



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

EVALUACIÓN DE TIEMPOS DE RESPUESTA PARA EL CUERPO DE BOMBEROS  
DE SANTIAGO: NUEVO MODELO DE RUTEO, VALIDACIÓN Y MÉTRICAS DE  
DESEMPEÑO DEL SISTEMA ACTUAL

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN GESTIÓN DE OPERACIONES

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

ÁLVARO RICARDO ECHEVERRÍA SOLÍS

PROFESOR GUÍA:

FERNANDO ORDOÑEZ PIZARRO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

DANIEL ESPINOZA GONZÁLEZ

MARCELO OLIVARES ACUÑA

MAURICIO REPETTO CONTRERAS

SANTIAGO DE CHILE  
JUNIO 2013

# Resumen

Encontrar el camino mínimo en un grafo dirigido es un problema clásico pero de tremenda repercusión e importancia para un sistema de emergencia, donde cada segundo es vital para poder minimizar las pérdidas humanas. De esta forma, este trabajo de tesis se enfoca en el desarrollo de un algoritmo de caminos mínimos para el Cuerpo de Bomberos de Santiago basado en un Dijkstra inverso implementado con Binary Heaps. Además, se construye un grafo dirigido de la Región Metropolitana de Chile donde, con información de las velocidades de buses del sistema público chileno, se puede recrear la velocidad en cada uno de los arcos a distintas horas del día. Esto permite obtener por primera vez un orden de despacho para cada emergencia que enfrenta el Cuerpo de Bomberos de Santiago, considerando aspectos de congestión.

Además, y debido a la diferente naturaleza de los tiempos de traslado entre Transantiago y CBS, se comparan los tiempos obtenidos por el algoritmo con los datos históricos del Cuerpo para calibrar dichas velocidades. Así, estos análisis llevan a la construcción del “Factor Bomberos”, una función de corrección que depende del horario de la emergencia, la zona de Bomberos que se está atendiendo y la distancia total recorrida por el carro elegido para asistir.

Por otra parte, se estudia el sistema de zonas que utiliza el Cuerpo de Bomberos de Santiago para sus despachos y se logra comprobar que esto le resta eficiencia y flexibilidad a su despacho. El sistema vigente no considera variaciones a través del día, lo que se comprobó es un factor importante al momento de definir el orden de despacho. Además, la gran mayoría de las zonas presentan diferentes “sub-zonas” de atención, lo que es muy alto en los sectores de alta concentración de compañías.

Adicionalmente, se estudia como se comportan los sistemas (actual y el propuesto) ante estándares internacionales (90 % de los despachos por debajo de 5 minutos). El primero de ellos tiene sólo un cumplimiento del 56.6 % y el segundo eleva este cumplimiento hasta el 68.45 %. Factores como la re-ubicación de ciertas compañías permitirían elevar dicho estándar hasta un nivel mayor.

*A mi madre, sin ella nada sería posible*

# Agradecimientos

Primero, agradezco al profesor Fernando Ordoñez por su apoyo y consejo en todo el proceso de esta tesis, fue fundamental para poder desarrollarla. Además, para el Profesor Daniel Espinoza que sin su apoyo durante el desarrollo del proyecto tanto programando el código del algoritmo Dijkstra así como con su amistad, nada de este trabajo podría haber sido desarrollado. En gran parte, por el apoyo de ustedes dos puedo decir que estoy a un paso de ser ingeniero, gracias por todo lo que me han enseñado en estos años.

Segundo, gran parte de este trabajo de tesis es resultado del proyecto que se realizó para el Cuerpo de Bomberos de Santiago, en el cual formaron parte Renaud Chicoisne y Francisco Muñoz. Sin sus enormes esfuerzos, trabajo profesional, horas de programación y constantes juntas para trabajar, habría tomado mucho más tiempo completar este trabajo.

Además, agradezco el enorme apoyo de mi familia; a mi papá Ricardo por todas las conversaciones y consejos que me ha dado durante este año, a mi hermano Alex por su energía, su rebeldía y su fuerza para enfrentar la vida, a mi hermana Nathalie por su ternura, su compañía, por su incondicional simpatía. Sin ellos este trabajo no tendría sentido de existir.

Además, agradezco a mis amigos, principalmente a Rodrigo Dueñas, por todas las veces que nos juntamos a trabajar y compartir ideas, así como también a Alonso Olate y Javier Zapata, por las conversaciones, ñoñerías y motivación para seguir.

Finalmente, quiero agradecer a mi mamá, Yolanda del Carmen Solis Olivares, por haber sido la persona más increíble que he conocido y que sin su visión, energía, felicidad e incansables consejos jamás habría decidido estudiar ni podría haber terminado esta hermosa carrera, te tengo en mi corazón cada día de mi vida.

Álvaro Echeverría Solís.



# Tabla de contenido

<b>Resumen</b>	<b>I</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>III</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. Definición del Problema . . . . .	5
1.3. Objetivos . . . . .	6
1.3.1. Objetivo General . . . . .	6
1.3.2. Objetivos Específicos . . . . .	6
1.4. Hipótesis . . . . .	6
1.5. Alcances . . . . .	7
1.6. Estructura de la tesis . . . . .	7
<b>2. Marco Conceptual</b>	<b>8</b>
2.1. Formulación genérica del problema de caminos mínimos . . . . .	11
2.1.1. Métodos de resolución . . . . .	12
2.2. Trabajos Relacionados . . . . .	16
2.2.1. Problemas de redes aplicados a emergencias y rutas reales . . . . .	17
2.2.2. Validación de sistemas de despacho y ubicación de compañías . . . . .	18
<b>3. Desarrollo del modelo de caminos mínimos</b>	<b>21</b>
3.1. Construcción grafo de Santiago . . . . .	21
3.1.1. Cartografía estudiada . . . . .	21
3.1.2. Construcción de arcos . . . . .	23
3.1.3. Construcción de nodos . . . . .	25
3.1.4. Obtención de información adicional de las calles . . . . .	26
3.1.5. Construcción de arcos prohibidos . . . . .	26
3.1.6. Transformación de información a sistema de coordenadas geográficas . . . . .	27

3.1.7.	Ubicación de las compañías de Bomberos . . . . .	28
3.1.8.	Definir nodos dentro de la zona del área de CBS . . . . .	28
3.2.	Velocidades en el grafo de Santiago . . . . .	29
3.2.1.	Datos utilizados . . . . .	30
3.2.2.	Heurística de proyección . . . . .	30
3.2.3.	Complejidad de la heurística de proyecciones . . . . .	34
3.2.4.	Problemas conocidos en la heurística . . . . .	35
3.2.5.	Algoritmo de extrapolación . . . . .	36
3.2.6.	Perfiles de velocidades resultantes . . . . .	38
3.3.	Implementación del algoritmo de caminos mínimos . . . . .	41
3.4.	Creación de Prototipo para visualización . . . . .	42
3.5.	Sistema de edición del grafo . . . . .	44
3.6.	Manuales de uso y documentación del sistema . . . . .	45
<b>4.</b>	<b>Análisis de los tiempos de respuesta</b>	<b>46</b>
4.1.	Tiempos de respuesta en el sistema actual . . . . .	46
4.1.1.	Datos históricos . . . . .	46
4.1.2.	Análisis preliminares . . . . .	49
4.2.	Validación del sistema de despacho propuesto . . . . .	55
4.2.1.	Evaluación del Factor Bomberos . . . . .	55
4.2.2.	Diferencia en orden de despacho entre despacho actual y Dijkstra . . . . .	63
4.2.3.	Diferencia en tiempo entre despacho actual y Dijkstra . . . . .	68
4.3.	Análisis desempeño de zonas en sistema propuesto . . . . .	71
<b>5.</b>	<b>Conclusiones y trabajos futuros</b>	<b>75</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>77</b>
	<b>Anexos</b>	<b>80</b>
A .	Estructura de los archivos de la cartografía de Santiago . . . . .	80
B .	Medición ejes viales UOCT . . . . .	80
C .	Tipos de emergencias y sus claves radiales en CBS . . . . .	81
D .	Código para obtener puntos de un conjunto de polilíneas en ArcGis 10.0 . . . . .	81
E .	Tipo de compañía . . . . .	83
F .	Pauta de Despacho de Bomberos - Parte 1- . . . . .	84
G .	Pauta de Despacho de Bomberos - Parte 2- . . . . .	85
H .	Distribución emergencias Bomberos de Santiago . . . . .	86

# Índice de figuras

1.1. Ubicación compañías de CBS en Región Metropolitana . . . . .	1
1.2. Zonas correspondientes a la antigua Pauta de Cuarteles . . . . .	2
1.3. Zonas correspondientes al sistema Halcón . . . . .	3
1.4. Zonas correspondientes al nuevo sistema . . . . .	4
1.5. Límites de las zonas del sistema actual . . . . .	5
2.1. Ejemplo de Binary Heap . . . . .	15
3.1. Visión general del mapa de Publiguías en ArcGis 10.0 . . . . .	22
3.2. Información de la cartografía estudiada. . . . .	23
3.3. Alameda representada por 2 polilíneas de sentidos opuestos. . . . .	25
3.4. Av. Salvador representada por una polilínea. . . . .	25
3.5. Límites de las zonas del Cuerpo de Bomberos de Santiago . . . . .	28
3.6. Camino recorrido por bus J06. . . . .	31
3.7. Velocidades y recorridos de los buses . . . . .	32
3.8. Primera etapa del algoritmo de proyección . . . . .	33
3.9. Subgrafo identificado y arcos con velocidad . . . . .	33
3.10. Primer problema conocido del algoritmo . . . . .	35
3.11. Segundo problema conocido del algoritmo . . . . .	36
3.12. Perfiles de velocidades por defecto usados en extrapolación. . . . .	37
3.13. Información de Transantiago a diferentes horas . . . . .	38
3.14. Perfil de velocidad en un tramo de Alameda . . . . .	39
3.15. Perfil de velocidades a lo largo de San Antonio en cada uno de los 48 períodos. . . . .	40
3.16. Perfil de velocidades a lo largo de San Antonio, visión 3D. . . . .	40
3.17. Interfaz de visualización de soluciones de caminos mínimos . . . . .	43
3.18. Interfaz de edición del grafo . . . . .	44
3.19. Proceso para arreglar el grafo . . . . .	44

4.1. Base de datos con despachos históricos de CBS . . . . .	47
4.2. Base de datos depurada con geo-referencias . . . . .	48
4.3. Distribución emergencias CBS durante 2010 y 2011 . . . . .	49
4.4. Tiempo de respuesta según horario del día. . . . .	50
4.5. Histograma para los tiempos de respuesta de la primera máquina para los tipos de emergencia en estudio. . . . .	51
4.6. Distribución acumulada de los tiempos de respuesta de la primera máquina para los tipos de emergencia en estudio. . . . .	52
4.7. Cumplimiento estándar NFPA 1710 a través del área de Bomberos. . . . .	53
4.8. Distribución de emergencias según distancia . . . . .	54
4.9. Distribución de emergencias según distancia y compañía despachada . . . . .	55
4.10. Tiempo de traslado por media hora del día . . . . .	56
4.11. Diferencia porcentual entre despacho Dijkstra y real . . . . .	57
4.12. Distribución de las zonas de CBS en la región . . . . .	57
4.13. Diferencia porcentual versus distancia recorrida . . . . .	59
4.14. Variables del modelo lineal del tiempo Dijkstra . . . . .	61
4.15. Tiempo de traslado por media hora del día . . . . .	61
4.16. Cambio en despacho Dijkstra después de corrección de tiempos CBS . . . . .	62
4.17. Variación despacho debido a corrección de tiempos Dijkstra. . . . .	63
4.18. Distribución espacial de diferencia en despacho . . . . .	64
4.19. Diferencia porcentual a nivel general . . . . .	64
4.20. Diferencia por zona en despacho entre modelos . . . . .	65
4.21. Diferencia en despacho . . . . .	67
4.22. Diferencias en el despacho de 10-0 . . . . .	68
4.23. Ahorro en tiempo a través de la red . . . . .	68
4.24. Ahorro promedio alcanzado por horario representativo . . . . .	69
4.25. Ahorro alcanzado en los puntos de la red analizado por macro-zonas . . . . .	70
4.26. Cumplimiento de estándar NFPA 1710 con nuevo modelo de despacho . . . . .	70
4.27. Diferencia en despacho en zona 719 . . . . .	72
4.28. Diferencia en despacho zona 601 a través del día . . . . .	74
5.1. Archivos cartográficos . . . . .	80
5.2. Medición ejes viales realizado por UOCT . . . . .	80
5.3. Pauta de despacho de CBS para su región de cobertura, parte 1 . . . . .	84

5.4. Pauta de despacho de CBS para su región de cobertura, parte 2 . . . . .	85
5.5. Distribución del tiempo de respuesta de la primera máquina en acudir a la emergencia	86

# Índice de Tablas

3.1. Ejemplo archivo de nodos con la zona correspondiente . . . . .	29
4.1. Promedios, en minutos, por tipo de emergencia con datos históricos . . . . .	50
4.2. Porcentaje de primeras respuesta bajo 5 minutos . . . . .	51
4.3. Funciones de distribución contrastadas y sus errores cuadráticos asociados . . . . .	53
4.4. Diferencia entre Dijkstra y emergencias reales por macro-zona . . . . .	58
4.5. Diferencia entre Dijkstra y tiempo CBS por compañía despachada . . . . .	59
4.6. Las 20 primeras zonas de mayor diferencia, independiente del horario, entre Dijkstra y CBS . . . . .	66
4.7. Diferencia porcentual de cómo distribuye la diferencia de despacho . . . . .	66
4.8. Distribución en la zona de CBS del cumplimiento del estándar NFPA 1710 . . . . .	71
4.9. Conjunto de zonas con mayor y menor variación de subzonas internas a través del día. . . . .	73
5.1. Tipo al que pertenece cada compañía de CBS. . . . .	83

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación

Cuerpo de Bomberos de Santiago (de ahora en adelante, CBS) atiende a nueve comunas de la capital [10], siendo el más grande Cuerpo de Bomberos de la Región Metropolitana. Durante los años 2010 y 2011, el promedio anual de llamadas de emergencia recibidas correspondió a 5005 (estadísticas internas), las que asociadas al gran terreno que abarca su jurisdicción, CBS pasa a ser uno de los Departamentos de Bomberos más grandes del país, depositando en sus manos gran cantidad de vidas humanas.

Para poder atender los llamados que diariamente recibe, CBS cuenta con 22 compañías distribuidas a través de la región, tal y como se aprecia en la figura 1.1. La distribución de éstas obedece a factores históricos, políticos, socioculturales y no necesariamente a elementos de eficiencia. Por lo anterior, y en conjunto con el crecimiento en su área de cobertura, CBS ha tenido que comenzar a pensar en la optimización como un factor crítico en su sistema de despacho.

En virtud de lo anterior, CBS ha implementado diferentes sistemas para mejorar el método de

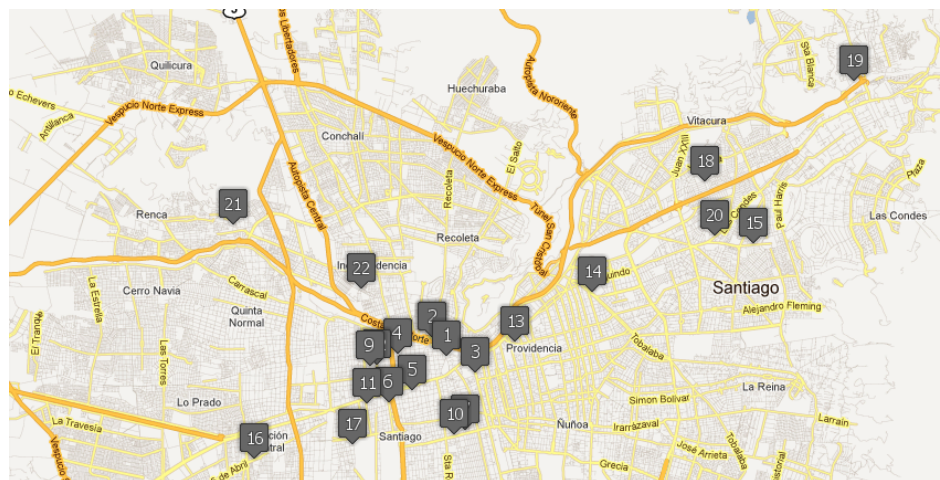


Figura 1.1: Ubicación compañías de CBS en Región Metropolitana

despacho a través de los años. Dichos esfuerzos se pueden resumir en lo siguiente:

- **Sistema histórico:** Data de 1867 y a través de los años se fue ajustando a las necesidades crecientes de CBS. En este sistema, la asistencia a incendios es elegida por la “Pauta de Cuarteles” construida por el Comandante del Cuerpo Ramón Abásolo, el cual buscaba crear un sistema de Incendios y Cuarteles más homogéneo. En este, existe una asignación fija de material a ciertos sectores preestablecidos con lo que, para su época, buscaba distribuir de buena forma los recursos existentes en CBS. Casi la totalidad del trabajo para este tipo de ruteo era manual, exigiendo a la operadora de turno estar atenta a registrar la llamada, obtener la dirección, revisar esta información en un mapa para posteriormente verificar la “Pauta de Cuarteles”, con la cual podía decir que compañía y carros estaban disponibles para así avisarle a la más cercana a la emergencia. Esta “Pauta de Cuarteles” definía un conjunto

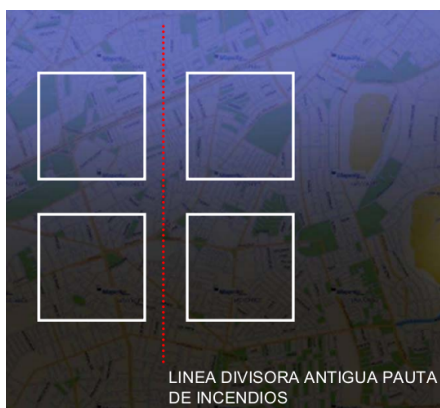


Figura 1.2: Zonas correspondientes a la antigua Pauta de Cuarteles

de zonas dentro de la ciudad, y cada una de éstas era asignada a alguna compañía del Cuerpo dependiendo de su ubicación y el tipo de emergencia. Los límites de estas zonas se definían por las calles, dejando veredas de una misma calle en diferentes zonas, tal y como se muestra en la figura 1.2.

- **Plan Halcón (Host de Alarmas y Control):** Este sistema fue creado por Mapcity durante el año 2003 y significó un gran avance en términos tecnológicos para CBS, ya que permitió incorporar elementos computacionales a la forma en la cual los despachos eran realizados con respecto al sistema histórico. Cada vez que ingresaba un nuevo llamado a la central de operadores en CBS, aparecía en la pantalla del sistema el número telefónico desde donde se estaba alertando por lo que ya no se necesitaba reconfirmar de donde venía dicho número y en virtud de esto se desplegaba el mapa a los alrededores del siniestro. Posteriormente, las operadoras confirman la dirección de la emergencia así como el tipo de la misma, con lo que al ingresar



dichos datos al sistema se obtenía en pocos segundos [24] la ubicación geográfica y la compañía que debía asistir a la emergencia según criterios de cercanía y disponibilidad. Dicho punto de cercanía estaba, al igual que en el antiguo sistema, definido por zonas. Los límites de estas nuevas zonas ahora evitan usar calles para hacer la separación como se aprecian en la figura 1.3. Esta nueva definición buscaba evitar el problema de ambigüedad de los límites que ocurría en el sistema histórico, ya que anteriormente al estar divididas en el sentido de las calles, no se sabía bien a quién correspondía la calle limítrofe.

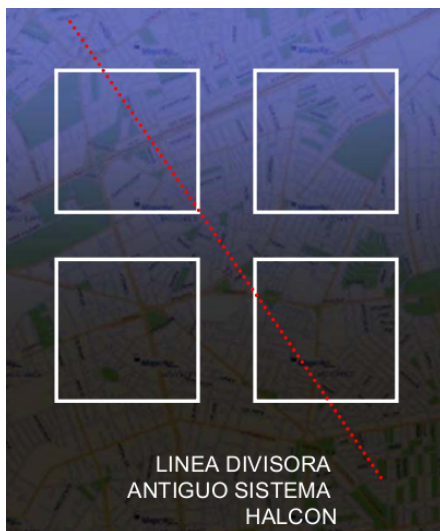


Figura 1.3: Zonas correspondientes al sistema Halcón

De esta forma, se tiene preestablecido a qué zonas y según qué tipo de llamado tenía que atender cada compañía, por lo que el sistema Halcón se limitaba a asignar según esta nueva pauta de despacho. Algo interesante de este nuevo modelo es que incorporó mapas digitales de Santiago, así como también la distribución geoespacial de los grifos, colegios, hospitales y otros puntos de interés en la ciudad lo que permite a los bomberos entender de mejor forma el entorno a una emergencia.

La idea de este sistema era ser utilizado para todo tipo de despacho en CBS pero finalmente fue utilizado sólo para aquellos llamados de servicio que no correspondían a incendios. Por su parte, se siguió utilizando la antigua Pauta de Cuarteles para despachar todos aquellos llamados que corresponden a incendios.

- **Sistema Integrado de Despachos:** Dado los importantes pasos con el sistema Halcón, incorporando elementos tecnológicos, el Sistema de despacho de CBS avanzó sustancialmente. El problema que se les presentó fue que Halcón funcionaba en paralelo a la antigua Pauta de Cuarteles por lo que en diferentes momentos existía constante duplicidad de material y no

existía claridad sobre las dotaciones disponibles [9]. Ante esto, en junio de 2005 decidieron dar un paso hacia un nuevo sistema que pudiese subsanar los problemas existentes. De esta manera, tomaron lo que ellos encontraban rescatable de cada sistema y lo integraron en un sistema consolidado. Así, la jurisdicción del área de Bomberos se subdividió en cerca de 200 áreas. Estas áreas son de diferentes dimensiones, dependiendo de su ubicación geográfica, densidad, sentido del tránsito y ubicación de los cuarteles. Un ejemplo de éstas se puede apreciar en la figura 1.4

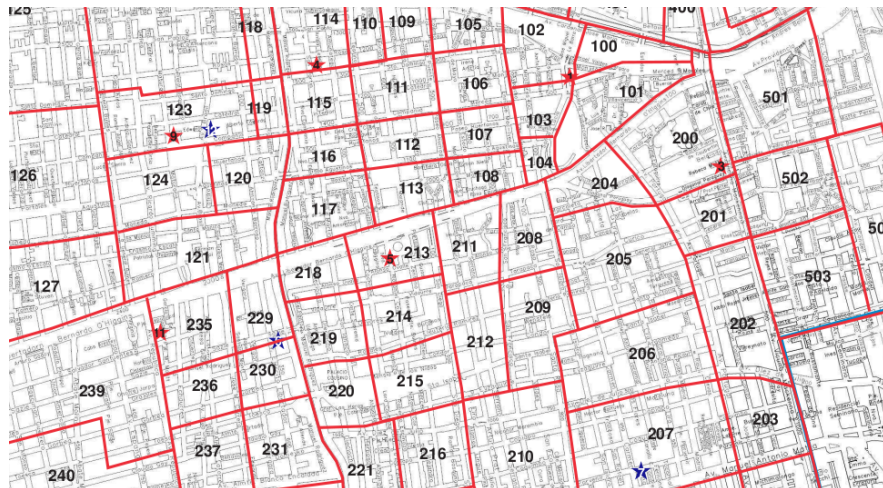


Figura 1.4: Zonas correspondientes al nuevo sistema

Los límites de dichas áreas pasan por sobre las manzanas. Esto quiere decir que no existirían límites sobre las calles ni esquinas, en un nuevo intento por reducir ambigüedades presentes en los 2 sistemas anteriores. De este modo se aprecia en la figura 1.5, una intersección de calles comprendida por 4 esquinas estará contenida completamente en una sola área de despacho. De todas formas, el orden de despacho, al igual que en los 2 sistemas anteriores, depende de la zona en la que ocurre la emergencia, donde dicho orden es calculado en base a distancias euclidianas de cada compañía hasta la emergencia sin tomar en consideración la ruta para llegar a dicho punto.

En conjunto con el diseño de estas zonas de cobertura, se desarrolló un software diseñado por la empresa Geo. Info. para darle soporte al sistema de despacho el cual permite de forma gráfica, definir las compañías que están operativas, los carros a ser despachados dependiendo de la zona y el tipo de incendio así como otros elementos informativos necesarios para el funcionamiento del modelo.

En este contexto es cuando comienza el trabajo de este proyecto; ya que han pasado 7 años desde la puesta en marcha del actual sistema de despacho y existen diversos cuestionamientos sobre



Figura 1.5: Límites de las zonas del sistema actual

cómo están definidas las zonas de cobertura, ya que no existe claridad si su diseño responde a las necesidades actuales de CBS, principalmente a su objetivo: *Minimizar el tiempo para llegar a una emergencia*. De esta forma, se requiere evaluar y diseñar un sistema de despacho basado en criterios netamente de optimización que incorpore elementos de velocidades en las calles y reversibilidad de las mismas. Además, es vital para su puesta en marcha y aceptación al interior de CBS que se pueda contrastar la situación de despachos actuales contra este nuevo sistema, mostrando sus mejoras potenciales, áreas críticas de cobertura y potenciales mejoras en la distribución, todo lo cual lleve a mejorar la eficiencia en como CBS atiende los llamados de emergencia que existen en su zona de cobertura.

## 1.2. Definición del Problema

En virtud de lo planteado en la motivación, el problema que busca resolver el Cuerpo de Bomberos de Santiago es identificar cuales son los tiempos de respuesta ante una emergencia en su zona de cobertura, en virtud de lo cual pueda definir el orden de despacho ante los diferentes llamados de emergencia que atiende. De esta manera, se tendrá:

1. **Nodos:** Donde pueden ocurrir emergencias en la red. Estos nodos son esquinas, quiebres de calles o extremos de las mismas.
2. **Arcos:** Cada arco representa un sentido de un eje vial. Estos pueden diferenciarse en avenidas, carreteras, calles, caminos, rotondas y paseos peatonales.
3. **Pesos de los arcos:** Tiempo en recorrer un arco, el que se obtiene desde velocidades por defecto e incorporando información de Transantiago.

4. **Compañías de Bomberos:** Estas, como se ha comentado, están distribuidas por Santiago y corresponde a 22.

Con los elementos anteriores, se busca para cada emergencia el camino mínimo que permita atenderla desde cada una de las 22 compañías que conforman CBS. Dicho camino minimiza el tiempo total de cada compañía hasta la emergencia incorporando criterios por el horario de la emergencia y reversibilidad de las calles, dejando de lado el sistema de zonas actualmente en uso en el sistema de despacho de CBS.

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo General**

Desarrollar y validar un modelo de despachos para el Cuerpo de Bomberos de Santiago que permita encontrar qué compañías pueden atender las diferentes emergencias del Cuerpo minimizando el tiempo de traslado.

### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- Construir un grafo dirigido y conexo de la Región Metropolitana.
- Obtener velocidades en las calles de Santiago para estimar tiempos de viaje.
- Programar el algoritmo elegido de caminos mínimos para el sistema de despachos.
- Desarrollar un prototipo para validar los caminos mínimos seguidos al atender una emergencia.
- Desarrollar una metodología de validación del sistema de despacho.
- Definir métricas de desempeño del sistema de despacho.
- Identificar zonas críticas de atención dentro del sistema.
- Estudiar cómo se desempeñan las compañías actuales para atender las emergencias que existen en la zona de CBS.

## **1.4. Hipótesis**

Dada la forma en que despacha CBS, se plantea que el sistema de zonas del modelo actual es ineficiente y no permite llegar de forma óptima a las emergencias que se presentan a diario. Por lo mismo, se considera que un sistema de despacho basado en los caminos mínimos dentro del grafo de la Región Metropolitana entregará siempre mejores resultados.

Además, la distribución de las compañías en la zona de CBS no es la óptima y que conlleva ineficiencia en el despacho y en el nivel de protección para su perímetro de atención.

## **1.5. Alcances**

Dentro de los alcances del proyecto se encuentra la forma en que se estima la velocidad en las calles de Santiago. Los datos utilizados son de las velocidades de Transantiago para el mes de Marzo de 2009. Además, para todas las calles que no cuentan con dicha estimación de velocidad, se considera razonable la aproximación dada por la combinación convexa entre la velocidad promedio para el tipo de calle y las calles similares que se encuentren cerca.

Otro punto relevante es la construcción del grafo y sus posibles errores. La cartografía del mismo fue una compra de CBS a una empresa externa, en base a lo cual se construyó un grafo conexo de la Región Metropolitana. Por lo mismo, existen algunos errores a lo largo de la región que pueden distorsionar en alguna medida los resultados. Las constantes mejoras realizadas durante el trabajo de tesis y del proyecto mismo, así como las capacitaciones para mejorar dicho grafo que fueron realizadas al personal de CBS permitirá, en un tiempo, eliminar estos errores potenciales y mantener el grafo actualizado con los cambios que ocurren en la ciudad.

No se encuentra dentro de los objetivos del proyecto de Tesis el definir los caminos mínimos tomando consideraciones más estocásticas en el tiempo de recorrer los arcos, sino que considerar que dicho arco tiene una velocidad promedio fija por intervalos en el día. El cálculo estadístico de esto y el desarrollo de modelos que incorporen dicha incertidumbre es parte fundamental del desarrollo en el contexto del proyecto Fondef “Tecnologías Avanzadas para las Ciudades del Futuro”, del que esta tesis forma parte.

## **1.6. Estructura de la tesis**

El resto de esta tesis se estructura de la siguiente manera; en el capítulo 2 se comenta sobre los diferentes modelos existentes para despacho de emergencia tanto a nivel general como para el caso de Bomberos. En el capítulo 3 se plantea el modelo de despachos desarrollado así como la estructura de datos que permitieron generar los resultados que este modelo entrega. El capítulo 4 se enfoca en analizar los resultados del modelo así como de la validación desarrollada. Por último, el capítulo 5 se orienta en las conclusiones y visiones de trabajos futuros en virtud de la problemática de CBS.

## Capítulo 2

# Marco Conceptual

El problema descrito en este trabajo de tesis pertenece a un problema de Flujo en Redes. Esta familia de problemas ha sido extensamente estudiada a lo largo de los años y por diferentes campos de conocimiento; pasando por las matemáticas, ciencias de la computación, electricidad y gestión de operaciones, por nombrar algunas. Por lo mismo, la literatura en torno a estos problemas es abundante y sus aplicaciones son utilizadas de muy diversas formas.

Según Ahuja [1], los problemas de flujo en redes se pueden catalogar de diversas formas, pero uno de los problemas fundamentales en que se centrará esta tesis es el **problema de flujo a costo mínimo**. Este problema es simple de explicar (aunque no siempre fácil de resolver): “*Se desea determinar el mínimo costo de transporte de un commodity a través de una red para satisfacer la demanda de ciertos nodos desde los nodos de oferta existentes en la red*”.

