óptima del problema.

4.1 ESCENARIOS DE ANÁLISIS

A continuación, se describen los escenarios de análisis a desarrollar en la presente investigación:

4.1.1 ESCENARIO 1: UBICACIÓN SIN CONSIDERAR ESTACIONES EXISTENTES

En el presente escenario se asume que el CGBVP tiene la disposición y capacidad de reubicar todas las Unidades Básicas Operativas. Dicho esto, el presente escenario cuenta con la cantidad mínima necesaria de estaciones en una ubicación óptima del tal modo que pueda cubrir la demanda identificada en el capítulo 3.

4.1.2 ESCENARIO 2: UBICACIÓN CONSIDERANDO ESTACIONES EXISTENTES

A diferencia del primer escenario, se considera la existencia de las estaciones operativas. Es decir, el modelo considera la ubicación óptima de nuevas estaciones considerando la reubicación mínima de las estaciones existentes.

4.2 MODELOS

A continuación, se detallan los modelos desarrollados para determinar la ubicación y cantidad óptima de estaciones para cada escenario:

4.2.1 MODELO DE LÍMITE DE COBERTURA

El presente modelo es una variación al método desarrollado por Murray (2013). Se desarrolla un modelo que busca ubicar estaciones con el objetivo de lograr un tiempo de respuesta (tiempo de viaje desde la estación hasta el lugar de la emergencia) en un tiempo S , el λ por ciento de las veces en Lima y Callao. Tal como se describió en el acápite 2.4.3 Estándares internacionales, NFPA recomienda que el tiempo S sea 9 minutos y que λ sea 90% para cualquier tipo de emergencia.

4.2.1.1 Variables, índices y notaciones

A continuación, se describen las variables e índices con sus respectivas notaciones:

i	Índice de potenciales estaciones de bomberos
j	Índice de sectores a ser atendidos
a_j	Servicio de demanda esperada en el sector j
S	Tiempo de respuesta establecido por estándar NFPA
V_j	Matriz de velocidad promedio de viaje en el sector j
D_{ij}	Matriz de distancia de Manhattan desde la estación i hasta el sector j
T_{ij}	Matriz de tiempo de viaje desde la estación i hasta el sector j
θ_{ij}	Matriz de estaciones de bomberos en el sector i que atienden adecuadamente al sector j
φ_i	Arreglo de estaciones existentes en el sector i

r	Cantidad de estaciones existentes
X_i	1; si la estación i es seleccionada 0; si la estación i no es seleccionada
Y_j	1; si el sector j es atendido adecuadamente por una o más estaciones 0; si el sector j no es atendido adecuadamente por una o más estaciones

4.2.1.2 Estimación de matriz T_{ij}

Para estimar esta matriz, se ha desarrollado un análisis de información de los registros de tiempos de respuesta del CGBVP del 2014 al 2020. A continuación, se describen las etapas del proceso:

A) Etapa 1:

Se analizaron 362'457 eventos de emergencia en el periodo de los últimos 6 años y se sectorizó la distribución de emergencias por cuadrantes de 1km cuadrado en el territorio de Lima Metropolitana y Callao, obteniendo un total de 1036 sectores j . Tal como se muestra en la Figura 47, se desarrolló un tratamiento de los datos en el software KNIME. Como resultado se obtuvo una tabla con la velocidad promedio de viaje en cada cuadrante de Lima y Callao.

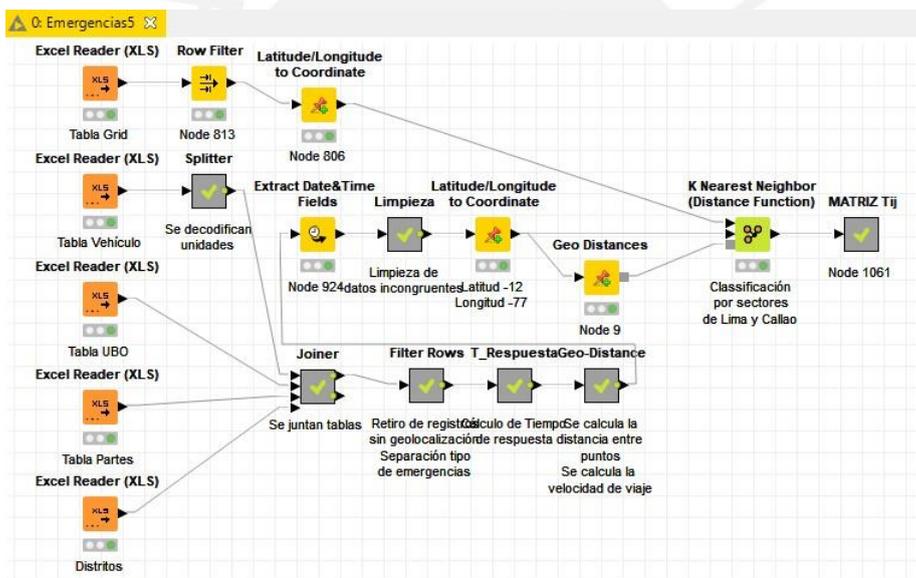


Figura 47 Evaluación de la velocidad promedio de viaje en cada cuadrante de Lima y Callao

Fuente: Elaboración propia. Datos: Registros de emergencia del CGBVP, 2014 – 2019.

B) Etapa 2:

En la segunda etapa se desarrolla la matriz T_{ij} a partir de la tabla obtenida en la etapa previa (ver Figura 49). Esta matriz se obtiene por medio de una codificación en Python dentro de un nodo de trabajo en el entorno KNIME. Esta codificación permite generar un vector V_j , el cual representa la relación de velocidad promedio de viaje en el sector j . Además, el código Python crea otra matriz cuadrada D_{ij} . Donde los elementos de D_{ij} corresponden a la distancia de Manhattan entre el sector i y j , expresada por la Ecuación (3).

$$D_{ij} = \sum_{i,j}^n (|x_i - x_j| + |y_i - y_j|); \forall i, j \in \{1 \dots n\} \quad \text{Ecuación (3)}$$

Finalmente, tal como se observa en la Figura 48, el código Python calcula la matriz T_{ij} la cual está expresada por la Ecuación (4).

$$T_{ij} = G D_{ij} \times V_j^{-1}; \forall i, j \in \{1 \dots n\} \quad \text{Ecuación (4)}$$

```

42 # CALCULO DE MATRIZ Dij
43 for i in range(elementos):
44     for j in range(elementos):
45         if i == j:
46             matriz_d[i][j]=1
47         else:
48             d=abs(x[i]-x[j])+abs(y[i]-y[j])
49             matriz_d[i][j]=d
50
51 # DIMENSIÓN MATRIZ T
52 matriz_t=np.ones((elementos, elementos))
53
54 # CÁLCULO DE MATRIZ Tij
55
56 for i in range(elementos):
57     for j in range(elementos):
58         matriz_t[i][j]=matriz_d[i][j]/v[j]
59 matriz_t=matriz_t*60
60

```

Figura 48 Extracto del código Python para la obtención de la matriz T_{ij}
Fuente: Elaboración propia.

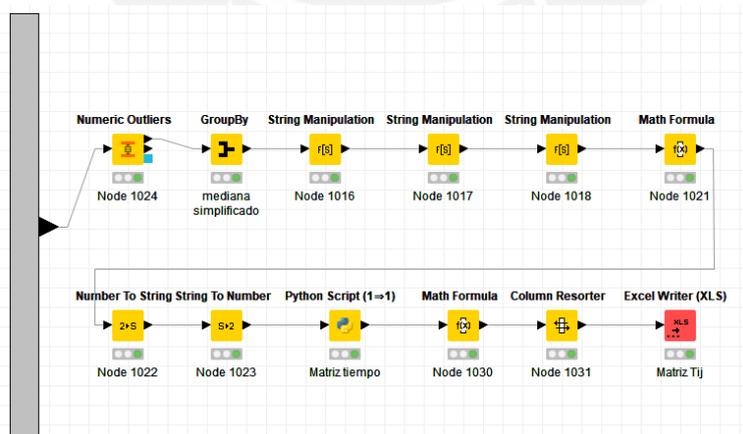


Figura 49 Obtención de la matriz T_{ij}
Fuente: Elaboración propia. Datos: Registros de emergencia del CGBVP, 2014 – junio de 2020.

4.2.1.3 Restricciones

A continuación, se describen las restricciones del modelo:

1) Garantizar el servicio adecuado:

La restricción descrita en la Ecuación (5), describe que la variable de decisión Y_j estará sujeta al cumplimiento de la condición en que es atendida adecuadamente por una estación en X_i .

$$\sum_i \theta_{ij} \times X_i \geq Y_j \quad \forall j \quad \text{Ecuación (5)}$$

Esta condición de atención adecuada es descrita en la Ecuación (6). Es decir, por medio de la matriz θ_{ij} , se logra restringir la asignación de la variable Y_j .

$$\theta_{ij} = \begin{cases} 1; & t_{ij} \leq S \\ 0; & t_{ij} > S \end{cases} \quad \text{Ecuación (6)}$$

2) Cumplir con percentil 90:

Considerando la demanda del servicio de respuesta a emergencias en cada sector a través de la matriz D_j , se presenta la restricción descrita en la Ecuación (7). En ella, se limita que el ponderado del cumplimiento de sectores atendidos correctamente con la demanda esperada, debe ser mayor o igual al 90%.

$$100 \left(\sum_j D_j \right)^{-1} \times \sum_j D_j \times Y_j \geq 90 \quad \text{Ecuación (7)}$$

3) Mantener las estaciones existentes:

La presente restricción aplica al segundo escenario descrito en el acápite 4.1. La Ecuación (8) describe la restricción que asegura la asignación de estaciones en el sector i . Es decir, las estaciones se mantienen en el sector inicial.

$$\sum_i X_i \times \varphi_i = r \quad \text{Ecuación (8)}$$

4) Variables de decisión binarias:

El modelo desarrollado utiliza variables de decisión binarias, las cuales están representadas en la Ecuación (9).

$$\begin{aligned} X_i &= \{0,1\}, \forall i \\ Y_j &= \{0,1\}, \forall j \end{aligned} \quad \text{Ecuación (9)}$$

4.2.1.4 Supuestos

A continuación, se listan los supuestos del modelo de optimización:

- 1) Se asume que los registros atípicos de velocidad, distancia y tiempo de respuesta, de la base de datos del CGBVP se presentaron por error humano. Por lo tanto, fueron eliminados de la estimación de la velocidad promedio de cada sector (V_j).

- 2) Se asume que la distancia recorrida desde la estación i al sector j es la distancia de Manhattan (la sumatoria de los lados de cada cuadrante).
- 3) Se asume que las condiciones de tráfico se mantienen por las 24 horas del día, los 7 días de la semana.
- 4) Se asume que las condiciones de tráfico se mantendrán por los próximos años.
- 5) Se asume que la demanda corresponde a cualquier tipo de emergencia.
- 6) Se asume que la demanda del servicio de emergencia se mantendrá constante por los próximos años.
- 7) Se asume que cada estación cuenta con la cantidad suficiente de bomberos voluntarios capacitados para atender cualquier tipo de emergencia.
- 8) Se asume que cada estación dispone de conductores y vehículos de emergencia operativos para cubrir la demanda.
- 9) Se asume que, después de ser notificados por una emergencia, los bomberos salieron de su estación después de un minuto y medio en emergencias médicas y después de dos minutos para cualquier otra emergencia.

4.2.1.5 Función objetivo

La función objetivo del modelo está expresada en la Ecuación (10), la cual describe la minimización de la cantidad de estaciones de bomberos en Lima y Callao.

$$\text{Minimizar: } \sum_i X_i \quad \text{Ecuación (10)}$$

4.2.2 OPTIMIZACIÓN POR METAS

El presente modelo fue desarrollado por Badri (1998), el cual presenta el criterio de optimización considerando distintos objetivos. Uno de los aspectos más importantes que se logra con este método es incluir objetivos elaborados por distintos actores del proceso de toma de decisión. Incluso, se considera la optimización por Límite de Cobertura, desarrollada por Murray. Sin embargo, estos objetivos planteados pueden llegar a tener conflictos entre otros y, al ser un modelo en base al cumplimiento de metas, no se llega a satisfacer los objetivos planteados.

En tal sentido, el presente modelo considera los siguientes objetivos presentados como restricciones de metas:

- Económica: Minimizar los costos de implementación de nuevas estaciones.
- Cobertura por tiempo en percentil 90: Minimizar el tiempo de viaje en percentil 90.
- Cobertura por tiempo máximo en percentil 80: Minimizar el tiempo de viaje máximo alcanzado en percentil 80.
- Objetivo: Minimizar la reubicación de las estaciones actuales y la adición de nuevas.
- Exceso de cobertura: Minimizar el exceso de cobertura en sectores donde no requieren más de cierta cantidad de estaciones.

Cabe resaltar que el método de Murray cuenta con dos restricciones estructurales para establecer el modelo. Por lo tanto, el modelo de optimización por metas cuenta con dos restricciones para establecer la cobertura por tiempo en percentil 90 y otras dos restricciones para establecer la cobertura por tiempo máximo en percentil 80.

4.2.2.1 Variables, índices y notaciones

i	Índice de sitios alternativos para ubicar estaciones de bomberos
j	Índice de sectores de Lima y Callao a ser atendidos
n	Número de potenciales alternativas de estaciones de bomberos
m	Número de sectores a ser atendidos
C	Presupuesto disponible para implementación de nuevas estaciones
F	Cantidad objetivo de estaciones de bomberos
E_i	Estaciones existentes en el sector i
c_i	Costo de implementar una estación de bomberos en el sector i
D_j	Cantidad de emergencias atendidas en el sector j
R_j	Cobertura con más de una unidad requerida en el sector j , al menos el 30% de los incidentes presentados en el sector
T_{ij}^{av}	Tiempo promedio de viaje desde sector i hasta el sector j
T_{ij}^{max}	Tiempo máximo de viaje desde sector i hasta el sector j
v^c	Desviación positiva del costo incurrido en la implementación
$v^{t\ av}$	Desviación positiva del tiempo de viaje promedio
$u^{p\ av}$	Desviación negativa del percentil alcanzado en tiempo de viaje promedio
$v^{t\ max}$	Desviación positiva del tiempo de viaje máximo
$u^{p\ max}$	Desviación negativa del percentil alcanzado en tiempo de viaje máximo
$v_j^{tb\ av}$	1; si $v^{t\ av}$ es mayor a 0 0; si $v^{t\ av}$ es 0
u^f	Desviación negativa sobre la cantidad objetivo de estaciones
u^r	Desviación negativa sobre la cobertura de respaldo requerida en el sector j
X_i	1; si la estación i es seleccionada 0; si la estación i no es seleccionada
θ_{ij}	1; si el sector j es atendido por la estación i en $t \leq 10$ minutos, 0; si el sector j es atendido por la estación i en $t > 10$ minutos
θ_{mxij}	1; si el sector j es atendido por la estación i en $t \leq 20$ minutos, 0; si el sector j es atendido por la estación i en $t > 20$ minutos
Y_{ij}	1; si el sector j es atendido adecuadamente por una o más estaciones 0; si el sector j no es atendido adecuadamente por una o más estaciones

4.2.2.2 Estimación de matrices de tiempo t_{ij}^{av} y t_{ij}^{max}

El desarrollo utiliza las primeras dos etapas descritas en el modelo de límite de cobertura

A) Etapa 1:

El desarrollo de la primera etapa calcula la velocidad de viaje de cada registro de emergencia de la base de datos de emergencias del CGBVP en el periodo 2014 – 2019. Este cálculo de velocidad es en base a la distancia recorrida calculada como distancia de Manhattan entre las ubicaciones geográficas de la estación existente hasta el lugar del incidente. Luego, se estima la velocidad promedio entre la distancia recorrida y el tiempo de viaje desde la salida de la estación hasta el arribo de la unidad.

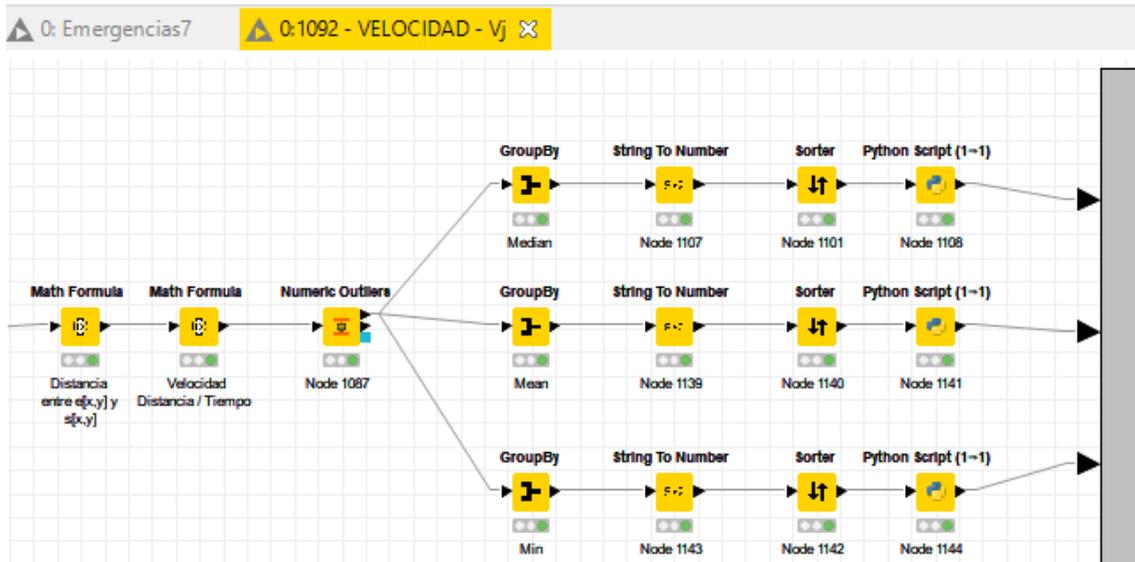


Figura 50 Estimación de velocidad de viaje en cada cuadrante por distintos métodos de agrupación
Fuente: Elaboración propia. Datos: Registros de emergencia del CGBVP, 2014 – 2019.