Matemáticamente, se tiene  $G = (N, A)$  una red dirigida definida por  $N$  nodos y  $A$  arcos dirigidos. Cada arco  $(i, j) \in A$  tiene asociado un *costo*  $c_{ij}$  que corresponde al costo por unidad de flujo en el arco  $i$  hasta  $j$ . Se puede asumir que este costo varía linealmente con el aumento de flujo. También, se asocia a cada arco  $(i, j) \in A$  una *capacidad*  $u_{ij}$  que denota el máximo flujo que puede transportar el arco y se tiene un *límite inferior*  $l_{ij}$  que denota el mínimo flujo que debe llevar el arco. Además, se asocia a cada nodo  $i \in N$  un número entero  $b(i)$  que denota su oferta/demanda. Si  $b(i) > 0$  se denota como un *nodo de oferta*; si  $b(i) < 0$  es un *nodo de demanda* con una demanda de  $-b(i)$ ; y si  $b(i) = 0$ , es un *nodo de transición*. La variable de decisión en un problema de flujo a costo mínimo representa si es que se utiliza el arco para traspasar flujo a través de él, denotado como  $x_{ij}$ . De todo lo anterior, su formulación es:

$$\begin{aligned}
& \text{minimizar} && \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} x_{ij} \\
& \text{s.a.} && \sum_{j:(i,j) \in A} x_{ij} - \sum_{j:(j,i) \in A} x_{ji} = b(i) \quad \forall i \in N \\
& && l_{ij} \leq x_{ij} \leq u_{ij} \quad \forall (i,j) \in A,
\end{aligned} \tag{2.1}$$

Tomando esta formulación base se pueden hacer diferentes variaciones, de las que resultan problemas clásicos como:

1. **Problemas de camino más corto** : Es uno de los más simple y más utilizados de los problemas de flujo en redes. Básicamente se busca encontrar el camino de costo mínimo entre una fuente  $s$  y un sumidero  $t$ , donde cada arco  $(i, j)$  tiene asociado un costo  $c_{ij}$ . Este costo en muchos casos se define como el largo de arco  $(i, j)$  o el tiempo que cuesta recorrer dicho arco. Este problema en específico es el que se basa el trabajo de tesis, por lo que en la sección 2.1 se detallará más en profundidad.
2. **Problemas de circulación**: Este tipo de problemas es un problema de flujo a costo mínimo sólo con nodos de transición, o sea  $b(i) = 0 \quad \forall i \in N$ . De esta manera se quiere encontrar el mínimo flujo que puede pasar por la red que satisfaga los límites de cada uno de los arcos  $(i, j)$ , además como en ningún nodo ingresa o sale flujo de la red, simplemente se limita a analizar el flujo circulante. Ejemplos de esto se puede apreciar en [28].
3. **Problema de flujo máximo**: En este tipo de problemas, se busca una solución factible que permita enviar el máximo flujo a través de la red (desde una fuente  $s$  hasta un sumidero  $t$ ) cumpliendo las restricciones de capacidad de cada uno de los arcos  $(i, j)$ . De esta forma, para plantear el problema como uno de flujo a cotos mínimo, se define:  $b(i) = 0 \quad \forall i \in N$ ,  $c_{ij} = 0 \quad \forall (i, j) \in A$ , y se agrega un arco adicional entre  $(t, s)$  con costo  $c_{ts} = -1$  y un límite de flujo  $u_{ts} = \infty$ . De esta forma, se maximiza el flujo por el arco  $(t, s)$  y dado que el flujo de este arco está condicionado al flujo que se realiza en el camino que une a  $(s, t)$  se puede concluir que el problema de flujo a costo mínimo entrega una solución para el problema original de flujo máximo. El problema ha sido estudiado en profundidad en diversas publicaciones, siendo una de ellas en [15] con el desarrollo algoritmos de resolución ampliamente utilizados como es Ford-Fulkerson [16].
4. **Problemas de asignación**: En este problema existen 2 conjuntos,  $N_1$  y  $N_2$ , ambos con la misma cardinalidad ( $|N_1|=|N_2|$ ) de los cuales una colección  $A \subset N_1 \times N_2$  representan el

conjunto de posibles asignaciones, y un costo  $c_{ij}$  asociado a cada elemento  $(i, j) \in A$ . De esta forma, se quiere asociar cada elemento de  $N_1$  a cada elemento de  $N_2$  a mínimo costo.

5. **Problemas de transporte:** Es un caso especial de flujo a costo mínimo en el cual el conjunto  $N$  es dividido en 2:  $N_1$  y  $N_2$  (no necesariamente la misma cardinalidad), de esta forma se denomina a los elementos de  $N_1$  como nodos de oferta y a los elementos de  $N_2$  como de demanda y existen arcos  $(i, j)$  tales que  $i \in N_1$  y  $j \in N_2$ . De esta forma se busca ir desde los elementos de  $N_1$  hacia los de  $N_2$  satisfaciendo las particularidades del problema planteado. Este problema fue formalizado en una de sus versiones por el matemático Gaspard Monge en [23].
6. **Problema de flujo a costo convexo:** En este tipo de problema no se asume que el costo de un arco varía linealmente con la cantidad de flujo que circula por él. Así, en este tipo de problemas el costo de un arco es una función convexa de la cantidad de flujo que pasa por el mismo. Referencias de su utilización se pueden encontrar en [17].
7. **Problema generalizado de flujo:** En la versión de flujo a costo mínimo existe el principio de conservación (todo el flujo que pasa por un arco, sale del arco). En su versión generalizada un arco puede consumir o generar flujo. De esta manera, si  $x_{ij}$  es el flujo que pasa por el arco  $(i, j)$ , lo que llega al nodo  $j$  es  $\mu_{ij}x_{ij}$ , donde  $\mu_{ij}$  es el multiplicador positivo asociado al arco. Si es que  $0 < \mu_{ij} < 1$  se dice que el arco es de pérdida, por su parte si  $1 < \mu_{ij} < \infty$  se considera un arco de ganancia.
8. **Problema de flujo de multicommodity:** El problema de flujo a costo mínimo modela el envío de un único commodity a través de una red. En este nuevo tipo de problema se modela el flujo de variados commodities al mismo tiempo por la misma red. De esta forma, cada commodity tiene un distinto flujo por cada arco así como también puede tener un distinto origen-destino, de esta forma, el problema central del multicommodity es ver como balancear el flujo de cada commodity para poder satisfacer las restricciones de cada arco minimizando el costo total. Ejemplos de este tipo de problemas se pueden apreciar en [14] [18].

Como se comentaba antes, el caso particular del Cuerpo de Bomberos estudiado es una aplicación de un problema de camino más corto, por lo que en la sección 2.1 se profundizará en su formulación, métodos de resolución así como literatura relacionada con la validación y aplicaciones de este tipo de modelos.



## 2.1. Formulación genérica del problema de caminos mínimos

Tal y como se comentaba en la sección anterior, el problema de caminos mínimos es un tipo especial de problemas de flujo a costo mínimo altamente estudiado debido a su utilización en diversas situaciones ya que es común que se presente la necesidad de enviar flujo desde un nodo a todos los demás de la red. De esta forma, dicho problema se puede escribir como en la ecuación 2.2:

$$\begin{aligned}
 &\text{minimizar} && \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} x_{ij} \\
 &\text{s.a.} && \sum_{j:(i,j) \in A} x_{ij} - \sum_{j:(j,i) \in A} x_{ji} = \begin{cases} n-1 & i=s \\ -1 & i \in N-\{s\} \end{cases} \\
 &&& x_{ij} \geq 0 \quad \forall (i,j) \in A,
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

Tomando como base la formulación anterior, se pueden hacer ciertos supuestos sobre el grafo utilizado que en muchos casos llevan a un mejor comportamiento de los algoritmos existentes para la resolución. Entre los supuestos más comunes están los enunciados por [1] [8]:

- **Largo de arcos son enteros:** Es relevante para algunos algoritmos. De todas maneras, para aquellos algoritmos donde es importante generalmente se puede multiplicar el peso de los arcos por un número grande que permita que se logre expresar como un entero.
- **Existe un camino dirigido entre todo par de nodos del grafo:** En algunos de los problemas que se están estudiando exigen necesariamente este supuesto, el que se puede satisfacer siempre agregando arcos ficticios de un elevado costo desde el nodo  $i$  no conectado hasta el nodo  $s$  creando el camino dirigido.
- **No existen ciclos negativos dentro del grafo:** El problema de la existencia de ciclos negativos genera soluciones no acotadas ya que permite mandar una cantidad infinita de flujo a través de dicho ciclo. En el caso particular del problema de caminos mínimos, ante la existencia de ciclos negativos, este se vuelve sustancialmente más complejo de resolver.
- **Es una red dirigida:** Si es que la red es no dirigida y todos los arcos fueran de largo no-negativo, se podría transformar el problema en uno equivalente donde si se pudiera representar de forma de una red dirigida pero, si existen arcos de costo negativo, entonces dicha transformación no sería posible lo que llevaría nuevamente a que el problema fuese muy complejo de resolver.

Cada uno de estos supuestos puede o no ser adoptado para la resolución particular del problema de caminos mínimos estudiado, por lo mismo, los algoritmo de resolución elegidos (así como también

su comportamiento) se ajustará al escenario particular de aplicación. En el caso estudiado del Cuerpo de Santiago es razonable asumir que el largo de cada uno de los arcos será (o puede ser) aproximado por un valor entero. Además, es un supuesto válido el que no existirán ciclos de largo negativo en la red ya que el peso de cada uno es positivo, correspondiendo a la distancia (o el tiempo que cuesta recorrer) del segmento de calle en Santiago.

Entrando en mayor detalle en los problemas de caminos mínimos, de acuerdo a [8] estos pueden dividirse básicamente en 3 tipos:

1. Camino mínimo entre un único origen a todos los nodos de la red
2. Camino mínimo entre todos los orígenes un único destino dentro de la red.
3. Camino mínimo entre todos los nodos.

El caso que se estudia en este trabajo, corresponde al segundo tipo de problema, ya que desde diversos puntos de la ciudad las compañías deben atender a un único foco de emergencia por ejecución del algoritmo. Diferentes algoritmos se han planteado para la resolución de este problema, cada uno dependiendo del tipo específico que se esté planteando y las características intrínsecas de la red. Ejemplos de desarrollos clásicos para esto son las publicaciones de Bellman [3], quien plantea una resolución para el problema en un caso general donde pueden existir arcos de peso negativo. Otro ejemplo de resolución es la planteada por Dijkstra [11] en 1959, la que entrega uno de los algoritmos más desarrollados y ampliamente utilizados por la comunidad pero que utiliza fuertemente el supuesto de la no-negatividad de los arcos. La elección de uno u otros de los diversos métodos de resolución es materia que debe analizarse específicamente para el caso en que se desea aplicar y se debate en mayor profundidad en la próxima sección.

### 2.1.1. Métodos de resolución

Todos los métodos de resolución descritos a continuación tienen una estructura similar. En cada una de sus iteraciones mantienen y ajustan un vector  $(d_1, d_2, \dots, d_N)$  donde cada  $d_j$  es denominado como *la etiqueta del nodo  $j$*  y su valor puede ser entero ó  $\infty$ . El uso de dichas etiquetas sigue un simple criterio de optimalidad:

Sean  $d_1, d_2, \dots, d_N$  enteros que satisfacen:

$$d_j \leq d_i + c_{i,j} \forall (i, j) \in A \quad (2.3)$$

Y sea  $P$  un camino comenzando en el nodo  $i_1$  y terminando en  $i_k$ . Si

$$d_j = d_i + c_{i,j} \forall (i, j) \in P \quad (2.4)$$

Entonces,  $P$  es un camino mínimo desde  $i_1$  hasta  $i_k$

Las ecuaciones 2.3 y 2.4 son llamadas holgura complementaria y entregan condiciones de optimalidad para el problema estudiado.

En general todos los métodos a continuación descritos hacen lo siguiente: inician con un arreglo de etiquetas  $(d_1, d_2, \dots, d_N)$ , iterativamente se seleccionan arcos  $(i, j)$  que violen la holgura complementaria, o sea  $d_j > d_i + c_{i,j}$  y se actualiza su valor a  $d_j := d_i + c_{i,j}$ . Esto continúa hasta que la holgura complementaria se satisface para todos los arcos  $(i, j)$ .

En vez de elegir de forma arbitraria el arco  $(i, j)$  a analizar, los métodos acá descritos mantienen una lista  $V$  de nodos, la que denominan *lista de candidatos* y un arreglo de etiquetas  $(d_1, d_2, \dots, d_N)$  que puede ser un valor entero o infinito. Así, inicialmente se tiene:

$$V = \{1\},$$

$$d_1 = 0, d_i = \infty, \forall i \neq 1$$

En cada iteración se ingresan elementos a la lista de candidatos que incumplan la holgura complementaria y las iteraciones terminan cuando esta lista esté vacía.

De esta forma, Bersekas [4] plantea que los métodos para resolver este tipo de problemas, siguiendo las ideas antes expuesta, se pueden dividir en:

- **Métodos Label setting:** En este caso, el nodo  $i$  a ser removido de  $V$  es el de mínima etiqueta. En este tipo de métodos toma relevancia el supuesto que cada largo de arcos sea no negativo. Dentro de las propiedades más rescatables de este tipo de métodos es que cada nodo entrará a la lista  $V$  **sólo una vez**, de esta manera obtiene su etiqueta final la primera vez que sale de  $V$ .

Dentro de este tipo de métodos de resolución destaca el antes comentado Dijkstra, el que encuentra el camino más corto desde un nodo fuente  $s$  a todos los nodos en la red exigiendo que no existan arcos de peso negativo. Este algoritmo mantiene una etiqueta de distancias  $d(i)$  para cada nodo  $i$ , la cual es un límite superior para el largo del camino más corto del nodo  $i$ . En cada paso intermedio, el algoritmo mantiene los nodos divididos en 2 grupos: aquellos con *etiqueta permanente* y los con *etiqueta temporal*. La etiqueta permanente a un nodo representa el camino de mínimo costo desde la fuente a ese nodo.

De esta manera, el algoritmo Dijkstra en cada iteración remueve el nodo  $i$  desde la lista de candidatos  $V$  que en dicha iteración tenga mínima etiqueta  $d_i$ , lo que corresponde a:

$$d_i = \min_{j \in V} d_j$$

Inicialmente, se tiene que:  $V = \{1\}$ ,  $d_1 = 0$ ,  $d_i = \infty \forall i \neq 1$ . A partir de esto el método itera hasta que consigue que  $V$  quede vacío. La iteración típica es como sigue:

1. Remover desde la lista de candidatos  $V$  un nodo  $i$  que cumpla que:

$$d_i = \min_{j \in V} d_j$$

2. Por cada arco saliente  $(i, j) \in A$  con costo asociado  $c_{ij}$ , si  $d_j > d_i + c_{ij}$ , definir:

$$d_j := d_i + c_{ij}$$

3. Agrega  $j$  a  $V$  si es que no está aún.

Este método tiene diversas implementaciones siendo una de las más utilizadas la denominada *binary heap* la cual entrega una estructura de datos bastante útil para mejorar la velocidad del algoritmo. Visualmente esto se puede apreciar en la figura 2.1. La información está distribuida en un árbol binario balanceado en el cual la etiqueta de cada nodo de  $V$  no es mayor que la etiqueta de todos sus descendientes en  $V$ . El nodo más en lo alto del heap es el de mínimo costo en dicha iteración, el cual es eliminado en cada paso del algoritmo. Otros nodos inferiores actualizarán sus etiquetas y en esta implementación, esto implica que puedan ser relocalizados en el árbol así como también puede ocurrir que otros nodos ingresen al árbol por primera vez, siendo necesario localizarlos en la posición correcta.

En la versión original del algoritmo Dijkstra se tiene que la complejidad conocida es de  $O(|A| + |N| \log |N|)$  donde  $O(|A|)$  no puede ser evitado ya que es necesario recorrer al menos una vez todos los nodos  $i$  en  $A$  para confirmar la condición de optimalidad ( $d_j \leq d_i + c_{ij}$ ) y por su parte la operación de encontrar la etiqueta de mínimo coste se puede reducir en base a definir estructuras de datos adecuadas siendo generalmente de orden  $O(|N| \log |N|)$ . Existen mejoras a esto como se puede apreciar en [2] donde se comenta de mejoras en la complejidad que llevan a algoritmos de este tipo a  $O(|A| + |N| \sqrt{\log |C|})$  donde  $C = \max_{ij} c_{ij}$ .

Al implementar un *binary heap*, se debe tener en consideración que existen  $N$  ingresos de nodos y  $N$  extracciones de los mismos, por lo que el número de operaciones para mantener el

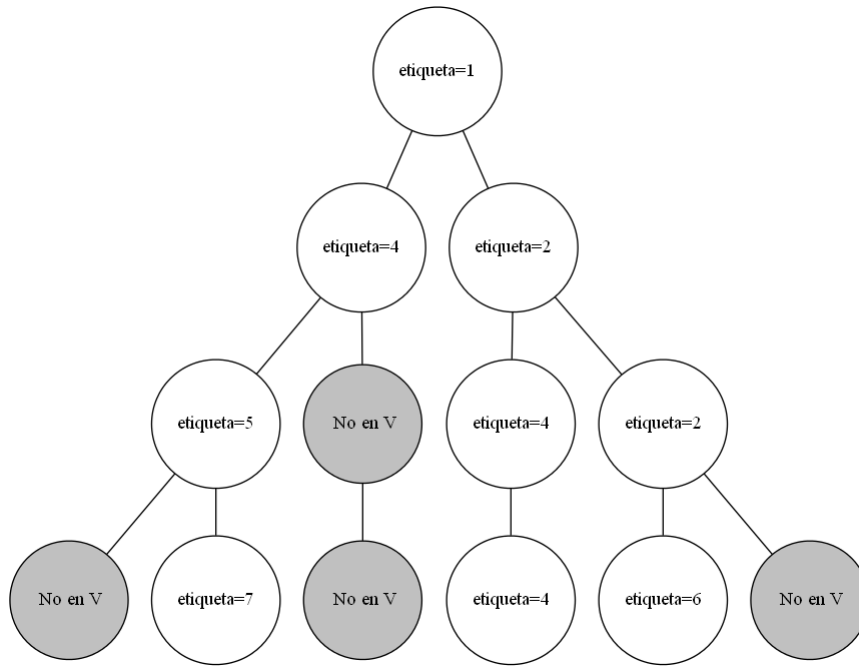


Figura 2.1: Ejemplo de Binary Heap

árbol es  $O((N + R)\log N)$  donde  $R$  es la cantidad de reposiciones necesarias. A lo más existe una reposición por arco, por lo que en  $R \leq A$  lo que lleva a que la cantidad de operaciones para mantener el árbol sea  $O(A\log N)$ . De todas maneras, en la práctica el número de elemento  $R$  es un pequeño múltiplo de  $N$  por lo que el tiempo de ejecución del algoritmo tiende en la realidad a  $O(|A| + |N|\log|N|)$ .

- **Métodos Label correcting:** En este tipo de métodos la forma de eliminar un elemento desde  $V$  es menos sofisticada que en Label setting pero por lo mismo, cada nodo puede entrar múltiples veces a la lista. Todos estos métodos implementan una cola para mantener los elementos de la lista  $V$  y difieren principalmente en como esta cola es implementada y en la posición de la cola en que los nodos son insertados. Dentro de estos destacan:

- **Método de Bellman-Ford:** Una de las versiones más simples de este tipo de métodos se basa en una actualización de las colas en la lista  $V$  de tipo FIFO. De esta forma, el nodo a ser removido es siempre el ubicado al inicio de la cola y cada nodo que ingresa a  $V$  lo realiza al final de dicha cola. Por lo tanto, este método va realizando ciclos de iteración, donde el primer ciclo sólo consiste en iterar sobre el nodo 1; y en cada nuevo ciclo, son removidos de la lista en el orden que fueron agregados. Así, el método es como se explica a continuación:

Por cada nodo  $i$  y  $k \geq 1$  entonces  $d_i^k$  es el camino más corto desde 1 hasta  $i$  usando rutas

que tienen  $k$  o menos arcos, donde  $d_i^k = \infty$  si no existe un camino de 1 a  $i$  con  $k$  o menos arcos. Entonces, la etiqueta  $d_i$  al final de la  $k$ -ésima iteración de Bellman-Ford es igual o menor a  $d_i^k$ . En el caso que todos los ciclos tengan largo no-negativo, el camino más corto de cada nodo puede ser alcanzado con una ruta que tenga  $N - 1$  arcos o menos, entonces Bellman-Ford implica que este método encontrará todos los caminos mínimos después de a lo más  $N - 1$  ciclos.

- **Algoritmo D’Esopo-Pape:** A diferencia del anterior, en este método los nodos son removidos desde la parte alta de la cola  $V$ . Cada nodo que ingresa en la cola es colocado al final de la misma si es que nunca había ingresado antes, sino es colocado al inicio.

La idea en este algoritmo es que, cuando un nodo  $i$  es removido desde la cola, su etiqueta afecta al subconjunto  $B_i$  de los nodos vecinos  $j$  con  $(i, j) \in A$ . Cuando la etiqueta de  $i$  cambia nuevamente, es probable que las etiquetas de los nodos en  $B_i$  tengan que ser actualizadas. De esta forma, hace sentido colocar dicho nodo al inicio de la cola para que los nodos en la vecindad tengan la oportunidad de actualizarse lo más pronto posible.

Si el largo de los arcos es no negativo, los métodos de tipo label setting ofrecen una mejor performance contra los de label correcting ya que el tiempo de ejecución en su peor caso es mejor. Por esto mismo y dado que este supuesto es aplicable a la realidad de CBS, se decidió utilizar dicho tipo de métodos. para resolver el problema planteado en este trabajo de tesis.

## 2.2. Trabajos Relacionados

Como se ha apreciado en los puntos anteriores, la literatura clásica con respecto a este tipo de problemas es abundante. Con las tendencias tecnológicas actuales se han implementados mejoras y diversas aplicaciones de los métodos antes comentados. Ejemplo de esto es la utilización de tecnologías GIS<sup>1</sup> que ha permitido la aplicación de este tipo de problemas en contextos reales con una muy buena precisión y entendiendo como se adaptan cada uno de los algoritmos al contexto real. Por otra parte, y al lidiar con datos reales, es necesario entender como adaptar estos de mejor forma al grafo que se generará y además, estudiar casos similares en sistemas de emergencias y entender como definir métricas adecuadas para medir el real impacto del modelo en la realidad de Bomberos.

De esta forma, esta sección se aborda básicamente desde 2 puntos de vista:

- Trabajos relacionados existentes con respecto al desarrollo de caminos mínimos en sistemas de emergencia.

---

<sup>1</sup>GIS: Sistema de Información Geográfica

- Validación de sistemas de despacho y ubicación de compañías de emergencias.

### 2.2.1. Problemas de redes aplicados a emergencias y rutas reales

Trabajos en esa línea se han desarrollado desde hace varios años. Entre estos se encuentran los que desarrolló la Corporación RAND en conjunto con el departamento de Bomberos de Nueva York a partir de 1971, generando una vasta literatura en esta área. Dentro de ellos, destacan trabajos como los de Walker [30] en 1975 donde postula diferentes criterios para la ubicación de compañías de bomberos en base a diferentes criterios de proximidad y de cobertura a la red basándose en los tiempos de respuesta dentro de la misma, aproximación que realizó en paralelo Kolesar [19] al encontrar que la distancia promedio de respuesta es inversamente proporcional a la raíz del tiempo promedio de respuesta a la emergencia. Esto se traduce en la ecuación

$$ED_i = k_i \sqrt{\frac{A}{n - \lambda ES}}$$

Donde  $A$  es el área de cobertura,  $k_i$  es la constante de proporcionalidad para la compañía  $i$  a determinar empíricamente,  $\lambda$  es el número esperado de llamadas de emergencia a recibir por hora y  $ES$  es el tiempo de servicio que gastará la compañía en llegar a la emergencia en cuestión. En base a esto, se diseñaron diversos análisis que apuntaban a entender la cobertura y los tiempos de respuesta dentro del estudio de RAND.

Trabajos más contemporáneos en relación a la integración de algoritmos de caminos más cortos utilizando técnicas GIS se pueden apreciar en [31], donde testearon 15 diferentes algoritmos en 20 redes de caminos a través de Estados Unidos. Toda esta información fue procesada y generaron un ranking basado en la performance de cada uno de los algoritmos. En particular, siguieron que para el problema de camino mínimo uno a todos, el que mejor se comportó fue “Pallottino’s graph growth algorithm implemented with two queue (TQQ)”. Por su parte, si el objetivo es obtener el camino más corto “uno a uno” ó “uno a algunos”, el algoritmo Dijkstra ofrece ventajas comparativas a los otros algoritmos al poder terminar su ejecución al encontrar los caminos más cortos al destino escogido. Las implementaciones que mejor se comportaron fueron Dijkstra’s Double Bucket y Dijkstra Heap Binary.

Por su parte, en el caso particular de sistemas de emergencia, problemas de caminos mínimos han sido utilizados en [29]. En este caso implementan algoritmos de caminos más cortos en el caso de ambulancias haciendo uso de técnicas GIS para tener un despacho en tiempo real en situaciones de emergencia. Por su parte, en [27] se diseñan heurísticas que permiten entender los caminos más cortos dentro de la ciudad ante situaciones de alta emergencia (cortes de caminos, inundaciones,

terremotos) y donde los tiempos de atención de servicios de bomberos, policía y ambulancias cobran extrema relevancia. Algunos de estos ruteos, toman en consideración el trabajo de Larson en [21] donde se toman consideraciones interesantes en su modelo de hipercubo para su caso de estudio (despacho policial). En este, se describen diferentes servidores que pueden tener 2 estados: Libre (0) u Ocupado (1). Basado en éstas consideraciones, el modelo de Hipercubo evalúa las variables de decisión relevantes a través de la región y los servidores para determinar cual servidor despachar a una emergencia tomando en cuenta su carga de trabajo, ubicación, tiempo de traslado y criterios de cobertura sobre la región.

Además, trabajos como los de [20] plantea interesantes análisis para el departamento de Bomberos de Nueva York al plantear un modelo y analizar el efecto de relocalizar las compañías dinámicamente a lo largo de una emergencia, detallando como realizar el despacho y bajo que criterios debería o no relocalizarse un carro dentro de la red de atención utilizada para así mantener un nivel de servicio dentro del área homogéneo y no perjudicar o poner en peligro algun área por despachar unidades hacia otra.

### 2.2.2. Validación de sistemas de despacho y ubicación de compañías

En proyectos de validación similares se encuentran desarrollos antiguos como el de 1974 por [26] quién desarrolló un trabajo en el que define diferentes factores para poder determinar cómo se constituía el *output* de una compañía de bomberos en base a los *inputs* que recibía. Dentro de los *outputs* se encuentran consideraciones de calidad y efectividad del servicio entregado a la comunidad, así como también la carga de trabajo que estaba sometido el sistema de protección de incendios. Por su parte, en 1977, se encuentra un trabajo similar de Schaenman [25] que en esta ocasión plantea de forma más precisa algunas métricas para medir la efectividad del proceso de atención de emergencias. Esto muestra que la inquietud de entender como se comporta el sistema de respuesta de incendios de una comunidad es constante y por lo mismo la búsqueda de los correctos indicadores ha sido exhaustiva.

En [22] se desarrolla una metodología para evaluar los tiempos de respuesta para el departamento de bomberos de North Lake Tahoe, Estados Unidos. En esta, identifican que su despacho está lejos de ser eficiente y sus principales problemas están dados por la falta de protocolos eficientes, así como también la ausencia de estudios anteriores con respecto a cómo despachaban. Dicha ausencia de métricas no les permitía entender la naturaleza del problema que estaban afrontando.

Un trabajo comparativo realizado por [6] realiza una tarea similar a la de este trabajo de tesis. En Midlan County, Michigan los despachos de sus sistemas de emergencia no están basados en modelos de caminos mínimos y además, esta basado en zonas como CBS. Concluye finalmente, que



el sistema de zonas está ilógicamente diseñado y no apoya al objetivo de responder en el menor tiempo posible a la emergencia. Además, argumenta que el uso de GIS es vital para salvar vida y recursos en este tipo de problemas.

Ante la diversidad de ciudades, objetivos y principalmente, tiempos de respuesta diversos en cada país, surge la necesidad de tener un estándar que permita tener como benchmark al momento de evaluar un sistema de despacho. De esta manera, diversos cuerpos de Bomberos alrededor del mundo se han contrastado en base a las normativas y directrices entregadas por la normativa NFPA 1710 de *National Fire Protection Association*<sup>2</sup>, las cuales han definido para diferentes tipos de emergencias un nivel de atención mínimo que muchas compañías de bomberos a nivel mundial han tendido a alcanzar. De esta manera, NFPA 1710 recomienda lo siguiente:

- Un minuto o menos para despachar carros después de recibir la llamada
- Que la primera unidad llegue en menos de 4 minutos el 90 % de todos los llamados recibidos.
- Que todas las compañías asignadas a un llamado de incendio estén en la emergencia en 8 o menos minutos, el 90 % de las veces.

Basados en este estándar, en el departamento de Bomberos de Miami se desarrolló un estudio para entender como ajustarse a dicho modelo [7] dentro de lo que determinando que los principales factores que afectan, en su caso, acercarse a dicho estándar, están dados por:

- **Alto tiempo de notificación de emergencia:** Es el tiempo que pasa desde que el afectado informa de la emergencia a los servicios centrales de Bomberos hasta que esto es informado al cuartel adecuado. Este tiempo es difícil de medir en el sistema de CBS pero se conoce empíricamente que puede ser alto en algunas ocasiones por el mal uso de las líneas de emergencia por parte de la comunidad de la capital. Sobre este punto poco se puede hacer dentro de este trabajo de tesis, pero según [13] es uno de los que más contribuye a la demora en la atención en todo sistema de emergencia.
- **Altos tiempos de *turnout time*:** Existe un problema de entrenamiento y de necesidad de procesos más eficientes para disminuir el tiempo para despachar un carro.
- **Ausencia de tecnologías GIS y de ruteo eficiente de sus despachos:** Data esto, no podían identificar la mejor forma de llegar a las emergencias. De igual forma, la ausencia de GPS en cada carro les restaba flexibilidad al momento de despachar.

---

<sup>2</sup>NFPA 170 (Organization and Deployment of Fire Suppression Operations, Emergency Medical Operations, and Special Operations to the Public by Career Fire De) :<http://www.nfpa.org/aboutthecodes/AboutTheCodes.asp?DocNum=1710>

Por su parte, en [5] se analiza el rendimiento del departamento de Bomberos de la ciudad de Greensboro en North Carolina en donde también toman en consideración el estándar de NFPA 1710 y en base a lo mismo, determinan que las ubicaciones de sus compañías resultan no ser las más adecuadas para el área de cobertura que tienen encargadas, lo que finalmente repercute en el bajo rendimiento de sus tiempos de respuesta.

Finalmente, y en relación a lo anterior, trabajos como los de [20] plantea interesantes análisis para el departamento de Bomberos de Nueva York al diseñar un modelo y analizar el efecto de relocalizar las compañías dinámicamente a lo largo de una emergencia, detallando como realizar el despacho y bajo qué criterios debería o no relocalizarse un carro dentro de la red de atención utilizada. Esto permite entender si las ubicaciones elegidas para las compañías son las correctas y cómo esto afecta al rendimiento de la red completa.

## Capítulo 3

# Desarrollo del modelo de caminos mínimos

### 3.1. Construcción grafo de Santiago

Para la construcción del grafo dirigido que fue utilizado intensivamente en este trabajo de tesis se tomó la cartografía suministrada por CBS que está en uso en su sistema actual de despacho. Este mapa de Santiago fue una donación al Cuerpo de Bomberos por parte de Publiguías con las calles actualizadas hasta 2008.

Dentro de los archivos proporcionados se encuentra la siguiente información:

- **Puntos de interés:** En esta serie de archivos están contenidos puntos como tranques, parques, canales, ríos, canchas, locales comerciales, etc.
- **Ejes viales:** En este archivo se tienen todas las calles de Santiago, con su sentido de tránsito, numeración, nombre de la calle, comuna de ubicación, largo de cada segmento de calle. En el punto 3.1.1 se explica en mayor detalle este apartado.
- **Ubicación compañías:** Posición geográfica de las compañías del cuerpo distribuidas en la Región Metropolitana.

En anexos A se aprecian todos los archivos que componen la cartografía de CBS más en detalle. En las siguientes secciones se profundizará en el archivo de Ejes viales, denominado “ejes viales.shp” en la cartografía, el que resulta fundamental para toda la construcción y desarrollo posterior del grafo de la Región Metropolitana.

#### 3.1.1. Cartografía estudiada

La cartografía proporcionada por CBS está compuesta de diferentes **polilíneas**, cada una de las cuales describe una autopista, avenida, calle, rotonda, camino, camino peatonal o pasaje. El

hecho de ser polilíneas es bastante beneficioso para los objetivos del proyecto ya que para una calle, al observarla entre 2 esquinas, no necesariamente es descrita por un único arco que une ambos puntos, sino que en muchos casos la cartografía representa todos los quiebres de camino tratando de representar fielmente la realidad observada. Esto aumenta el nivel de precisión de las distancias presentes en la cartografía y que son vitales para hacer un correcto cálculo de los caminos mínimos en los próximos puntos de esta tesis. En contraposición, esto lleva a la construcción de un grafo mucho más grande pero se observó que no significa una demora relevante para ser considerada una dificultad para el modelo.

Para poder trabajar de forma más simple con la cartografía, se utilizó una licencia de 60 días de “ArcGis 10 Desktop Edition” proporcionada por Jaime Backit, Gerente de “Exploración Satelital Ltda” y colaborador en el desarrollo del actual sistema de despacho de CBS.

Una imagen general de lo que el archivo de ejes viales contiene se puede apreciar en la figura 3.1

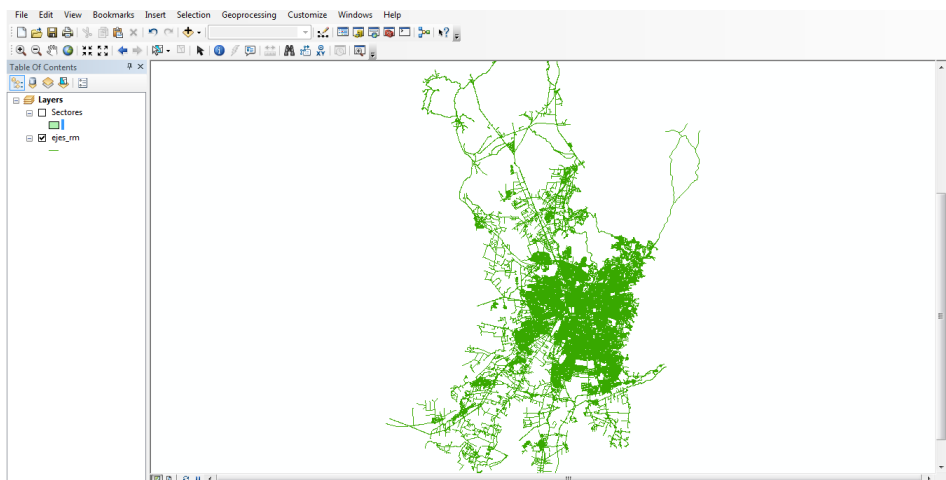


Figura 3.1: Visión general del mapa de Publiguías en ArcGis 10.0

En esta se puede observar que la cartografía abarca toda la Región Metropolitana y el nivel de detalle es bastante alto. Si se observa la información referente a un eje vial en particular se puede apreciar el detalle informativo que este contiene en la figura 3.2

Cada polilínea contiene la información del tipo de calle, el nombre de la misma, la numeración y particularmente importante, **el sentido declarado de la calle**. Este punto final permite poder generar un grafo dirigido y, como se verá con el trabajo posterior, intentar que este sea conexo.

Otro punto importante es el sistema de coordenadas. En la cartografía las ubicaciones se encuentran en el sistema denominado “UTM” (Universal Transverse Mercator), el cual está basado en proyecciones cartográficas. Su unidad de medida es el metro y dado que es un sistema proyectado<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>UTM asume que la Tierra es plana y las ubicaciones se representan en un eje cartesiano. Más información se puede encontrar en <http://goo.gl/wRfy7>

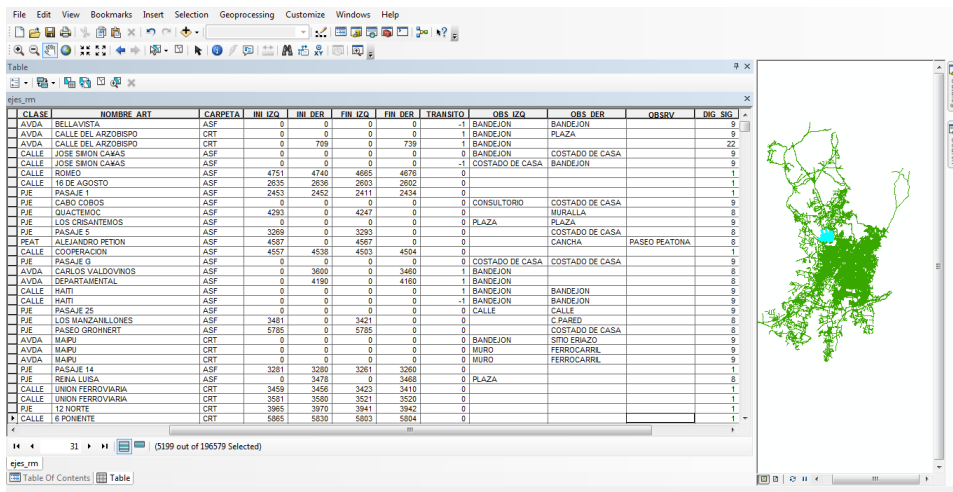


Figura 3.2: Información de la cartografía estudiada.

su precisión es aceptable en pequeñas áreas, siendo un poco más impreciso al aumentar las distancias representadas. Dado este inconveniente y asociado al uso de herramientas de Google Maps, se decidió pasar desde UTM al sistema de Coordenadas Geográficas<sup>2</sup>, el que asume que la Tierra es esférica y las unidades son representadas por 2 coordenadas angulares: **latitudes** y **longitudes**. Dentro de este sistema de coordenadas existen diferentes estándares referentes a varios parámetros que se utilizan para definir las latitudes y longitudes del planeta. El más preciso y ampliamente utilizado es WGS84, el que utiliza Google Maps y además en este se basa el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) por lo que resultó el más adecuado para adoptar en este trabajo de tesis. Esta transformación y mayor detalle sobre estos sistemas de referencia se detallarán en la sección 3.1.6.

### 3.1.2. Construcción de arcos

Dado que una polilínea es una construcción cartográfica y no necesariamente óptima para el desarrollo de un grafo dirigido, la etapa de obtener los arcos se enfoca principalmente en la construcción de los mismos y no sólo en rescatarlos desde las polilíneas. De esta forma, el trabajo en esta etapa se dividió en:

1. Obtener los puntos que contienen las polilíneas de la cartografía.
2. Obtener los extremos de dichas polilíneas.
3. Representar arcos en el correcto sentido.

Para el primero de los puntos se realizó un proceso mixto entre herramientas de ArcGis 10 y un desarrollo ad-hoc que toma en consideración la posibilidad de realizar script en Python dentro

<sup>2</sup>[http://es.wikipedia.org/wiki/Coordenadas\\_geograficas](http://es.wikipedia.org/wiki/Coordenadas_geograficas)

de la interfaz misma de ArcGis lo que facilita la extracción de la información necesaria para la construcción del grafo. De esta forma, se escribió el siguiente script que permite leer las polilíneas y extraer la información relevante para la obtención de los arcos:

---

**Algoritmo 1** Obtención de puntos de polilíneas desde ArcGis.

---

**Entrada:** Archivo de polilíneas, Un archivo de salida.

**Salida:** Archivo con puntos que componen las polilíneas ingresadas.

```
1: Ver propiedades incluidas en el archivo de entrada(puntos, polilíneas, polígonos)
2: Crear arreglo con las propiedades incluidas en el archivo.
3: while Filas sea distinto de nulo do
4:   if Si la línea observada tiene la propiedad punto then
5:     Obtengo los atributos de dicho punto
6:     Imprimo línea con: ID punto, Posición X del punto, Posición Y del punto.
7:   end if
8:   Leo la siguiente línea
9: end while
10: return Archivo de puntos que componen las polilíneas.
```

---

Con este script se obtuvo un archivo con las posiciones “x” e “y” de cada punto que compone cada polilínea de la cartografía. Con esto se tomaron las posiciones extremas de cada una de dichas polilíneas y se obtuvo la primera versión de los arcos utilizados. Dichos puntos extremos corresponde al inicio y fin de una polilínea y no necesariamente coinciden siempre con ser extremos de calles, esto debido a que en la cartografía se representan como diferentes polilíneas aquellos segmentos de calle que presentan quiebres “significativos” en la linealidad de la calle. De esta manera, un segmento vial entre 2 esquinas podría estar representado por una o más polilíneas.

Para el último de los puntos (representar el correcto sentido del tránsito), se debió tener especial cuidado. En la cartografía el sentido de una polilínea viene representado de la siguiente forma:

- **1** si el arco tiene sentido en dirección de la digitalización de la polilínea, lo que usualmente se traduce en un sentido Sur a Norte y de Oeste a Este.
- **-1** si el arco tiene sentido en dirección opuesta a la digitalización de la polilínea, lo que equivale a los sentido opuestos del caso anterior.
- **0** si el arco es de doble sentido.

Por ejemplo, una avenida como “Libertador Bernardo O’Higgins” está representada por un conjunto de polilíneas donde un conjunto de ellas tiene valor -1 (van desde Este hacia Oriente) y otro conjunto de polilíneas con sentido de valor 1 que representan la otra calzada de esta avenida. Un ejemplo de esto se aprecia en la figura 3.3.

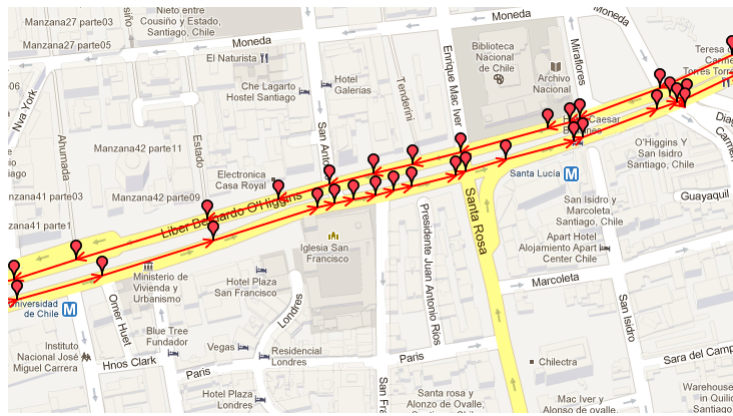


Figura 3.3: Alameda representada por 2 polilíneas de sentidos opuestos.

Por otra parte, existe un conjunto de calles que tienen doble sentido pero corresponden a una única polilínea dentro de la cartografía. Un ejemplo de esto es lo que pasa con Salvador, en la comuna de Providencia. Esta calle, como se aprecia en la figura 3.4, está representada por una única polilínea lo que puede llevar a una confusión al momento de diseñar el algoritmo de resolución de caminos mínimos. De esta forma, para este conjunto de polilíneas se decidió crear 2 arcos donde cada uno de ellos representa el correcto sentido de circulación a través de la calle en la realidad.

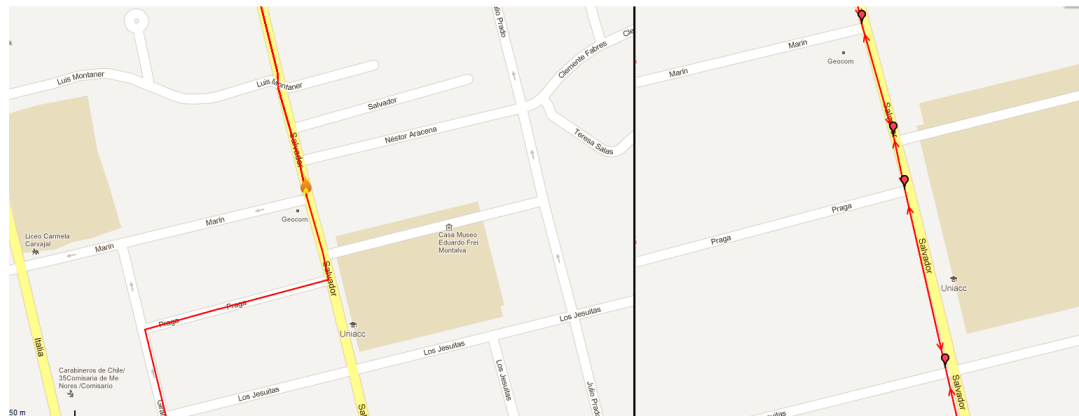


Figura 3.4: Imagen de Salvador, la cual es descrita como una única polilínea en la cartografía

Tomando todo lo anterior en consideración se construyó la primera versión de arcos del grafo de Santiago con sentidos de las calles. Este quedó conformado por 662595 arcos que representan la gran mayoría de los ejes viales de la Región Metropolitana de Chile.

### 3.1.3. Construcción de nodos

Dado que en el punto anterior se consiguió el conjunto de puntos que componen cada una de las polilíneas de la cartografía utilizada, se conoce entonces la posición geográfica de cada uno de ellos por lo que ahora era necesario recorrer dicha lista para obtener la cantidad exacta de nodos

que componen las polilíneas creadas. Una vez recorrida dicha lista se obtuvo el conjunto de nodos distintos que forman la red de Santiago, de esta manera se llegó a una lista de nodos del tipo: (**id nodo, posición x, posición y**) .Y una lista de arcos: (**id arco, id nodo inicio, id nodo fin**)

#### 3.1.4. Obtención de información adicional de las calles

Para cada calle que compone el grafo de Santiago existe información adicional en la cartografía más allá de solo orientaciones geográficas. Al visualizarlo en ArcGis 10.0 se aprecia que tabla con dicha información esta compuesta por la siguiente cabecera:

**(id arco,nodo inicio,nodo fin,clase id,calle id,comuna id,numeracion 0,numeracion 1,numeracion 2,numeracion 3)**

Donde **clase id** corresponde al tipo de calle que tiene declarado ese arco, pudiendo ser Autopista, Avenida, Calle, Camino, Paseo Peatonal, Rotonda o Pasaje. Por su parte **calle id** es un correlativo asociado a los nombres de cada uno de los ejes viales de la Región. De igual manera es el caso de **comuna id** el que tiene el id de las 50 comunas de la región. De esta manera, se obtiene un grafo bastante robusto en información adicional para análisis y consultas futuras referentes a calles específicas así como también la altura, el nombre de la calle y la comuna para entender como se comportan y cuales son sus velocidades promedios y congestión al utilizar la información en los caminos mínimos utilizados.

#### 3.1.5. Construcción de arcos prohibidos

Con el grafo construido, tanto en sus arcos como nodos, uno de los puntos importantes es la identificación de que arcos corresponden a calles que son denominadas “reversibles”, que según la UOCT<sup>3</sup> son:

*“Aquellas vías del Área Metropolitana que varían su sentido de tránsito en determinados períodos del día, para favorecer el desplazamiento de los vehículos que por ellas circulan. Las vías reversibles operan de Lunes a Viernes exceptuando los días festivos”*

De esta forma, para cada una de las calles que se encuentran en dicho caso se identificó cada uno de los arcos que la componen y los horarios en que se encuentran con su circulación alterada. Posteriormente, estos arcos identificados se ingresaron al archivo “arcos.prohibidos.csv” junto con los períodos del día en que su circulación está prohibida. En el caso que el sentido por una calle se invierta pero dichos arcos no existan en el grafo (como en el caso de Mariano Sánchez Fontencilla), se ingresaron en el grafo todos los arcos inversos pero prohibiendo la circulación por ellos en cualquier

---

<sup>3</sup>UOCT:Unidad Operativa de Control de Tránsito <http://www.uoct.cl/>



horario que no fuese en las horas de reversibilidad con lo que se mantiene la integridad de la circulación en el grafo en los horarios de no prohibición.

### 3.1.6. Transformación de información a sistema de coordenadas geográficas

La información de nodos y arcos obtenida de la cartografía estaba en el sistema de coordenadas UTM (Universal Transverse Mercator)<sup>4</sup>. Este es un sistema de proyecciones geodésicas<sup>5</sup>, el cual construye geoméricamente el mapa de manera que los meridianos (líneas de intersección con la superficie terrestre de los infinitos planos que contienen el eje de la tierra) y paralelos (líneas de intersección de los infinitos planos perpendiculares al eje terrestre con la superficie de la tierra) se transformen en una red regular, rectangular, de manera que se conserven los ángulos originales de la tierra. De esta forma, mantiene los ángulos pero distorsiona todas las superficies sobre los objetos originales así como las distancias existentes. Esto cobra relevancia en este proyecto de tesis ya que las distancias utilizadas son fundamentales para tomar correctas decisiones en los caminos mínimos elegidos.

En este sistema de referencia es necesario definir la zona y el hemisferio que se está representando ya que existe duplicidad de coordenadas entre zonas. Para el territorio de Chile, la zona UTM correspondiente es la 19.

Un sistema más adecuado para este proyecto es el sistema geográfico. Este es un sistema de 3 dimensiones (a diferencia de UTM que sólo son 2), un eje cruza la tierra de polo a polo, otro está definido por los **meridianos** y el otro definido por los **paralelos**. La posición geográfica basado en la red de meridianos y paralelos, se encuentra definida por su **latitud** y **longitud**

Finalmente, para transformar los datos desde el sistema UTM hacia el sistema geográfico conociendo que la zona en que se ubica Chile es 19 se utiliza el proceso detallado en [12]. Este método se implementó como una función dentro del algoritmo de caminos mínimos para futuros usos dentro del proyecto.

Se decidió mantener 6 cifras significativas después de la coma en la información geográfica resultante. De esta manera, se minimiza la pérdida de información (exactitud hasta de 11 centímetros) así como también se minimiza la información innecesarias (más cifras significativas ocupan espacio de memoria y no entregan una ubicación más precisa).

---

<sup>4</sup>Mayor información sobre este sistema y otros en <http://www.cartesia.org/data/apuntes/cartografia/cartografia-geograficas-utm-datum.pdf>

<sup>5</sup>Geodesia: Representación de la tierra en un plano.

### 3.1.7. Ubicación de las compañías de Bomberos

La correcta ubicación de cada una de las 22 compañías de CBS es vital para representar de forma precisa las salidas de los despachos en el modelo, por lo que en este punto se hizo un trabajo en conjunto con los voluntarios del Cuerpo de Bomberos a través de solicitar la ubicación exacta de cada una de sus compañías y más importante aún, las salidas permitidas para cada una de las compañías. Esto considera los cruces de calles que realizan al salir de su compañía así como también si existen virajes particulares en las inmediaciones de su salida.

### 3.1.8. Definir nodos dentro de la zona del área de CBS

Dentro de los requerimientos del sistema solicitado por CBS se encuentra adicionalmente que los caminos mínimos identificados para las compañías estén siempre trazados dentro del área de cobertura del Cuerpo. Esto quiere decir que se debe prohibir el hecho de pasar por sectores externos a la zona de CBS para atender emergencias dentro del área de cobertura. De esta forma, fue necesario identificar que nodos se encuentran al interior de la zona de cobertura.

El desafío en este punto se encuentra principalmente en la poca documentación cartográfica existente para las zonas que componen a CBS. La información de dichas zonas se pudo solamente obtener a través de un archivo pdf que contiene la información de los límites de la jurisdicción de CBS. Esto se puede apreciar en la figura 3.5.

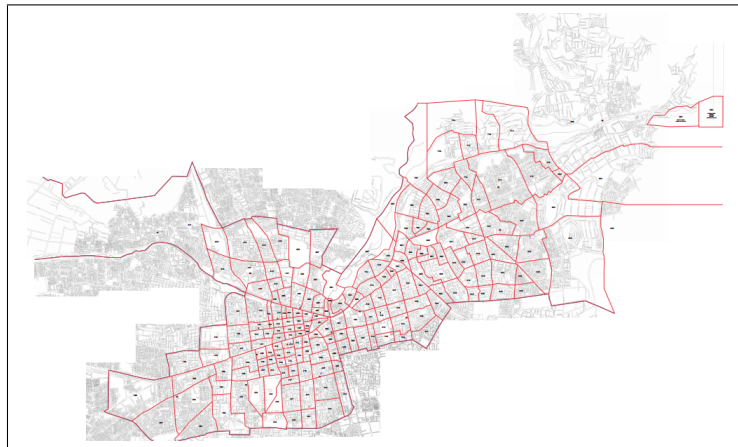


Figura 3.5: Límites de las zonas del Cuerpo de Bomberos de Santiago

Dada esta imagen, se hizo un trabajo intensivo sobre la misma con las herramientas de georeferenciación proporcionadas por ArcGis 10.0. De esta manera se pudo proyectar dicha información y construir los polígonos correspondientes a las zonas que componen a CBS. Posteriormente dicha información se combinó con la de los nodos anteriormente construidos de la Región Metropolitana realizando una intersección de ambos a través de ArcGis con lo que se obtuvo finalmente el atributo

adicional de la zona a la que pertenece cada uno de los nodos de la red. Se definió dejar con valor “0” a aquellos nodos fuera del área de CBS y con el valor de su zona correspondiente a los que si estuvieran dentro de la zona de cobertura. Una pequeña muestra de esto se puede apreciar en el ejemplo expuesto en la tabla 3.1.

# id_nodo	latitud	longitud	zona
290658	-33416407	-70539133	633
290659	-33377189	-70538441	718
290660	-33707943	-70544313	0
290661	-33351635	-70537989	800
290662	-33454393	-70539798	0
290663	-33351524	-70537983	800
290664	-33605657	-70542481	0
290665	-33333895	-70537673	800
290666	-33612310	-70542598	0
290667	-33386246	-70538592	717
290668	-33360457	-70538135	800
290669	-33514710	-70540859	0
290670	-33439956	-70539533	0
290671	-33333035	-70537646	800
290672	-33520716	-70540959	0
290673	-33408800	-70538979	633
290674	-33386104	-70538576	717
290675	-33723540	-70544571	0
290676	-33478023	-70540198	0

Tabla 3.1: Ejemplo archivo de nodos con la zona correspondiente

De esta manera, se pudo finalmente tener una estructura de datos que sustenta los puntos posteriores de análisis y desarrollo para completar el punto pendiente hasta ahora en el grafo: las velocidades en las calles.

## 3.2. Velocidades en el grafo de Santiago

El desarrollo de esta etapa resulta particularmente desafiante. Hasta hace un par de años no existía un medio confiable de obtener las velocidades de todas las calles de Santiago. Dentro de la investigación se tomó contacto con la UOCT pero sus registros de velocidad sólo toman en cuenta 18 ejes viales principales de Santiago medidos trimestralmente en tramos muy acotados. Un detalle de esto se aprecia en Anexos B.

Al descartar esta posibilidad, los esfuerzo se enfocan en el trabajo que ha estado desarrollando en los últimos años el Departamento de Ingeniería Civil, específicamente en Ingeniería de Transporte quienes, liderados por la profesora Marcela Munizaga, han trabajado en conjunto con Transantiago

obteniendo dentro de sus resultados las velocidades de los buses basados en la dirección GPS de los mismos.

### 3.2.1. Datos utilizados

De esta manera, y como se comentaba en la sección anterior, la principal fuente de información utilizada es Transantiago, en particular corresponden a los datos procesados por Ingeniería en Transporte para una semana de Marzo del año 2009. Esta información se encuentra agrupada por servicio de Transantiago y contiene:

- **Velocidades de buses:** Por cada servicio de bus se tiene registro de la velocidad cada 500 metros. Este dato viene con información geográfica.
- **Número de buses:** Junto al dato de velocidad, se entrega además la cantidad de buses que se utilizó para construir dicha velocidad.
- **Rutas de los buses:** Es un conjunto de latitudes y longitudes diferenciadas por servicio de buses. De esta manera se conoce el recorrido particular de cada microbus permitiendo aproximar las calles en las que se encuentran sus rutas.

Un panorama general de la información antes comentada se puede apreciar en la figura 3.6. Por cada línea se tiene la información de las velocidades cada 500 metros. Dentro del procesamiento realizado en Ingeniería en Transporte está contemplada la eliminación de los tiempos asociados a las detenciones en paraderos de cada uno de los microbuses por lo que la velocidad resultante corresponde a la estimación real en la calle. Además, dado que existen mediciones de velocidad a lo largo del día se concentra dicha información en intervalos de 30 minutos, con lo que se forman 48 períodos de velocidades para cada una de las líneas de buses que operan en Transantiago.

La problemática principal es que las ubicaciones donde se mide la velocidad de los buses, no necesariamente coinciden con el recorrido del bus. Además, las rutas de los buses están proyectadas en el sistema de referencia utilizado por Transantiago, el cual no es conocido y no coincide necesariamente con el utilizado en el grafo de este trabajo de tesis. De esta manera, resulta crucial para obtener velocidades en los arcos del grafo poder superar los problemas recién comentados. Esto se detalla en profundidad en los próximos puntos.

### 3.2.2. Heurística de proyección

Tal y como se comentaba en la sección anterior, los datos de Transantiago se encuentra condensado en polilíneas cada 500 metros con velocidades por cada recorrido que tiene este sistema

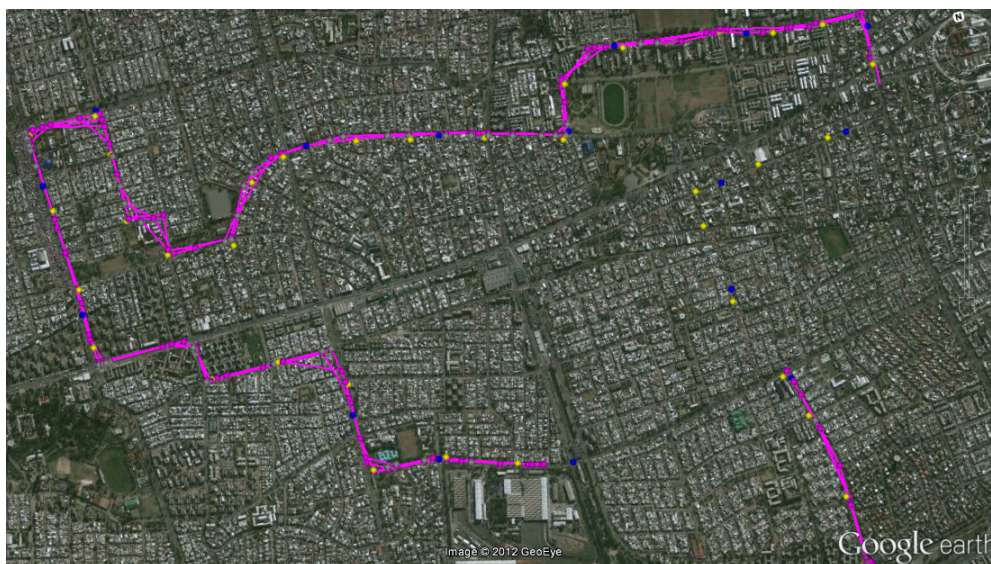


Figura 3.6: Camino recorrido por bus J06. De color magenta es el recorrido del bus. De color amarillo son los puntos definidos como paraderos de Transantiago y de color azul son los intervalos de 500 metros donde se calcula la velocidad del bus.

público de transporte. Esta secuencia de puntos no es demasiado densa comparada con el grafo de Santiago, ya que un gran porcentaje de los arcos tienen un largo menor a 500 metros, por lo que en muchas ocasiones los arcos de velocidades contiene varios arcos del grafo. Asociado a lo anterior, se tiene el recorrido de cada uno de los buses cada 30 segundos con lo que se puede tener la secuencia de puntos que siguió ese bus y debería poder aproximarse al recorrido real del bus en las calles de Santiago. Esto puede apreciarse en la figura 3.7, donde los puntos azules y más densos son del GPS de los buses y los puntos rojos es donde se midió la velocidad de dicho recorrido de bus. Como se puede apreciar, los puntos donde existen velocidades no calzan ni siguen los quiebres de las calles. Por su parte, los puntos de los recorridos no siempre caen sobre las calles por lo que el desafío en este algoritmo es: **identificar por que arcos del grafo circulan los recorridos de buses y asociarles la velocidad del bus registrada cada 500 metros eligiendo la mejor forma de distribuir dicha información.**

La idea principal del método implementado es, por cada línea de bus, reducir el largo de los arcos que corresponden a la línea de bus, seleccionar los  $K$  arcos del grafo que se encuentran más cercanos a cada punto de la línea para luego ejecutar el algoritmo de camino mínimo entre el primer punto del conjunto de arcos identificados (asociado al primer punto de los datos de buses) hasta el último dato de dicho conjunto. De esta manera, se asegura que se está recreando un camino y más importante, que dicho camino se ajusta relativamente bien al recorrido que debería seguir el bus dentro del grafo. Ejemplo de esto se puede apreciar en la figura 3.8

De esta forma, dada una línea de bus, se itera sobre todos los puntos pertenientes a ella. Por

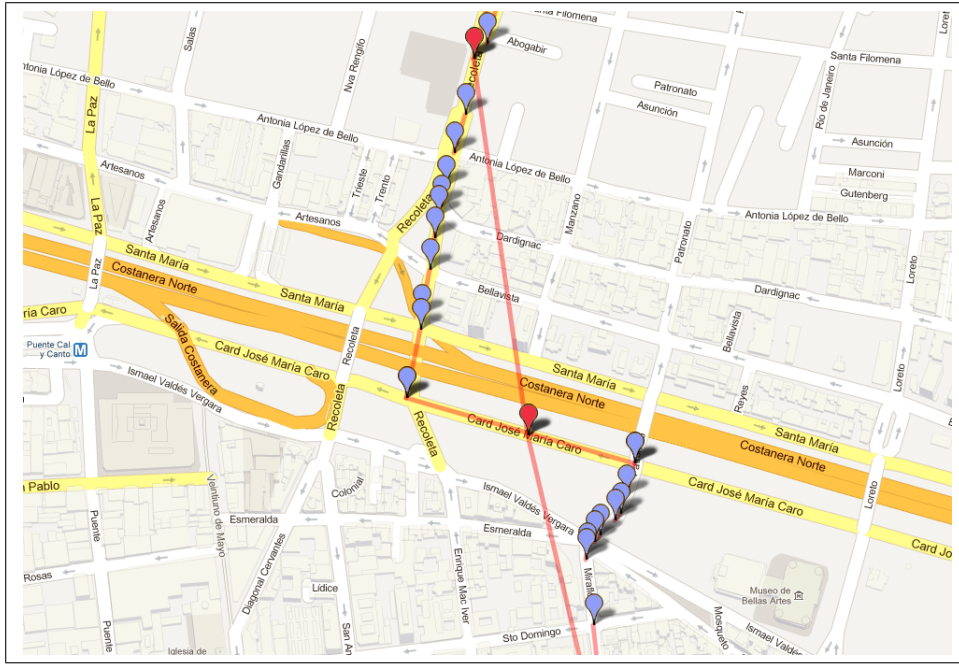


Figura 3.7: En Azul es la red de puntos de los recorridos de los buses. En rojo las velocidades cada 500 metros.

cada uno de dichos puntos, denominado  $p_i$  se computan los  $K$  arcos del grafo más cercanos a dicho punto y se reduce su largo por la distancia entre  $p_i$  y  $p_{i+1}$ . De esta distancia reducida se mantiene la parte positiva; si dicho largo es negativo entonces es reemplazado por 0. Una vez que se itera sobre todos los puntos de la línea se ejecuta el algoritmo de caminos mínimos desde el inicio hacia el fin de la línea. Lo anterior se explica en el algoritmo 2

Donde:

- $G = (N, A)$  es la representación del grafo.
- $P = (p_i)_{i \in \{1, \dots, n\}}$  es el conjunto de puntos de la línea del bus, con  $n$  el total de puntos.
- $K$  es el número de arcos cercanos que se consideran al analizar cada punto de la línea de bus.
- $d_{max}$  es la distancia máxima permitida entre 2 puntos de la línea de bus.
- $d \in \mathbb{R}^{|A|}$  el vector de largos de los arcos del grafo.
- $closest\_edges(G, K, p)$  una rutina que computa los  $p$ 's  $K$  más cercanos arcos en el grafo  $G = (N, A)$
- $dijkstra(G, w, p, q)$  una rutina que computa el camino más corto en el grafo  $G = (N, A)$  con pesos  $w \in \mathbb{R}^{|A|}$  entre los  $p$ 's nodos más cercanos en  $G$  y  $q$ , el nodo más cercano en  $G$ .