Luego, se retiran los valores atípicos de velocidad los cuales se identifican como registros causados por error humano. Posterior a ello, se desarrollan agrupaciones por cada uno de los 1036 sectores. Cada agrupación tiene una metodología que difiere según la aplicación de análisis. Tal como se describió en el modelo de límite de cobertura, la velocidad promedio de cada sector es la agrupación según la mediana de los valores de velocidad en el sector. Para el método de optimización por metas, se tienen las agrupaciones por promedio y valor mínimo de cada sector, generando el vector V_{prom} y V_{min} , respectivamente.

B) Etapa 2:

Similar a la segunda etapa de la estimación de matriz tiempo del modelo de límite de cobertura, se calcula una matriz de tiempo para cada método de agrupación. Tal como se observa en la Figura 51, a través de este cálculo se obtiene la matriz de tiempo promedio y tiempo máximo.

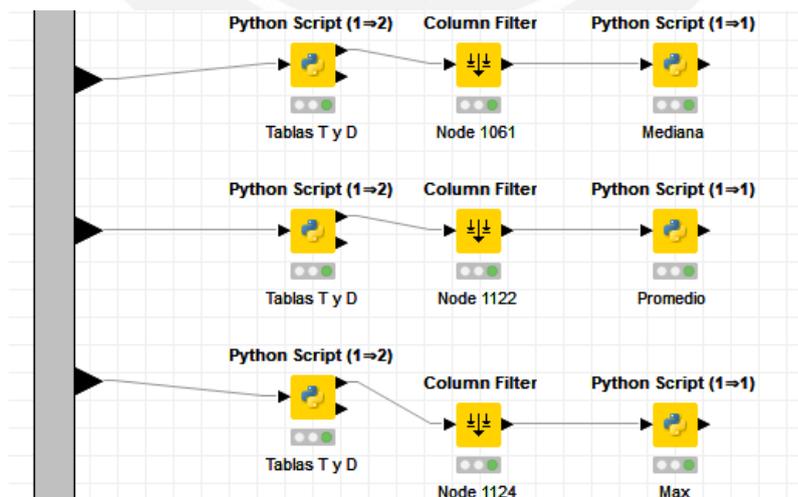


Figura 51 Cálculo de matrices de tiempo para cada método de agrupación de velocidad
Fuente: Elaboración propia. Datos: Registros de emergencia del CGBVP, 2014 – 2019.

C) Etapa 3:

Finalmente, estas matrices son almacenadas en una base de datos en MS Access. Para ello, se desarrolló un código en Python en la plataforma KNIME a través del nodo *Python Script*, ver Figura 52.

```

19 # funcion fila en tabla
20 def format_dataframe_data():
21     rows = [tuple(cell) for cell in TIEMP.values]
22     return rows
23
24 # create connection
25 con = pyodbc.connect(r'DRIVER={Microsoft Access Driver (*.mdb, *.accdb)};DBQ=C:\FIRE_ACCESS\FIRE2.mdb;')
26 cursor = con.cursor()
27
28 # Limpieza de datos
29 cursor.execute (''' DELETE FROM TIEMPO_prom ''')
30
31 # carga de tablas
32 sql = ''' INSERT INTO TIEMPO_prom (estaciones,sectores, Tiempo)
33     VALUES (?,?,?) '''
34 rows = format_dataframe_data()
35 for row in rows:
36     cursor.execute(sql,row)
37
38 # close connection

```

Figura 52 Extracto del código Python que ejecuta el almacenamiento de matrices en MS Access

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2.3 Restricciones

A continuación, se describen las restricciones por objetivos del modelo de optimización.

4.2.2.3.1 Minimizar el costo a un presupuesto

La restricción de costo tiene como objetivo de minimizar el costo de implementación de estaciones según el distrito donde estaría ubicado, sin considerar las estaciones existentes que coinciden en el mismo sector. Esta restricción pretende que el costo total no supere el presupuesto asignado por la Intendencia Nacional de Bomberos del Perú.

$$\sum_{i=1}^n (X_i - E_i \times X_i) \times c_i - v^c = C ; \forall i \in \{1 \dots n\} \quad \text{Ecuación (11)}$$

En esta ecuación, C es el presupuesto disponible para el costo total de implementación, n es el número de sectores donde se ubicarían estaciones, c_i es el costo de implementar una estación en el sector i, y E_i es el parámetro el cual contiene la ubicación de las estaciones existente en el sector i. Por lo tanto, la función objetivo debe minimizar la desviación negativa v^c para no exceder el presupuesto.

4.2.2.3.2 Límite de Cobertura en tiempo promedio

Las siguientes restricciones corresponden al método de Murray, Límite de Cobertura. En estas restricciones se desarrollan las ecuaciones que limitan la cobertura en base al tiempo promedio.

La restricción descrita en la Ecuación (12), describe que la variable de decisión $v^{t\ av}$ estará sujeta al cumplimiento de la condición en que es atendida adecuadamente por una estación en X_i .

$$\sum_i \theta_{ij} \times X_i - v^{t\ av} \geq 0 \forall j \quad \text{Ecuación (12)}$$

Esta condición de atención adecuada es descrita en la Ecuación (13). Es decir, por medio de la matriz θ_{ij} , se logra restringir la asignación de la variable $v^{t\ av}$.

$$\theta_{ij} = \begin{cases} 1; & t_{ij} \leq S \\ 0; & t_{ij} > S \end{cases} \quad \text{Ecuación (13)}$$

La segunda restricción del modelo es el cumplimiento del percentil 90. Para ello, se considera la demanda del servicio de respuesta a emergencias en cada sector a través de la matriz D_j , ver Ecuación (14). En ella, se limita que el ponderado del cumplimiento de sectores atendidos correctamente con la demanda esperada, debe ser mayor o igual al 90%.

$$100 \left(\sum_j D_j \right)^{-1} \times \sum_j D_j \times v^{t\ av} + u^{p\ av} \geq 90 \quad \text{Ecuación (14)}$$

4.2.2.3.3 Límite de cobertura en tiempo máximo

Al igual que las restricciones del acápite anterior, las siguientes restricciones describen el método de Murray, sin embargo, analizan el límite de cobertura en base al tiempo máximo en percentil 80.

La restricción descrita en la Ecuación (15), describe que la variable de decisión $v^{t\ max}$ estará sujeta al cumplimiento de la condición en que es atendida adecuadamente por una estación en X_i . Siendo θ^{mx}_{ij} , definido por la Ecuación (16).

$$\sum_i \theta^{mx}_{ij} \times X_i - v^{t\ max} \geq 0 \quad \forall j \quad \text{Ecuación (15)}$$

$$\theta^{mx}_{ij} = \begin{cases} 1; & t_{ij} \leq S \\ 0; & t_{ij} > S \end{cases} \quad \text{Ecuación (16)}$$

La segunda restricción del modelo es el cumplimiento del percentil 80. Similar al caso original, se evalúa la demanda del servicio de respuesta a emergencias en cada sector a través de la matriz D_j , ver Ecuación (17). En ella, se limita que el ponderado del cumplimiento de sectores atendidos correctamente con la demanda esperada, debe ser mayor o igual al 80%.

$$100 \left(\sum_j D_j \right)^{-1} \times \sum_j D_j \times v^{t\ max} + u^{p\ max} \geq 80 \quad \text{Ecuación (17)}$$

4.2.2.3.4 Alcanzar una cantidad objetivo de estaciones requeridas

El objetivo de alcanzar una cantidad objetivo de estaciones, expuesta por la Ecuación (18), representa la minimización de estaciones existentes a reubicar. Es decir, mantener las estaciones existentes.

$$\sum_{i=1}^n X_i \times E_i + u^f = F \quad \text{Ecuación (18)}$$

Donde F es la cantidad de estaciones existentes.

4.2.2.3.5 Minimizar el exceso de cobertura

El objetivo de minimizar el exceso de cobertura de estaciones, desarrollada por

$$v_j^{tb\ av} + u_j^r = 10R_j ; \forall j \in \{1 \dots m\} \quad \text{Ecuación (19)}$$

Donde R_j representa a los sectores que requieren de más de una unidad autobomba contra incendios al menos, el 30% de los incendios registrados en el sector j.

4.2.2.3.6 Restricciones estructurales

La primera restricción estructural permite forzar que X_i sea 1 si $Y_{ij} \neq 0$ para el sector j. Donde M es un número arbitrario de gran magnitud, ver Ecuación (20).

$$\sum_{i=1}^n Y_{ij} - MX_i \leq 0 ; \forall i \in \{1 \dots n\} \quad \text{Ecuación (20)}$$

La segunda restricción convierte la variable de desviación $v^{t\ av}$ a una variable binaria descrita como $v_j^{tb\ av}$, ver Ecuación (21).

$$v_j^{tb\ av} \leq v^{t\ av} ; \forall j \in \{1 \dots m\} \quad \text{Ecuación (21)}$$

4.2.2.4 Supuestos

A continuación, se listan los supuestos del modelo de optimización:

- 1) Se asume que los registros atípicos de velocidad, distancia y tiempo de respuesta, de la base de datos del CGBVP se presentaron por error humano. Por lo tanto, fueron eliminados de la estimación de la velocidad promedio y velocidad mínima de cada sector.
- 2) Se asume que la distancia recorrida desde la estación i al sector j es la distancia de Manhattan (la sumatoria de los lados de cada cuadrante).
- 3) Se asume que las condiciones de tráfico tienen un comportamiento constante en las horas pico entre los años 2014 y 2019.
- 4) Se asume que las condiciones de tráfico se mantendrán por los próximos años.
- 5) Se asume que la demanda corresponde a cualquier tipo de emergencia.
- 6) Se asume que cada estación cuenta con la cantidad suficiente de bomberos voluntarios capacitados para atender cualquier tipo de emergencia.
- 7) Se asume que cada estación dispone de conductores y vehículos de emergencia operativos para cubrir la demanda.
- 8) Se asume que después de ser notificados por una emergencia, los bomberos salieron de su estación después de un minuto y medio en emergencias médicas y después de dos minutos para cualquier otra emergencia.
- 9) Se asume que el costo de reubicación de una estación de bomberos es el mismo que abrir una nueva estación.
- 10) Se asume que una estación de bomberos requiere de un área de terreno de 300 m².
- 11) Se asume que el presupuesto disponible para la implementación del proyecto es de 13 millones de USD.

4.2.2.5 Función objetivo

La función objetivo está representada por la Ecuación (22). En ella, se pretende minimizar las desviaciones resultantes por no alcanzar los objetivos. En ella, se consideran prioridades para cada objetivo las cuales reflejan los criterios de decisión del tomador de decisiones.

$$\text{Minimizar: } \begin{matrix} P_1(v^c) + P_2(u^{p\ av}) + \\ P_3u^{p\ max} + P_4u^f + P_5 \sum u_j^r \end{matrix} \quad \text{Ecuación (22)}$$



5. RESULTADOS

El presente capítulo expone los resultados de los dos escenarios de análisis, comparando los resultados al emplear los modelos de optimización por metas y por límite de cobertura.

5.1 ESCENARIO 1: UBICACIÓN SIN CONSIDERAR ESTACIONES EXISTENTES

5.1.1 Resultados del modelo de límite de cobertura

Al desarrollar el modelo de límite de cobertura, se obtiene que para lograr una cobertura de 9 minutos en percentil 90, se requiere un total de 42 estaciones. Cabe resaltar que, actualmente la región Lima Metropolitana y Callao cuenta con un total de 51 estaciones. Por lo tanto, de acuerdo con los resultados del modelo se estarían reubicando 36 estaciones y cerrando otras 9, ver Tabla 5.

Tabla 5 Resultados del modelo de límite de cobertura en escenario 1

Cobertura	90.118%
Estaciones existentes	6 estaciones
Estaciones reubicadas	36 estaciones
Estaciones cerradas	9 estaciones
Total estaciones	42 estaciones
Costo de implementación	USD 13.30 millones

Fuente: Elaboración propia.

Al observar la configuración del modelo se evidencia que el modelo concentra la ubicación de las estaciones en los sectores con mayor demanda del servicio de respuesta a emergencias. Por consiguiente, no considera la implementación de estaciones en zonas de menor demanda. Como resultado de esta configuración, el costo de implementación se estima en 13.3 millones de USD.

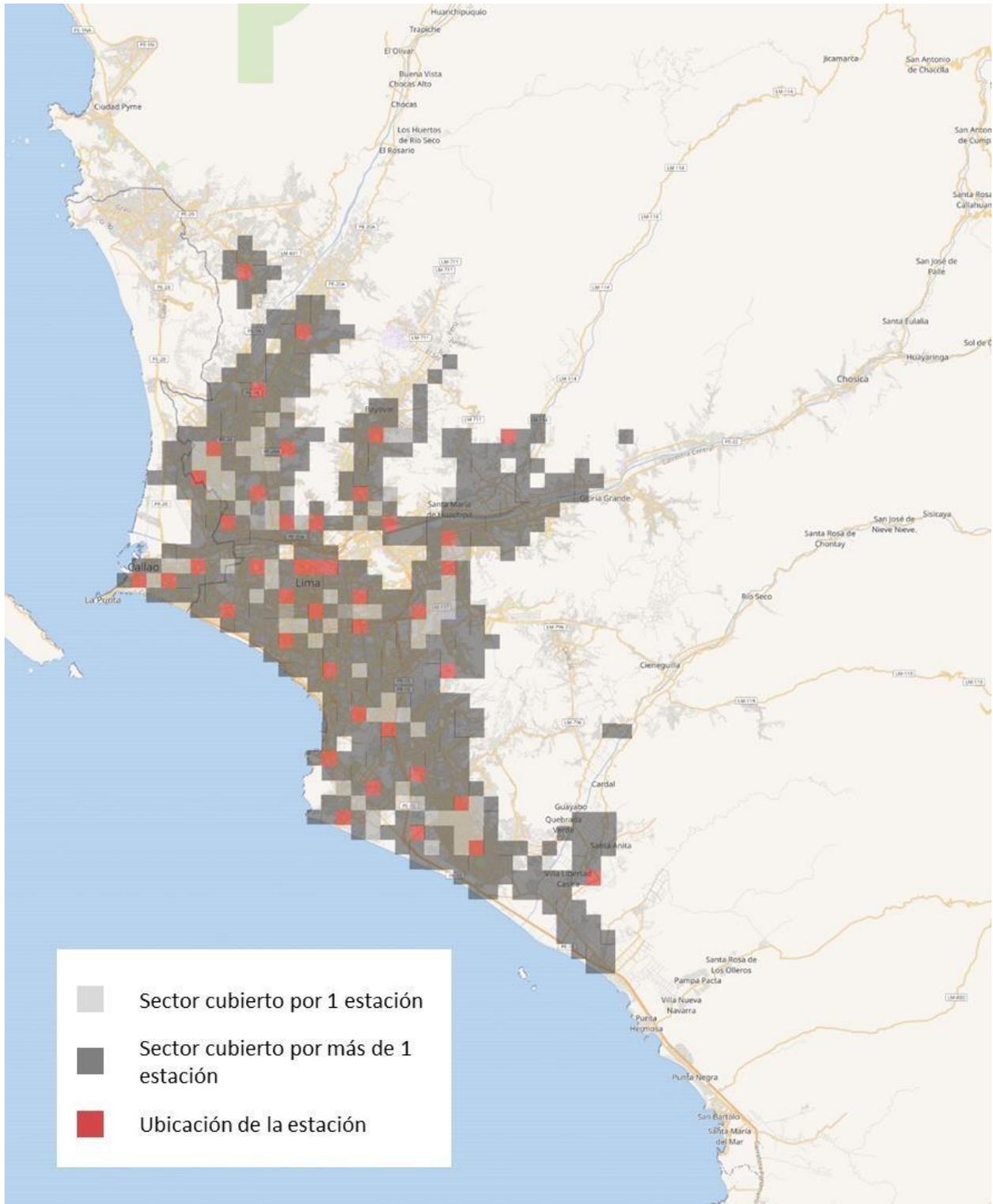


Figura 53 Mapa de resultados del modelo de límite de cobertura en escenario 1
 Fuente: Elaboración propia.

5.1.2 Resultados del modelo de optimización por metas

En la Tabla 6 se exponen los 8 casos desarrollados para el escenario de ubicación de estaciones considerando estaciones existentes. Para ello, se asignaron prioridades a los cinco objetivos expresados en el modelo de optimización por metas.