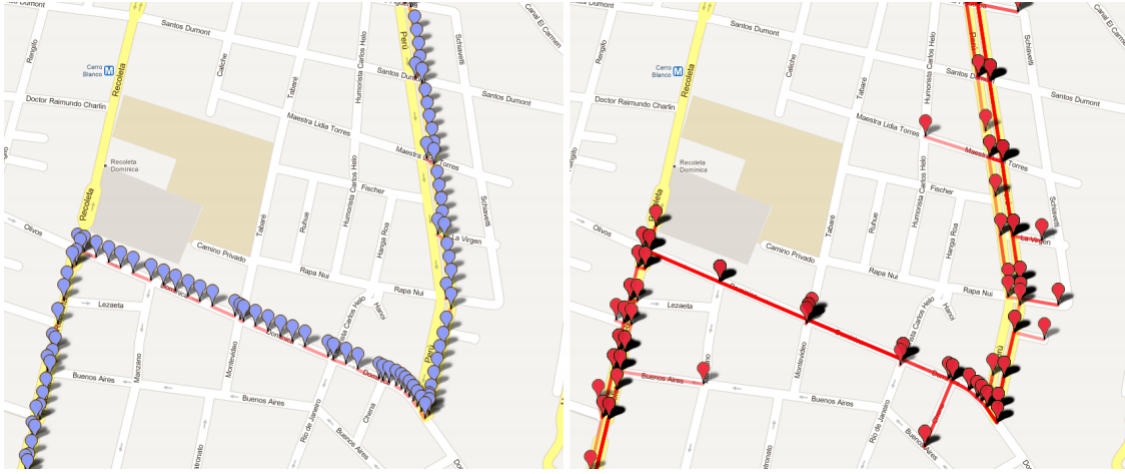


Figura 3.8: Resultado de la primera etapa de la heurística: En el ejemplo, se tienen los  $K=3$  arcos más cercanos (en rojo) a cada uno de los arcos del recorrido del bus (en celeste)

- $S$  subconjunto de nodos correspondientes al camino seguido calculado por la línea de buses. Es el output de la heurística.

El proceso anteriormente comentado entrega como resultado el subgrafo seleccionado. Ahora, para asignarle a este grafo las velocidades que Transantiago ha proporcionado, se parte de la configuración de la figura 3.9.

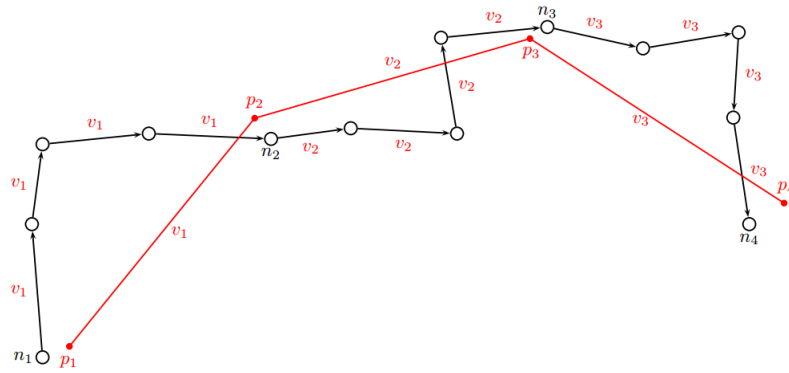


Figura 3.9: Se aprecia de color rojo los arcos con velocidades de Transantiago y en negro los arcos del subgrafo que representan el recorrido del bus analizado.

Por cada punto  $p_i$  de los datos de velocidad, se busca el nodo  $n_i$  del subgrafo  $S$  más cercano. Luego, por cada par de puntos consecutivos en los puntos de velocidades,  $p_i$  y  $p_{i+1}$ , se le asigna la velocidad del segmento  $p_i p_{i+1}$  a todos los arcos  $p_i$  del subgrafo que estén contenidos en dicho segmento  $p_i p_{i+1}$ . Dado que la distancia entre los puntos de velocidades es siempre superior al largo de los arcos del subgrafo no existe el problema que dentro de un intervalo  $p_i p_{i+1}$  exista un único punto  $n_i$ .

Asignada dicha velocidad al arco  $n_i$  del subgrafo, se divide la distancia del arco por dicha



---

**Algoritmo 2** Heurística de proyecciones

---

**Entrada:**  $G, P, k, d \in \mathbb{R}^E, d_{\text{máx}}$   
{Calcular largos modificados  $w$ }  
 $w \leftarrow d, p_o \leftarrow p_1$   
**for**  $i = 1, \dots, n - 1$  **do**  
   $n_i \leftarrow \lfloor d(p_i, p_{i+1})/d_{\text{máx}} \rfloor$   
  **for**  $j = 0, \dots, n_i$  **do**  
     $p \leftarrow p_i + (p_{i+1} - p_i) \cdot j \frac{d_{\text{máx}}}{d(p_i, p_{i+1})}$   
    **for**  $e \in \text{closest\_edges}(G, k, p)$  **do**  
       $w_e \leftarrow (w_e - d(p_o, p))_+$   
    **end for**  
     $p_o \leftarrow p$   
  **end for**  
**end for**  
**for**  $e \in \text{closest\_edges}(G, k, p_n)$  **do**  
   $w_e \leftarrow (w_e - d(p_o, p_n))_+$   
**end for**{Construir camino más corto}  
 $S \leftarrow \text{dijkstra}(G, w, p_1, p_n)$   
**return**  $S$

---

velocidad para finalmente almacenar el tiempo que cuesta recorrer dicho arco como el peso utilizado por el algoritmo de caminos mínimos.

### 3.2.3. Complejidad de la heurística de proyecciones

Para entender la dificultad del algoritmo se enumeran a continuación los pasos generales antes comentados que realiza el algoritmo de proyecciones. Estos son:

- A lo más  $M = \frac{1}{d_{\text{max}}} \sum_{i=1}^{n-1} d(p_i, p_{i+1})$  puntos de recorrido denso.
  1. Dado un punto, encontrar los  $k$  arcos más cercanos:  $O(|A| \log k)$ .
  2. Modificar el largo de estos  $k$  arcos  $O(k)$ .
- Dijkstra con binary heap con largos modificados:  $O(|A| + |N| \log |N|)$
- Proyección en el subgrafo  $O(|\text{subgrafo}| \cdot |\text{muestras}| \cdot T)$

De esta forma, la complejidad total del algoritmo es:

$$O(|A| + |N| \log |N| + M(k + |A| \log k) + |\text{subgrafo}| \cdot |\text{muestras}| \cdot T) \quad (3.1)$$



### 3.2.4. Problemas conocidos en la heurística

Como toda heurística que busca encontrar la solución de un problema exacto, el resultado obtenido no es necesariamente el óptimo del problema existiendo casos en que la heurística planteada no logra encontrar de forma correcta el camino de arcos del grafo que representan al recorrido del bus analizado.

Un ejemplo de error es cuando una trayectoria densa pasa a través de una zona de calles también densas y dicha trayectoria contiene segmentos más largos que los arcos de su vecindad. Esto se aprecia en la figura 3.10 donde los puntos rojos son los que contienen los puntos reales identificados por Transantiago del recorrido del bus. Las líneas verdes son los nodos del grafo que deberían corresponder a la trayectoria del bus y la azul es la encontrada por el algoritmo. En este caso el problema viene de la naturaleza de minimización que existe en el diseño de la heurística ya que al estar constantemente buscando el camino más corto entre los puntos de la trayectoria, tenderá a no alejarse demasiado de un punto y el siguiente, por lo que el punto de la esquina inferior derecha queda descartado ya que implica alejarse de la trayectoria aún cuando sea la solución real.

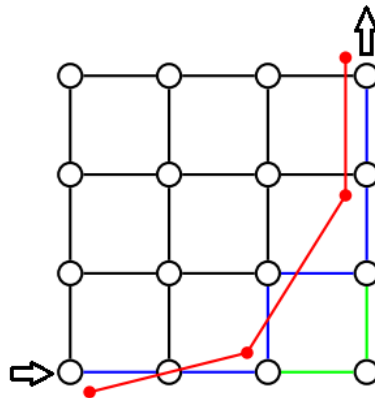


Figura 3.10: Problema conocido en heurística al ser muy densa la red de nodos en la vecindad

Otro problema detectado en el método es cuando la trayectoria del bus realiza un viraje en U, tal y como se aprecia en la figura 3.11. Si el bus viene por el nodo 1, la heurística tenderá a eliminar los nodos lejanos nuevamente, acortando los caminos lo más posible ya que sabe que posterior a ingresar por el nodo 1 debe regresar en el sentido opuesto por lo que seguir hasta los nodos 4 y 5 es ineficiente, aunque nuevamente, sean el camino real sobre el grafo.

En el caso del proyecto, estos errores fueron solucionados manualmente bajo inspección de cada una de las líneas de Transantiago identificadas. De todas formas, el problema como se comentaba al inicio de esta subsección, no se observa en gran cantidad de los recorridos y arcos del grafo de Santiago, por lo que no es tan complicado entender su lógica y subsanar los problemas.

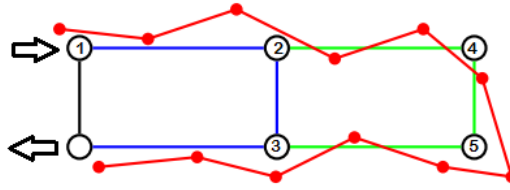


Figura 3.11: Problema conocido en heurística al tener el recorrido vueltas con retorno

### 3.2.5. Algoritmo de extrapolación

Una vez identificados los arcos del grafo por lo que circulan los buses de Transantiago se tiene un subgrafo de la Región Metropolitana ya que dichos buses no circulan en todas y cada una de las calles de la región. Ante la ausencia de información para los sectores donde no existen buses de Transantiago, se estuvo ante la necesidad de realizar un ajuste y extrapolación de la información ya contenida junto con información generada. De esta manera, se definieron perfiles de velocidades por defecto para cada uno de los tipos de calles en el grafo con variaciones según el horario del día. Esto se puede apreciar en la figura 3.12 la cual representa cada uno de estos tipos de ejes viales y su velocidad de circulación promedio. Es importante tener en consideración que esto fue validado con el equipo de CBS con el que se llegó a una versión definitiva de perfiles que se ajustara más fielmente a la realidad de los carros de bomberos al momento de atender una emergencia.

Al momento de extrapolar, es complicado tomar demasiados supuestos sobre semejanzas entre ejes viales y como se comporta a través del día una calle en particular contra otra ya que se ha podido observar una gran diferencia entre un eje y otro, lo que está fuertemente relacionado con sus conexiones y cantidad de pistas, información que no se tiene desde la cartografía. De esta manera, la mejor alternativa que se evaluó para este caso, fue hacer lo siguiente:

Para un arco  $e$  sin velocidades de Transantiago, se busca en el conjunto de ejes viales que tengan información que cumpla los siguientes criterios:

- En un cuadrado de lado 200 metros en torno al arco analizado se busca si existe algún par de arcos  $(e_1, e_2) \in E^2$  con información de Transantiago.
- Además se exige que dicho par de arcos, deben ser del mismo tipo de eje vial del arco de análisis.
- Si dicho par de arcos existen, se exige que tengan “similar sentido” al arco de análisis. En este caso, el sentido se estudia por el producto punto entre ambos arcos no sea superior a  $30^\circ$ .

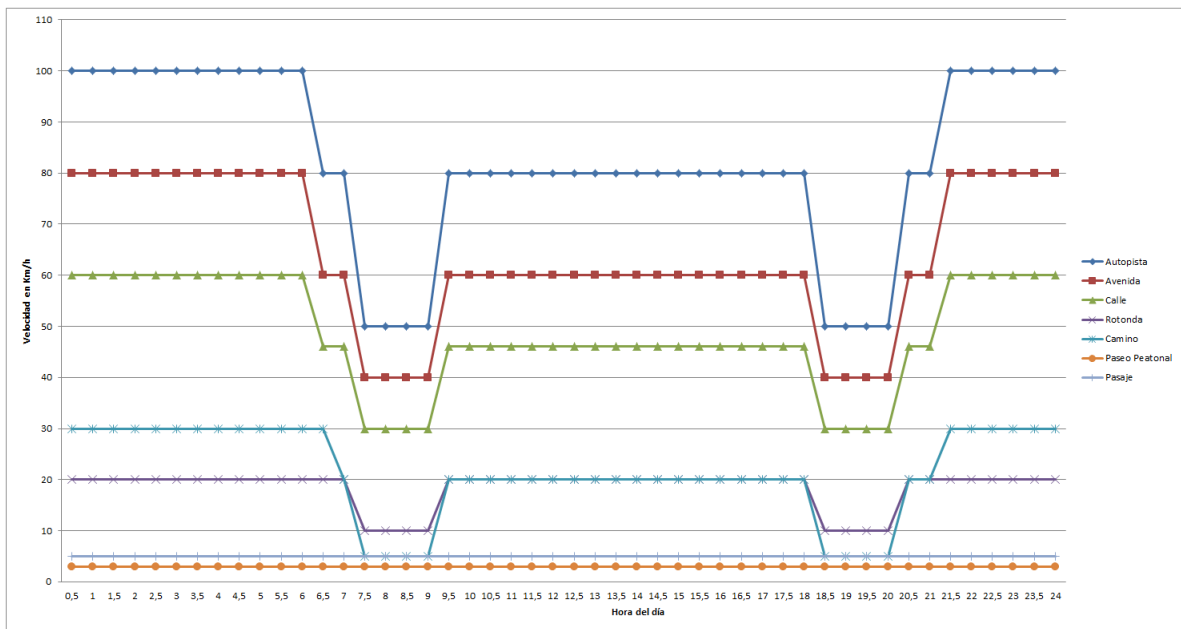


Figura 3.12: Perfiles de velocidades por defecto usados en extrapolación.

Si existe un par de arcos con dichas características, entonces se le asignará por velocidad la mínima velocidad entre la velocidad por defecto y la combinación convexa de las velocidades de los arcos  $e_1$  y  $e_2$  para cada velocidad. Dicha velocidad se computa tal y como se comenta en la sección anterior:

$$v_{et} = \frac{dist(e, e_1)}{dist(e, e_1) + dist(e, e_2)} v_{e_2t} + \frac{dist(e, e_2)}{dist(e, e_1) + dist(e, e_2)} v_{e_1t}$$

Debido a la posibilidad de alta variabilidad en los datos de origen, se consideran para algunos períodos todos los arcos que tuviesen información proyectada por más de 5 buses para así no incorporar información poco representativa.

Por otra parte, si es que en dicho sector de 200 metros no existe un arco con tales características, entonces se le asignará simplemente la velocidad por defecto para el tipo de eje vial al que pertenece.

Esto debe realizarse para cada arco que no tenga velocidad, los que son gran parte de los arcos del grafo. Esta situación varía significativamente dependiendo del horario en el que se haga la extrapolación, ya que como se aprecia en la figura 3.13 la cantidad de recorridos de buses es menos intenso en horarios nocturnos, como a las 3 am en la parte derecha de la figura. De esta forma, la extrapolación no es homogénea para cada uno de los 48 horarios que se subdividió el día.

Finalmente, la heurística recorre cada uno de los arcos completando la información de velocidades según sea el caso. El tiempo total de realizar esta extrapolación, debido a la alta cantidad de arcos del grafo, alcanza las 6 horas. Con esto se llega a la versión final de los archivos del grafo y se puede comenzar a trabajar en el algoritmo que resuelve el problema de caminos mínimos.

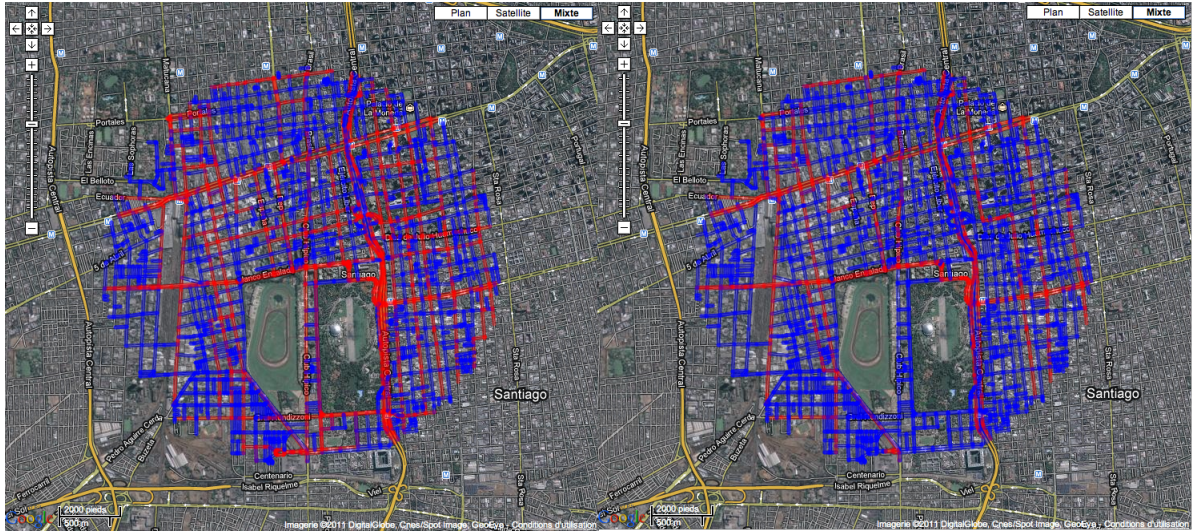


Figura 3.13: En la imagen de la izquierda corresponde a las 12 del día. La imagen de la derecha corresponde al mismo sector a las 3 de la mañana.

### 3.2.6. Perfiles de velocidades resultantes

Teniendo todo lo anterior en consideración se obtienen velocidades en cada una de las calles de la Región Metropolitana. La estructura de estas velocidades varía dependiendo del horario del día, ya que como se comentaba antes, se realiza una combinación entre las velocidades por defecto y las velocidades de Transantiago. La cobertura de la red de buses de Transantiago varía como se pudo apreciar en la figura 3.13

En dicha figura, se diagrama un kilómetro de radio en torno a Beauchef 850. En ella se puede apreciar en colores rojos las calles donde existe información de tráfico de Transantiago y en azul todas aquellas calles donde no existe información de buses. Como se puede esperar, en la imagen de la izquierda, representación de la información a las 12:00 del día, la cantidad de líneas de buses con información son bastante más abundantes que en la imagen de la derecha, a las 3:00 de la mañana. Esto es un punto a favor de entregar una presentación más robusta de la congestión en horarios de alta cantidad de buses en la capital. Por otra parte, dado que la congestión vehicular en horarios de la noche, entre las 1 y 5 de la mañana, es relativamente baja en la ciudad siendo las velocidades semejantes a las definidas como “por defecto”, la distorsión de la falta de información real en dichos horarios no es tan crítica como podría suponerse.

Por otra parte, al proyectar cada una de las velocidades a las calles del grafo, y dado que dichas estimaciones varían en cada uno de los horarios del día, se obtienen perfiles de velocidades en calles, información relevante y poco medida hasta la actualidad con precisión. Un ejemplo se puede ver en la figura 3.14 que representa los tiempos en recorrer un arco en Alameda entre el Paseo Ahumada

y Estado, tanto en el sentido Este-Oeste como en sentido inverso. Se pueden apreciar 2 efectos interesantes aunque intuitivos:

- Los tiempos en recorrer los arcos varían a lo largo del día presentando diferentes *peaks* en el mismo.
- Los tiempos varían según el sentido del tránsito en una misma calle. De igual manera, los *peaks* pueden ser en distintos horarios e intensidad.

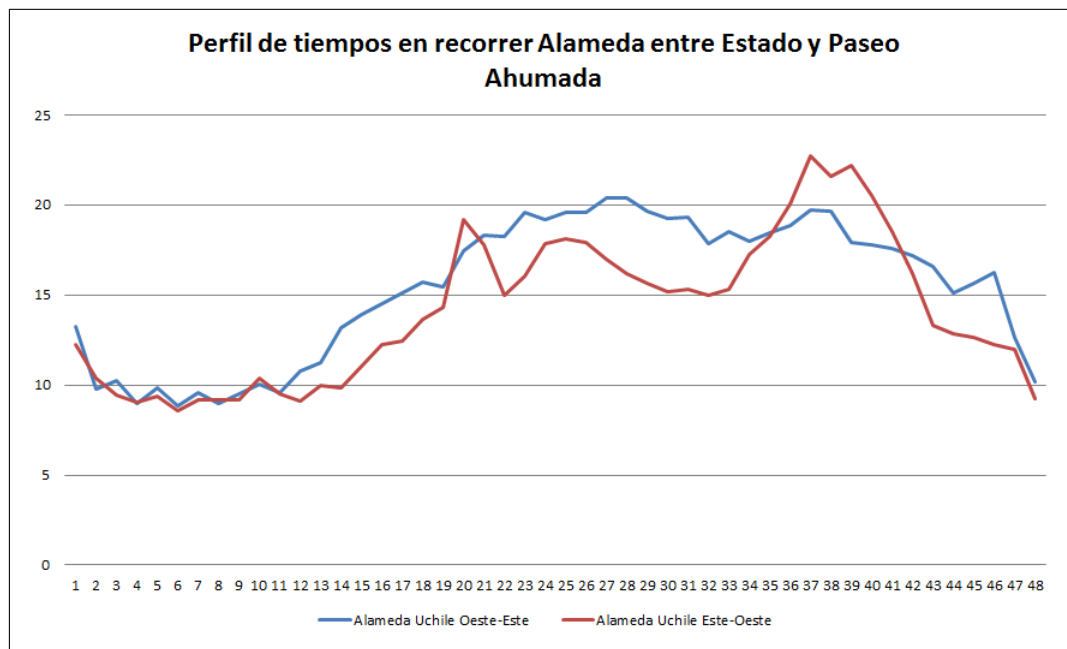


Figura 3.14: Perfil de velocidad Alameda entre Paseo Ahumada y Estado a través del día.

Si se estudia una calle a lo largo de toda su extensión a través del día se pueden obtener interesantes observaciones. En la figura 3.15 se observa una visión general de la información de la calle San Antonio a lo largo de su extensión a través de los 48 períodos del día. Además en 3.16 se pueden apreciar los *peaks* de cada uno de los períodos y posiciones de manera más visual para potenciar el análisis. Los segmentos de San Antonio son crecientes hacia Alameda. De esta forma el segmento 1 es al inicio de la calle y el segmento 18 es el que desemboca en Alameda. Además, los colores representan la intensidad de la velocidad, siendo el rojo oscuro altas velocidades y el azul oscuro velocidades muy bajas.

De esta manera, como primera observación, se puede apreciar que en los horarios de menor circulación es donde se generan los mayores *peaks* de velocidad en esta calle correspondiendo a los horarios entre las 23:00 y las 6:30 de la mañana. Además, se puede observar que los *peaks* en cada horario son diferentes a lo largo de la calle. Se puede apreciar que transversal al horario, existe un

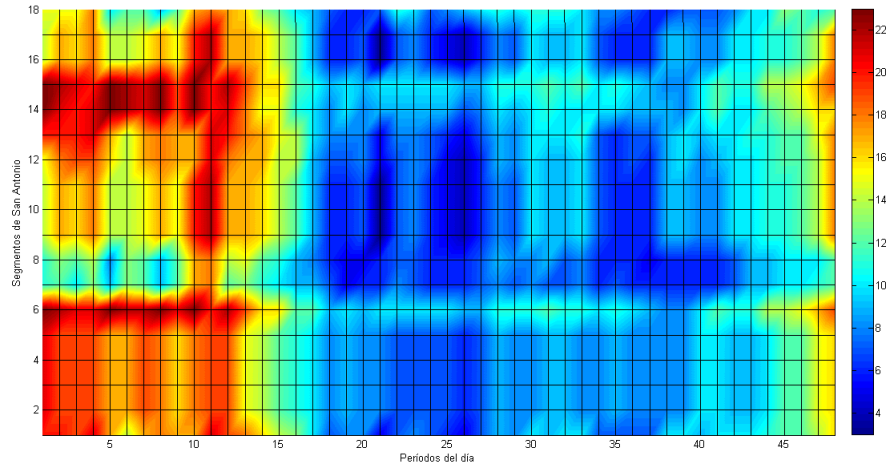


Figura 3.15: Perfil de velocidades a lo largo de San Antonio en cada uno de los 48 períodos.

descenso general en las velocidades en torno al segmento 7, el que geográficamente se encuentra cercano a la intersección con la calle Monjitas. De igual forma existen peaks de velocidad en torno al segmento 4 y 14 que con diferentes intensidad son transversales en el día.

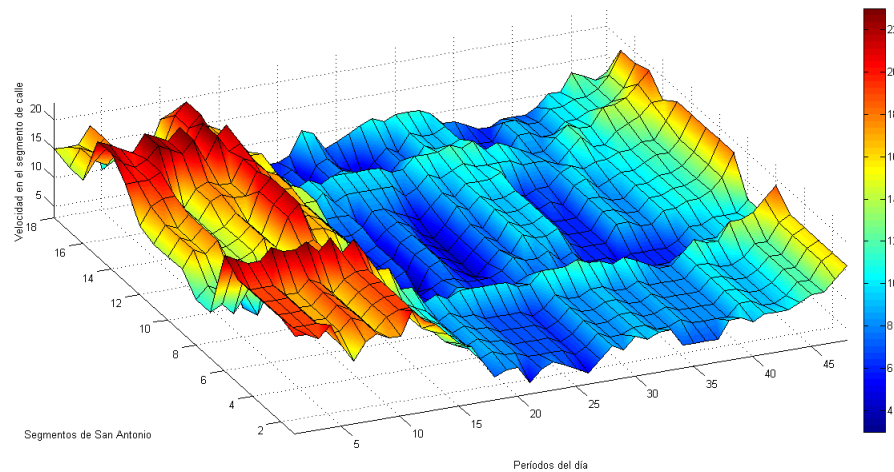


Figura 3.16: Perfil de velocidades a lo largo de San Antonio, visión 3D.

De esta manera, se tiene para cada media hora del día un perfil de velocidades diferente para un mismo tramo de una calle, lo que entrega una aproximación más certera a la realidad al momento de ejecutar el programa de caminos mínimos ya que entrega información mucho más robusta que simples estimaciones de velocidad promedio por tipo de calle haciéndose cargo, aunque de forma estática, de las variaciones que existen en cada una de los ejes viales de la Región Metropolitana.

La validez de estos perfiles y velocidades promedio en las calles de Santiago para el caso del Cuerpo de Bomberos de Santiago será estudiado en el Capítulo 4 de esta Tesis y se propondrá como esto puede ser corregido en caso de estar subvalorando la velocidad de un carro de bombas.



### 3.3. Implementación del algoritmo de caminos mínimos

El centro del diseño de este proyecto es una implementación del algoritmo Dijkstra (1959), el cual es ampliamente utilizado en la literatura del transporte e investigación de operaciones y fue extensivamente comentado en capítulos anteriores.

En particular, la implementación utilizada es un Dijkstra reverso con Binary Heap. En la versión original del algoritmo se crean caminos desde un único origen hacia todos los posibles destinos del grafo, en cambio en un Dijkstra reverso se encuentra el camino más corto desde todos los orígenes posibles hacia un único destino. La elección de un Dijkstra reverso es debido a la naturaleza misma del problema, ya que se está buscando el camino mínimo desde diversos puntos hasta una única emergencia.

Un requerimiento particular desde CBS fue definir un radio en torno a la emergencia en el cual se permitiera que los carros pudiesen ignorar el sentido de los arcos, con esto se representaría de mejor forma la realidad de CBS, eliminando el hecho de tener que recorrer camino extra sólo por el hecho de ir por la pista opuesta a la emergencia. Este radio debe ser el adecuado para no inducir errores en la construcción de los caminos. En conversaciones con CBS quedó definido en 70 mts.

La implementación de este algoritmo con las consideraciones comentadas fue realizada en el lenguaje de programación *C* utilizando elementos de la librería EGLib<sup>6</sup> para algunas de las estructuras de datos utilizadas. Gran parte del código desarrollado e ideas de implementación fueron implementadas por el profesor Daniel Espinoza, siendo vital su apoyo para obtener este programa funcionando y obtener los resultados expuestos en futuros capítulos.

El programa está diseñado para que funcione como daemon<sup>7</sup> bajo un sistema Linux, función denominada en el programa como “boss mode”, lo que le permite estar en constante ejecución en segundo plano y a la espera de peticiones de ejecución del algoritmo Dijkstra desde diferentes clientes ubicados en la misma red, pudiendo estar estos en ambientes Windows, Linux o MacOS. La conexión entre el cliente y daemon se realiza a través de TCP/IP. Si el programa se ejecuta como “boss mode” lee los archivos del grafo y los mantiene cargados en memoria, con lo cual se optimiza el tiempo de ejecución para obtener resultados. Por su parte, al ejecutar el programa como cliente, este envía los siguientes parámetros al daemon:

- -c indica que se ejecutará como cliente.
  
- -L latitud de la emergencia.

---

<sup>6</sup>Eglib: [http://www.dii.uchile.cl/~daespino/EGLib\\_doc/main.html](http://www.dii.uchile.cl/~daespino/EGLib_doc/main.html)

<sup>7</sup><http://www.kernel.org/doc/man-pages/online/pages/man3/daemon.3.html>

- -l longitud de la emergencia.
- -S horario en que está ocurriendo la emergencia. (0,1,...,47)
- -R radio en torno a la emergencia en que es permitido andar en contra sentido del tránsito.
- -K puerto de conexión con el daemon.

Por su parte, si el programa se ejecuta en “boss mode” debe declararse los siguientes parámetros:

- -b se declara que se iniciará como boss
- -n especificar la ubicación del archivo con los nodos.
- -e especificar la ubicación del archivo con los arcos.
- -i especificar la ubicación del archivo con los arcos prohibidos.
- -s especificar la ubicación del archivo con las compañías.
- -I definir la IP en que se estará ejecutando el programa.
- -K definir el puerto que estará escuchando el programa.
- -z si vale 1 se restringe el grafo al área de Bomberos, 0 si no.

De esta forma, el programa recibe solicitudes de los clientes y entrega como respuesta el orden de las máquinas para atender la emergencia. Además, el programa entrega en formato XML el spanning tree asociado, por lo que es simple identificar las rutas seguidas por cada una de las compañías para atender la emergencia en cuestión.

El tiempo de ejecución de Dijkstra en la red de 662595 arcos y 325344 nodos es de apenas 0,074 segundos en promedio, lo que resulta en extremo rápido para las evaluaciones y los requerimientos de CBS para contar con un sistema eficiente y efectivo.

### **3.4. Creación de Prototipo para visualización**

Una vez creado el sistema tanto a nivel de construcción del grafo con velocidades en las vías así como también del algoritmo Dijkstra para encontrar el camino más corto dentro de dicha red, fue necesario crear un herramienta de visualización de dichas soluciones para validar las rutas e identificar potenciales errores en el algoritmo así como también observar el camino identificado y eliminar errores en la construcción del grafo.



De esta forma se hizo un desarrollo web<sup>8</sup> utilizando el API v3 de Google Maps utilizando programación en PHP y algunos elementos en Javascript (tanto para el uso del API como de aspectos webs básicos). De esta manera se llegó al resultado presente en la figura 3.17.

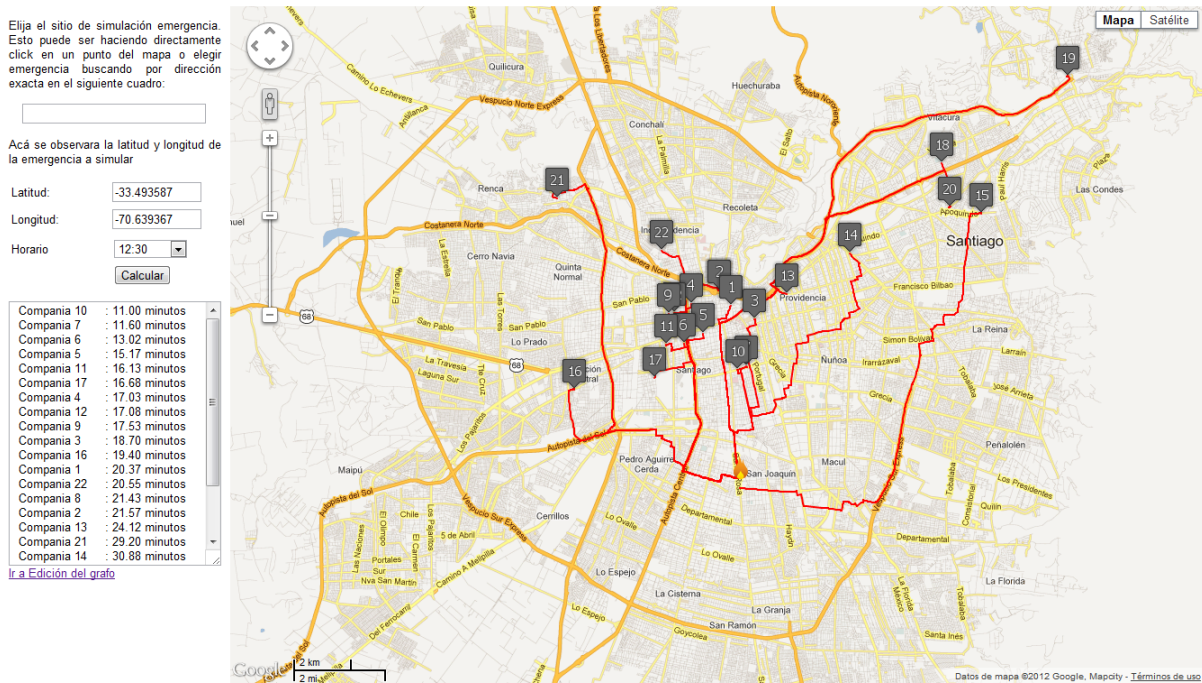


Figura 3.17: Interfaz de visualización de soluciones de caminos mínimos

En ella se puede apreciar una interfaz básica en la que se pueden simular emergencias de 2 maneras:

- Ingresar en el campo superior izquierdo la dirección exacta de la emergencia a simular.
- Hacer click sobre un punto del mapa para simular la emergencia a estudiar.

Una vez seleccionada la emergencia se puede elegir la hora que se desea simular para posteriormente hacer click en “Calcular” para ejecutar el programa de caminos mínimos y obtener los resultados que se aprecian en la figura 3.17.

Lo interesante de esta herramienta es que permite en forma gráfica identificar los caminos mínimos seguidos, lo que forma un paso crucial para la validación final del sistema por parte del Cuerpo de Bomberos de Santiago.

<sup>8</sup>Interfaz del sitio [http://www.dii.uchile.cl/~cbs/mapa\\_final.php](http://www.dii.uchile.cl/~cbs/mapa_final.php)

### 3.5. Sistema de edición del grafo

Debido a que el grafo fue construido en base a un sistema cartográfico que no estaba específicamente diseñado para crear un grafo dirigido de la ciudad de Santiago, los errores en el sentido de algunas calles así como inexistencia de otros ejes viales son abundantes. Por esto mismo y para poder mejorar este grafo se desarrolló una herramienta en PHP y Javascript que hiciera un poco más amigable la detección de errores potenciales. La interfaz se puede apreciar en la figura 3.18.

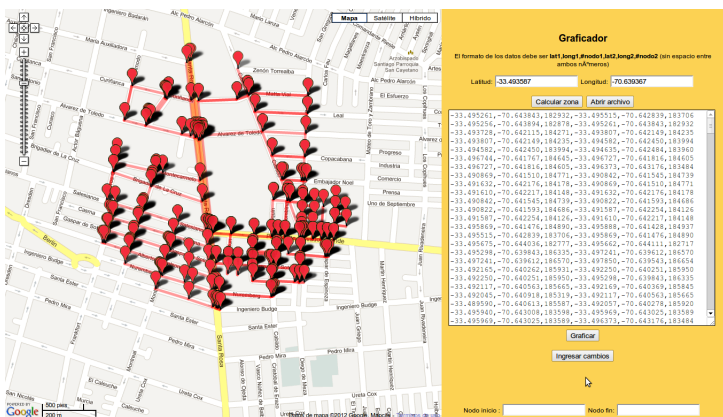


Figura 3.18: Interfaz de edición del grafo

En torno a un punto que uno seleccione en la interfaz se dibuja 1 kilómetro de radio conteniendo todos los nodos y arcos que se encuentran en dicha zona. Esto se grafica sobre el mapa de Google Maps por lo que es simple entender que calles pueden faltar o el sentido esperado que debe tener el grafo en dicha zona.

Si un error es identificado, como la ausencia de un arco, la interfaz permite seleccionar los ID's de dichos arcos y agregarlos con velocidades por defecto para así entregarle completitud a las calles de dicha zona. Este proceso se puede observar en la figura 3.19.

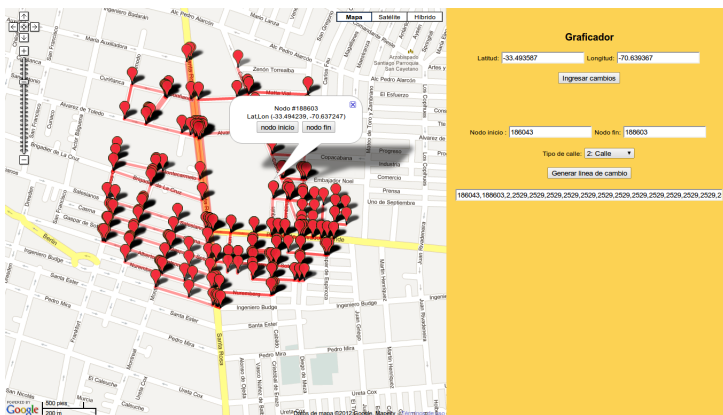


Figura 3.19: Proceso para arreglar el grafo

De esta forma, se permite la mejora continua y actualización del grafo ante el crecimiento y desarrollo de nuevos caminos dentro de la región dándole un alto nivel de gestión para mantenerlo siempre con información relevante.

### **3.6. Manuales de uso y documentación del sistema**

Debido a que la utilización de este sistema estará a cargo de los encargados dentro del Cuerpo de Bomberos de Santiago, es necesario que exista una adecuada documentación de los datos y resultados obtenidos así como de diseñar capacitaciones efectivas para así generar un correcto proceso de traspaso de conocimiento.

De esta manera, se realizó un proceso de documentación del contenido de cada uno de los archivos que forman parte del grafo, así como de las unidades en que se encuentran los datos. Adicionalmente se diseñaron video-tutoriales en los que se explican paso a paso los aspectos más importantes del funcionamiento general del programa de caminos mínimos así como también de la depuración y mejora del grafo ante errores potenciales detectados. Todo esto fue traspasado a las contrapartes del proyecto al interior del Cuerpo de Bomberos para así iniciar su proceso de capacitación y acercamiento a como funciona esta nueva forma de calcular los caminos mínimos. De igual manera se sostienen reuniones periódicas con los equipos encargados de la gestión del sistema para el apoyo en potenciales errores y mejoras.

## Capítulo 4

# Análisis de los tiempos de respuesta

Es importante entender que mejoras genera el sistema diseñado a la situación de CBS. De esta forma, se busca responder las siguientes preguntas:

1. ¿Cómo se han comportado históricamente los tiempos de despacho en el sistema actual de CBS?
2. ¿El despacho actual cumple con los estándares y exigencias internacionales en términos de tiempo de respuesta?
3. ¿Cómo se desempeña el despacho Dijkstra en comparación al actual Sistema de Despachos en términos generales?
4. ¿Existe variación significativa en cada zona entre el despacho CBS y el despacho Dijkstra?
5. ¿Qué factores explican la variación entre el despacho de CBS y el desarrollado por Dijkstra?
6. Calibrados los pesos en el modelo Dijkstra, ¿Cuánto mejor se desempeña CBS en sus tiempos de respuesta según los estándares internacionales?

En base a las preguntas anteriores se desarrolla el resto de este capítulo, iniciando por la evaluación del sistema en el estado actual para posteriormente ver como se comporta con el nuevo sistema de despacho y entender que otras mejoras se pueden hacer en el futuro.

### 4.1. Tiempos de respuesta en el sistema actual

#### 4.1.1. Datos históricos

Para poder estudiar los tiempos de respuesta se tuvo acceso a los datos históricos de emergencias que maneja el Cuerpo de Bomberos de Santiago. Esta base de datos contiene la información de todos los despachos durante el año 2010 y parte de 2011, alcanzando un total de 5005 alarmas a lo largo

de toda la muestra. La información contenida se puede apreciar en la figura 4.1, dentro de la cual es particularmente relevante la siguiente:

- **Motivo:** Está parametrizado y su detalle se puede apreciar en Anexos. Es importante rescatar el dato ya que dependiendo del tipo de emergencia es el tipo de carro que se envía.
- **Dirección:** Punto vital para rescatar la información. El proceso de recuperación de esta fue en muchas ocasiones manual por la baja integridad de la información presente en la base de datos que maneja actualmente CBS en su sistema de despacho.
- **Tono:** Registra el instante en que a la compañía se le informa que debe acudir a una emergencia.
- **6-3:** Compañía informa que ha llegado al sitio de la emergencia.
- **6-9:** Compañía informa que se retira de la emergencia.
- **6-10:** Material Mayor se encuentra de regreso en el cuartel.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Fecha	Hora	NumAts	Sector	Conductor	Maquina	Motivo	Comentario
2	01-01-2010	0:03:44	0	202		RX7	AD	Anular la Disponibilidad
3	01-01-2010	0:03:46	1	202		Detalle:10-4-1 Lesionados menor que 5.	10-4	Direccion:
4	01-01-2010	0:00:00	1	202	C2	B10	Tono	Nº Acto: 1
5	01-01-2010	0:00:00	1	202	C1	Q7	Tono	Nº Acto: 1
6	01-01-2010	0:05:46	1	202	C1	RX7	0-8	Por Salida del Q7
7	01-01-2010	0:04:12	1	202			0-1F	Alarma: 1/2010
8	01-01-2010	0:04:12	1	202			0-1F	Lugar inicio fuego:
9	01-01-2010	0:04:12	1	202			0-1F	Origen: RESCATE DE PERSONA
10	01-01-2010	0:04:12	1	202			0-1F	Origen de la Alarma: Particular ALEJANDRO MAGLU 08.509 25 00
11	01-01-2010	0:04:12	1	202			0-1F	Causa: COLISION DE VEHICULO -
12	01-01-2010	0:04:12	1	202			0-1F	Naturaleza del local: VIA PUBLICA P.P.U VEHI. PPU: VH-4467
13	01-01-2010	0:04:12	1	202			0-1F	Pisos: -
14	01-01-2010	0:04:12	1	202			0-1F	Poblacion:-
15	01-01-2010	0:04:12	1	202			0-1F	Calle: AV. PORTUGAL
16	01-01-2010	0:04:12	1	202			0-1F	Numero: F.446
17	01-01-2010	0:04:12	1	202			0-1F	Esquina: SANTA ISABEL
18	01-01-2010	0:04:12	1	202			0-1F	Depto:-
19	01-01-2010	0:04:12	1	202			0-1F	Cargo: Voluntario
20	01-01-2010	0:04:12	1	202			0-1F	Compañía a cargo: 10ª Compañía
21	01-01-2010	0:04:12	1	202			0-1F	Nombre a cargo: JORGE GOMEZ PEREZ
22	01-01-2010	0:04:12	1	202			0-1F	Acto: 10-4-1 Lesionados menor que 5.
23	01-01-2010	0:04:12	1	202			0-1F	Comuna: Santiago Sur
24	01-01-2010	0:05:35	1	202	C1	Q7	6-9	Nº Acto: 1
25	01-01-2010	0:05:37	1	202	C2	B10	6-3	Nº Acto: 1
26	01-01-2010	0:06:25	1	202	C2	B10	6-9	Nº Acto: 1
27	01-01-2010	0:06:25	1	202	C1	Q7	6-9	Nº Acto: 1
28	01-01-2010	0:06:41	0	503		BX13	AD	Anular la Disponibilidad
29	01-01-2010	0:06:12	1	202	C2	B10	6-10	
30	01-01-2010	0:07:14	1	202	10	B10	6-10Cuentav	5
31	01-01-2010	0:06:40	1	202			2-0	Despache al lugar Carro Bomba
32	01-01-2010	0:06:17	1	202	C1	Q7	6-10	
33	01-01-2010	0:07:18	1	202	7	Q7	6-10Cuentav	3
34	01-01-2010	0:07:18	1	202	C1	RX7		

Figura 4.1: Base de datos con despachos históricos de CBS

Rescatando los tiempos y los datos asociados a las 6 categorías anteriores se pudo construir una base de datos mucho más limpia y que permitió los análisis posteriores.

Las direcciones de las emergencias fueron geo-referenciadas creando un script en Javascript que hace uso del API v3 de Google Maps <sup>1</sup> con lo que se obtuvo las respectivas latitud y longitud. Debido a la baja integridad de los datos originales, del total de 5005 emergencias sólo se pudo obtener la geo-referencia automática de un total de 4938 de ellas, siendo el resto procesado manualmente. Es

<sup>1</sup> Google Maps API 3: <https://developers.google.com/maps/documentation/geocoding>

importante mencionar que por cada una de las emergencias se tiene el dato de que carros asistieron a atenderla, por lo que realmente se tienen 10468 despachos de carros a dichas emergencias. De esta manera se obtuvo una base de datos depurada como se observa en la figura 4.2.

ID	N_emergenc	lat	long	mediahor	compañía	tipo_cami	tiempo traslado	tipo_emergenc
1	2	-33,446653	-70,627193	1	13	B	225	10-0
2	2	-33,446653	-70,627193	1	10	B	228	10-0
3	2	-33,446653	-70,627193	1	7	Q	223	10-0
4	2	-33,446653	-70,627193	1	1	B	343	10-0
5	2	-33,446653	-70,627193	1	5	B	445	10-0
6	2	-33,446653	-70,627193	1	2	B	282	10-0
7	2	-33,446653	-70,627193	1	20	BX	696	10-0
8	2	-33,446653	-70,627193	1	8	Q	271	10-0
9	2	-33,446653	-70,627193	1	2	S	812	10-0
10	2	-33,446653	-70,627193	1	1	K	514	10-0
11	2	-33,446653	-70,627193	1	18	H	1209	10-0
12	2	-33,446653	-70,627193	1	11	B	648	10-0
13	2	-33,446653	-70,627193	1	7	M	304	10-0
14	2	-33,446653	-70,627193	1	3	K	711	10-0
15	2	-33,446653	-70,627193	1	1	LT	2006	10-0
16	2	-33,446653	-70,627193	1	2	K	432	10-0
17	2	-33,446653	-70,627193	1	1	X	787	10-0
18	3	-33,4063	-70,55972	3	20	B	113	10-0
19	3	-33,4063	-70,55972	3	18	B	448	10-0
20	3	-33,4063	-70,55972	3	15	Q	304	10-0
21	4	-33,42952	-70,650396	4	2	B	127	10-0
22	4	-33,42952	-70,650396	4	1	B	232	10-0
23	4	-33,42952	-70,650396	4	8	Q	125	10-0
24	4	-33,42952	-70,650396	4	9	B	402	10-0
25	4	-33,42952	-70,650396	4	22	B	388	10-0
26	4	-33,42952	-70,650396	4	13	BX	624	10-0
27	4	-33,42952	-70,650396	4	12	Q	414	10-0

Figura 4.2: Base de datos depurada con geo-referencias

Espacialmente, estos llamados se encuentran distribuidos como se aprecia en la figura 4.3, donde se observa que la cantidad de emergencias atendidas es particularmente intenso en el centro de la capital, lugar donde se encuentra la mayor concentración de compañías de CBS. De igual forma, de color negro se observan gran cantidad de zonas con baja cantidad de emergencias atendidas, principalmente en el sector hacia Recoleta, Las Condes y Vitacura existiendo un punto muy aislado de alta cantidad de emergencias en la parte oriente de la zona de cobertura (sector de Vitacura).

Con esta información ya ordenada y georeferenciada, se logra entender a grandes rasgos donde se distribuyen las emergencias dentro de área de cobertura de CBS, con lo que se puede pasar a realizar análisis más detallado en las próximas subsecciones.

Es importante tener en consideración las dotaciones de carros de cada una de las compañías, así como la naturaleza de las mismas. Básicamente, una compañía puede ser de tipo “bomba (B)” o tipo “carro (Q)”. Si es de tipo **B** sus equipos son especialmente orientados a los típicos carros que llevan agua a una emergencia. Si son de tipo **Q**, sus carros son principalmente porta-escalas o de rescate en altura. El detalle de las compañías y su tipo se puede encontrar en el Anexo E.



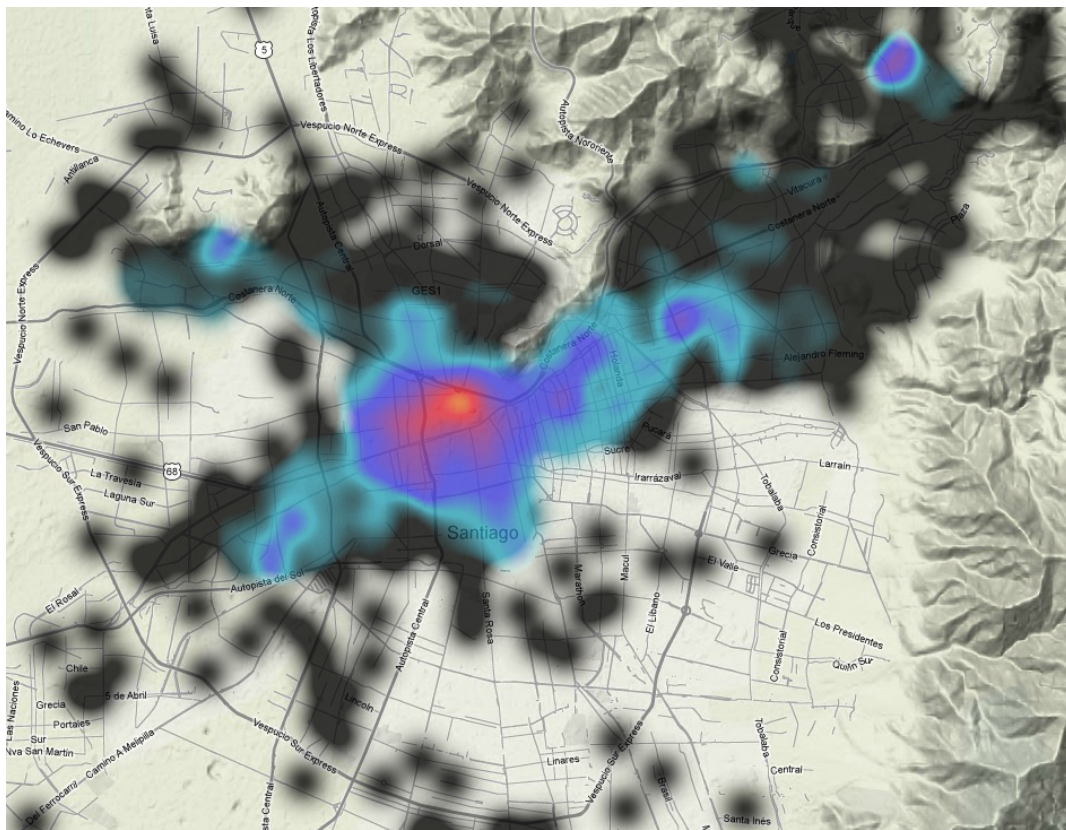


Figura 4.3: Distribución emergencias CBS durante 2010 y 2011

#### 4.1.2. Análisis preliminares

Como se comentaba en el capítulo de Marco Conceptual, a nivel mundial son diversas las compañías de Bomberos que han definido sus estándares de servicio en base a los establecidos por NFPA 1710 (que la primera respuesta llegue a la emergencia en menos de 5 minutos el 90% de las veces)<sup>7</sup>. Si se aplica dicho estándar a los datos que se tienen de los despachos de CBS, se observa en primera instancia que en promedio, por tipo de emergencia, todos están incumpliendo el estándar exigido con excepción de 10-4 (Llamado de rescate vehicular) y 10-13 (Llamado a atentado terrorista), este último con muy pocas ocurrencias en los datos históricos. Es importante aclarar que la tabla 4.1 muestra los datos para la primera respuesta a la emergencia. Para los posteriores análisis, sólo se utilizarán las emergencias de tipo 10-0 (Llamado Estructural), 10-1 (Llamado de Vehículos), 10-3 (Llamado a Rescate de Emergencia) y 10-4 (Llamado a Rescate Vehicular) ya que estas son las contempladas en el estándar de NFPA 1710 y son las de mayor ocurrencia dentro de CBS. Considerando sólo las mencionadas, el tiempo promedio se reduce a 5,6 minutos, lo que aun sigue por encima de los 5 minutos exigidos.

Si se estudia más en detalle el conjunto de emergencias, se puede apreciar que existen sutiles diferencias de la primera respuesta a través de los diferentes horarios del día, representado en la

Tipo de emergencia	Promedio Traslado (mins)
10-0	5,1
10-1	5,4
10-2	6,7
10-3	6,3
10-4	4,9
10-5	6,2
10-6	6,0
10-7	6,1
10-8	6,0
10-9	12,7
10-10	9,7
10-12	23,1
10-13	3,9
10-15	5,0
<b>Total general</b>	<b>6,4</b>

Tabla 4.1: Promedios, en minutos, por tipo de emergencia con datos históricos

figura 4.4. Acá se aprecia algo interesante: En general es relativamente homogéneo el tiempo de respuesta, siendo algo superior en los casos de horario bajo, esto podría explicarse por 2 factores: una tendencia de ser más “conservadores” en el tipo de calles que eligen para el despacho o errores en la inclusión de dicha información en la base de datos.

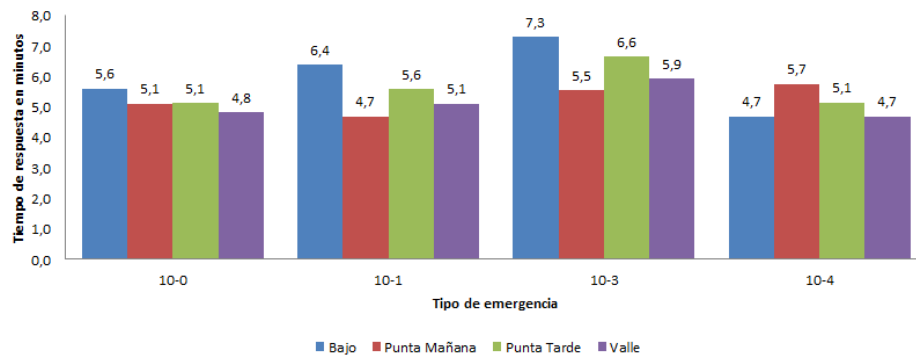


Figura 4.4: Tiempo de respuesta según horario del día.

En la tabla 4.2 se puede observar el cumplimiento del estándar NFPA 1710 a nivel general por cada una de los tipos de emergencia analizados en cada horario del día. La exigencia que el 90 % de las veces se atienda la emergencia en menos de 5 minutos (4 minutos de traslado más 1 minuto para el despacho) está muy lejos de cumplirse. En el tipo de emergencia más común de CBS, 10-0, en promedio se encuentra que en el 63,7 % de las veces cumplen dicha restricción. En los otros casos la situación es incluso más crítica, estando en promedio 58,8 % 41,9 % 60,8 % para 10-1, 10-3 y 10-4 respectivamente. Esto comienza a entregar luces sobre los problemas que tiene el sistema



actualmente operativo en CBS.

Tipo	Bajo	Punta Mañana	Punta Tarde	Valle	General
10-0	63,1 %	71,9 %	56,3 %	63,6 %	63,7 %
10-1	49,0 %	64,0 %	61,1 %	60,9 %	58,8 %
10-3	43,2 %	41,3 %	35,1 %	48,0 %	41,9 %
10-4	66,0 %	56,3 %	57,0 %	63,8 %	60,8 %

Tabla 4.2: Porcentaje de emergencias que compañía con primera respuesta se encuentra por debajo de 5 minutos.

Si se profundiza en el punto anterior, para la primera respuesta, los tiempos se pueden agrupar como se aprecia en la figura 4.5. Principalmente, los datos se encuentran concentrados en torno a los 210 y 420 segundos, con una media de 382,4 y una desviación 344,3. En particular, el intervalo de mayor ocurrencia es el que contiene las llegadas entre 210 y 280 segundos pero, debido a la alta dispersión de los datos, sólo representa al percentil 45 de la muestra. Por lo mismo, el percentil 90 se encuentra por los 635 segundos.