Tabla 6 Resultado de metas según prioridades y costo de inversión, sin considerar estaciones existentes

Caso	Prioridades				Costo de Implementación (millones de USD)	Total de estaciones	Percentil (tprom <= 10)	Percentil (tmax <= 20)
	C	Tp	Tm	R				
1	4	1	2	3	12.775	50	90.00	73.85
2	4	1	2	3	16.048	63	89.70	67.80
3	4	1	2	3	20.045	64	90.00	53.27
4	4	2	1	3	12.631	49	89.99	73.85
5	4	2	1	3	16.059	61	84.87	68.54
6	4	2	1	3	20.045	64	89.93	53.30
7	2	4	1	3	8.000	44	76.11	71.85
8	2	4	1	3	16.000	60	81.90	64.21

Fuente: Elaboración propia.

Donde las prioridades son:

- C: Minimizar costos de implementación de nuevas estaciones
- Tp: Minimizar el tiempo de viaje en percentil 90
- Tm: Minimizar el tiempo de viaje máximo alcanzado
- R: Minimizar el exceso de cobertura en sectores donde no requieren cobertura simultánea

A continuación, se listan las observaciones encontradas a partir de los casos desarrollados:

- a) Se observa que en los casos del 4 al 8, la primera prioridad fue el objetivo del cumplimiento del percentil 80 en un tiempo máximo de 20 minutos. Sin embargo, a pesar de ser la primera prioridad, el modelo no alcanza a cumplirlo. El valor máximo alcanzado es en los casos 1 y 4.
- b) Se observa que en los casos del 1 al 3, la primera prioridad fue el objetivo del cumplimiento del percentil 90 en un tiempo promedio de 10 minutos. Sin embargo, el objetivo se cumple sólo en los casos 1 y 3. La característica diferencial entre estos casos es el costo de implementación el cual alcanza los 20 millones de dólares para el caso 3.
- c) Se observa que los casos 1 y 4 tienen resultados muy similares. Si bien la diferencia en el ordenamiento de las prioridades es el primer orden del objetivo de percentil en tiempo promedio y el segundo orden del objetivo de percentil en tiempo máximo. Los resultados similares se dan en el costo de implementación de 12.7 millones de USD, aproximadamente; la cantidad de estaciones (50 para el caso 1 y 49 para el caso 2), el virtual cumplimiento del percentil en tiempo promedio (90% para el caso 1 y 89.99% para el caso 4) y el mismo percentil (73.85) en el tiempo máximo alcanzado para ambos casos.

Para efectos de la presente investigación, se considera el caso N°1 por los siguientes hallazgos:

- a) La naturaleza del modelo es ubicar estaciones al centro de la región analizada, congruente con el mapa de calor de emergencias. Ello se refuerza al priorizar la reducción del percentil
- b) A diferencia del modelo de Límite de Cobertura, el modelo distribuye estaciones a los exteriores de la ciudad. Es decir, el modelo ha ubicado estaciones en la zona este, norte y sur de la región analizada.
- c) Se puede decir que el objetivo que minimiza el exceso de cobertura ha permitido la descentralización de estaciones.
- d) Al considerar el objetivo de minimizar el costo de implementación, el modelo arroja distintos valores de costo de implementación. Siendo el promedio de los casos, 15.2 millones de dólares. Sin embargo, para el caso de análisis en el presente escenario, el costo de implementación es de 12.8 millones de dólares.

A continuación, se presentan los sectores cubiertos y estaciones nuevas y reubicadas:



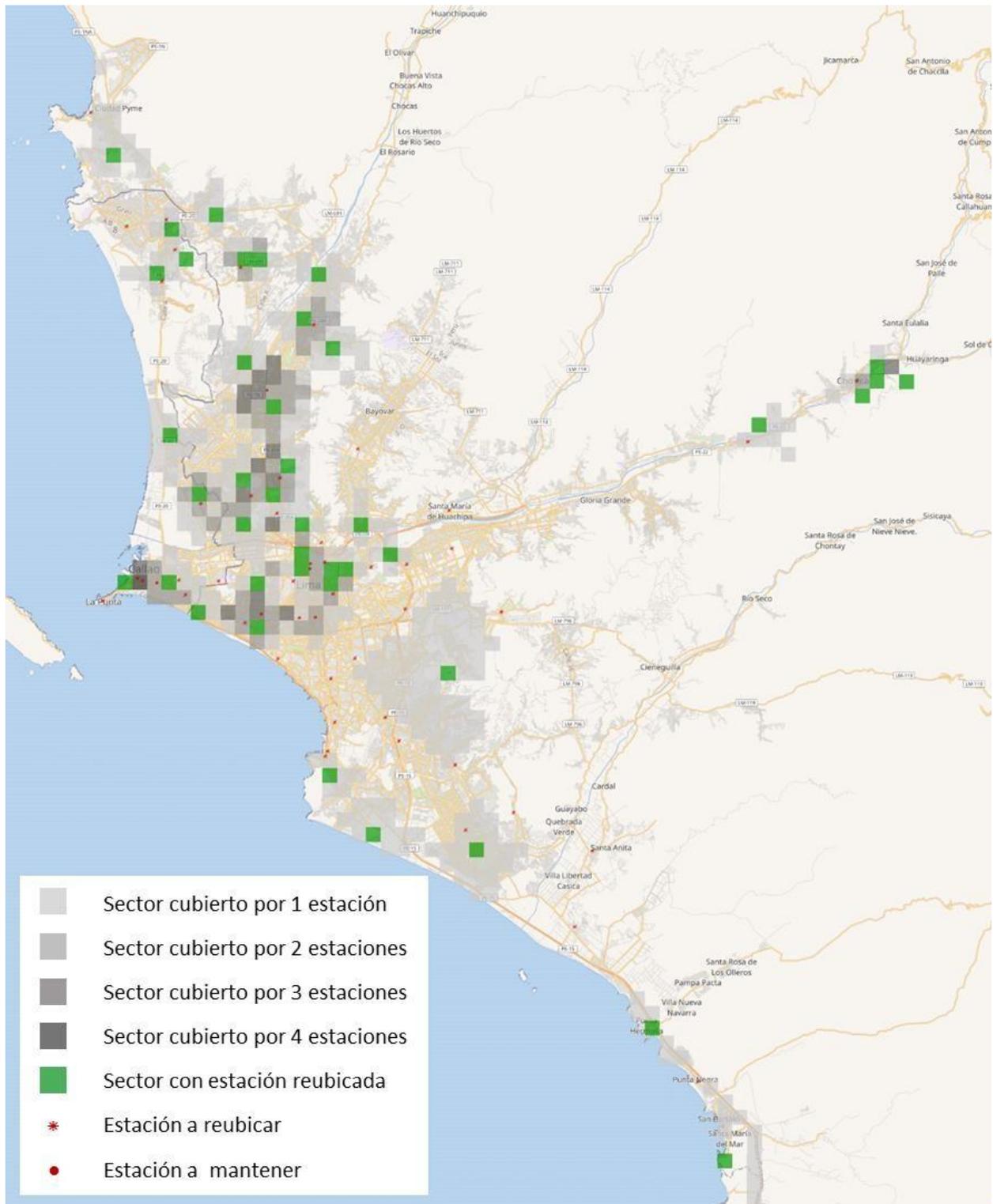


Figura 54 Mapa de resultados del modelo de optimización por metas en el escenario 1
Fuente: Elaboración propia.

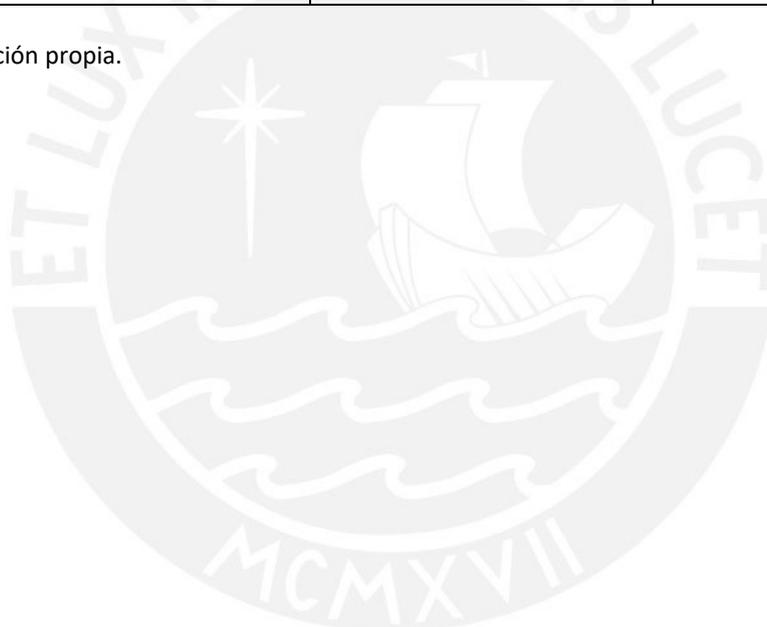
5.1.3 Análisis comparativo de ambos modelos

La Tabla 7, compara los resultados obtenidos en ambos modelos en el escenario ideal. Se observa que el costo de implementación que se tendría en ambas configuraciones sería de 13 millones USD, aproximadamente. Sin embargo, el modelo de optimización por metas estima un mayor número de estaciones para lograr la cobertura en Lima Metropolitana y Callao.

Tabla 7 Comparativo entre los resultados obtenidos en ambos modelos en el escenario sin considerar estaciones existentes

	Modelo de Límite de Cobertura	Optimización por Metas
Cobertura	90.118%	89.999%
Estaciones existentes	6	8
Estaciones nuevas	0	0
Estaciones reubicadas	36	43
Estaciones cerradas	9	1
Total estaciones	42	50
Costo de implementación	USD 13.30 millones	USD 12.78 millones

Fuente: Elaboración propia.



5.2 ESCENARIO 2: UBICACIÓN CONSIDERANDO ESTACIONES EXISTENTES

5.2.1 Resultados del modelo de límite de cobertura

Al considerar las estaciones existentes, el modelo de límite de cobertura fija estas estaciones. Como consecuencia, se obtiene que para lograr una cobertura de 9 minutos en percentil 90, se requiere añadir un total de 18 estaciones, lo cual suma un total de 69 estaciones en Lima Metropolitana y Callao, ver Tabla 5.

Tabla 8 Resultados del modelo de límite de cobertura en escenario 2

Cobertura	90.012%
Estaciones existentes	51 estaciones
Estaciones nuevas	18 estaciones
Total estaciones	69 estaciones
Costo de implementación	USD 23.48 millones

Fuente: Elaboración propia.

Al observar la configuración del modelo en la Figura 55, se evidencia que el modelo complementa la configuración existente con la ubicación de las estaciones en los sectores con mayor demanda del servicio de respuesta a emergencias. Como resultado de esta configuración, el costo de implementación se estima en 23.5 millones de USD.

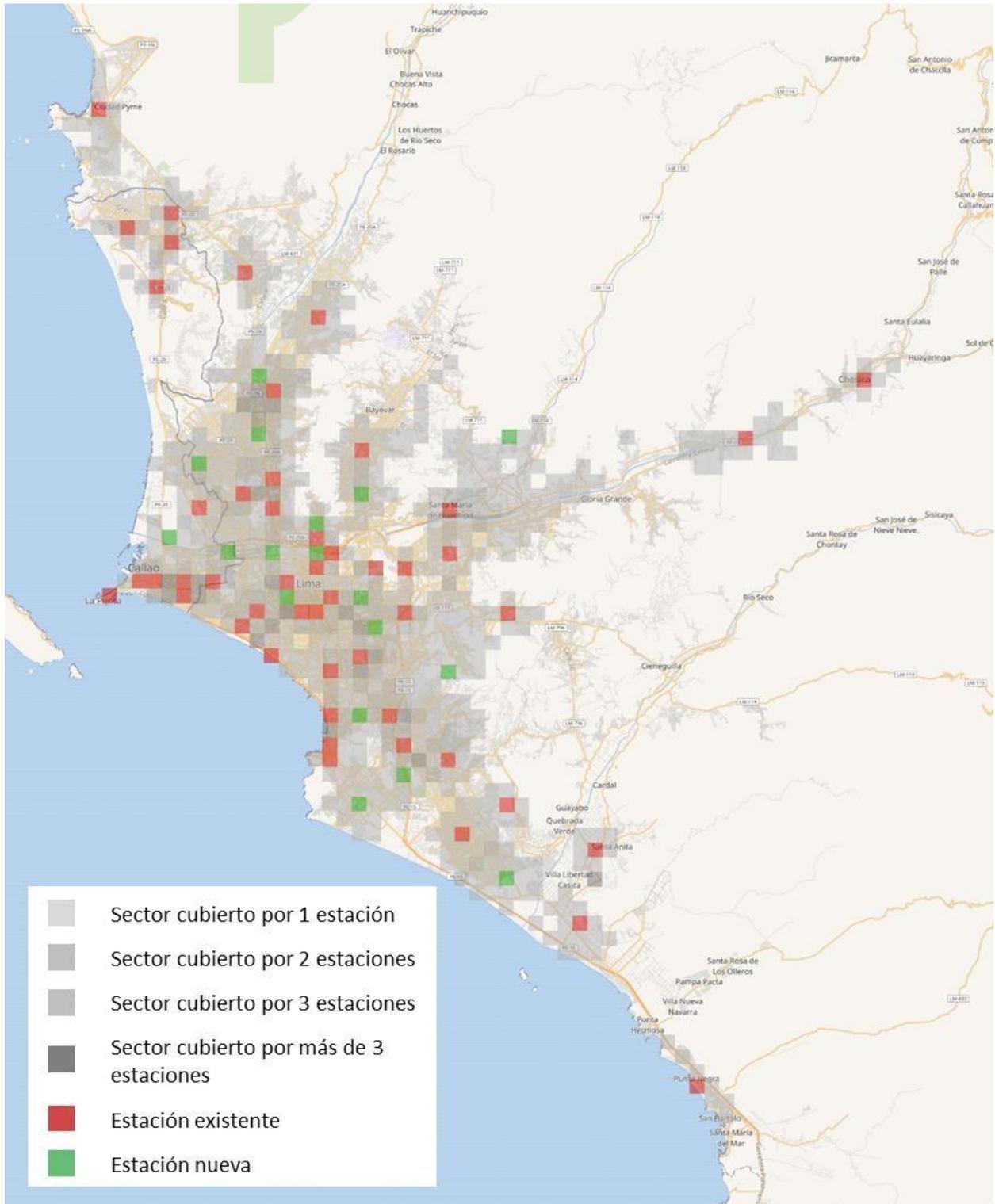


Figura 55 Mapa de resultados del modelo de límite de cobertura en escenario 1
 Fuente: Elaboración propia

5.2.2 Resultados del modelo de optimización por metas

En la Tabla 9 se exponen los 14 casos desarrollados para el escenario de ubicación de estaciones considerando estaciones existentes. Para ello, se asignaron prioridades a los cinco objetivos expresados en el modelo de optimización por metas.

Tabla 9 Resultado de metas según prioridades y costo de inversión, considerando estaciones existentes

N	Prioridades					Costo de Implementación (millones de USD)	Total de estaciones	Estaciones a mantener	Estaciones a reubicar	Nuevas estaciones	Percentil (tprom <= 10)	Percentil (tmax <= 20)
	C	Tp	Tm	Ex	R							
1	5	1	4	3	2	13.050	52	9	42	1	90.00	42.34
2	5	1	2	4	3	13.070	54	10	41	3	90.00	73.81
3	5	1	2	4	3	15.033	57	8	43	6	90.00	71.49
4	5	1	2	4	3	20.045	64	2	49	13	90.00	53.27
5	5	3	1	2	4	20.023	67	5	46	16	89.99	53.15
6	5	1	3	2	4	20.055	73	15	36	22	90.00	42.13
7	5	3	2	1	4	20.017	73	15	36	22	89.94	43.83
8	5	3	2	1	4	18.036	73	22	29	22	89.97	41.06
9	5	3	2	1	4	16.034	73	27	24	22	89.97	38.73
10	5	3	2	1	4	14.011	72	30	21	21	89.99	42.03
11	5	3	2	1	4	12.051	71	32	19	20	89.96	42.26
12	5	3	2	1	4	10.004	70	33	18	19	89.80	43.08
13	5	3	2	1	4	8.080	63	33	18	12	90.00	45.54
14	5	3	2	1	4	7.223	60	33	18	9	89.98	45.62

Fuente: Elaboración propia

Donde las prioridades son:

- C: Minimizar costos de implementación de nuevas estaciones
- Tp: Minimizar el tiempo de viaje en percentil 90
- Tm: Minimizar el tiempo de viaje máximo alcanzado
- Ex: Maximizar la cantidad de estaciones existentes sin reubicar
- R: Minimizar el exceso de cobertura en sectores donde no requieren cobertura simultánea

A continuación, se listan las observaciones encontradas a partir de los casos desarrollados:

- a) El caso 1 tuvo una ligera modificación al caso seleccionado del primer escenario. En este caso se tomó como primer orden de prioridad el percentil de tiempo promedio, con el objetivo de garantizar el cumplimiento del estándar internacional, logrando obtener el percentil 90. El segundo objetivo fue reducir el exceso de cobertura, el cual carecía en el modelo de Límite de Cobertura. El tercer objetivo fue mantener las estaciones existentes. El cuarto, alcanzar el percentil 80 en tiempo máximo. Y el último, reducir la desviación positiva del presupuesto asignado de 13 mil millones de USD, el valor promedio encontrado en el primer escenario aplicando ambos modelos.
- b) Como resultado del primer caso, se logra el percentil 90 en tiempo de viaje promedio, además, este mismo objetivo promueve que el tiempo máximo obtenga el 42.3% de atenciones. Por otro lado, al incluir como segundo objetivo la reducción de exceso de cobertura y, tener como tercer objetivo el mantener las estaciones existentes, el modelo desarrolla una solución de reducir el exceso de cobertura reubicando 42 estaciones.