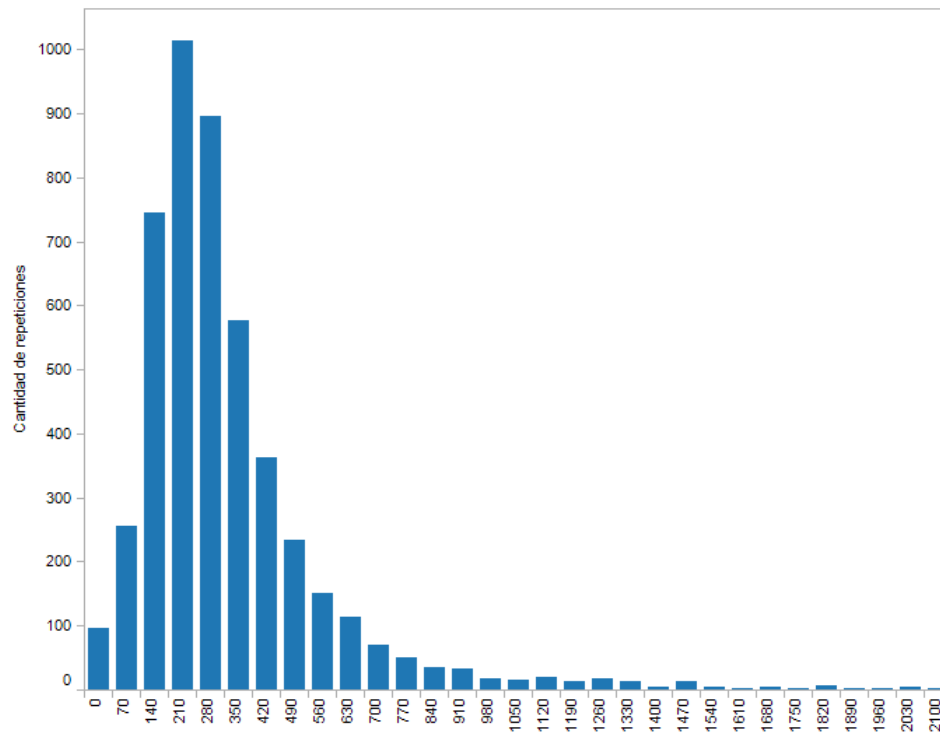


Figura 4.5: Histograma para los tiempos de respuesta de la primera máquina para los tipos de emergencia en estudio.

Si se trata de entender que distribución siguen estos datos, se aprecia que el mejor ajuste se logra con la distribución Lognormal. Esta consigue un error cuadrático de 0,0141 al contrastarlo con la distribución  $-0,001 + \text{LNGN}(390, 313)$ . Además, si se realiza un test chi-cuadrado donde por hipótesis nula se tiene que la serie de datos sigue una distribución Lognormal de los parámetros antes

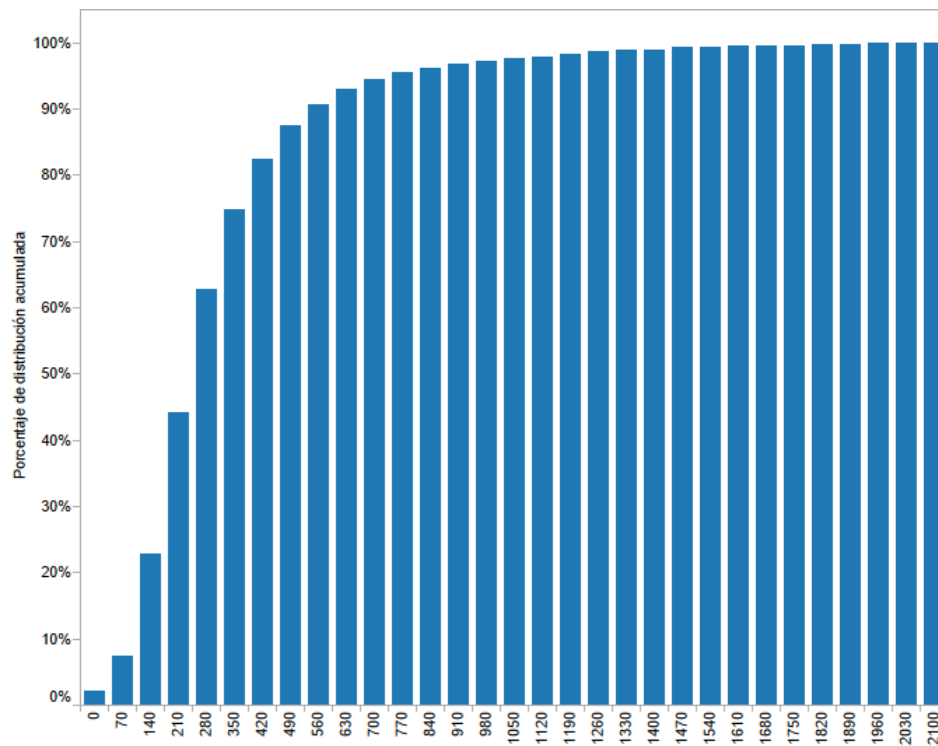


Figura 4.6: Distribución acumulada de los tiempos de respuesta de la primera máquina para los tipos de emergencia en estudio.

comentados, se llega a la conclusión que se acepta dicha hipótesis ya que el p-valor es 0,00435 menor al nivel de significancia exigido, para el resto de las distribuciones testeadas se puede apreciar en la tabla 4.3. Adicionalmente, si se realiza el test de Kolmogorov-Smirnov se llega a la misma conclusión. Este test es similar al de chi-cuadrado que es utilizado para determinar la bondad de ajuste entre 2 muestras de datos siendo ambas desconocidas sus distribuciones, o en este caso, queriendo entender si una muestra desconocida se ajusta a una distribución dada  $(-0,001 + \text{LNGN}(390,313))$ . Los resultados en detalle de aplicar este test estadístico se puede apreciar en más detalle en la figura 5.5 en Anexos. Si se aprecia la figura 4.6 se puede observar que la función acumulada sigue claramente la tendencia de una distribución Lognormal, lo que ratifica más aún los test antes desarrollados.

Si se analiza en particular cada una de las emergencias (figura 4.7), se aprecia que en general las zonas centrales del área de cobertura se encuentran cumpliendo el estándar, mientras las áreas hacia Providencia, Las Condes y Vitacura, se encuentran con peores estándares en términos de tiempo de respuesta. Esto puede explicarse debido a la cantidad de compañías ubicadas en los sectores centrales de Santiago lo que favorece a la existencia de mayores alternativas al momento de despachar. Adicionalmente, la menor cantidad de compañías y alternativas para atender una emergencia en zonas extremas del grafo dificultan tener tiempos de respuesta reducidos.

Lo anterior se valida al entender la distribución de las llegadas en función de la distancia recorrida

Función	Error cuadrático
Lognormal	0,0141
Beta	0,0166
Gamma	0,0169
Erlang	0,022
Weibull	0,0358
Normal	0,0562
Exponential	0,0718
Triangular	0,111
Uniform	0,139

Tabla 4.3: Funciones de distribución contrastadas y sus errores cuadráticos asociados

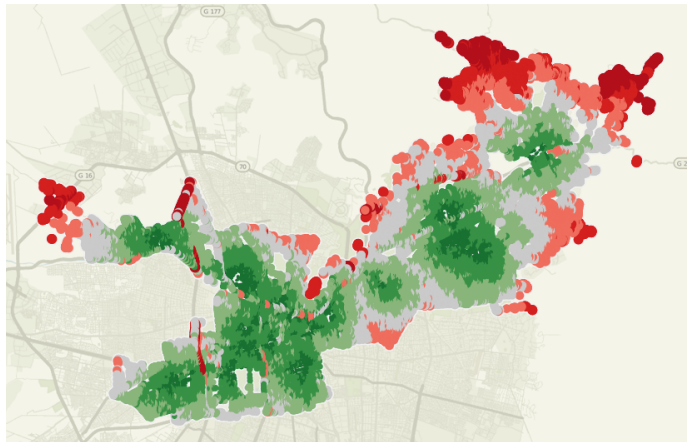


Figura 4.7: Cumplimiento estándar NFPA 1710 a través del área de Bomberos. Los colores distribuyen desde el verde oscuro (cumplen ampliamente el estándar) hasta el rojo oscuro (no cumplen ampliamente el estándar)

para atender dicha emergencia. Si se aprecia la figura 4.8, para atender emergencias en las macrozonas 800 y 900, la primera máquina asignada tiene que recorrer cerca 7.5 kilómetros para llegar. En el caso de la macro-zona 900 resulta interesante ya que su ubicación no es tan alejada del centro de la ciudad como en el caso de las macro-zonas 800. Por otra parte, la primera máquina que debe atender las macro-zonas 100 y 200 debe recorrer una distancia significativamente menor que en el caso anterior, lo que repercute en el tiempo promedio de traslado. En el caso de macro-zonas un poco más alejadas del centro del grafo (300,400 y 600) se aprecia que tienen una actividad intermedia de llamados recibidos así como también las distancias recorridas no son extremas. Juega a favor de ellas la relativa cercanía a las alternativas presentes en la región céntrica de la ciudad. Interesante es el caso de la macro-zona 500, la que tiene una alta cantidad de emergencias pero de igual forma mantiene un bajo tiempo de traslado y corta distancia recorrida. Esto se debe a que contiene 3 compañías de CBS (13 y 14, además de compañía 3 que está en el borde de la macro-zona) por lo que el área atendida por compañía es significativamente menor a lo ocurrido en en macro-zona 600

(compañías 20 y 15) y macro-zona 700 (sólo contiene la compañía 18).

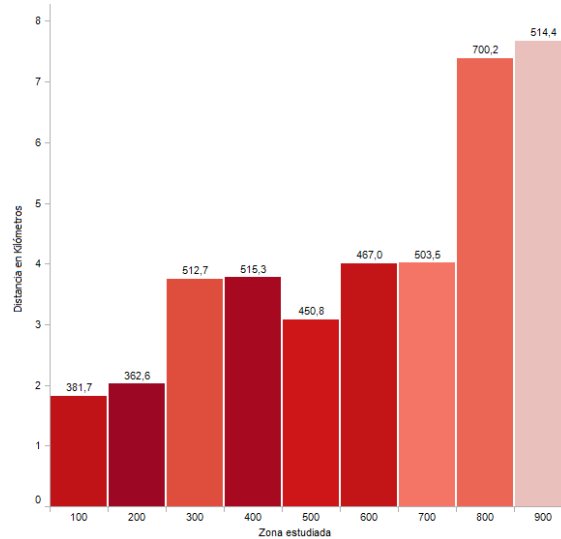


Figura 4.8: Distribución de las emergencia según distancia y zona atendida. El color esta dado por la cantidad de eventos en dicha zona, la altura de las barras por la distancia promedio (en Km.) y los textos son el tiempo promedio(en segundos) en atender la emergencia

Si se estudia lo anterior por cada una de las compañías, se observa lo que está en la figura 4.9. Existen diferencias bastante grande entre las compañías al momento de elegir las como despacho. Primero, se aprecia que las compañías 5, 9 y 19 son las despachadas en menos ocasiones. Estas compañías son de tipo “B” que corresponde a una bomba. Observando el mapa presentado anteriormente en 1.1 se entiende que la compañía 19 se ubica en un sector de baja cantidad de emergencias lo que explica su relativa baja utilización, explicación que no se puede extender a las compañías 5 y 9, que deben su baja utilización por factores externos a la ubicación o intensidad de emergencias de la zona.

Por otra parte, las compañías que tienden a estar alejadas de otras y en puntos extremos de la zona CBS presentan tiempos de viajes y distancias recorridas relativamente bajos. Esto se puede observar en las compañías 16 y 21 (ambas compañías con carros bomba), las que se ubican 2° y 7° en menor distancia recorrida.

Si se estudian las compañías tipo “B”, estas recorren en general distancias por sobre el promedio de la muestra aunque presentan bastante dispersión. En el caso de las compañías 6 y 7 estas se encuentran de la mitad hacia abajo en distancia recorrida, por el contrario las compañías 8,12 y 15 se encuentran en la parte más alta del gráfico. Si se estudian por ubicación, las 6 y 7 se encuentran en la macro-zona 200, que como se analizó antes, presenta despachos en promedio de corta distancia, en contraposición a las compañías 8 y 15 (macro-zona 400 y 600 respectivamente). El caso de la compañía 12 es diferente de explicar ya que presenta una alta distancia recorrida así como también

alta utilización pero se encuentra dentro de la macro-zona 100, lo que lleva a pensar que es una decisión de CBS el que realice traslados extensos.

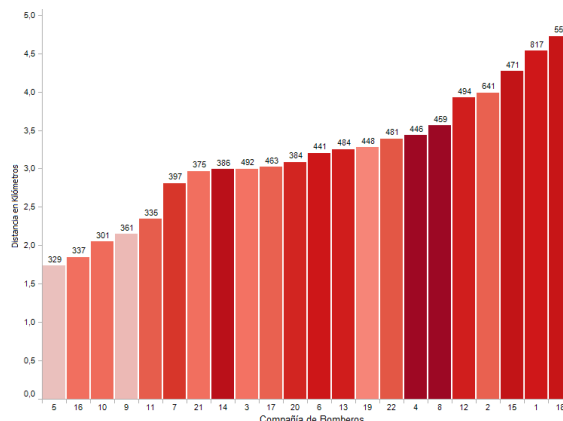


Figura 4.9: Distribución de las emergencia según distancia y compañía que la atiende. El color esta dado por la cantidad de eventos en dicha zona, la altura de las barras por la distancia promedio y los textos son el tiempo promedio en atender la emergencia

Asumiendo que la ubicación de las compañías es fija, la mejor alternativa es definir cual es la más adecuada para despachar en cada periodo y llamado de emergencia. De esta forma, se entiende que se busca homogeneizar la distancia recorrida por cada compañía asi como también conseguir que la primera respuesta al incendio sea la mínima posible. Esta última característica es la métrica de desempeño principal que se usará para medir la calidad del despacho Dijkstra en contraste con la situación actual de CBS.

## 4.2. Validación del sistema de despacho propuesto

El primer punto de la validación corresponde a entender como son las velocidades resultantes del algoritmo de proyecciones en comparación a lo que se enfrenta CBS a diario en las calles de Santiago. De esta forma, se propone una forma de calibrar y llegar a un valor que permita hacer las velocidades comparables en ambos sistemas y tomando esto se puedan realizar los análisis de las siguientes secciones. Con dicha calibración, se correrán test adicionales para definir cuál es la mejora que Dijkstra entrega a la red de CBS.

### 4.2.1. Evaluación del Factor Bomberos

Este indicador busca rescatar cuanto difiere el tiempo de traslado a una emergencia entre Dijkstra, el cual considera velocidades por defecto y datos de Transantiago, y la realidad observada en los despachos de CBS, el cual toma el tiempo declarado por Bomberos en sus bases de datos para calcular el tiempo de respuesta. De esta forma se puede saber si los tiempos de traslados obtenidos

en el grafo distorsionan en alguna medida la respuesta entregada o si se distribuyen homogéneamente a través del grafo no siendo un problema significativo en el orden de despacho. Es importante tener en cuenta que existe un supuesto bastante fuerte al hacer esta comparación: Dado que CBS no contaba a la fecha de este proyecto con GPS en los carros, es imposible conocer la trayectoria seguida por un carro para atender una emergencia. Debido a la necesidad de comparar los tiempos y encontrar un factor correctivo, se asumirá en general que ambos caminos son similares y podría aproximarse el camino real de CBS por el de Dijkstra.

Si se compara en base a los horarios del día, se obtiene lo que se aprecia en el gráfico de la figura 4.10. En este se aprecia que en promedio (independiente del lugar de la emergencia), en horarios de baja congestión (desde el periodo 1 al 13 y desde del 45 al 48, que corresponden a las horas 0:30 hasta 6:30 y desde 22:30 hasta 0:00) se observa que tanto Dijkstra como CBS tienen tiempos promedios bastante similares entre si, con diferencias que fluctúan entre el -22.1% y 11.7%. En todos los otros horarios observados la diferencia es superior, entregando como primer indicio que en horarios de libre circulación el desplazamiento de CBS es similar a lo propuesto por Dijkstra. Esto puede estar fuertemente explicado, tal y como se comentó en la sección de Perfiles de velocidad, debido a que en los horarios de baja congestión la cantidad de buses de Transantiago circulantes es bastante inferior a los horarios de mayor congestión por lo que la velocidad resultante es principalmente explicada por las velocidades por defecto usadas para la generación de los pesos de los arcos.

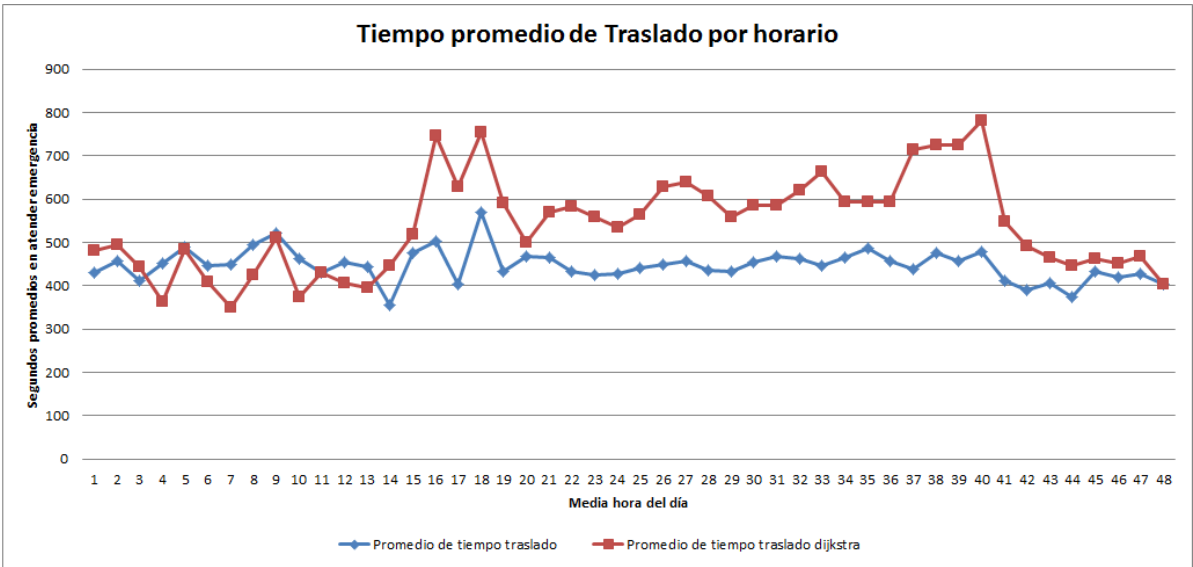


Figura 4.10: Tiempo de traslado por media hora del día comparando el promedio

De esta manera, es esperable que en estos horarios ambos tiempos de respuesta tiendan a converger ya que la velocidad considerada en ambos casos es mayoritariamente de libre circulación y es más probable que ambos tiendan a circular por caminos que incluyan principalmente avenidas y

autopistas, para dejar en un segundo plano las calles o caminos de menor envergadura. A medida que el día avanza dicha ausencia de buses desaparece y el tiempo para recorrer cada arco tiende a estar altamente explicado por la velocidad de los buses que circularon a través de él y por lo que se aprecia, al menos en términos agregados, los tiempos de respuesta de Dijkstra son superiores a los tiempos declarados por CBS. Esta diferencia se vuelve bastante significativa en horarios punta, observable en la medias horas 16-18 (7:30-8:30) y las medias horas 38-40 (18:30-19:30) lo que hace pensar que los carros de CBS pueden alcanzar velocidades superiores a las de los buses de Transantiago. Esta diferencia porcentual se puede apreciar en la figura 4.11.

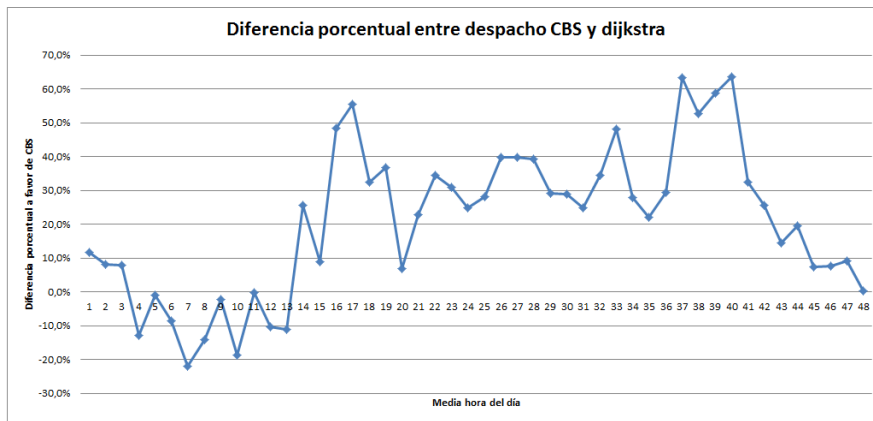


Figura 4.11: Diferencia porcentual entre despacho Dijkstra y real

Similarmente, si se observa esta diferencia espacialmente, se pueden llegar a mejores análisis. En primera etapa, y observando el diseño que CBS tiene actualmente de sus sistema de despacho basado en zonas de cobertura, se puede observar como varía el tiempo Dijkstra y el declarado actualmente. En la figura 4.12 se observa donde están distribuidas las zonas dentro de la Región Metropolitana.

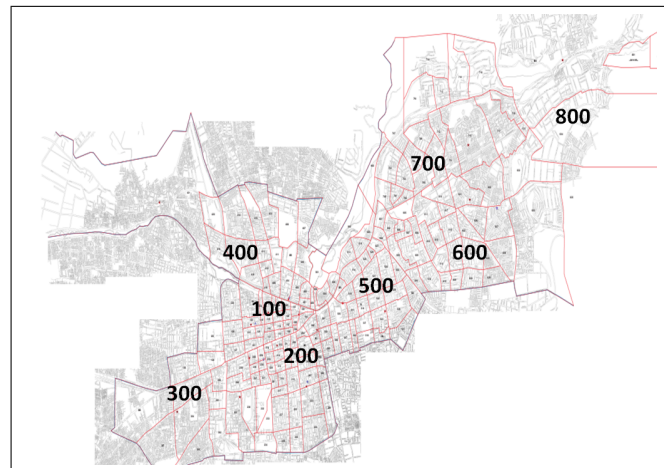


Figura 4.12: Distribución de las zonas de CBS en la región

De esta forma, si se estudia al variación por zonas y se correlaciona con la métrica anterior del

horario del día, se obtienen los resultados expuestos en la tabla 4.4.

macro zonas	Diferencia
500	138,97 %
900	133,35 %
600	106,77 %
800	84,70 %
700	42,44 %
100	42,13 %
200	39,97 %
300	38,94 %
400	33,47 %

Tabla 4.4: Diferencia entre Dijkstra y emergencias reales por macro-zona

Por otra parte, si se analiza la distancia recorrida por los carros para atender la emergencia y como esto repercute en la diferencia entre los tiempos de despacho, se puede observar en la figura 4.13, donde el eje horizontal es los metros recorridos por el carro despachado para la emergencia y el eje vertical representa la diferencia entre Dijkstra y el despacho CBS (si aumenta es que Dijkstra entrega un valor mayor). Se puede apreciar que no es claro poder destacar de estos datos una correlación clara ya que incluso en distancias cortas (donde se aprecia menor varianza) los datos presentan valores de diferencia porcentual altos. Al tratar de hacer un ajuste lineal no se logró obtener un modelo que explicara bien los datos. Por otro lado, la línea roja representa la aproximación logarítmica de los datos, la que entrega con un  $R^2$  de 0,58 el siguiente modelo:

$$diferencia = -1,7136 + 0,2367 * \ln(distancia) \quad (4.1)$$

El ajuste logarítmico tiene un alto  $R^2$ , lo que denota que existe un alto poder explicativo por parte de la distancia a la diferencia entre los tiempos de Dijkstra y CBS pero así también, se puede apreciar que la varianza de estos datos es bastante alta, por lo que existen factores relevantes en la estimación que no se están rescatando en dicha relación.

Por lo mismo, si se estudia este efecto por la compañía que atiende la emergencia, se observa lo que está en la tabla 4.5. La diferencia es mayor en el caso de que el despacho sea atendido por la compañía 10, seguido por la compañía 8 y 15, estas 2 últimas máquinas de tipo **Q**. Por su parte, si el despacho es realizado por alguna de las compañías ubicadas en las zonas centrales del área de CBS, la diferencia no es tan notoria como en el caso anterior. Los mínimos valores se obtienen cuando el despacho es atendido por compañías ubicadas en zonas donde la densidad de compañías es menor, lo que es el caso de la compañía 16, 17 y 22.

Dado que la compañía elegida para el despacho depende de la zona donde es la emergencia, no



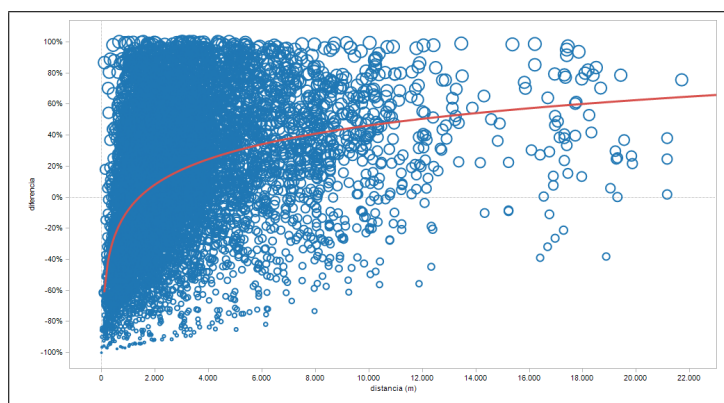


Figura 4.13: Diferencia porcentual entre despacho Dijkstra y real comparado con la distancia recorrida por la compañía que atiende la emergencia

es posible diferenciar el efecto de cada una de las variables ya que están altamente correlacionadas dada su dependencia. De todas formas, y dada la construcción del sistema de despacho vigente en CBS, el efecto de ambos factores es difícil de eliminar, lo que para la regresión se utilizaron ambas variables y se analizó su real correlación y factor predictivo.

Compañía	Diferencia	Compañía	Diferencia
10	175,0 %	21	55,2 %
15	105,2 %	12	52,9 %
1	95,3 %	5	43,5 %
8	92,0 %	2	41,6 %
14	83,8 %	20	41,5 %
13	82,6 %	18	33,5 %
4	71,8 %	11	33,4 %
7	68,1 %	9	24,5 %
3	62,0 %	17	21,1 %
19	61,0 %	22	12,0 %
6	57,1 %	16	8,8 %

Tabla 4.5: Diferencia entre Dijkstra y tiempo CBS por compañía despachada

Los puntos anteriores dan indicios de que cosas contribuyen a generar la diferencia entre los tiempos de CBS y Dijkstra. De esta manera, los factores que podrían incidir al explicar el tiempo Dijkstra se pueden enumerar como los siguientes:

- Tiempo CBS
- Horario del día
- Zona de la región de cobertura
- Distancia recorrida

- Compañía que atiende la emergencia

Tomando estos factores se puede correr una regresión lineal del tipo:

$$tiempo_{a,i,j,k} = \beta_0 + \beta_1 * t_{i,j} + \beta_2 * zona + \beta_3 * distancia_{i,j} + \epsilon_0 \quad (4.2)$$

Donde  $tiempo_{a,i,j,k}$  es el tiempo de respuesta de Dijkstra a la emergencia en  $a$  que es atendida por la compañía  $i$  en el horario  $j$  (con  $j$  agrupado en valle noche, punta mañana, valle día, punta tarde) en la zona  $k$ ,  $t_{i,j}$  es el tiempo de Dijkstra para la compañía  $i$  en el horario  $j$ . Esta variable realmente se expresa como  $\sum_{i=1} (t_i * e_i)$  donde  $e_i$  es una variable dummy que vale 1 si la compañía  $i$  atiende la emergencia. Además,  $zona$  es el área del CBS donde ocurre la emergencia, siendo nuevamente una variable dicotómica que indica 1 si la emergencia  $a$  es en dicha zona (estando las zonas agrupadas en 100,200,...,900) y  $distancia_{i,j}$  es la distancia dentro del grafo recorrida por el carro  $i$  en el horario  $j$  para llegar a la emergencia en  $a$ . Dicha variable está parametrizada tal que puede caer en los intervalos “0 hasta percentil 33”, “percentil 33 y percentil 66” o “superior a percentil 66”. Se decide eliminar la variable “compañía que atiende la emergencia” ya que esta explicada por la zona en que ocurre la emergencia, por lo que incluir una de las 2 variables entrega el mismo resultado predictivo.

Para realizar el tipo de regresión antes comentada, se tomó una muestra de 5234 de los 10468 despachos disponibles para hacer el análisis y posteriormente se toma el resto de los datos para verificar la regresión obtenida. El resultado de este conjunto de variables se encuentra expresado en la figura 4.14. El  $R^2$  de esta regresión es 65.4%, y las variables representadas son en su mayoría significativas con excepción de las zonas 900 y 400. En la zona 900 principalmente por los pocos despachos a dicha macrozona (apenas 5 en toda la muestra), lo que imposibilita tener datos representativos. El intercepto de esta regresión corresponde al caso de una emergencia en zona 200 con la compañía elegida recorra una distancia sobre el percentil 66 y ocurra en horario valle noche.

Dado esto, se puede entender en que medida afectan cada uno de los factores antes comentados en el tiempo que Dijkstra reporta a los despachos. En base a eso, se puede decir con seguridad estadística que una emergencia que sea atendida por una compañía que le tome una distancia corta en horario valle día en la zona 700 reportará tiempos bastante inferiores a una emergencia atendida por una compañía que recorra distancias largas en horario punta tarde en la zona 800.

En base a los puntos anteriores, si es que se desea ajustar el valor del tiempo Dijkstra al valor del tiempo de CBS, se debe tomar en consideración la distancia recorrida, la zona y el horario en que ocurre la emergencia. Este ajuste se realiza utilizando las variables significativas encontradas para el caso anterior y evaluarlos para cada una de las emergencias de la muestra y se puede obtener

Modelo		Coeficientes
		B
1	(Constante)	747,242
	tiempo traslado	,183
	0-percentil3	-648,724
	percentil33-percentil66	-453,667
	punta_manana	41,924
	valle_dia	26,057
	punta_tarde	80,176
	zonas100	20,998
	zonas300	-20,153
	zonas400	-63,732
	zonas500	50,204
	zonas600	36,493
	zonas700	-68,562
	zonas800	208,448
	zonas900	137,410

a. Variable dependiente: tiempo traslado dijkstra

Figura 4.14: Variables del modelo de regresión lineal que busca explicar el tiempo Dijkstra en base a diversos factores.

el tiempo Dijkstra en base a los datos de tiempo CBS que se dejaron fuera de la muestra.

Una vez ajustados los tiempos en base a la idea anterior, se puede apreciar que las diferencias entre ambos tiempos se reduce significativamente. En la figura 4.15 al ver como cambia a lo largo del día, ya no se aprecian las diferencias tan altas que se apreciaban en al inicio de esta sección. De esta manera, los tiempos entre ambos sistemas son comparables y a partir de este punto se puede tomar el tiempo Dijkstra corregido para realizar los análisis de rendimiento de compañías y sus despachos en las próximas secciones.

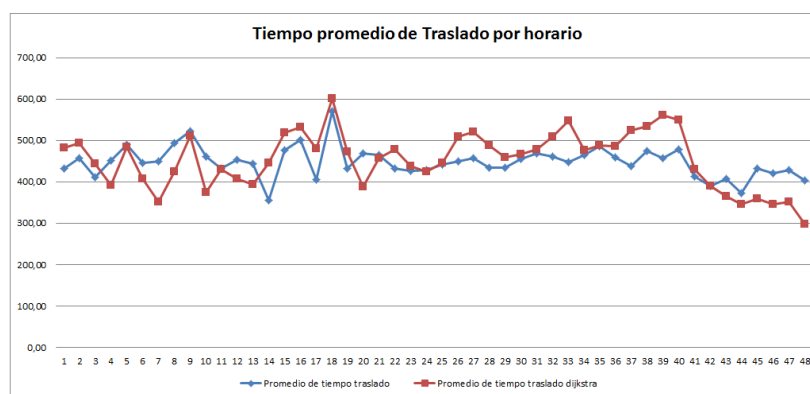


Figura 4.15: Tiempo de traslado cada media hora comparando el promedio con tiempo corregido

Adicionalmente, si se compara el despacho realizado por Dijkstra con los tiempos iniciales creados (obtenidos con Transantiago) y estos nuevos tiempos generados (corregidos con el factor bomberos), se aprecia que el orden de despacho sugerido no cambia significativamente a través de la red. Esto se puede observar en la figura 4.16 en la que se aprecia que principalmente los cambios de despacho ocurren en sectores extremos de la zona de CBS, esto debido potencialmente a que al recorrer altas distancias es más factible que se vean más afectadas al momento de atender una emergencia. De todas maneras, al ver esto en términos agregados, el despacho cambia sólo un 12,6% de las veces siendo en el 87,4% restante idéntico en el orden las 22 compañías de CBS.

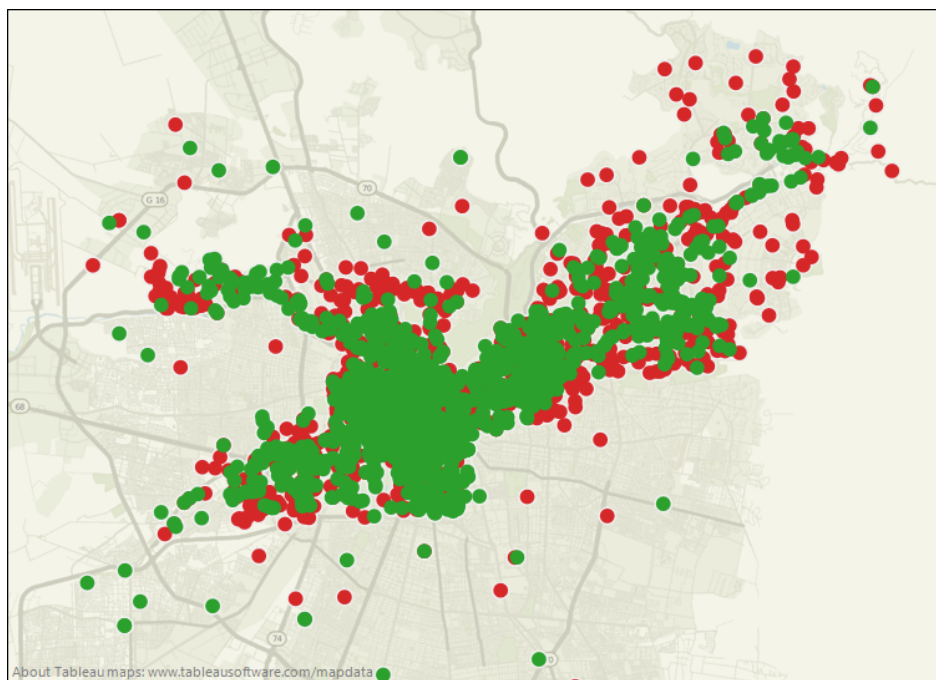


Figura 4.16: Cambio en despacho Dijkstra después de corrección de tiempos CBS. Verde corresponde a todos los puntos donde el orden de despacho de las 22 compañías es exactamente igual. En rojo si es que alguna de las compañías cambió su orden después de la aplicación del factor bombero

Si se entra en detalle de este 12,6%, se puede apreciar que para la primera respuesta no varía tan dramáticamente, tal y como se muestra en la figura 4.17. En el 56,7% de las veces el cambio simplemente provocó que la primera respuesta pasara a estar en segunda posición con los nuevos tiempos. En un 28,6% la primera respuesta bajó hasta la tercera posición y sólo en un 14,7% de las veces bajó más allá del cuarto puesto. De esta forma, el cambio en posiciones es relativamente bajo con respecto a la corrección, lo que refuerza la idea de un resultado robusto en los tiempos de respuesta.

De esta manera, la utilización de este factor en los análisis de las próximas secciones hará que los tiempos tanto CBS como Dijkstra puedan ser representativos de la realidad que enfrenta el Cuerpo

en las calles de Santiago y adicionalmente entrega una única base de comparación al momento de traducir los ordenes de despacho en tiempos de respuesta.

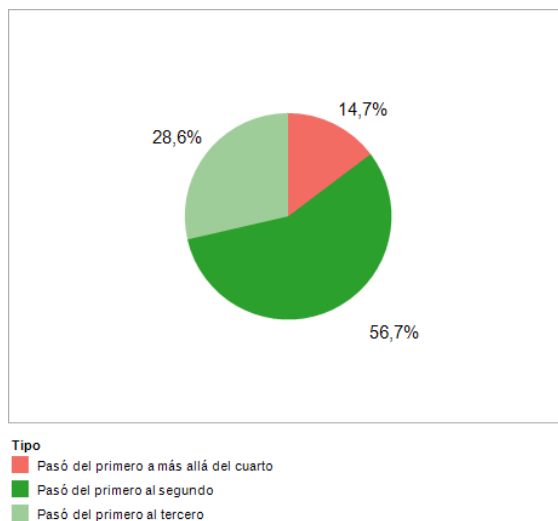


Figura 4.17: Variación despacho debido a corrección de tiempos Dijkstra.

#### 4.2.2. Diferencia en orden de despacho entre despacho actual y Dijkstra

Una vez entendido como varía el factor bombero temporal y espacialmente y aplicado para corregir los tiempos obtenidos, es interesante hacerse la siguiente pregunta: Si se evalúa todo en tiempo Dijkstra (aplicando el factor bombero), al comparar el despacho CBS para una emergencia con el despacho entregado por el algoritmo ¿Cuán alejados están en posiciones?. Si comparo el tiempo de llegada de la primera máquina despachada tanto por Dijkstra como el sistema actual ¿Cuánto ahorro potencial genera Dijkstra?.

Para poder responder estas preguntas, se decidió simular un tipo de emergencia denominada por CBS como “10-0”, la que corresponde a un “Llamado Estructural” (39,3% de los llamados son de este tipo), el que según la pauta de despacho debe ser atendido por **2** carros Bomba (B) y **1** porta-escala (Q)<sup>2</sup>. No existen compañías que tengan bombas y porta-escala, así que el análisis de un despacho se puede hacer separado por tipo de carro. El orden de CBS se obtiene de la clásica “Pauta de Cuarteles” que utiliza CBS para las zonas de atención. Así, para cada nodo perteneciente a la zona de CBS se ejecuta el algoritmo Dijkstra en 7 diferentes horas representativas del día (00:30, 04:00, 07:30, 11:00, 13:30, 17:00 y 20:30) y se compara el orden resultante con respecto a lo que existe en la pauta. En esta etapa, el resultado es simplemente binario: Si el orden de los 2 primeros B y del primer Q es igual tanto por Dijkstra y la Pauta de Cuarteles entonces este punto se catalogará como

<sup>2</sup>Existen diferentes subtipos de 10-0 con cambios en el tipo de material mayor enviado, pero para mantener el ejemplo genérico se prefirió no diferenciar dicho tipo de emergencia.

“Despacho Idéntico”, en caso contrario, si es que alguno de los 2 primeros Q resultantes de Dijkstra o el primer B es diferente al declarado por la Pauta de Cuarteles, entonces dicho punto caerá en la categoría de “Despacho Distinto”. El tipo de carros con que cuenta cada compañía se puede observar en la tabla 5.1 en Anexos E.

El resultado de esta simulación se aprecia en la figura 4.18, donde el color verde corresponde a los puntos donde el despacho es igual y rojo si es diferente. Se puede observar que en el sector central y poniente de la Región Metropolitana es donde se concentra principalmente las diferencias de despacho. Dichas diferencias se vuelven nulas hacia el sur-poniente y oriente de la región. Esto último se puede explicar debido a la baja cantidad de opciones de despacho en dicho sector de CBS.

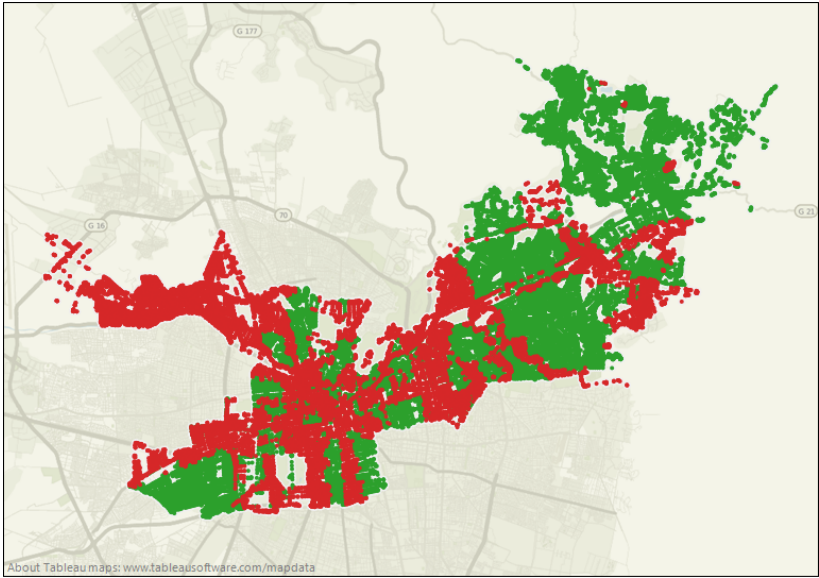


Figura 4.18: Distribución de la diferencia entre el despacho de CBS y Dijkstra a través de la Región Metropolitana. De color rojo el despacho es distinto, de color verde el despacho es el mismo.

En términos agregados se puede apreciar que el 65,4 % de todos los puntos de la región mantienen el despacho en Dijkstra con respecto a la situación de la pauta de Cuarteles en todas las horas representativas estudiadas. Resulta interesante entender cómo se distribuye el 34,6 % restante.

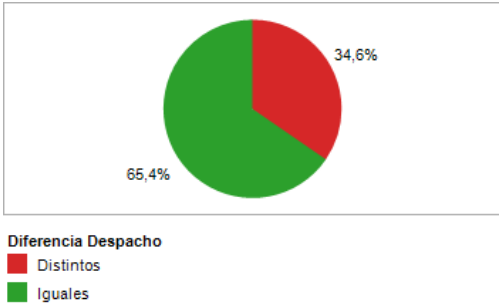


Figura 4.19: Diferencia porcentual a nivel general

Si se observa en la figura 4.20, las macro-zonas de mayor diferencia son la 900, 400, 100, 200 y 500 con diferencias de 100 %, 77.3 %, 58.7 %, 50.7 % y 50.5 % respectivamente. Si se aprecia, estas zonas (100, 200, 400 y 500) son las que concentran el 72,3 % de las compañías de la región (16 de las 22 en la zona de CBS) por lo que es esperable que el despacho tienda a diferir bastante ante la alta cantidad de opciones de despacho posibles.

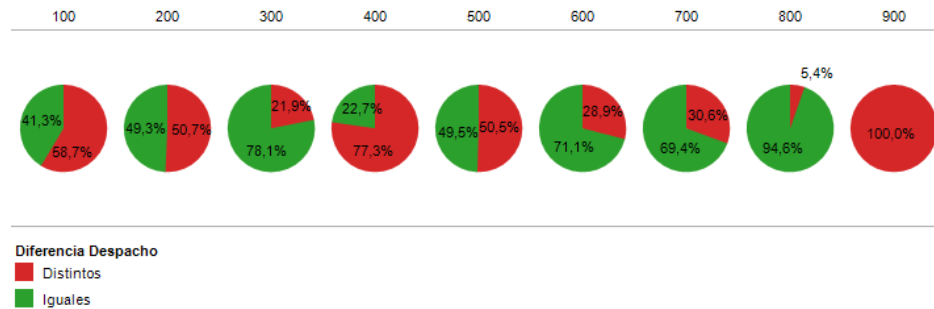


Figura 4.20: Distribución de la diferencia entre el despacho de CBS y Dijkstra.

Si se observa las demás zonas se confirma lo antes comentado, especialmente en la macro-zona 800, ya que ante la falta de alternativas, Dijkstra tiende a coincidir con el despacho de CBS en la gran mayoría de los casos de dichas zonas. Si se observa esto a nivel individual de cada una de las zonas, se llega a lo que se encuentra en la tabla 4.6, donde existe un conjunto de zonas que en ningún horario representativo igualan el despacho de CBS para la combinación de los 2 primeros B y el primer Q. Esto es interesante, ya que dado que se está actualmente en tiempos equivalentes y que Dijkstra entrega un ruteo igual o mejor que el diseñado por CBS, se puede concluir que estas 20 zonas son las de mayor ineficiencia en el sistema actual, con lo que Dijkstra consigue mejoras potenciales en los tiempos de atención de dichas zonas.

Si no se considera simplemente el caso de “cumplir” y “no cumplir” se puede apreciar sutiles diferencias en cada una de las zonas al considerar la variación dentro de los 2 primeros B y el primer Q que llegan a la emergencia. En la tabla 4.7 se resumen todas las alternativas y como se diferencia el caso de “no cumplir” ya que este puede estar dado porque existe diferencia en algunas (o ambas) bombas así como en el porta-escala elegido. Se denomina “B1” como el primer B que llega a la emergencia (consecuentemente B2 será el segundo en llegar) y Q1 al primer porta-escala en llegar a destino. En el general de las veces, 65,41 %, el despacho es idéntico entre los 2 modelos. La segunda mayoría habla de un cambio moderado en el despacho, manteniendo tanto la primera respuesta de bombas y porta-escala pero se ve modificada la segunda respuesta de bomba. La siguiente mayoría es un cambio más intenso en el despacho: Se mantiene primera respuesta en porta-escalas pero el despacho de bombas es totalmente distinto.

Es interesante observar que son muy pocos los casos donde el despacho es totalmente distinto,

Zona	% de diferencia
902	100 %
703	100 %
300	100 %
234	100 %
233	100 %
701	100 %
112	100 %
601	100 %
420	100 %
108	100 %
409	100 %
901	100 %
704	99,98 %
419	99,86 %
604	99,76 %
228	99,36 %
410	99,32 %
418	98,27 %
107	97,28 %
421	97,23 %

Tabla 4.6: Las 20 primeras zonas de mayor diferencia, independiente del horario, entre Dijkstra y CBS

2.19%, y en general las primeras respuesta (tanto de bombas como porta-escalas) se mantienen. Esto habla que la pauta de despacho, que no calcula rutas óptimas, si logra en alguna medida un despacho eficiente.

Factor Diferencia	% del total
Despacho idéntico	65,41 %
B1 y Q1 igual, B2 distinto	11,51 %
Q1 igual, B1 y B2 distintos	9,41 %
B1 y B2 igual, Q1 distinto	8,91 %
Despacho totalmente distinto	2,19 %
B1 igual, B2 y Q1 distinto	2,15 %
B2 y Q1 igual, B1 distinto	0,33 %
B2 igual, B1 y Q1 distintos	0,09 %

Tabla 4.7: Diferencia porcentual de cómo distribuye la diferencia de despacho

El punto anterior puede observarse espacialmente en la figura 4.21. En la figura se aprecia que en general es bastante limitado el sector donde todo el despacho sea totalmente distinto. Esto ocurre en el sector rojo oscuro en sector nor-poniente de la zona de atención. Por su parte, el sector rosado claro, que representa “B1 igual, B2 y Q1 distinto” resulta bastante intuitivo en el sector que está, ya que en la parte nor-poniente se encuentra la compañía 21, por lo que es natural que continúe



siendo la primera alternativa.

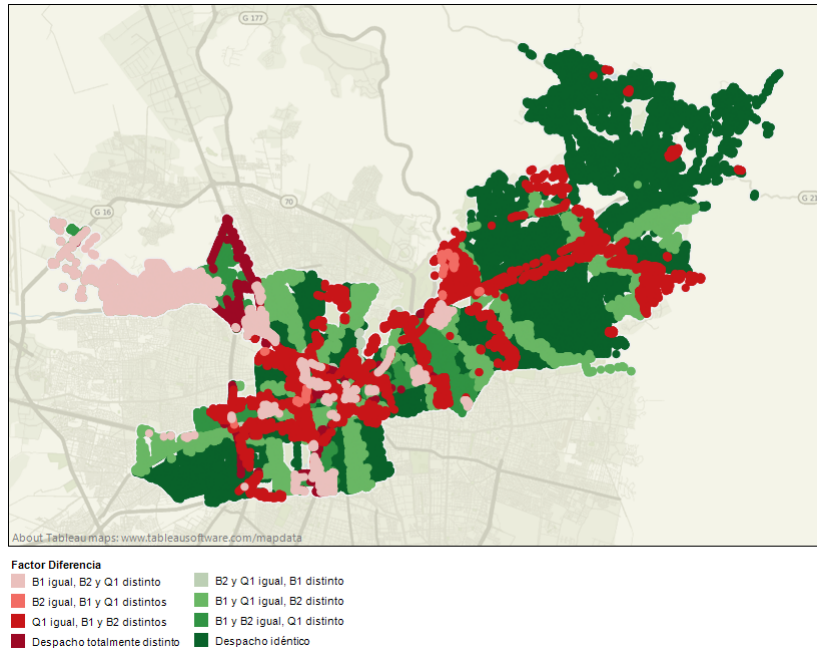


Figura 4.21: Distribución de la diferencia entre el despacho de CBS y Dijkstra

El despacho es rojo cuando ocurre que ambos despachos de bombas son distintos pero se mantiene el despacho para porta-escalas. Si se observa la figura esto ocurre transversal en la zona. Desde Vespucio hacia el oriente, varía en muchos casos en el sector medio las compañías tipo B seleccionadas pero se mantiene el despacho de la compañía 15. Desde Vespucio y hasta llegar a Ruta 5 nuevamente existen diferentes despachos de B pero el territorio para las máquinas porta escalas es repartido entre las compañías 7 y 8. El resto al poniente es despachado para la compañía porta-escala 6.

Es interesante apreciar que el despacho idéntico está bastante repartido en la ciudad y no se concentra espacialmente todo en una zona. De todas maneras, existe una mayor presencia en el sector oriente, tal y como se ha discutido antes, debido a la menor cantidad de alternativas de despacho para cada emergencia.

El efecto por cada una de las macrozonas se puede apreciar en la figura 4.22, que muestra que en la gran mayoría de las zonas el despacho tiende a mantenerse. Esto resulta diferente en las macrozonas 400 y 900. En el caso de la primera, la modificación de la primera máquina tipo Q y manteniendo el despacho de los carros B es el efecto predominante. En el caso de las zonas 900, estas presentan una discrepancia casi absoluta para el caso comparado de Dijkstra y Pauta de Cuarteles.

Dados estos cambios, la pregunta natural es entender si es que conducen a una mejora en los tiempos de traslado a la emergencia, lo que se estudia en la próxima subsección.

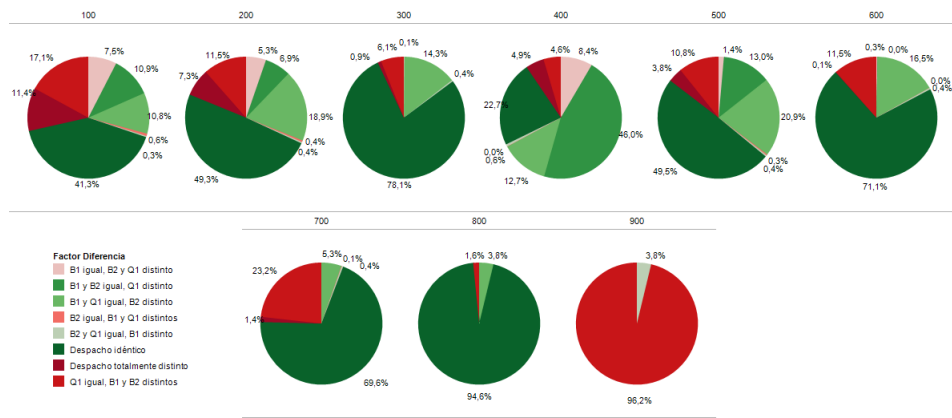


Figura 4.22: Distribución de la diferencia entre el despacho de CBS y Dijkstra al simular emergencia 10-0

### 4.2.3. Diferencia en tiempo entre despacho actual y Dijkstra

Con el análisis del punto anterior se tiene un panorama general de como espacialmente el nuevo modelo afecta a la región. Adicionalmente queda responder la pregunta ¿Cómo esto mejora los tiempos de atención?. Para responder en base a esto, se estudiará los 2 siguiente puntos:

- Variación en tiempo para la primera respuesta de tipo B a cada emergencia.
- Cumplimiento estándar NFPA 1710 en nueva situación de despacho.

Para el primero de los puntos comentados, al analizarlos en la red se realiza la resta entre el tiempo de respuesta Dijkstra corregido y el tiempo de respuesta CBS declarado de la máquina asignada a dicho punto de la red. En la figura 4.23 se aprecia en color verde oscuro los sitios con mayor ahorro observado y en verde claro las zonas de bajo o nulo ahorro. Los peaks se aprecian se encuentran en sectores de Providencia, así como Vitacura y Las Condes.

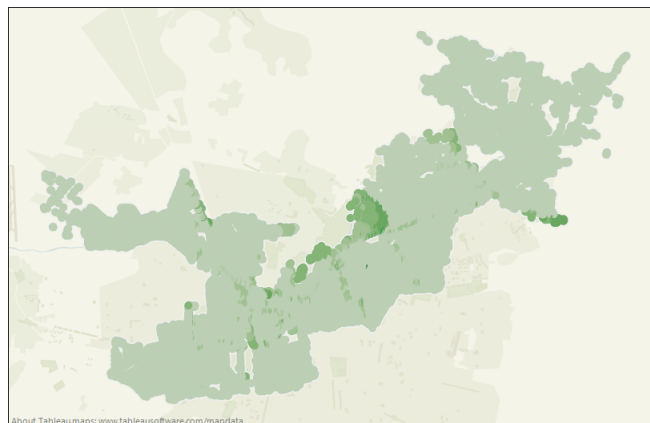


Figura 4.23: Ahorro alcanzado en los puntos de la red donde hubo un cambio en el despacho de la primera máquina tipo B

Si se calcula el promedio del ahorro sobre toda la red sobre aquellos puntos que vieron su despacho modificado, se aprecia lo que esta en la figura 4.24. En promedio en estos puntos existe un ahorro de 88,15 segundos, lo que es bastante significativo donde el tiempo de despacho promedio actual de CBS es 476 segundos en dichas zonas, correspondiente a un 18,5% de ahorro. Se aprecia en la figura que existen peaks de ahorro en los horarios representativos 3 y 6 (hora 11:00 y 20:30 respectivamente) asociados a los horarios punta mañana y punta tarde. Esto es bastante interesante ya en dichos horarios es donde potencialmente es más relevante entender cuál es la mejor ruta para minimizar los tiempos de traslado al enfrentarse a alta congestión en la red.

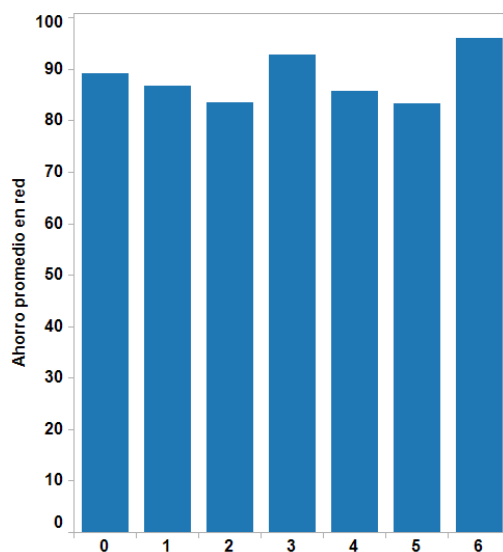


Figura 4.24: Ahorro promedio alcanzado por horario representativo

Si se estudia por zonas dicho ahorro, este se puede apreciar en la figura 4.25. Estos alcanzan su peak en las macro-zonas 700 con un ahorro de casi 120 segundos. Esto está bastante en la línea de lo conversado con CBS, ya que en este sector normalmente se ha levantado que los tiempos son potencialmente mejorables por un mal diseño de la zonas y efectos de reversibilidad de calles que impactan en el despacho y no son rescatados actualmente en la Pauta de Cuarteles. Adicionalmente, la zona de menor ahorro está dada por la 800, debido a su muy baja diferencia en el despacho actual.

Finalmente, si con estos ahorros se estudia como mejora el estándar NFPA 1710 se observa lo contenido en la figura 4.26. Esta distribución es bastante similar a la observada en la figura 4.7 pero existe el área verde es más marcada y delimitada, ya que en el caso anterior todos los bordes de la zona verde se teñían de color verde claro y rojo claro, lo que significaba que en dichos puntos el estándar estaba cerca de violarse. Con este nuevo despacho estos puntos desaparecen totalmente y el cumplimiento se ve mucho más establecido en la zona.

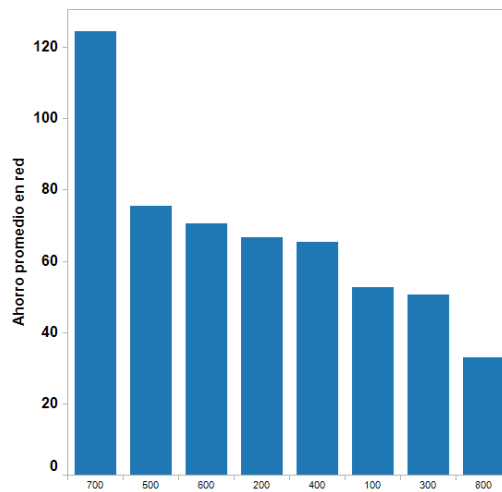


Figura 4.25: Ahorro alcanzado en los puntos de la red analizado por macro-zonas

Por otra parte, los puntos rojos oscuros, los cuales se encuentran por sobre el estándar establecido, se mantienen casi en su totalidad inalterados. Esto debido a que el despacho para aquellas zonas no se ve modificado por la falta de alternativas de despacho, lo que dificulta a Dijkstra de poder generar alguna mejora.

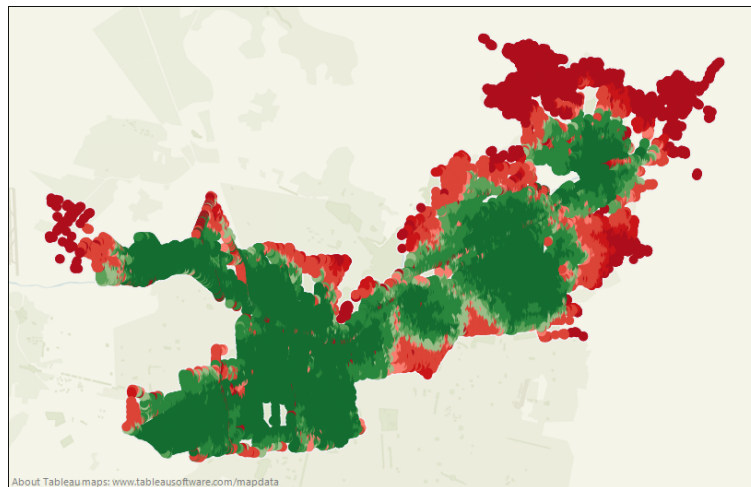


Figura 4.26: Cumplimiento de estándar NFPA 1710 con nuevo modelo de despacho

Lo anterior se traduce en que, a través de toda la red, el 68.45% de los puntos de la red de CBS se encuentran cumpliendo el estándar, lo que en la situación anterior ocurría en el 56.6% de las veces. Este cumplimiento en el nuevo modelo se distribuye en las zonas como se observa en la tabla 4.8. Se aprecia que las zonas 100 y 200 están muy bien en el estándar, en el otro extremo se encuentran las zonas 900 y 800, con cumplimientos alejados más de 50 puntos porcentuales del estándar exigido. De todas formas, todas las zonas mejoran con respecto al sistema anterior de CBS.

Macro-zona	Cumplimiento estándar NFPA 1710
200	95 %
100	89 %
300	89 %
400	82 %
500	77 %
700	71 %
600	69 %
800	33 %
900	22 %

Tabla 4.8: Distribución en la zona de CBS del cumplimiento del estándar NFPA 1710

Se puede apreciar según lo analizado que Dijkstra entrega mejoras sustanciales a la red de CBS permitiendo ahorros potenciales al modificar el despacho generado. De todas formas, hay que tomar estos resultados en base a los supuestos existentes (que ambas velocidades son comparables, que ambos rutas son conocidas y aproximables a la seguida por Dijkstra, etc) por lo que podrían variar al tener más información. Por lo mismo, es parte de trabajos futuros visitar estos análisis para corroborar como se ajusta este modelo ante la existencia de nueva información de los despachos de CBS así como también en las proyecciones de velocidades en el grafo. En la siguiente sección se profundizará como son las variaciones de despacho dentro de una zona para reafirmar la necesidad de su eliminación para dar paso en plenitud a este nuevo modelo.

### 4.3. Análisis desempeño de zonas en sistema propuesto

Para el sistema que está en uso actualmente en CBS, cada una de las zonas existe un único despacho asignado. Este no presenta variaciones ni por día ni por horario del día. En el sistema basado en Dijkstra, existe variación en las velocidades que pueden circular los buses en cada horario del día, por lo que es esperable que existan diferencias en el despacho en cada una de las zonas de CBS. Esta intuición se reafirma al estudiar cada una de las zonas y sus respuestas. Para hacer esto, se construyó por cada nodo del grafo el orden de despacho Dijkstra y esto se comparó con el despacho asignado a la zona que pertenece el nodo. Al tomar dichos datos, se aprecia que en general en cada zona existen “sub-zonas” de despacho las que varían en algunos casos significativamente. Este análisis se hizo desde 2 puntos de vista:

- Variaciones en el orden de despacho independiente del tipo de compañía
- Variaciones en el orden de despacho asumiendo que se simula un despacho tipo “10-0”

Para estudiar ambos casos en detalle, se crea una interfaz web de fácil consulta para posteriores análisis<sup>3</sup>. Esta cuenta con 2 pestañas: “Variación Orden de Despacho” y “Despacho 10-0” donde se representa los 2 puntos a analizar en esta sección. Se representan en base a los antes mencionados 7 horarios representativos, desde el 0 al 6 (correspondientes a las horas del día 00:30, 04:00, 07:30, 11:00, 13:30, 17:00 y 20:30).