- Como resultado de esta inversión y al tener un presupuesto limitado de 13 mil millones de USD, esta solución se limita a la creación de solo una nueva estación.
- c) En los casos del 2 al 4, sólo se modifica el objetivo de percentil 80 en tiempo máximo pasándolo como segunda prioridad. Es decir, en este caso, minimizar el exceso de cobertura, sigue teniendo mayor prioridad que el mantener las estaciones existentes. Con este ordenamiento de prioridad, se tendría un orden similar al caso 1 del primer escenario, con la excepción que el objetivo de mantener las estaciones existentes tiene mayor prioridad que el objetivo de minimizar la desviación positiva del presupuesto asignado.
 - d) Los resultados obtenidos en el caso 2, son muy similares a los obtenidos en el caso 1 del escenario ideal. En él, se diseña una red de 54 estaciones con 10 estaciones a mantener, 41 a reubicar y 3 estaciones a agregar. Además, al tener como segundo objetivo alcanzar el percentil 80 en tiempo máximo, este caso, logra obtener 73.8%.
 - e) En los siguientes dos casos (caso 3 y 4), se observa que al aumentar el presupuesto, se incrementa el total de estaciones, la cantidad de estaciones a reubicar y la cantidad de estaciones nuevas a añadir. Sin embargo, el percentil en tiempo máximo va decayendo significativamente hasta 53.3% al tener un presupuesto de 20 mil millones de USD.
 - f) En el caso 5 se observa que al considerar un presupuesto de 20 millones de USD el modelo determina 64 estaciones, infiriendo una proporcionalidad directa entre ambos. En el mismo caso, se evalúa la capacidad del modelo en poder generar un diseño donde alcance el 80% de atenciones en un tiempo máximo de 20 minutos, al poner dicho objetivo como primera prioridad. Sin embargo, a pesar de ello y con un alto presupuesto, se observa que el modelo no logra alcanzar el objetivo, limitándose al percentil 53.15.
 - g) En los casos del 7 al 14, se evaluó el impacto la variación del presupuesto ante la misma condición de prioridad en los objetivos. El crecimiento de presupuesto asignado para cada caso fue de 2 mil millones de USD. Además, el orden de las prioridades se diseñó según la opinión experta de los miembros del CGBVP. En este ordenamiento se considera que el mayor peso lo tiene el objetivo de mantener estaciones existentes. La segunda prioridad es alcanzar el percentil 80 en tiempo máximo. La tercera es alcanzar el percentil 90 en tiempo promedio. La cuarta es minimizar el exceso de cobertura. La última prioridad se le dio a minimizar la desviación negativa entre el costo de implementación del diseño y al presupuesto establecido.
 - h) Ante ello, se obtuvo que el presupuesto es directamente proporcional a la cantidad total de estaciones, lo que incluye mayor cantidad de estaciones nuevas y a reubicar. Por otro lado, se encontró una proporción indirecta con la cantidad de estaciones a mantener. Es decir, al tener más capacidad de implementación, el modelo el modelo tiende a mantener menos estaciones y de reubicar la mayor cantidad de estaciones posibles.
 - i) Además, se observa que desde la asignación presupuesto de 16 mil millones de USD, el modelo dejó de crear nuevas estaciones y optó por reubicar más estaciones existentes. Por lo tanto, se podría decir que para esta configuración, el caso 9 es el caso disruptivo.
 - j) Sin embargo, a pesar de contar con el objetivo de alcanzar el percentil 80 en el tiempo de viaje máximo, el caso 9 alcanzaría sólo el 38.7% de atenciones atendidas en un tiempo menor a 20 minutos como máximo.
 - k) Por otro lado, se encuentra que el caso 13, con el mismo orden de prioridad y con un presupuesto de 8 mil millones de USD, alcanzaría el 45.5% de atenciones atendidas en un tiempo menor a 20 minutos como máximo. Es decir, con un menor presupuesto que el caso disruptivo, logra un mejor valor percentil en el objetivo con segundo orden de prioridad.

A continuación, se presentan los sectores cubiertos y estaciones nuevas y reubicadas:

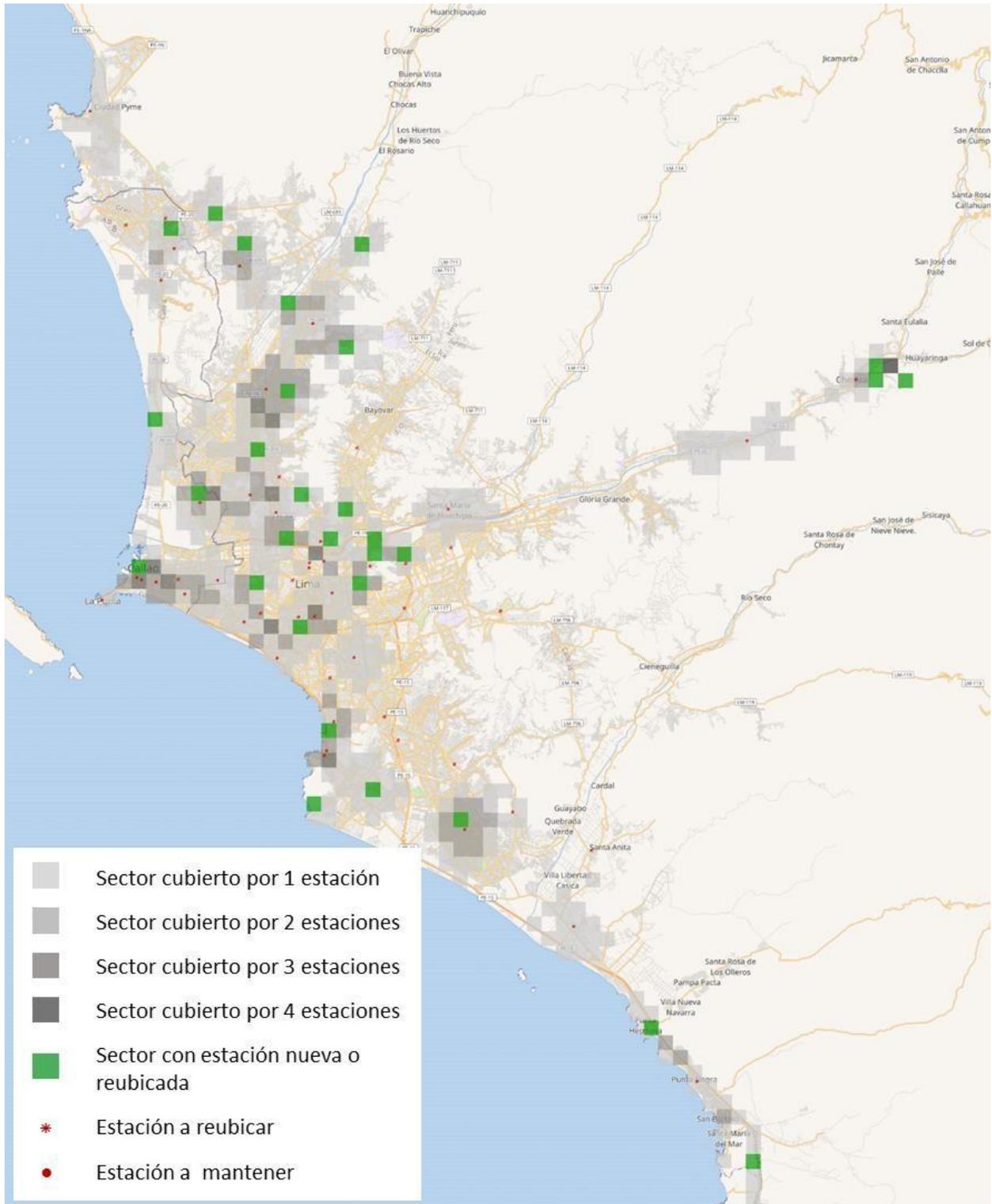


Figura 56 Mapa de resultados del modelo de optimización por metas en el escenario 2
 Fuente: Elaboración propia

5.2.3 Análisis comparativo de ambos modelos

La Tabla 10, compara los resultados obtenidos en ambos modelos en el segundo escenario. Se observa que el costo de implementación que presentan ambos modelos tiene una brecha significativa de 15.4 millones de USD. Esta diferencia, se basa en que el modelo de optimización por metas considera la minimización del costo de implementación entre los objetivos del modelo. Además, la eficiencia del modelo de optimización por metas se identifica al observar que logra implementar 12 nuevas estaciones y reubicar 18 estaciones existentes a un costo de implementación limitado a 8 millones USD.

Tabla 10 Comparativo entre los resultados obtenidos en ambos modelos en el escenario en el que se consideran las estaciones existentes

	Modelo de Límite de Cobertura	Optimización por Metas
Cobertura	90.012%	89.995%
Estaciones existentes	51	33
Estaciones nuevas	18	12
Estaciones reubicadas	0	18
Total estaciones	69	63
Costo de implementación	USD 23.48 millones	USD 8.08 millones

Fuente: Elaboración propia.



5.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se desarrolla un análisis de sensibilidad de falla para identificar las estaciones críticas. Para ello, se considera que, al no encontrarse operativa dejaría de cubrir a los sectores asignados. En consecuencia, el tiempo de respuesta aumentaría y el percentil de atención en menos de 9 minutos se vería reducido.

5.3.1 MODELO LÍMITE DE COBERTURA

5.3.1.1 Escenario 1

La Tabla 11, muestra las ocho estaciones críticas del modelo límite de cobertura, considerando el escenario en el que se optimiza la ubicación de las estaciones sin considerar las estaciones existentes. Como resultado, se observa que, al tener 42 estaciones en Lima Metropolitana y Callao, el perder una estación tiene un impacto significativo. Este impacto se traduce en el tiempo de respuesta en hasta 11.4 minutos en el percentil 90 para las estaciones mostradas en la tabla. Además, al evaluar el percentil con el que alcanzarían un tiempo de respuesta no mayor a 9 minutos, se encuentra que la estación más crítica estaría alcanzando el percentil 69.93.

Tabla 11 Criticidad de estaciones en el escenario 1 del modelo límite de cobertura

Tiempo (percentil 90)	Percentil (Tiempo <= 9)	ID - estación
11.37	69.93	2836
11.37	71.43	3085
11.40	71.76	2844
11.23	71.99	2961
11.17	72.46	3153
11.12	72.48	3282
11.22	72.52	4047
11.16	72.84	3469
11.18	72.94	3091
11.10	73.07	3275
11.13	73.39	2646
11.10	73.41	3279
11.07	73.50	3599
11.06	73.68	3030
11.05	73.74	3209
11.08	73.83	3473
11.05	73.90	3283
11.07	73.90	3793
11.14	73.96	2452
11.10	74.07	3158
11.04	74.11	3659
11.07	74.13	2584
11.21	74.14	4306
11.03	74.18	3098

Tiempo (percentil 90)	Percentil (Tiempo <= 9)	ID - estación
11.04	74.19	2269
11.04	74.21	3788
11.02	74.21	2394
11.03	74.32	2327
11.08	74.36	3284
11.05	74.39	2078
11.08	74.40	3475
11.59	74.57	3872
11.08	74.61	3207
11.41	74.64	1958
11.03	74.70	3606
10.99	74.83	3863
11.22	74.87	4558
11.00	74.89	2138
10.99	74.91	3420
11.01	74.93	3292
11.03	75.01	3480
11.00	75.01	2197

Fuente: Elaboración propia.

Nota:

La columna "ID – estación" corresponde al identificador del sector de 1 km² ubicado en la región de Lima Metropolitana y Callao en el cual el modelo ha establecido la ubicación de una estación de bomberos.

El Figura 59 muestra las curvas de los valores alcanzados en el análisis de sensibilidad de las estaciones. En la curva de percentil alcanzado para un tiempo menor o igual a 9 minutos se observa que tiene un crecimiento logarítmico el cual inicia en el percentil 70 y tiende a estabilizarse por debajo de 75%. En el caso del tiempo alcanzado, se observan distintos picos que superan los 11.4 minutos.

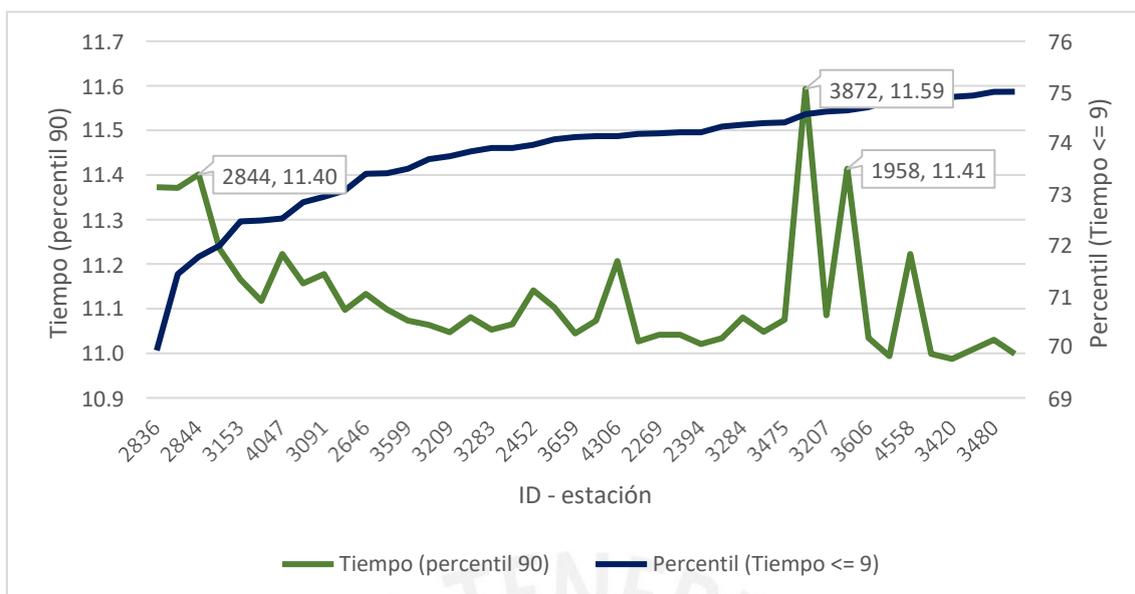


Figura 57 Análisis de sensibilidad por tiempo alcanzado en percentil 90 y percentil alcanzado en tiempo menor o igual a 9 minutos en el escenario 1

Fuente: Elaboración propia

5.3.1.2 Escenario 2

La Tabla 12, muestra la criticidad de las estaciones del modelo límite de cobertura, considerando el escenario en el que se optimiza la ubicación de las estaciones sin modificar la posición de las estaciones existentes. Como resultado, se observa que, no hay un impacto significativo al perder una estación. Este resultado se debe a que el diseño del presente modelo alcanza una red de 68 estaciones en Lima Metropolitana y Callao. Por lo que, al perder una estación, no tiene un alto impacto en la operatividad del servicio de respuesta a emergencias. Tal como se observa en la tabla, el tiempo de respuesta alcanza 9.7 minutos en el percentil 90 en la estación más crítica (ID 2844). Además, al evaluar el percentil con el que alcanzarían un tiempo de respuesta no mayor a 9 minutos, se encuentra que la estación más crítica (ID 2836) estaría alcanzando el percentil 77.

Tabla 12 Criticidad de estaciones en el escenario 2 del modelo límite de cobertura

Tiempo (percentil 90)	Percentil (Tiempo <= 9)	ID - estación
9.62	77.01	2836
9.68	77.47	2844
9.47	77.75	3217
9.44	78.22	3091
9.45	78.49	3341
9.48	78.62	2896
9.43	78.68	3153
9.44	78.80	3212
9.40	78.86	3090
9.45	78.87	3344
9.51	78.87	2141

Tiempo (percentil 90)	Percentil (Tiempo <= 9)	ID - estación
9.39	78.91	3283
9.47	79.15	2262
9.40	79.16	3531
9.41	79.18	3146
9.45	79.25	3855
9.44	79.28	3347
9.54	79.34	4371
9.40	79.40	3158
9.42	79.41	3723
9.39	79.42	3411
9.41	79.49	3207
9.42	79.54	3031
9.40	79.56	3598
9.38	79.60	2460
9.39	79.61	3664
9.39	79.62	2648
9.40	79.64	3208
9.51	79.65	3872
9.37	79.68	3348
9.38	79.74	2452
9.40	79.75	1952
9.37	79.78	2393
9.38	79.79	3156
9.38	79.81	2646
9.38	79.84	3356
9.42	79.85	3606
9.37	79.87	3798
9.46	79.88	4558
9.37	79.92	3289
9.37	79.92	3022
9.41	79.93	4111
9.40	79.95	3888
9.39	79.95	3475
9.41	79.96	2902
9.46	79.96	1765
9.35	79.98	3287
9.39	80.01	3087
9.36	80.01	3097
9.37	80.01	3536
9.38	80.06	4048
9.37	80.11	3401
9.40	80.13	4152
9.35	80.15	3548
9.39	80.16	4809
9.36	80.17	2521

Tiempo (percentil 90)	Percentil (Tiempo <= 9)	ID - estación
9.42	80.19	5252
9.49	80.19	1069
9.36	80.22	2086
9.35	80.22	3104
9.36	80.22	2272
9.39	80.24	4488
9.35	80.29	4681
9.34	80.33	4742
9.36	80.36	2516
9.35	80.37	2644
9.36	80.37	3210

Fuente: Elaboración propia.

Nota:

La columna "ID – estación" corresponde al identificador del sector de 1 km² ubicado en la región de Lima Metropolitana y Callao en el cual el modelo ha establecido la ubicación de una estación de bomberos.

El Figura 60 muestra las curvas de los valores alcanzados en el análisis de sensibilidad de las estaciones. En la curva de percentil alcanzado para un tiempo menor o igual a 9 minutos se observa que tiene un crecimiento pronunciado en las primeras 5 estaciones. Además, se observa un crecimiento logarítmico el cual inicia en el percentil 77 y tiende a estabilizarse por encima de 80%. Con respecto a la curva de tiempo alcanzado en percentil 90, se observa una tendencia a establecer el tiempo de respuesta a 9.3 minutos. Siendo la estación más crítica (ID 2844) con un tiempo de sólo 9.7 minutos.

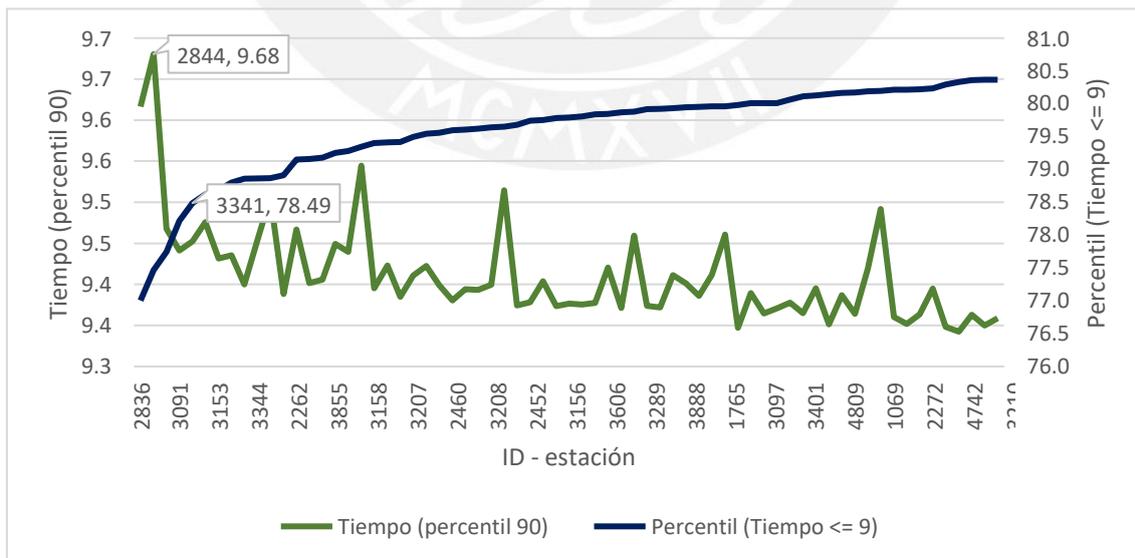


Figura 58 Análisis de sensibilidad por tiempo alcanzado en percentil 90 y percentil alcanzado en tiempo menor o igual a 9 minutos en el escenario 2

Fuente: Elaboración propia

5.3.2 MODELO OPTIMIZACIÓN POR METAS

5.3.2.1 Escenario 1

La

Tabla 13 muestra la criticidad de todas las estaciones establecidas en el Caso 1 del modelo de optimización por metas desarrollado en el primer escenario. De la lista, se observa que la estación más crítica es la estación con ID “2844”. La misma que, al encontrarse fuera de servicio, afectaría el tiempo de respuesta de la red de estaciones en Lima y Callao. Ante ello, se observa que el 90% de las ocurrencias se obtendría un tiempo de respuesta de 14.59 minutos. Además, al evaluar la cantidad de veces que se lograría el tiempo recomendado por el estándar NFPA 1720, este se alcanzaría sólo el 47.55% de las ocurrencias.

Tabla 13 Criticidad de estaciones en el escenario 1 del modelo optimización por metas

Tiempo (percentil 90)	Percentil (Tiempo <= 9)	ID - estación
14.59	47.55	2844
10.34	48.43	3091
10.24	48.74	3282
10.21	48.91	3090
10.23	49.69	3470
10.48	50.04	2078
10.27	50.22	3023
10.14	50.27	3209
10.20	50.33	3083
10.37	50.45	2388
10.15	50.48	3662
10.13	50.58	3220
10.15	50.62	3284
10.17	50.66	3215
10.15	50.71	3600
10.15	50.82	3984
10.16	50.85	3531
10.10	50.89	3208
10.17	50.94	3474
10.10	51.01	3346
10.27	51.03	3478
10.12	51.10	4174
10.09	51.19	3285
10.12	51.23	3729
10.15	51.28	2135
10.11	51.30	4370
10.19	51.32	5061
10.12	51.32	3352
10.14	51.34	3849
10.10	51.37	3207

Tiempo (percentil 90)	Percentil (Tiempo <= 9)	ID - estación
10.09	51.38	4563
10.21	51.40	1322
10.27	51.42	3953
10.10	51.43	4244
10.13	51.44	4552
10.08	51.44	4622
10.09	51.46	4745
10.11	51.49	751
10.09	51.50	4812
10.09	51.53	4048
10.07	51.56	4623
10.07	51.57	4088
10.07	51.60	4217
10.13	51.61	3087
10.07	51.61	3595
10.06	51.61	3206
10.06	51.61	4153
10.06	51.61	4155
10.06	51.61	3283

Fuente: Elaboración propia.

Nota:

La columna "ID – estación" corresponde al identificador del sector de 1 km² ubicado en la región de Lima Metropolitana y Callao en el cual el modelo ha establecido la ubicación de una estación de bomberos.

El Figura 59 muestra las curvas de los valores alcanzados en el análisis de sensibilidad de las estaciones. En la curva de percentil alcanzado para un tiempo menor o igual a 9 minutos se observa que tiene un crecimiento pronunciado en las primeras 7 estaciones. Luego, se observa una tendencia a mantener el percentil por debajo de 52%.

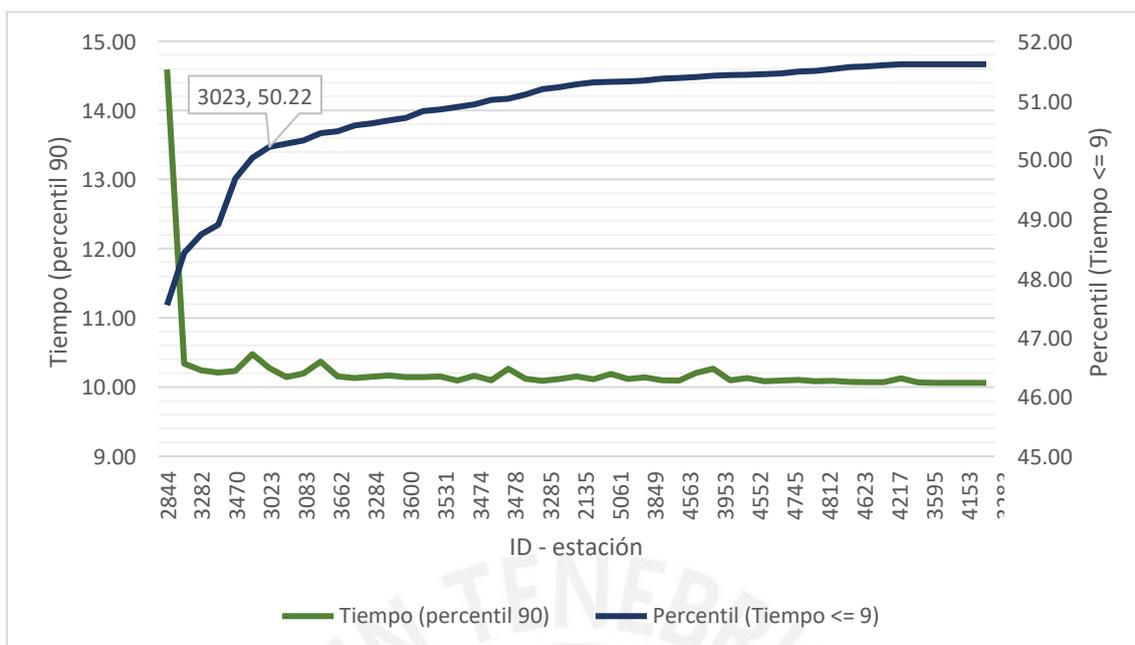


Figura 59 Análisis de sensibilidad por tiempo alcanzado en percentil 90 y percentil alcanzado en tiempo menor o igual a 9 minutos en el escenario 1
Fuente: Elaboración propia

5.3.2.2 Escenario 2

La Tabla 14 muestra la criticidad de todas las estaciones establecidas en el Caso 13 del modelo de optimización por metas desarrollado en el segundo escenario. De la lista, se observa que la estación más crítica es la estación con ID “2902”. La misma que, al encontrarse fuera de servicio, afectaría el tiempo de respuesta de la red de estaciones de Lima y Callao. Ante ello, se observa que el 90% de las ocurrencias se obtendría un tiempo de respuesta de 11.62 minutos. Además, al evaluar la cantidad de veces que se lograría el tiempo recomendado por el estándar NFPA 1720, este se alcanzaría sólo el 52.15% de las ocurrencias.

Tabla 14 Criticidad de estaciones en el escenario 2 del modelo optimización por metas

Tiempo (percentil 90)	Percentil (Tiempo <= 9)	ID - estación
11.62	52.15	2902
10.79	52.60	3022
10.75	53.32	3090
10.76	53.64	3212
10.74	53.79	3026
10.76	53.82	3791
10.74	54.04	3156
10.67	54.11	3146
10.66	54.57	3283
10.70	54.59	2896
10.85	54.63	2327
10.63	54.71	3412
10.80	54.99	3215
10.67	55.05	3531

Tiempo (percentil 90)	Percentil (Tiempo <= 9)	ID - estación
10.64	55.16	3536
10.62	55.16	2580
10.64	55.22	4371
10.66	55.25	3598
10.60	55.34	3348
10.71	55.34	3409
10.67	55.55	3222
10.65	55.56	2141
10.75	55.58	2644
10.86	55.61	3888
11.07	55.61	3548
10.60	55.61	3411
10.60	55.62	2452
10.71	55.62	3541
10.77	55.62	1765
10.63	55.66	2205
10.60	55.68	4558
10.59	55.70	3208
10.63	55.71	4049
10.65	55.72	3912
10.65	55.75	3353
10.59	55.76	3271
10.59	55.79	3415
10.61	55.83	4048
10.60	55.84	1322
10.68	55.85	5252
10.59	55.87	3602
10.59	55.87	4745
10.60	55.88	2272
10.58	55.89	1069
10.59	55.89	4152
10.60	55.89	3351
10.61	55.90	4488
10.59	55.91	4812
10.59	55.92	753
10.58	55.93	4681
10.58	55.94	4686
10.58	55.96	2259
10.59	55.98	4245
10.58	55.98	4694
10.57	56.01	4217
10.60	56.02	2516
10.57	56.02	4433
10.62	56.03	3207
10.57	56.03	3595

Tiempo (percentil 90)	Percentil (Tiempo <= 9)	ID - estación
10.57	56.03	3287
10.57	56.03	4153
10.57	56.03	4155

Fuente: Elaboración propia.

Nota:

La columna "ID – estación" corresponde al identificador del sector de 1 km² ubicado en la región de Lima Metropolitana y Callao en el cual el modelo ha establecido la ubicación de una estación de bomberos.

El Figura 60 muestra las curvas de los valores alcanzados en el análisis de sensibilidad de las estaciones. En la curva de percentil alcanzado para un tiempo menor o igual a 9 minutos se observa que tiene un crecimiento pronunciado en las primeras 9 estaciones. Luego, se observa una tendencia a mantener el percentil alrededor de 56%. Con respecto a la curva de tiempo alcanzado en percentil 90, se observa que existe una segunda estación (ID 3548) que alcanza un pico de 11.07 minutos. Sin embargo, dicha estación estaría con un percentil mayor en comparación al caso crítico (ID 2902), para atenciones asistidas en menos de 9 minutos.

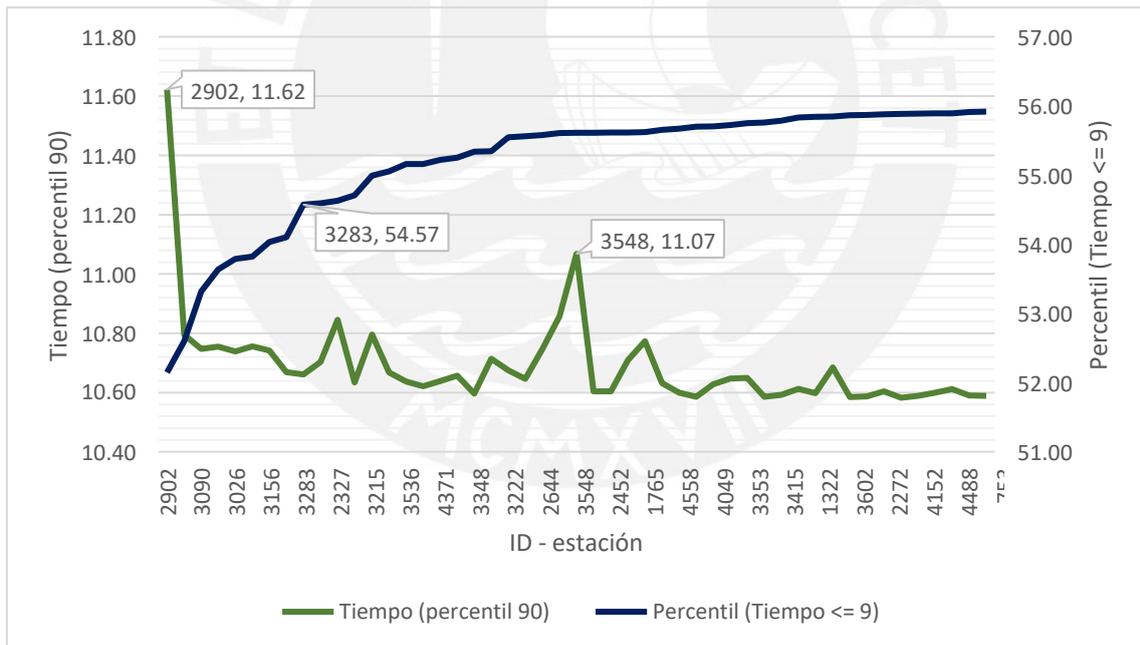


Figura 60 Análisis de sensibilidad por tiempo alcanzado en percentil 90 y percentil alcanzado en tiempo menor o igual a 9 minutos en el escenario 2

Fuente: Elaboración propia

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

La presente investigación desarrolla un estudio de ubicación de las Unidades Básicas Operativas del Cuerpo General de Bomberos Voluntarios del Perú (CGBVP) en las regiones de Lima Metropolitana y Callao. Para ello, se analizó la problemática de la distribución de recursos y se evaluó el tiempo de respuesta requerido según los tipos de emergencias y los estándares internacionales. Luego, se desarrolló un diagnóstico el cual abordó las principales causales de la problemática actual. El estudio de ubicación se desarrolló a través de dos modelos, en cada uno se plantearon dos escenarios. Finalmente, se analizaron los resultados y sensibilidad de cada modelo.

PROBLEMÁTICA:

La situación actual del problema se presenta en dos argumentos. El primero describió la distribución actual de recursos. Y el segundo, la criticidad del tiempo de respuesta en atenciones a emergencias.

Al evaluar la distribución de las estaciones de bomberos en Lima Metropolitana y Callao (ver Figura 4) y la demanda del servicio en la misma región (ver Figura 18), se observó que la ubicación de las estaciones guarda relación directa a la necesidad de este. Sin embargo, no se encontró un plan estratégico del CGBVP o de la Intendencia Nacional de Bomberos del Perú (INBP) que designe un método para la ubicación de una estación. Por lo tanto, se evidenció la necesidad de una política de decisión para la ubicación de estaciones. No solo para la creación de nuevas estaciones, sino para la reubicación o clausura de las mismas.

El tiempo de respuesta es un factor clave que puede llegar a ser determinante para reducir las consecuencias de un incidente. Por ejemplo, en el caso de un incendio, estudios determinan que el tiempo de respuesta debe ser en total 10 minutos, siendo el tiempo de viaje menor a 6 minutos (ver Figura 7). En el caso de una emergencia médica por paro cardíaco, la supervivencia de la víctima se cuadruplica si el tiempo de respuesta es menor a 4 minutos (ver Figura 8). En tal sentido, *National Fire Protection Association* dispuso un estándar internacional (NFPA 1720) en el cual establece el tiempo de respuesta que debe ser atendido por bomberos voluntarios. Este estándar determina que, para un área urbana, el tiempo de respuesta debía ser menor a 9 minutos el 90% de las veces (ver Tabla 3).