Si se estudia el primer punto, se aprecia que existe bastante diferencia en el despacho a través del día en el ejemplo expuesto en la figura 4.27 correspondiente a la zona 719. Como primera observación se aprecia que dentro de una zona el despacho es bien variado, existiendo una tendencia principal pero no única. Además, a través de los periodos dichos patrones van cambiando en tamaño y en su presencia incluso. De hecho, la primera respuesta varía dentro de la zona siendo mayoritariamente la compañía 18 pero también existe presencia de la compañía 19, lo que no está representado en el despacho de CBS, el que es único y entrega como primera respuesta a la 18 y posteriormente, si es que no está disponible la anterior, favorece a la 19.

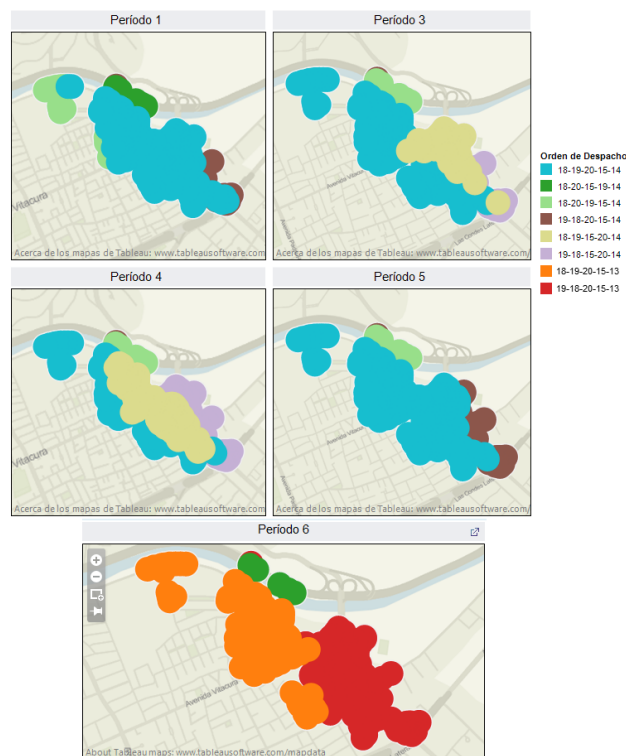


Figura 4.27: Variación del despacho de Dijkstra en la zona 719 dentro del día.

En la figura, la presencia de esta compañía se encuentra en primera respuesta en el color café, rojo y púrpura. Se puede apreciar que en toda la zona inferior-oriente de esta zona es dominada por esta compañía y su presencia aumenta en los horarios representativos 4,5 y 6 presentados (horas 13:00,

<sup>3</sup>[http://dii.uchile.cl/~cbs/variaciones\\_bomberos.html](http://dii.uchile.cl/~cbs/variaciones_bomberos.html)

16:00 y 19:00). De hecho, en el último período, el efecto de la compañía 19 es muy marcado, siendo casi la mitad de la zona presentada. Esto entrega luces del efecto de la congestión sobre la prioridad de respuesta en una zona.

Si se observa la totalidad de las zonas de CBS, al analizar la cantidad de subzonas que se generan en cada una de las definidas en el área se pueden hacer algunos análisis adicionales. Primero, se definió un indicador "variación zonal", el que se define como la cantidad de subzonas de una zona CBS dividido por la cantidad de nodos que componen dichos sector. En base a esto, se expone en la tabla 4.9 las 20 zonas con mayor y menor variación interna. En el caso de las con mayor variación se aprecia que está compuesto completamente por zonas de tipo 100 y 200. Esto es totalmente esperable debido a la alta concentración de alternativas dentro de estos sectores por lo que es fácil que existan diversas combinaciones de llegadas en cada horario.

Zonas con mayor variación	Zonas con menor variación
113	800
115	633
212	307
111	635
107	627
108	628
209	634
214	421
238	304
110	306
215	629
112	623
236	630
208	614
117	715
103	625
106	418
220	305
218	619
217	414

Tabla 4.9: Conjunto de zonas con mayor y menor variación de subzonas internas a través del día.

En el caso de las zonas con menor variación están compuesto por alternativas de las zonas 300,400, 600, 700 y 800. Es interesante observar que las zonas 500 son mayormente moderadas en términos de variación ya que no se encuentra ninguna de las zonas que la componen en la tabla comentada.

Si se analiza el despacho "10-0" en cada una de las zonas se aprecia lo que se observa en el ejemplo de la figura 4.28. En este caso se analiza la zona 601, donde el despacho es bastante variado

a través del día. En la madrugada principalmente dominan las máquinas B14 y B13 con la compañía porta-escala Q8. Avanzando en el día esto se modifica (periodo 2) para darle paso a la compañía 13 como primera máquina relegando a la compañía 14 a un segundo lugar en buena parte de la zona. Es interesante que en los periodos de congestión (período 3 y 5) aparece la compañía 18 como primera máquina seguida de la 14.

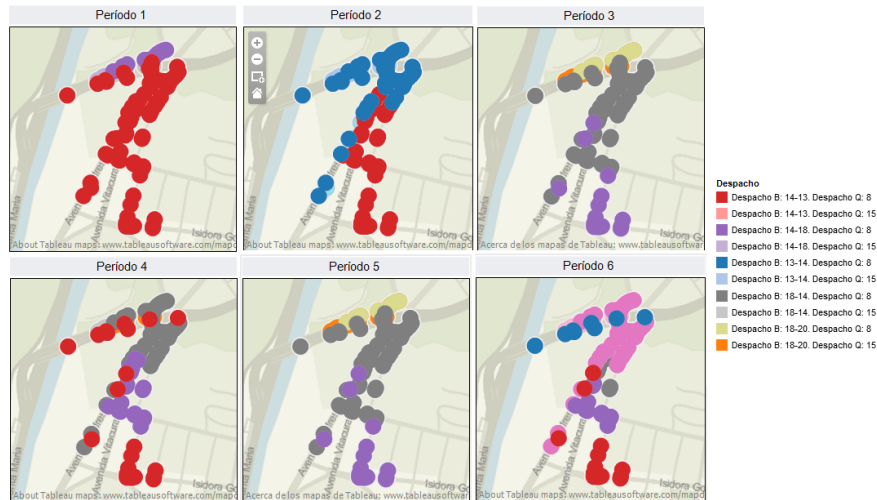


Figura 4.28: Diferencia en despacho zona 601 a través del día

Si se toma lo anterior y se generaliza a toda la red, se puede apreciar que, nuevamente, existen gran cantidad de subzonas en cada una de las zonas definidas por CBS, las cuales varían a través del día por efecto de la congestión y la reversibilidad de las calles. Este modelo más realista entrega herramientas a CBS para poder tomar mejores decisiones de despacho al conocer al detalle cual es el mejor conjunto de compañías B y Q a despachar en cada momento.

Por último, y como se ha mostrado en toda esta sección, el diseño de zonas simplemente limita las posibilidades de CBS. El fijar un único despacho por zona, que adicionalmente no varía por horario del día, deja de lado todas aquellas alternativas que cada compañía puede tener al momento de desarrollar caminos alternativos y poder llegar en primera prioridad a una zona en horarios de congestión. Es indiscutible que el verdadero valor de este modelo se aprecia en dichos momentos, ya que en horarios de baja congestión ambos tipos de despacho tienden a converger en muy alta medida.



## Capítulo 5

# Conclusiones y trabajos futuros

El sistema de despacho implementado en esta tesis es un avance sustancial para el Cuerpo de Bomberos de Santiago, tanto en términos de eficiencia como de análisis de la situación actual y proyecciones futuras de su cobertura y trabajo incansable ante las emergencias en la Región Metropolitana. De esta manera, los resultados obtenidos del trabajo de la construcción del grafo de Santiago son muy interesantes y bastante innovadores: tener una representación conexas, en base a nodos y arcos dirigidos en la red de Santiago usando como pesos las velocidades proyectadas de Transantiago era un desafío no desarrollado anteriormente y genera una plataforma muy útil para sustentar nuevos proyectos de caminos mínimos, ruteo vehicular o similares sobre la capital.

Otro aspecto relevante es la comparativa realizada entre las velocidades de CBS y las obtenidas desde Transantiago. Se tenía la hipótesis que la diferencia entre ambas sería simplemente un factor ponderador que ajustara las velocidades de Dijkstra a las de bomberos cuya variación no sería significativa a lo largo del área de cobertura. Dicha hipótesis resultó estar alejada de la realidad que CBS enfrenta. Uno de los factores que genera diferencias es el horario del día, el que se vuelve más significativo a horarios puntas (tanto mañana como en la tarde) que en los demás horarios. Adicionalmente, la ubicación de la emergencia y distancia recorrida para llegar a la misma son factores que afectan significativamente: por un lado, mientras mayor es la distancia que debe recorrer la máquina que atiende la emergencia, es mayor la diferencia declarada entre CBS y Dijkstra, por otro lado (y bastante correlacionado con lo anterior), si la emergencia se encuentra en zonas hacia la periferia del área de cobertura, nuevamente la diferencia entre los sistemas se ve intensificada. En base a esto se creó una función paramétrica que permitió homologar ambos sistemas a lo largo de la red de Santiago, para tener de esta manera una más certera estimación del tiempo de viaje para cada compañía y su orden correcto.

Implementada dicha corrección, se comprobó que en el 34,6 % no existe coincidencia entre el despacho sugerido por el sistema propuesto y el actual de CBS. Esto permite que el orden sugerido por

Dijkstra mejore los tiempos de atención, en promedio, en 88.15 segundos. Se analizó adicionalmente este efecto por cada una de las zonas de CBS concluyéndose que no es proporcional el porcentaje de diferencia entre los despachos y el ahorro en tiempo que se puede conseguir. Esto debido a que la concentración de compañías de bomberos en la región es no homogénea, lo que lleva a que por ejemplo, en las zonas 100 y 200, donde están la mayoría de las compañías, el ahorro sea mínimo y la variación dentro de las zonas sea muy alta, en contraposición a zonas como 700 y 800 donde existe poca variación en el despacho.

Con respecto al nivel de servicio (porcentaje de las veces que llegan a una emergencia en 5 minutos o menos), en el sistema de CBS se alcanza un nivel general de 56,6%. Si se utiliza el despacho sugerido en esta tesis y las correcciones dadas por el factor bombero, dicho estándar se eleva hasta el 68,45%. Los principales mejoras se alcanzan en las zonas más alejadas del centro de la ciudad. De igual manera, dicho estándar se encuentra limitado por la ubicación de las compañías dentro de la región: en muchos casos después de implementado el algoritmo Dijkstra, se continúa incumpliendo el estándar debido a que la compañía más cercana a la emergencia está más allá del límite de tiempo establecido. Por esto, se sugiere que se profundice en el estudio de las ubicaciones de las mismas para entender su rendimiento y potenciales mejoras que lleven a homogenizar la respuesta a través de la red.

Adicionalmente, se entendió la dinámica de las zonas y su rendimiento, llegando a la conclusión que muchas de ellas desfavorecen el despacho de CBS. El fijar una única respuesta independiente del horario y el punto dentro de la zona deja de lado todos los elementos de congestión, ubicación, vías alternativas y otros factores que hacen que la respuesta pueda ser mejorada a lo largo del día.

Finalmente, este proyecto sienta las bases para el desarrollo del trabajo del proyecto Fondef “Tecnologías avanzadas para ciudades del futuro” del que esta tesis forma parte. Se abordó el problema de ruteo de forma estática con velocidades promedio en las calles. Ante esto y las mejoras obtenidas en el despacho y su tiempo de respuesta, se plantea la siguiente inquietud: ¿Cuál sería el orden de atención si existiera incertidumbre en los tiempos de viaje?. Es natural pensar que en general, el mundo no se mueve ni rige en base al promedio de los eventos y en más de una ocasión la varianza del tiempo en recorrer un arco puede ser en extremo alta. De esta forma, sería interesante entender como se distribuye este tiempo, cómo varia a través del día y la posición en un eje vial para de esta manera tomar decisiones de caminos mínimos que incorporen dichas consideraciones. Este enorme desafío es parte central del Fondef antes mencionado y el trabajo acá desarrollado espera haber sido un aporte para su éxito.

# Bibliografía

- [1] Ravindra K. Ahuja, Thomas L. Magnanti, and James B. Orlin. *Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications*. Prentice Hall, 1 edition, February 1993.
- [2] Ravindra K. Ahuja, K. Mehlhorn, J. Orlin, and R.E. Tarjan. Faster algorithms for the shortest path problem. *Journal of the ACM (JACM)*, 37(2):213–223, 1990.
- [3] Richard Bellman. On a Routing Problem. *Quarterly of Applied Mathematics*, 16:87–90, 1958.
- [4] Dimitri P. Bertsekas. An auction algorithm for shortest paths, 1991.
- [5] D.L. Bullins. An analysis of emergency response times in the greensboro fire department. 2002.
- [6] Christopher D. Cantrell. Comparative analysis of response times between actual emergency responses and geographic information systems developed emergency responses for midland county, michigan, 2008.
- [7] C.J. Castillo. *Complying with NFPA 1710: an Analysis of the Miami-Dade Fire Rescue Department's Response Times*. National Fire Academy, 2002.
- [8] Boris Cherkassky, Andrew V. Goldberg, and Tomasz Radzik. Shortest paths algorithms: Theory and experimental evaluation. *Mathematical Programming*, 73:129–174, 1993.
- [9] Catorce Compañía de Bomberos de Santiago. Nuevo sistema de despacho. [http://www.14.cl/detalle\\_noticia.php?&id=407](http://www.14.cl/detalle_noticia.php?&id=407), Abril 2013.
- [10] Cuerpo de Bomberos de Santiago. Preguntas frecuentes. <http://www.cbs.cl/institucion.php?preguntas-frecuentes>, Abril 2013.
- [11] E. W. Dijkstra. A note on two problems in connexion with graphs. *NUMERISCHE MATHEMATIK*, 1(1):269–271, 1959.
- [12] S. Dutch. Converting utm to latitude and longitude (or vice versa). *Natural and Applied Sciences, University of Wisconsin-Green Bay*, <http://www.uwgb.edu/dutchs/UsefulData/UTMFormulas.HTM>, 2003.

- [13] DT Endicott. Performance measurement and organizational improvement. *Managing fire and rescue services*, page 302, 2002.
- [14] S. Even, A. Itai, and A. Shamir. On the complexity of time table and multi-commodity flow problems. In *Foundations of Computer Science, 1975., 16th Annual Symposium on*, pages 184–193. IEEE, 1975.
- [15] L. R. Ford and D. R. Fulkerson. *Flows in networks, by L.R. Ford, Jr. [and] D.R. Fulkerson*. Princeton University Press, Princeton, N.J., 1962.
- [16] L.R. Ford and D.R. Fulkerson. Maximal flow through a network. *Canadian Journal of Mathematics*, 8(3):399–404, 1956.
- [17] TC Hu. Minimum convex-cost flows in networks. 1964.
- [18] G. Karakostas. Faster approximation schemes for fractional multicommodity flow problems. In *Proceedings of the thirteenth annual ACM-SIAM symposium on Discrete algorithms*, pages 166–173. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2002.
- [19] P. Kolesar and E.H. Blum. Square-root laws for fire company travel distances. 1975.
- [20] P. Kolesar and W.E. Walker. An algorithm for the dynamic relocation of fire companies. *Operations Research*, 22(2):249–274, 1974.
- [21] R.C. Larson. A hypercube queuing model for facility location and redistricting in urban emergency services. *Computers & Operations Research*, 1(1):67–95, 1974.
- [22] W.R. Metcalf. *An evaluation of response time performance for the North Lake Tahoe Fire Protection District and comparison to national standards*. National Fire Academy, 2002.
- [23] G. Monge. *Mémoire sur la théorie des déblais et des remblais*. De l’Imprimerie Royale, 1781.
- [24] prevención y salud Ocupacional de Chile Portal Seguridad. Preguntas frecuentes. [http://www.paritarios.cl/ciencia\\_nueva\\_tecnologia\\_apagar\\_fuego.htm](http://www.paritarios.cl/ciencia_nueva_tecnologia_apagar_fuego.htm), Abril 2013.
- [25] P.S. Schaeffer, J. Hall, A. Schainblatt, J. Swartz, and M. Karter. *Procedures for improving the measurement of local fire protection effectiveness*. National Fire Protection Association, 1977.
- [26] P.S. Schaeffer and J. Swartz. *Measuring Fire Protection Productivity in Local Government: Some Initial Thoughts*. National Fire Protection Association, 1974.

- [27] R. Sivanandan, AG Hobeika, and PB Lockwood. A heuristic shortest-path method for emergency vehicle assignment—a study on the mexico city network. *Transportation Research Record*, (1168), 1988.
- [28] É. Tardos. A strongly polynomial minimum cost circulation algorithm. *Combinatorica*, 5(3):247–255, 1985.
- [29] Y.J. Tsai, Z. Wang, and C.T. Yang. A prototype real-time gps/gis-based emergency response system for locating and dispatching moving patrol vehicles with the beat-based shortest distance search. ASCE, 2002.
- [30] W.E. Walker, Rand Corporation, United States. Dept. of Housing, Urban Development. Office of Policy Development, Research, and New York City-Rand Institute. *Firehouse site evaluation model: Executive summary*, volume 1. New York City Rand Institute, 1975.
- [31] F.B. Zhan and C.E. Noon. Shortest path algorithms: an evaluation using real road networks. *Transportation Science*, 32(1):65–73, 1998.

# Anexos

## A . Estructura de los archivos de la cartografía de Santiago

Nombre	Tamaño	Tipo	Fecha de modificación
Tranque	57 KB	AutoCAD Shape So...	13-10-2009 14:28
Soleras_line	44.868 KB	AutoCAD Shape So...	27-08-2009 17:39
Rios	2.677 KB	AutoCAD Shape So...	13-10-2009 14:27
Regueros	187 KB	AutoCAD Shape So...	13-10-2009 14:26
Quebradas	3.126 KB	AutoCAD Shape So...	13-10-2009 14:26
Puentes	100 KB	AutoCAD Shape So...	13-10-2009 14:25
Pista_Avi	40 KB	AutoCAD Shape So...	13-10-2009 14:24
Piscinas	31 KB	AutoCAD Shape So...	13-10-2009 14:23
Piscina_decantadora	1 KB	AutoCAD Shape So...	13-10-2009 14:22
Lagunas	209 KB	AutoCAD Shape So...	13-10-2009 14:21
Intermedias	67.802 KB	AutoCAD Shape So...	27-08-2009 14:57
Indices	19.186 KB	AutoCAD Shape So...	27-08-2009 14:56
Huellas	2.204 KB	AutoCAD Shape So...	27-08-2009 14:54
FFCC	29 KB	AutoCAD Shape So...	13-10-2009 14:19
Estanques	406 KB	AutoCAD Shape So...	13-10-2009 14:18
ejes_rm	19.801 KB	AutoCAD Shape So...	13-10-2009 12:15
Cotas	3.056 KB	AutoCAD Shape So...	28-08-2009 12:30
Copa_de_Agua	8 KB	AutoCAD Shape So...	13-10-2009 14:17
Construcciones	4.110 KB	AutoCAD Shape So...	27-08-2009 16:08
Canchas	1.402 KB	AutoCAD Shape So...	13-10-2009 14:16
Canaleta	2 KB	AutoCAD Shape So...	13-10-2009 14:15
Canales	2.133 KB	AutoCAD Shape So...	13-10-2009 14:15
Areas_Verdes	2.776 KB	AutoCAD Shape So...	13-10-2009 14:14
Alcantarilla	18 KB	AutoCAD Shape So...	13-10-2009 14:12
Acequias	27 KB	AutoCAD Shape So...	13-10-2009 14:11

Figura 5.1: Archivos cartográficos

## B . Medición ejes viales UOCT

VMS	EJE	SENTIDO	RECORRIDO IDA					EJE	INICIO	RECORRIDO VUELTA			Hr
			INICIO	1ª MEDICION	2ª MEDICION	TERMINO IDA (2ª MED)	INICIO			1ª MEDICION	2ª MEDICION	TERMINO IDA (2ª MED)	
1	COLON / E. YAÑEZ	D-P	A. VESPUCCIO	TOBALABA	LOS LEONES	P. DE VALDIVIA	C. ANTUNEZ	P. DE VALDIVIA	LOS LEONES	TOBALABA	VESPUCCIO	1.5	
2	LARRAIN / IRARRAZAVAL	D-P	TOBALABA	A. VESPUCCIO	D. ORIENTE	D. ORIENTE	S. BOLIVAR	COVENTRY	COVENTRY	TOBALABA	TOBALABA	1.5	
3	IRARRAZAVAL / D. ORIENTE	D-P	BREMEN	CHILE ESPAÑA	A. VARIAS	M. EYZAGUIRRE	D. ALMEYDA	M. EYZAGUIRRE	P. DE VALDIVIA	R. CRUZ	R. CRUZ	1.5	
4	BILBAO	D-P	LAS LUICERNAVAS	TOBALABA	LOS LEONES	P. DE VALDIVIA	POURO	P. DE VALDIVIA	LOS LEONES	TOBALABA	ALCANTARA	1.5	
5	TOBALABA / SANCHEZ FONTECILLA	S-N	TRONCOS VIEJOS	BILBAO	C. ANTUNEZ	CARLOS ANTUNEZ	TOBALABA	C. ANTUNEZ	BILBAO	TRONCOS VIEJOS	TRONCOS VIEJOS	1.5	
6	J. A. DELANO / G. VÍA/BALAGUER	D-P	LA AGUADA	MANQUEHUE	A. VESPUCCIO	PEREZ ZUOVIĆ	VITACURAU / A. DELANO	PEREZ ZUOVIĆ	A. VESPUCCIO	MANQUEHUE	LA AGUADA	1.5	
7-11	PROVIDENCIA/ALAMEDA	D-P	SALVADOR	PIO NONO	SANTA ROSA	TEATINOS	ALAMEDA / PROVIDENCIA	TEATINOS	SANTA ROSA	PIO NONO	SALVADOR	0	
8	ALAMEDA	P-O	LAS CATALPAS	GRAL. VELASQUEZ	EXPOSICION	BASCUÑAN	ALAMEDA	BASCUÑAN	GRAL. VELASQUEZ	LAS REJAS	LAS REJAS	1.5	
9	NUEVA IMPERIAL / PORTALES	P-O	LAS REJAS	GRAL. VELASQUEZ	MATUCANA	MATUCANA	ECUADOR	MATUCANA	GRAL. VELASQUEZ	LAS REJAS	LAS REJAS	1.5	
10	P. A. C.	P-O	A. VESPUCCIO	GRAL. VELASQUEZ	EXPOSICION	EXPOSICION	P. A. C.	EXPOSICION	GRAL. VELASQUEZ	VESPUCCIO	VESPUCCIO	0	
13	VICUÑA MACKENNA	S-N	LOS PIONEROS	A. VESPUCCIO	DEPARTAMENTAL	RETORNO A VESPUCCIO	VICUÑA MACKENNA	DEPARTAMENTAL	A. VESPUCCIO	-	-	1.5	
8	ALAMEDA	P-O	LAS CATALPAS	GRAL. VELASQUEZ	EXPOSICION	BASCUÑAN	ALAMEDA	BASCUÑAN	GRAL. VELASQUEZ	LAS REJAS	LAS REJAS	2	
7-11	ALAMEDA / PROVIDENCIA	P-O	SANTA ROSA	V. MACKENNA	SALVADOR	SALVADOR	ALAMEDA / PROVIDENCIA	SALVADOR	V. MACKENNA	SANTA ROSA	ESTADO	2	
	ALAMEDA / D. PARAGUAY	P-O	SANTA ROSA	V. MACKENNA	SALVADOR	MIQUEL CLARO	ALAMEDA / PROVIDENCIA	SALVADOR	V. MACKENNA	SANTA ROSA	ESTADO	2	
12	COSTANERA	P-O	JOSE M. DE LA BARRA	PIO NONO	D. DE VALDIVIA	LOS LEONES	LOS CONQUISTADORES	LETELIER	ARZOBISPO	PIO NONO	PURISIMA	2	

Figura 5.2: Medición ejes viales realizado por UOCT

## C . Tipos de emergencias y sus claves radiales en CBS

Claves radiales	
10-0	Llamado Estructural.
10-1	Llamado de Vehículos.
10-2	Llamado de Pastizales y/o Basura.
10-3	Llamado a Rescate de Emergencia.
10-4	Llamado a Rescate Vehicular.
10-5	Llamado Haz-Mat.
10-6	Llamado a Emanación de Gases.
10-7	Llamado Eléctrico.
10-8	Llamado No Clasificado.
10-9	Llamado a Otros Servicios.
10-10	Llamado a Escombros.
10-11	Llamado de Apoyo a Aeródromo y/o Aeropuertos.
10-12	Llamado de Apoyo a otros Cuerpos de Bomberos
10-13	Llamado a Atentados Terroristas.
10-14	Llamado a Accidentes Aéreos.
10-15	Llamado a Simulacro.
10-16	Llamado a Emergencias en Túneles

## D . Código para obtener puntos de un conjunto de polilíneas en ArcGis 10.0

```
import string, os, sys, locale, arcgisscripting
gp = arcgisscripting.create()
gp.overwriteoutput = 1

msgNotEnoughParams = "Número incorrecto de parámetros"
msgUseValidDecimalPointSep = " Por favor usar uno de
los separadores de decimales válidos"

try:

    if len(sys.argv) < 4: raise Exception, msgNotEnoughParams
    inputFC = sys.argv[1]
    outFile = open(sys.argv[2], "w")

    arg3poss = ['default python output',
                'locale decimal point', 'comma', 'period', '$sep$']
    if sys.argv[3].lower() not in arg3poss: raise Exception,
```

```

msgUseValidDecimalPointSep

if sys.argv[3].lower() == arg3poss[1]:
    locale.setlocale(locale.LC_ALL, '')
    sepchar = locale.localeconv()['decimal_point']
elif sys.argv[3].lower() == arg3poss[2]: sepchar = ','
elif sys.argv[3].lower() == arg3poss[3]: sepchar = '.'
elif sys.argv[3].lower() == arg3poss[4]: sepchar = '$SEP$'
elif sys.argv[3].lower() == arg3poss[0]: sepchar = ""

inDesc = gp.describe(inputFC)

inRows = gp.searchcursor(inputFC)
inRow = inRows.next()
outFile.write(inDesc.ShapeType + "\n")

while inRow:
    feat = inRow.GetValue(inDesc.ShapeFieldName)
    if inDesc.ShapeType.lower() == "point":
        pnt = feat.getpart()
        outLine = str(inRow.GetValue(inDesc.OIDFieldName)) + " " + str(pnt.x) +
            " " + str(pnt.y) + " " + str(pnt.z) + " " + str(pnt.m) + "\n"
        if sepchar == "": outFile.write(outLine)
        else: outFile.write(outLine.replace(".", sepchar))
    inRow = inRows.next()
outFile.write("END")
outFile.flush()
outFile.close()

except Exception, ErrorDesc:
    gp.AddError(ErrorDesc[0])
    if outFile: outFile.close()
    gp.AddError(gp.getmessages(2))

```



## E . Tipo de compañía

Compania	tipo B	tipo Q
1	1	0
2	1	0
3	1	0
4	1	0
5	1	0
6	0	1
7	0	1
8	0	1
9	1	0
10	1	0
11	1	0
12	0	1
13	1	0
14	1	0
15	0	1
16	1	0
17	1	0
18	1	0
19	1	0
20	1	0
21	1	0
22	1	0

Tabla 5.1: Tipo al que pertenece cada compañía de CBS.





## H . Distribución emergencias Bomberos de Santiago

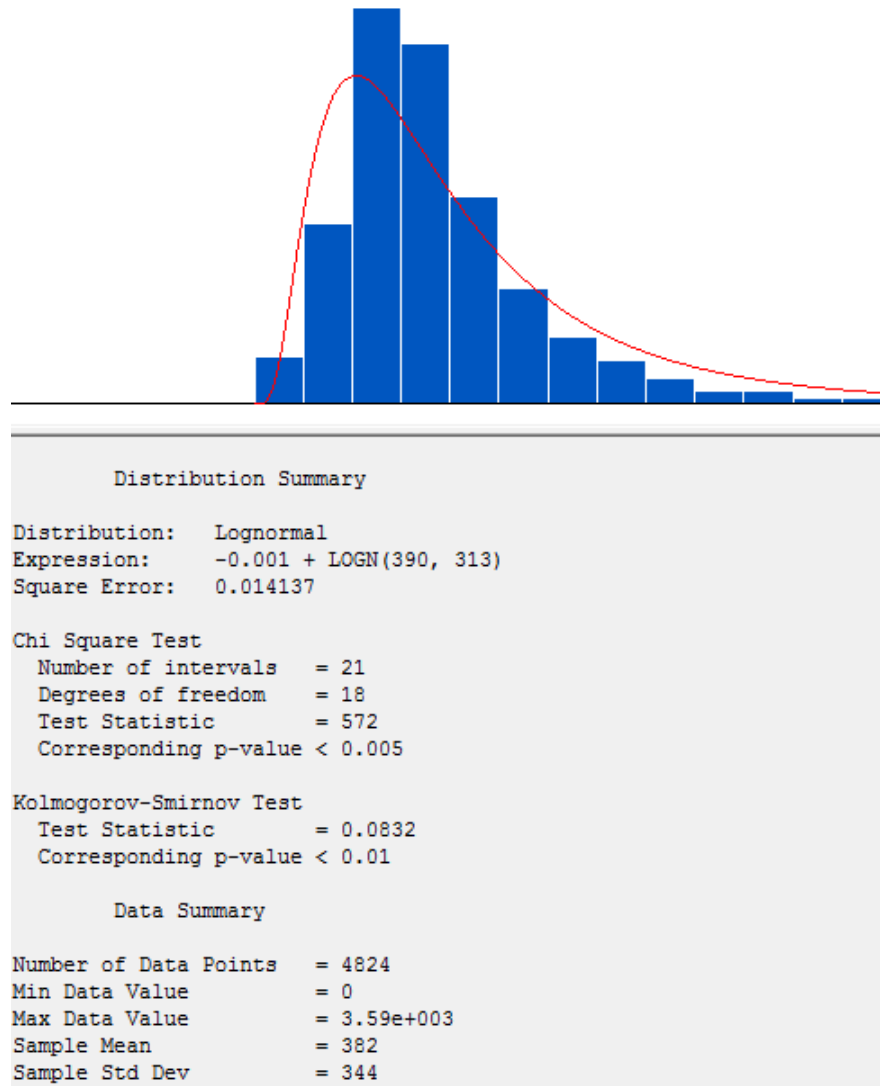


Figura 5.5: Distribución del tiempo de respuesta de la primera máquina en acudir a la emergencia