RESULTADOS DEL DIAGNÓSTICO:

Tras el planteamiento del problema, la investigación desarrolló un diagnóstico el cual aborda el análisis de la problemática en base a dos causales. La primera fue la evolución urbana y el crecimiento de la demanda de emergencias atendidas por el CGBVP en Lima y Callao. La segunda, fue el comportamiento actual de la atención del CGBVP en el espacio geográfico de Lima y Callao.

Los efectos del crecimiento demográfico en Lima y Callao que influyeron en el presente estudio fueron: el crecimiento del parque automotor y el aumento de la demanda de emergencias. El crecimiento del parque automotor en la región afecta las velocidades promedio de viaje en autos particulares las cuales son levemente reducidas por los proyectos de mejora vial (ver

Gráfico 7). Sin embargo, no hay un impacto significativo en la velocidad de viaje en vehículos de emergencia.

En cuanto a la cobertura a través de los recursos actuales, se observa que no todas las estaciones cuentan con vehículos para atender emergencias médicas, incendios, rescates o incluso con materiales peligrosos. Es decir, las principales estaciones del Perú, las cuales están ubicadas en Lima y Callao, no cuentan con suficientes recursos para atender la demanda actual. Siendo el problema principal la falta de renovación de los vehículos de emergencia. El resultado de las condiciones en los recursos existentes es que, al suscitarse una emergencia, no siempre la estación más cercana podrá asistirle. Por lo tanto, el tiempo de respuesta será mayor al tener que despachar a una unidad desde la siguiente estación más cercana.

Además, debido a la concentración de recursos en la región de Lima Centro, se observó que hay zonas de alta demanda las cuales no están cubiertas de manera adecuada. Esta situación, conlleva a que el 90 por ciento de las atenciones en Lima y Callao sean atendidas en menos de 19.5 minutos. Por lo tanto, la situación actual del tiempo de respuesta es más del doble de lo recomendado por el estándar internacional.

MODELAMIENTO DEL PROBLEMA Y RESULTADOS:

A partir de este análisis preliminar, el estudio de ubicación se desarrolló por medio de dos modelos: modelo de límite de cobertura y optimización por metas. El primero, buscó minimizar la cantidad de estaciones requeridas en determinadas zonas, de tal manera que el tiempo de respuesta en base a la demanda existente sea menor a 9 minutos el 90% de las veces. El segundo, buscó minimizar el costo de instalación en base a un presupuesto establecido, minimizar el exceso de cobertura, minimizar la desviación de atención en tiempo promedio adecuada en percentil 90, minimizar la desviación de atención en tiempo máximo alcanzado en percentil 80. Además, en cada modelo se desarrollaron dos escenarios que permitieron comparar los resultados obtenidos de cada modelo.

El primer escenario consistió en un caso ideal donde la administración del INBP puede rediseñar la ubicación de las estaciones de bomberos del CGBVP con el objetivo de cumplir con el estándar internacional. En este escenario ideal, se pudo analizar la naturaleza de cada modelo desolución.

El segundo escenario consistió en un caso realista donde la administración del INBP puede rediseñar la ubicación de las estaciones de bomberos del CGBVP con el mismo objetivo del primer escenario. Sin embargo, en este escenario, se debe considerar la mínima o nula reubicación de estaciones de bomberos.

MODELO DE LÍMITE DE COBERTURA:

En el caso del modelo de límite de cobertura, en el primer escenario se obtuvo una red con sólo 42 estaciones y sumando un costo estimado de implementación de 13 millones de dólares. Se observó que, 6 estaciones coinciden con la ubicación actual de la red de estaciones. Esto indicó que, según el criterio del modelo, el 11.8% de las estaciones existentes estarían ubicadas en un cuadrante ideal.

De los resultados obtenidos, se observó que la naturaleza del modelo es centralizar las estaciones en Lima y Callao. Por lo tanto, se puede decir que el modelo está directamente relacionado con el mapa de calor de emergencias. Sin embargo, al concentrar la atención en zonas de alta demanda dejó varios sectores sin cubrir a las afueras de la ciudad. Es decir, la

respuesta a emergencias en sectores de baja demanda sería inexistente. Además, la naturaleza del modelo generó un exceso de cobertura en las regiones del centro. Por lo tanto, se evidencia que, si bien el modelo cumple con el estándar, podría ser más eficiente si se reduce el exceso de cobertura en el centro y se reubican estaciones en las zonas no atendidas.

Al aplicar el mismo modelo al segundo escenario, se obtuvieron resultados consistentes con la naturaleza de este. Cabe resaltar que, en el segundo escenario, las estaciones se mantienen de manera estricta para el modelo. Por lo tanto, el resultado fue la adición de 18 nuevas estaciones y un total de 62 estaciones en Lima y Callao. Sin embargo, debido a la naturaleza del modelo, las nuevas estaciones se concentran en el centro y en zonas cercanas a él.

Al evaluar la estimación del costo de implementación de este modelo, se encontró que el costo de agregar 18 estaciones suma un valor de 23.5 millones de dólares. Por lo tanto, se evidenció que, a pesar de ser un modelo que cumple con el estándar, necesita reducir el costo de implementación para convertirse en un proyecto viable.

MODELO DE OPTIMIZACIÓN POR METAS:

En el caso del modelo de optimización por metas aplicado al primer escenario, se cubrió no solo el objetivo de alcanzar un tiempo de respuesta menor a 9 minutos el 90% de las veces, también se logró alcanzar un tiempo máximo menor a 20 minutos el 80% de las veces y las observaciones encontradas durante el desarrollo del modelo de límite de cobertura: la minimización del exceso de cobertura y la minimización de la desviación positiva del costo al presupuesto asignado.

Al contar con diversos objetivos, se desarrollaron 8 casos con distintas prioridades y distinto presupuesto. A partir de ellos, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

Los tres primeros casos evaluados, representan el mismo orden de prioridad. La diferencia entre ellos fue el presupuesto asignado. El presupuesto del primer caso fue de 12 millones de dólares y se obtuvo un diseño de 50 estaciones. El segundo, tuvo un presupuesto de 16 millones de dólares y se obtuvo un diseño de 63 estaciones. Finalmente, el tercer modelo tuvo un presupuesto de 20 millones de dólares, sin embargo, el crecimiento de la red de estaciones no siguió un crecimiento lineal, el resultado arrojó un diseño de 64 estaciones. Es decir, a pesar de seguir incrementando el presupuesto de implementación de estaciones, el modelo alcanzó un aparente nivel máximo de ubicación de estaciones con el orden de prioridad establecido, el mismo que mantiene el percentil 90 en tiempo promedio. En cuanto al comportamiento del percentil en tiempo máximo, se observó que a mayor presupuesto y, por ende, a mayor cantidad de estaciones, el modelo redujo la capacidad del diseño de alcanzar el percentil 80. Es decir, tuvo un comportamiento indirectamente proporcional al presupuesto del proyecto.

Al evaluar un ordenamiento inverso entre los objetivos de percentil de tiempo promedio y tiempo máximo y su comportamiento ante el incremento gradual del presupuesto de inversión (en los casos 4, 5 y 6), se observó que la cantidad de estaciones incrementa gradualmente. Sin embargo, encuentra la misma limitación al contar un presupuesto de 20 millones de dólares. Es decir, el modelo alcanza un aparente límite de inserción de estaciones.

Por lo tanto, la aplicación del modelo de optimización por metas permitió desarrollar diversos casos y analizarlos para identificar las limitaciones del modelo. Además, permitió comparar los resultados obtenidos en base a las prioridades establecidas y, finalmente, seleccionar un caso que se adecúe a las necesidades sociales, operativas e institucionales del Cuerpo General de Bomberos Voluntarios del Perú.

Dicho esto, el caso seleccionado fue el primer caso evaluado el cual tuvo como prioridad inicial, el tiempo promedio y luego, el tiempo máximo. Los siguientes dos objetivos fueron la reducción del exceso de cobertura y el exceso de costo de implementación. Ante ello, el diseño obtenido logró alcanzar un tiempo de respuesta de 9 minutos en menos del 90% y, en menos de 20 minutos como máximo, el 73.9% de las veces. Al ubicar el resultado del modelo en un mapa, se encontró que la naturaleza del modelo fue de ubicar a la mayoría de las estaciones al centro de la región. Sin embargo, el modelo sí ubicó estaciones en regiones del este, norte y sur de Lima y Callao. Además, el costo de implementación alcanzado fue menor al promedio del resto de casos evaluados.

En tal sentido, el primer escenario bajo el modelo de optimización por metas permitió desarrollar una red de estaciones en ubicaciones ideales bajo un ordenamiento de prioridades elaborada por los tomadores de decisión del CGBVP.

En cuanto a la aplicación del modelo de optimización por metas al segundo escenario, al modelo se le agregó un nuevo objetivo: minimizar la reubicación de estaciones existentes. En este segundo escenario, se desarrollaron 14 casos los cuales permitieron evaluar el comportamiento del modelo y encontrar el ordenamiento ideal.

De los 14 resultados obtenidos, se pudo encontrar la limitación del objetivo de tiempo máximo. Es decir, en los casos donde el objetivo tuvo máxima prioridad, no se logró alcanzar el percentil deseado. Sin embargo, en el tiempo promedio se encontraron casos donde el percentil superaba al mínimo requerido.

Naturalmente, se encontró que en los casos donde no se priorizaba mantener las estaciones existentes y se tenía un menor presupuesto de implementación, el modelo tendía a reubicar estaciones y añadir pocas estaciones a la red. Por el contrario, en los casos donde se priorizaba mantener estaciones existentes y con un mayor presupuesto, el modelo tendía a reubicar tres veces más estaciones que las estaciones añadidas. Sin embargo, en los casos donde se priorizaba mantener estaciones existentes, pero con un menor presupuesto, el modelo tendía a mantener la cantidad de estaciones a reubicar y añadir nuevas estaciones en una cantidad proporcional al presupuesto disponible.

Por lo tanto, la naturaleza del modelo permitió identificar un punto disruptivo en la asignación de presupuesto. Donde la cantidad a mantener fue alrededor de 20 estaciones, se alcanzó el percentil 90 en tiempo de respuesta promedio y el máximo percentil en tiempo de respuesta máximo. Siendo estas condiciones en el caso número 13, el cual tiene el menor presupuesto (8 millones de dólares) y, por consiguiente, las estaciones a añadir estarían limitadas a 12 instalaciones nuevas.

Tal como se evidenció en el presente escenario, el modelo de optimización por metas permitió generar una serie de casos los cuales varían según las prioridades y presupuesto disponible asignados por los tomadores de decisión. Por lo tanto, este modelo puede considerar otros factores políticos y sociales que son relevantes para tomar una decisión final de ubicación de estaciones de bomberos.

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD:

Al evaluar los análisis de sensibilidad de ambos modelos en el primer escenario, por un lado, se observó que las estaciones críticas en el modelo de límite de cobertura afectarían la respuesta en un rango entre 11 y 11.6 minutos en el percentil 90, mientras que las estaciones del modelo

de optimización por metas estarían alrededor de los 10 minutos (a excepción de una estación crítica de 14.6 minutos), ver Figura 57 y Figura 59. Por lo tanto, el segundo modelo fue más robusto frente al tiempo de respuesta en percentil 90. Por otro lado, al evaluar el percentil afectado para un tiempo de atención menor a 9 minutos, se encontró que el modelo de límite de cobertura sólo reduce su percentil en el rango entre 70% y 75%, mientras que el modelo de optimización por metas se reduce considerablemente entre 47% y 52%. Es decir, el segundo modelo es más sensible al percentil alcanzado en atenciones menor a 9 minutos.

Dicho esto, del análisis de sensibilidad del primer escenario se pudo interpretar que, si bien el modelo de optimización por metas no logró atender más del 50% de atenciones en menos de 9 minutos, sí las estaría atendiendo en un valor cercano a los 10 minutos al menos el 90% de las veces. En comparación con el modelo de límite de cobertura, el cual estaría atendiendo hasta el 75% de eventos en menos de 9 minutos y el resto, en hasta 11.6 minutos.

Por lo tanto, se concluyó que, en el primer escenario el diseño obtenido por el modelo de optimización por metas fue significativamente más robusto y menos sensible, siendo la principal causa la cantidad de estaciones implementadas.

En el caso del análisis de sensibilidad en el segundo escenario, se mantuvo el comportamiento en el percentil bajo un tiempo de respuesta menor a 9 minutos. El modelo de límite de cobertura mantuvo una alta robustez (con 69 estaciones) ante la baja de estaciones siendo el rango de afectación entre 77% y 80%, mientras que el modelo de optimización por metas (con 63 estaciones) tuvo un rango de afectación entre 52% y 56%, ver Figura 58 y Figura 60.

Sin embargo, al evaluar el comportamiento del tiempo de respuesta en percentil 90, la situación fue distinta en comparación al primer escenario. El rango de tiempo resultante por la afectación de una estación en el modelo de límite de cobertura fue entre 9.4 y 9.7 minutos, siendo un valor cercano al tiempo establecido por el objetivo del diseño. Mientras que el modelo de optimización por metas tuvo un rango entre 10.6 y 11.6 minutos. Cabe resaltar que el segundo modelo tuvo una tendencia a mantener el tiempo de respuesta alrededor de 10.7 minutos, sin embargo, presentó picos que superan los 11 minutos.

Finalmente, se concluyó que ambos modelos presentan resultados óptimos en el diseño y en el análisis de sensibilidad tanto en el primer y segundo escenario. Además, considerando que el modelo de optimización por metas presentó una robustez y sensibilidad ligeramente menor al modelo de límite de cobertura en el segundo escenario, dicho modelo sería la opción viable al tener un menor costo de implementación (8 millones de dólares), con una red de 63 estaciones en total distribuidas en la región de Lima Metropolitana y Callao y asegurando el servicio de respuesta a emergencias en zonas de baja demanda.

6.2 RECOMENDACIONES

Uno de los factores más importantes que ha acompañado la elaboración de esta investigación es la política de decisión en la ubicación de estaciones. Si bien no hay ninguna política implementada por el CGBVP o la INBP, la presente investigación desarrolla una basada en el estándar internacional NFPA 1720. Por lo tanto, se recomienda que los tomadores de decisión del CGBVP e INBP implementen una política de ubicación de estaciones de bomberos basada en los resultados de la presente tesis.

Cabe resaltar que el estándar NFPA 1720 sólo considera ciudades urbanas destinadas a vivienda. En cambio, Lima Metropolitana y Callao son ciudades complejas con infraestructura vial limitada y con desarrollos urbanos impulsados por la industrialización de los últimos años. Por lo tanto, se recomienda que el CGBVP e INBP implemente una política que busque satisfacer los objetivos sociales, económicos y políticos, tales como: el índice de pobreza, esperanza de vida ante un incendio o accidente, material constructivo de la vivienda, tipo de vivienda, tipo de edificación, uso de edificación y criticidad de la edificación como lo son los centros históricos, monumentos, colegios y centros de salud.

Durante el desarrollo del diagnóstico se observó que, en la región de Lima Centro y zonas cercanas, se concentraba casi el 80% de las emergencias del periodo evaluado. Ante ello, al ejecutar el modelo de límite de cobertura en el primer escenario, consideraba la ubicación de estaciones en la zona de alta demanda y, dejaba sin cobertura a las demás zonas. Dicho esto, se recomienda implementar un método de segmentación de zonas según la demanda del servicio de emergencia.

En los resultados del diagnóstico se encontró que, la evolución urbana y, por consiguiente, el crecimiento de la demanda del servicio en los últimos años ha tenido un impacto significativo en la cobertura del servicio de respuesta a emergencias. Ante ello, se recomienda que los tomadores de decisiones del CGBVP e INBP implementen un programa periódico de evaluación del rendimiento de la cobertura del servicio. Teniendo como resultado, la evaluación de permanencia de estaciones, así como la reubicación o cierre de las mismas con una metodología basada en la presente investigación.

Otro hallazgo del diagnóstico fue la distribución heterogénea de las unidades de respuesta a emergencias. Actualmente, la adquisición de unidades se produce de tres maneras: por la dirección de recursos de la INBP, por iniciativa de los bomberos a través de donaciones y/o por convenio municipal directamente a la compañía del distrito. Si bien la INBP es la institución encargada de asegurar los recursos para la operatividad del CGBVP, en los últimos años no se ha elaborado una política de asignación de unidades. Por lo tanto, se recomienda que la INBP implemente una política de asignación de vehículos de emergencia según la demanda del servicio en cada distrito, aplicando herramientas de investigación de operaciones.

De manera similar, otro recurso crítico para asegurar la operatividad de las unidades de respuesta a emergencias es el personal competente para operar dichas unidades. El personal está dividido en conductores voluntarios y rentados. Sin embargo, al igual que en el caso de asignación de unidades, no existe una política de asignación de conductores. En consecuencia, las estaciones de bomberos se enfrentan a situaciones en las que tienen bomberos voluntarios y vehículos operativos, pero, no cuentan con un conductor capacitado para el manejo del vehículo. Ante esta situación, cada estación busca una solución propia como la organización interna para asegurar la asistencia de conductores voluntarios o convenios con las municipalidades distritales en aras de la contratación de personal rentado. Por lo tanto, se

recomienda que la INBP implemente una política de asignación de pilotos voluntarios y rentados basado en un estudio de investigación de operaciones.

En el desarrollo de los modelos se estipularon supuestos para limitar el alcance de los modelos. Sin embargo, al implementar un modelo que permita asignar vehículos de emergencia y pilotos voluntarios y rentados, se podría estimar el área requerida para cada estación según la cantidad de vehículos asignados, el costo del mantenimiento de las instalaciones y unidades, el pago por el servicio del personal de conducción de las unidades. Dicho esto, se recomienda que la INBP implemente un estudio de investigación de operaciones y que, con la asignación de unidades, incluya las restricciones pertinentes para reducir los supuestos establecidos en la presente investigación.

Finalmente, se recomienda implementar estudios de ubicación de estaciones de bomberos en todas las ciudades del país según las particularidades encontradas en cada región.



REFERENCIAS

- American Heart Association. (2015). *Heartsaver Manual*.
- AMPL. (2021). *AMPL - About us*. <https://ampl.com/products/ampl/>
- Anbuudayasankar, S. P., Ganesh, K., & Mohapatra, S. (2014). Models for practical routing problems in logistics: Design and practices. In *Models for Practical Routing Problems in Logistics: Design and Practices*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-05035-5>
- Badri, M. A., Mortagy, A. K., & Ali Alsayed, C. (1998). A multi-objective model for locating fire stations. *European Journal of Operational Research*. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)00247-6](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00247-6)
- Bornmann, L., & Mutz, R. (2011). Further steps towards an ideal method of measuring citation performance: The avoidance of citation (ratio) averages in field-normalization. *J. Informetrics*, 5, 228–230. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2010.10.009>
- Çatay, B. (2011). Siting new fire stations in Istanbul: A risk-based optimization approach. *OR Insight*. <https://doi.org/10.1057/ori.2011.3>
- CGBVP. (2010). *Sistema de Gestión Operativa*. Dirección de Informática.
- Plan Operativo Institucional 2017, Pub. L. No. 473-2016 CGBVP, 34 (2016).
- Reglamento Interno de Funcionamiento, (2017).
- Coz, J. (2010). *Historia del Cuerpo de Bomberos Voluntarios del Perú, al cierre del milenio 1860 - 2000*. CGBVP. http://www.bomberosperu.gob.pe/portal/net_historia.aspx#
- Custer, R. (2008). Dynamics of Compartment Fire Growth. *Fire Protection Handbook*, 1(2), 237–246.
- Davenport, T. H., & Harris, J. G. (2007). *Competing on Analytics: The New Science of Winning*. Boston. <http://lib.ugent.be/catalog/rug01:001210069>
- Degel, D., Wiesche, L., Rachuba, S., & Werners, B. (2014). Reorganizing an existing volunteer fire station network in Germany. *Socio-Economic Planning Sciences*, 48(2), 149–157. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seps.2014.03.001>
- Dextre, J., & Avellaneda, P. (2013). *Movilidad en Zonas Urbanas*.
- Eilon, S. (1972). Goals and Constraints in Decision-making†. *Journal of the Operational Research Society*, 23(1), 3–15. <https://doi.org/10.1057/jors.1972.2>
- Eilon, S. (1977). Management perspectives in physical distribution. *Omega*. [https://doi.org/10.1016/0305-0483\(77\)90007-X](https://doi.org/10.1016/0305-0483(77)90007-X)
- Flores, L., Santa María, E., Valero, Y., & Montenegro, W. (2018). Diagnosis and Analysis of The Behavior of The Vehicular Flow and Service Level from The Javier Prado Avenue - Lima, Perú. *16th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: "Innovation in Education and Inclusion"*. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2018.1.1.409>
- Fourer, R., Gay, D. M., & Kernighan, B. W. (1990). A Modeling Language for Mathematical Programming. *Management Science*. <https://doi.org/10.1287/mnsc.36.5.519>

- Ganesh, K., & Narendran, T. T. (2005). CLOSE: a heuristic to solve a precedence-constrained travelling salesman problem with delivery and pickup. *International Journal of Services and Operations Management*. <https://doi.org/10.1504/IJSOM.2005.007496>
- Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (2010). *Introducción a la investigación de operaciones* (Novena edi). McGraw-Hill/Interamericana.
- INEI. (2014). *Una Mirada a Lima Metropolitana*.
- JICA. (2013). *Encuesta de recolección de información básica del transporte urbano en el área metropolitana de Lima y Callao*.
- Johnson, R., & Price, M. (2008). GIS for Fire Station Locations and Response Protocols. *Fire Protection Handbook*, 2(12), 2025–2041.
- Jones, D., & Tamiz, M. (2016). A review of goal programming. *International Series in Operations Research and Management Science*. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3094-4_21
- Kliestik, T., Misankova, M., & Bartosova, V. (2015). Application of multi criteria goal programming approach for management of the company. *Applied Mathematical Sciences*. <https://doi.org/10.12988/ams.2015.57488>
- Krajewski, L., Ritzman, L., & Malhotra, M. (2013). Administración de Operaciones: Procesos y cadena de suministro. In *Información tecnológica*. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642009000500001>
- Liberatore, M., & Luo, W. (2010). The Analytics Movement: Implications for Operations Research. *Interfaces*, 40, 313–324. <https://doi.org/10.1287/inte.1100.0502>
- Plan Estratégico Sectorial Multianual (PESEM) 2016-2021 Actualizado, 58 (2016).
- Ministerio de Economía y Finanzas. (2020). *Portal de Transparencia Económica*. <https://apps5.mineco.gob.pe/transparencia/Navegador/default.aspx>
- Murray, A. T. (2013). Optimising the spatial location of urban fire stations. *Fire Safety Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2013.03.002>
- NFPA 1221: Standard for the Installation, Maintenance, and Use of Emergency Services Communications Systems, Pub. L. No. NFPA 1221 (2019).
- NFPA 1720: Standard for the Organization and Deployment of Fire Suppression Operations, Emergency Medical Operations, and Special Operations to the Public by Volunteer Fire Departments, (2020). <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=1720>
- Olson, D., & Lauhoff, G. (2019). *Descriptive Data Mining* (2nd ed.).
- DL N°1260 Decreto Legislativo que fortalece el Cuerpo General de Bomberos Voluntarios del Perú como parte de sistema nacional de seguridad ciudadana y regula la Intendencia Nacional de Bomberos del Perú, (2016). <https://busquedas.elperuano.pe/normaslegales/decreto-legislativo-que-fortalece-el-cuerpo-general-de-bombe-decreto-legislativo-n-1260-1461978-5/>
- Pons, P. T., Haukoos, J. S., Bludworth, W., Cribley, T., Pons, K. A., & Markovchick, V. J. (2005). Paramedic response time: Does it affect patient survival? *Academic Emergency Medicine*. <https://doi.org/10.1197/j.aem.2005.02.013>

- Robusté, F. (2014). *Logística del transporte* (Universida). Lighting Source.
- Rousseau, R. (2012). Basic properties of both percentile rank scores and the I3 indicator. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*.
<https://doi.org/10.1002/asi.21684>
- SPSS-IBM. (2012). *Manual CRISP-DM* (15th ed.).
- SUNARP. (2020). *Registro de bienes muebles por departamento*.
- Tamiz, M., Jones, D. F., & El-Darzi, E. (1995). A review of Goal Programming and its applications. *Annals of Operations Research*, 58(1), 39–53. <https://doi.org/10.1007/BF02032309>
- TomTom. (2020). *Traffic Index 2019*. Traffic Index Ranking. https://www.tomtom.com/en_gb/traffic-index/ranking/
- Winston, W. L. (2009). Investigación de operaciones aplicaciones y algoritmos. *Termodinamica*.
- Yao, J., Zhang, X., & Murray, A. T. (2019). Location optimization of urban fire stations: Access and service coverage. *Computers, Environment and Urban Systems*.
<https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2018.10.006>



ANEXOS

ANEXO 1 LISTADO DE RECURSOS DEL CGBVP

A. TABLA DE UNIDADES BÁSICAS POR UNIDAD BÁSICA OPERATIVA (UBO) EN LIMA METROPOLITANA Y CALLAO

Comandancia Departamental	Región Metropolitana	ID - UBO	Total de Unidades Básicas	Unidad Médica		Autobomba		Unidad de Rescate	
				Cant.	%	Cant.	%	Cant.	%
V	Callao	1	4	2	50%	2	50%	0	0%
V	Callao	5	4	2	50%	2	50%	0	0%
V	Callao	7	5	2	50%	2	50%	1	25%
V	Callao	9	5	2	50%	2	50%	1	25%
V	Callao	15	4	2	50%	1	25%	1	25%
V	Callao	18	5	2	50%	3	75%	0	0%
V	Callao	34	3	2	50%	1	25%	0	0%
V	Callao	60	4	2	50%	1	25%	1	25%
V	Callao	75	3	1	25%	2	50%	0	0%
V	Callao	184	4	2	50%	1	25%	1	25%
V	Callao	207	2	0	0%	1	25%	1	25%
V	Callao	232	2	1	25%	1	25%	0	0%
IV	Lima Centro	2	5	1	25%	2	50%	2	50%
IV	Lima Centro	3	3	1	25%	1	25%	1	25%
IV	Lima Centro	4	5	1	25%	2	50%	2	50%
IV	Lima Centro	8	4	1	25%	2	50%	1	25%
IV	Lima Centro	10	5	2	50%	2	50%	1	25%
IV	Lima Centro	14	3	1	25%	1	25%	1	25%
IV	Lima Centro	21	3	1	25%	1	25%	1	25%
IV	Lima Centro	36	4	2	50%	1	25%	1	25%
IV	Lima Centro	83	3	1	25%	1	25%	1	25%
IV	Lima Centro	100	4	1	25%	1	25%	2	50%
IV	Lima Centro	202	6	3	75%	1	25%	2	50%

Comandancia Departamental	Región Metropolitana	ID - UBO	Total de Unidades Básicas	Unidad Médica		Autobomba		Unidad de Rescate	
				Cant.	%	Cant.	%	Cant.	%
XXIV	Lima Centro	11	4	2	50%	1	25%	1	25%
XXIV	Lima Centro	16	4	2	50%	1	25%	1	25%
XXIV	Lima Centro	28	3	1	25%	1	25%	1	25%
XXIV	Lima Centro	134	3	1	25%	1	25%	1	25%
IV	Lima Este	32	5	3	75%	1	25%	1	25%
IV	Lima Este	115	3	2	50%	1	25%	0	0%
IV	Lima Este	121	6	2	50%	1	25%	3	75%
IV	Lima Este	127	3	1	25%	1	25%	1	25%
IV	Lima Este	138	4	1	25%	2	50%	1	25%
IV	Lima Este	169	3	1	25%	1	25%	1	25%
IV	Lima Este	176	3	1	25%	1	25%	1	25%
IV	Lima Este	236	1	0	0%	0	0%	1	25%
XXIV	Lima Este	96	3	1	25%	1	25%	1	25%
XXV	Lima Norte	65	3	1	25%	1	25%	1	25%
XXV	Lima Norte	124	4	1	25%	1	25%	2	50%
XXV	Lima Norte	150	3	1	25%	1	25%	1	25%
XXV	Lima Norte	161	3	1	25%	1	25%	1	25%
XXV	Lima Norte	163	4	2	50%	1	25%	1	25%
XXV	Lima Norte	164	4	2	50%	1	25%	1	25%
XXV	Lima Norte	168	3	1	25%	1	25%	1	25%
XXIV	Lima Sur	6	3	1	25%	1	25%	1	25%
XXIV	Lima Sur	13	4	2	50%	1	25%	1	25%
XXIV	Lima Sur	105	3	1	25%	1	25%	1	25%
XXIV	Lima Sur	106	3	1	25%	1	25%	1	25%
XXIV	Lima Sur	120	3	1	25%	1	25%	1	25%
XXIV	Lima Sur	125	3	1	25%	1	25%	1	25%
XXIV	Lima Sur	129	2	1	25%	1	25%	0	0%
XXIV	Lima Sur	133	3	1	25%	1	25%	1	25%
XXIV	Lima Sur	155	2	1	25%	1	25%	0	0%
XXIV	Lima Sur	160	3	1	25%	1	25%	1	25%

B. TABLA DE UNIDADES ESPECIALES POR UNIDAD BÁSICA OPERATIVA (UBO) EN LIMA METROPOLITANA Y CALLAO

Comandancia Departamental	Región Metropolitana	ID - UBO	Total de Unidades Especiales	UA ¹	MATPEL ²	UE ³	UPC ⁴	USAC ⁵	UCIST ⁶
V	Callao	1	0	0	0	0	0	0	0
V	Callao	5	2	0	0	0	0	1	1
V	Callao	7	2	1	0	0	1	0	0
V	Callao	9	3	1	0	0	0	0	1
V	Callao	15	0	0	0	0	0	0	0
V	Callao	18	0	0	0	0	0	0	0
V	Callao	34	0	0	0	0	0	0	0
V	Callao	60	1	1	0	0	0	0	0
V	Callao	75	1	0	1	0	0	0	0
V	Callao	184	1	0	0	0	0	0	1
V	Callao	207	0	0	0	0	0	0	0
V	Callao	232	0	0	0	0	0	0	0
IV	Lima Centro	2	1	0	0	0	0	1	0
IV	Lima Centro	3	1	1	0	0	0	0	0
IV	Lima Centro	4	2	1	1	0	0	0	0
IV	Lima Centro	8	1	1	0	0	0	0	0
IV	Lima Centro	10	1	1	0	0	0	0	0
IV	Lima Centro	14	2	1	0	0	1	0	0
IV	Lima Centro	21	1	0	0	0	0	0	1
IV	Lima Centro	36	2	1	0	1	0	0	0
IV	Lima Centro	83	1	1	0	0	0	0	0
IV	Lima Centro	100	0	0	0	0	0	0	0
IV	Lima Centro	202	2	1	0	0	0	1	0
XXIV	Lima Centro	11	3	1	0	1	0	0	1
XXIV	Lima Centro	16	0	0	0	0	0	0	0
XXIV	Lima Centro	28	3	1	1	0	1	0	0

¹ UA: Unidad Aérea (Plataforma, Escala Telescópica, *Squrt* y *Snorkel*).

² MATPEL: Unidad para Materiales Peligrosos.

³ UE: Unidad Eléctrica.

⁴ UPC: Unidad Puesto de Comando.

⁵ USAC: Unidad de Soporte de Aire Comprimido.

⁶ UCIST: Unidad de Cisterna de agua

Comandancia Departamental	Región Metropolitana	ID - UBO	Total de Unidades Especiales	UA ¹	MATPEL ²	UE ³	UPC ⁴	USAC ⁵	UCIST ⁶
XXIV	Lima Centro	134	1	1	0	0	0	0	0
IV	Lima Este	32	2	0	1	1	0	0	0
IV	Lima Este	115	0	0	0	0	0	0	0
IV	Lima Este	121	2	1	0	0	0	0	1
IV	Lima Este	127	0	0	0	0	0	0	0
IV	Lima Este	138	2	0	1	0	0	0	1
IV	Lima Este	169	0	0	0	0	0	0	0
IV	Lima Este	176	0	0	0	0	0	0	0
IV	Lima Este	236	0	0	0	0	0	0	0
XXIV	Lima Este	96	0	0	0	0	0	0	0
XXV	Lima Norte	65	0	0	0	0	0	0	0
XXV	Lima Norte	124	2	1	1	0	0	0	0
XXV	Lima Norte	150	0	0	0	0	0	0	0
XXV	Lima Norte	161	0	0	0	0	0	0	0
XXV	Lima Norte	163	0	0	0	0	0	0	0
XXV	Lima Norte	164	2	1	0	0	0	0	1
XXV	Lima Norte	168	0	0	0	0	0	0	0
XXIV	Lima Sur	6	0	0	0	0	0	0	0
XXIV	Lima Sur	13	2	1	0	0	0	0	1
XXIV	Lima Sur	105	1	0	0	0	0	1	0
XXIV	Lima Sur	106	1	0	0	0	0	0	1
XXIV	Lima Sur	120	1	1	0	0	0	0	0
XXIV	Lima Sur	125	0	0	0	0	0	0	0
XXIV	Lima Sur	129	0	0	0	0	0	0	0
XXIV	Lima Sur	133	0	0	0	0	0	0	0
XXIV	Lima Sur	155	1	0	0	0	0	0	1
XXIV	Lima Sur	160	0	0	0	0	0	0	0

ANEXO 2 BASE DE DATOS

A continuación, se describen los extractos de las tablas de la base de datos manejada en MS Access.

A. TABLA COSTO DE IMPLEMENTACIÓN

COSTO				
Id	sector-GIS	Distrito	Costo	estaciones
9173	173	Pucusana	131040	1
9174	237	Pucusana	131040	2
9175	238	Pucusana	131040	3
9176	302	Pucusana	131040	4
9177	366	Pucusana	131040	5
...
9186	817	Santa Maria del Mar	274440	14
9187	879	San Bartolo	208260	15
9188	881	San Bartolo	208260	16
9189	943	San Bartolo	208260	17
9190	944	San Bartolo	208260	18
9191	1006	Punta Negra	115260	19
...
10204	5252	Ancon	85740	1032
10205	5253	Ancon	85740	1033
10206	5316	Ancon	85740	1034
10207	5380	Ancon	85740	1035
10208	5444	Ancon	85740	1036

B. TABLA DEMANDA DEL SERVICIO DE EMERGENCIA

DEMANDA			
Id	sectores	Demanda	sector
11627	1	1	173
11628	2	30	237
11629	3	1	238
11630	4	1	302
11631	5	4	366
...
11876	250	109	2779
11877	251	48	2788
11878	252	25	2794

DEMANDA			
Id	sectores	Demanda	sector
11879	253	1	2795
11880	254	692	2833
11881	255	2043	2834
...
12658	1032	129	5252
12659	1033	25	5253
12660	1034	14	5316
12661	1035	4	5380
12662	1036	2	5444

C. TABLA ESTACIONES EXISTENTES

EXISTENTES				
Id	sector-GIS	estaciones	Existentes	
5259	173	1		0
5260	237	2		0
5261	238	3		0
5262	302	4		0
5263	366	5		0
...
5450	2516	192		1
5451	2517	193		0
5452	2518	194		0
5453	2519	195		0
5454	2520	196		0
5455	2521	197		1
...
6290	5252	1032		1
6291	5253	1033		0
6292	5316	1034		0
6293	5380	1035		0
6294	5444	1036		0

D. TABLA SECTORES CON REQUERIMIENTO DE SERVICIO DE RESPALDO

RESPALDO			
Id	sectores	Respaldo	sector
1	1	0	173

RESPALDO			
Id	sectores	Respaldo	sector
2	2	1	237
3	3	0	238
4	4	0	302
5	5	1	366
...
314	314	1	2981
315	315	0	2988
316	316	0	2989
317	317	0	2990
318	318	1	2991
319	319	0	3021
...
1032	1032	0	5252
1033	1033	0	5253
1034	1034	0	5316
1035	1035	0	5380
1036	1036	0	5444

E. TABLA ESTIMACIÓN DE TIEMPO DE RESPUESTA

TIEMPO			
Id	estaciones	sectores	Tiempo
1073297	1	1	6.00
1073298	1	2	2.00
1073299	1	3	4.00
1073300	1	4	4.00
1073301	1	5	6.00
...
1161479	86	123	8.00
1161480	86	124	12.00
1161481	86	125	17.00
1161482	86	126	22.00
1161483	86	127	35.00
1161484	86	128	27.00
1161485	86	129	54.00
...
2146588	1036	1032	3.00
2146589	1036	1033	5.00
2146590	1036	1034	3.00

TIEMPO			
Id	estaciones	sectores	Tiempo
2146591	1036	1035	1.00
2146592	1036	1036	1.00

F. TABLA ESTIMACIÓN DE TIEMPO DE RESPUESTA MÁXIMO

TIEMPO_max			
Id	estaciones	sectores	Tiempo_mx
1	1	1	6.00
2	1	2	4.00
3	1	3	4.00
4	1	4	4.00
5	1	5	6.00
...
88183	86	123	12.00
88184	86	124	23.00
88185	86	125	29.00
88186	86	126	35.00
88187	86	127	47.00
88188	86	128	54.00
88189	86	129	71.00
...
1073292	1036	1032	4.00
1073293	1036	1033	6.00
1073294	1036	1034	3.00
1073295	1036	1035	1.00
1073296	1036	1036	1.00

ANEXO 3 CÓDIGO PYTHON

A. ESTIMACIÓN DE VELOCIDAD

```
# Import librerias
import numpy as np
import pandas as pd
import sys
import pyodbc

i=input_table['sector(id)']
vel=input_table['Median(Vj)']

data = {'sectores':i,'Velocidad':vel}

VELO = pd.DataFrame (data)

# Output
output_table = VELO

# Carga a base de datos

# funcion fila en tabla
def format_dataframe_data():
    rows = [tuple(cell) for cell in VELO.values]
    return rows

# create connection
con = pyodbc.connect(r'DRIVER={Microsoft Access Driver (*.mdb, *.accdb)};DBQ=C:\FIRE_ACCESS\FIRE2.mdb;')
cursor = con.cursor()

# Limpieza de datos
cursor.execute (''' DELETE FROM VELOCIDAD''')

# carga de tablas
sql = ''' INSERT INTO VELOCIDAD (sectores, Velocidad)
VALUES (?,?) '''
rows = format_dataframe_data()
for row in rows:
    cursor.execute(sql,row)

# close connection
con.commit()
```

B. ESTIMACIÓN DE TIEMPO

```
# Import librerias
import numpy as np
import pandas as pd
import sys
import pyodbc

#extraemos los datos del excel x , y , sector , i, velocidad
x = input_table['Emer_X'] #posicion x
y = input_table['Emer_Y'] #posicion y
sector = input_table['sector(id)'] #sector
```

```

i = input_table['sector(id)'] #posicion i
v = input_table['Vj'] #velocidad
# extraemos la cantidad de elementos
elementos = len(x)
#volvemos matrices los datos
x = np.array( x.values)
y = np.array( y.values)
v = np.array( v.values)
i = np.array( i.values)
sector = np.array( sector.values)

#-----Arreglos-----
#arreglamos las matrices de los sectores y la cantidad de datos(i)y
las transformamos en tuplas para generar los ejes del excel
i=i.T
sector=sector.T
i_list = i.tolist()
sector_list= sector.tolist()

#-----Matrices-----
#generamos una matriz unitaria del tamaño de los elementos
matriz_d=np.ones((elementos, elementos))

#hacemos un barrido en lso ejes I y J , e caso sean igual el valor a
colocar es 1
for i in range(elementos):
    for j in range(elementos):
        if abs(x[i]-x[j])+abs(y[i]-y[j])<=2:
            matriz_d[i][j]=2
        else:
            d=(abs(x[i]-x[j])+abs(y[i]-y[j]))/1000 # D en km
            matriz_d[i][j]=d

#generamos una matriz unitaria del tamaño de los elementos
matriz_t=np.ones((elementos, elementos))

#hacemos un barrido en lso ejes I y J dividiendo los valores con la
matriz V
for i in range(elementos):
    for j in range(elementos):
        matriz_t[i][j]=2*matriz_d[i][j]/(v[j]+v[i])
matriz_t=matriz_t*60

#-----
#generamos nuevas listas para almacenar datos
a=[]
ai=[]
ax=[]
ay=[]
b=[]
bj=[]
bx=[]
by=[]
c=[]
d=[]
for i in range(elementos):

```

```

        for j in range(elementos):
            ai.append(i+1)
            ax.append(x[i])
            ay.append(y[i])
            bj.append(j+1)
            bx.append(x[j])
            by.append(y[j])
            c.append(matriz_t[i][j])
            d.append(matriz_d[i][j])
data1 = {'estaciones':ai,'X_i':ax,'Y_i':ay,
'sectores':bj,'X_j':bx,'Y_j':by,"Tiempo":c}
data2 = {'estaciones':ai,'X_i':ax,'Y_i':ay,
'sectores':bj,'X_j':bx,'Y_j':by,"Distancia":d}
data1_ = {'estaciones':ai,'sectores':bj,"Tiempo":c}
data2_ = {'estaciones':ai,'sectores':bj,"Distancia":d}

#las agregamos en diccionarios y las mostramos
# -----
TIEMP = pd.DataFrame (data1)
DISTA = pd.DataFrame (data2)
TIEMP_ = pd.DataFrame (data1_)
DISTA_ = pd.DataFrame (data2_)

output_table_1 = TIEMP # OUTPUT DEL SCRIPT
output_table_2 = DISTA

# funcion fila en tabla tiempo
def format_dataframe_data1():
    rows = [tuple(cell) for cell in TIEMP_.values]
    return rows

# funcion fila en tabla distancia
def format_dataframe_data2():
    rows = [tuple(cell) for cell in DISTA_.values]
    return rows

# Carga a base de datos

# create connection
con = pyodbc.connect(r'DRIVER={Microsoft Access Driver (*.mdb,
*.accdb)};DBQ=C:\FIRE_ACCESS\FIRE2.mdb;')
cursor = con.cursor()

# Limpieza de datos
cursor.execute (''' DELETE FROM TIEMPO''')
cursor.execute (''' DELETE FROM DISTANCIA''')

# carga de tablas
sql_1 = ''' INSERT INTO TIEMPO (estaciones, sectores, Tiempo)
VALUES (?, ?, ?) '''
rows_1 = format_dataframe_data1()
for row in rows_1:
    cursor.execute(sql_1,row)

sql_2 = ''' INSERT INTO DISTANCIA (estaciones, sectores, Distancia)
VALUES (?, ?, ?) '''
rows_2 = format_dataframe_data2()
for row in rows_2:
    cursor.execute(sql_2,row)

con.commit()

```

ANEXO 4 CÓDIGO AMPL

A. MODELO LÍMITE DE COBERTURA

```
# Indices
set estaciones      := 1..1036; # definido por índice de tabla
set sectores := 1..1036; # definido por índice de tabla
set matriz          := {estaciones, sectores};

# Parametros
param Tiempo {matriz} > 0; # sectores que pueden ser atendidos por
estaciones en menos de 10 min
param Demanda {sectores} > 0; # demanda de sector j
#param Costo {estaciones};
param Existentes {estaciones};
param Omega {i in estaciones, j in sectores} =
    if Tiempo[i,j] <= 10 then 1 else 0; # restricción de omega

# Variables
var X {i in estaciones} binary;
var Y {j in sectores} binary;

# Funcion objetivo
minimize Cantidad_estaciones:
    sum {i in estaciones} X[i];

# RESTRICCION 1
subject to Servicio {j in sectores}:
    sum {i in estaciones} Omega[i,j]*X[i] >= Y[j];
    #sum {i in estaciones} X[i] >= Y[j];

# RESTRICCION 2
subject to Percentil90:
    #{j in sectores}
    100*(1/(sum {i in sectores} Demanda [i]))*(sum {i in sectores}
Demanda [i]* Y[i]) >= 90;

# RESTRICCION 3
subject to Existencias:
    sum {i in estaciones} Existentes[i]*X[i] = 50;
```

B. EJECUTABLE DE MODELO LÍMITE DE COBERTURA

```
reset;
model Murray-v2.mod

# Declaración de tablas
table EXISTENTES IN 'ODBC' 'FIRE2.mdb':
[estaciones], Existentes;

table DEMANDA IN 'ODBC' 'FIRE2.mdb':
[sectores], Demanda;

# X OUT, Y OUT
```

```

table RESULTADOS OUT 'ODBC' 'FIRE2.mdb':
[sectores], X, Y;

# Tabla bidimensional
table TIEMPO IN 'ODBC' 'FIRE2.mdb':
[estaciones, sectores], Tiempo;
#[i ~ estaciones], {j in sectores} < Tiempo[i,j] ~ (j) >; # [filas],
{columnas}

# Lectura de tablas
read table EXISTENTES;
read table DEMANDA;
read table TIEMPO;

# Verificación
#display Tiempo;
#display Demanda;
option solver cpex; # uso de variables enteras y binarias
solve;
# Imprimir resultados
#display X;
option display_width 50;
display 100*(1/(sum {i in sectores} Demanda [i]))*(sum {i in sectores}
Demanda [i]* Y[i]);
option omit_zero_rows 1;
option display_width 5;
display X;

# Escritura de resultados
write table RESULTADOS;

```

C. MODELO DE OPTIMIZACIÓN POR METAS

```

# Indices
set estaciones := 1..1036; # definido por índice de tabla
set sectores := 1..1036; # definido por índice de tabla
set matriz := {estaciones, sectores};

# Parametros
param Tiempo {matriz} integer > 0; # T-prom_ij
param Tiempo_mx {matriz} integer > 0; # T-max_ij
param Demanda {sectores} > 0; # Aj - Demanda
param Costo {estaciones}; # Ci - costo por sectores
param Existentes {estaciones}; #Ei - Estaciones existentes
param Respaldo {sectores}; #Rj - Cobertura de respaldo requerido
param C = 13000000; # Presupuesto disponible 13 millones
param F = 50; # Cantidad objetivo de estaciones de bomberos
param M = 100000000000; # Constante de gran valor
param Omega_pm {i in estaciones, j in sectores} =
if Tiempo[i,j] <= 10 then 1 else 0; # restricción de omega
param Omega_mx {i in estaciones, j in sectores} =
if Tiempo_mx[i,j] <= 20 then 1 else 0; # restricción de omega
param P1 = 100000000000000000000;
param P2 = 100000000000000000000;
param P3 = 1000000;
param P4 = 100000;
param P5 = 1000;

```

```

# Variables
var X {i in estaciones} binary;
var Y {i in estaciones, j in sectores} >= 0;
var Vc >= 0;
var Ud {j in sectores} >= 0;
var Vd {j in sectores} >= 0;
var Vtm {j in sectores} binary;
var Vtp {j in sectores} integer;# Y: sectores atendidos adecuadamente en
tprom
var Vf >= 0;
var Ur {j in sectores} >= 0;
var Vr {j in sectores} >= 0;
var Upn >= 0;
var Umn >= 0;
var Vm >= 1;

# Funcion objetivo
minimize Cantidad_estaciones:

    P2*Vc # Costo
    + P1*Upn # Distancia a Percentil 90
    + P4*Umn # Distancia a percentil M 90
    + P3*(Uf) # Cantidad de existentes
    + P5*sum {j in sectores} Ur[j]; # Dist a Respaldo: 0

# RESTRICCION 1
subject to COSTS:
    sum{i in estaciones}((X[i]-Existentes[i]*X[i]) * Costo[i]) - Vc = C;

# RESTRICCION 2
subject to T_PROM {j in sectores}:
    sum {i in estaciones} Omega_pm[i,j]*X[i] - Vtp[j] = 0;

# RESTRICCION 3
subject to Percentil90:
    100*(1/(sum {j in sectores} Demanda [j]))*(sum {j in sectores}
Demanda [j]* Vtp[j]) + Upn = 90;

# RESTRICCION 4
subject to T_MAX {j in sectores}:
    sum {i in estaciones} Omega_mx[i,j]*X[i] - Vtm[j] = 0;

# RESTRICCION 5
subject to Percentil90_max:
    100*(1/(sum {j in sectores} Demanda [j]))*(sum {j in sectores}
Demanda [j]* Vtm[j]) + Umn = 80;

# RESTRICCION 6 - solo en escenario 2
subject to EXIST:
    sum {i in estaciones} Existentes[i]*X[i] + Uf - Vf = F;

# RESTRICCION 7
subject to Overlap {j in sectores}:
    Vtpb[j] + Ur[j] = 10*Respaldo[j];

# RESTRICCION 8
subject to Estructural {i in estaciones}:
    sum {j in sectores} Y[i,j] - M*X[i] <= 0;

```

```
subject to Estructural12 {j in sectores}:  
    Vtpb[j] <= Vtp[j] ;
```

D. EJECUTABLE DE MODELO DE OPTIMIZACIÓN POR METAS

```
reset;  
model Badri-v1.mod  
  
# Declaración de tablas  
  
# T7  
table TIEMPO IN 'ODBC' 'FIRE2.mdb':  
[estaciones, sectores], Tiempo;  
# T8  
table TIEMPO_max IN 'ODBC' 'FIRE2.mdb':  
[estaciones, sectores], Tiempo_mx;  
# T9  
table DEMANDA IN 'ODBC' 'FIRE2.mdb':  
[sectores], Demanda;  
#T10  
table COSTO IN 'ODBC' 'FIRE2.mdb':  
[estaciones], Costo;  
#T11  
table EXISTENTES IN 'ODBC' 'FIRE2.mdb':  
[estaciones], Existentes;  
#T12  
table RESPALDO IN 'ODBC' 'FIRE2.mdb':  
[sectores], Respaldo;  
  
# X OUT, Y OUT  
table RESULTADOS OUT 'ODBC' 'FIRE2.mdb':  
[sectores], X, Y;  
  
# Lectura de tablas  
#read table TIEMPO_prom;  
read table TIEMPO;  
read table TIEMPO_max;  
read table DEMANDA;  
read table COSTO;  
read table EXISTENTES;  
read table RESPALDO;  
  
# Verificación  
#display Tiempo;  
#display Demanda;  
  
option solver cplex; # uso de variables enteras y binarias  
option show_stats 1;  
option cplex_options 'mipdisplay=2 nodefile=3 memoryemphasis=1 threads=1  
mipinterval=10000'; #memoryemphasis=1 threads=1 mipinterval=10000  
  
solve;  
# Imprimir resultados  
#display X;  
option display_width 50;
```

```

#display 100*(1/(sum {i in sectores} Demanda [i]))*(sum {i in sectores}
Demanda [i]* Y[i]);
#option omit_zero_rows 1;
option display_width 50;

#display Uc;
display Vc;
#display sum {j in sectores} Ud[j];
display Vm;
display Upn;
display Umn;
display Uf;
display sum {j in sectores} Ur[j];
#display sum {j in sectores} Vr[j];
#display Vtm; # sectores cubiertos

#option display_width 50;
#display sum {i in estaciones} X[i];

# Escritura de resultados
write table RESULTADOS;

```

