



**ANA CATARINA DE OLIVEIRA JÓIA**

Licenciada em Matemática

**MODELOS DE LOCALIZAÇÃO PARA  
AVALIAR A PRONTIDÃO DE BOMBEIROS:  
UM ESTUDO DE CASO**

MESTRADO EM MATEMÁTICA E APLICAÇÕES

Universidade NOVA de Lisboa  
Setembro, 2022



# MODELOS DE LOCALIZAÇÃO PARA AVALIAR A PRONTIDÃO DE BOMBEIROS: UM ESTUDO DE CASO

**ANA CATARINA DE OLIVEIRA JÓIA**

Licenciada em Matemática

**Orientadora:** Maria Isabel Azevedo Rodrigues Gomes

*Associate Professor, NOVA School of Science and Technology*

**Coorientador:** Nelson Fernando Chibeles Pereira Martins

*Assistant Professor, NOVA School of Science and Technology*

## Júri

**Presidente:** Magda Stela de Jesus Rebelo

*Assistant Professor, NOVA School of Science and Technology*

**Arguente:** Isabel Cristina Silva Correia

*Associate Professor, NOVA School of Science and Technology*

**Orientadora:** Maria Isabel Azevedo Rodrigues Gomes

*Associate Professor, NOVA School of Science and Technology*

MESTRADO EM MATEMÁTICA E APLICAÇÕES

ESPECIALIDADE EM ATUARIADO, ESTATÍSTICA E INVESTIGAÇÃO OPERACIONAL

Universidade NOVA de Lisboa

Setembro, 2022

## **Modelos de Localização para Avaliar a Prontidão de Bombeiros: Um Estudo de Caso**

Copyright © Ana Catarina de Oliveira Jóia, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

## AGRADECIMENTOS

Esta dissertação marca o fim da jornada que foram os últimos cinco anos. Foi um caminho repleto de aprendizagens, desafios, inseguranças mas também de alegria, graças a todas as pessoas que dele fizeram parte.

Aos meus orientadores, Professora Isabel Gomes e Professor Nelson Chibeles, obrigada por toda a disponibilidade, apoio e paciência. Obrigada por acreditarem em mim, foi um prazer trabalhar convosco.

A todos os intervenientes do projeto no âmbito do qual surgiu esta dissertação, obrigada pela ajuda e por todos os esclarecimentos prestados.

Aos meus amigos e colegas, obrigada por todo o apoio, ajuda e momentos vividos ao longo destes cinco anos. Obrigada por me ouvirem, compreenderem e incentivarem todos os dias a ser uma pessoa melhor.

Por fim, mas não menos importante, obrigada à minha família, em especial aos meus pais e à minha irmã. Obrigada por todos os sacrifícios, pelo apoio incondicional e por nunca deixarem de acreditar em mim. Sem vocês nada disto teria sido possível.

A todos vocês, o meu mais sincero obrigada.

## RESUMO

Em Portugal, as localizações dos atuais quartéis de bombeiros nunca foram alvo de um estudo estratégico que considerasse a relação entre custo e eficácia. A instalação de diversos quartéis de bombeiros adveio da vontade popular e da sua necessidade de obter uma rápida resposta em caso de uma ocorrência. Assim, existe um elevado número de corporações em Portugal Continental, quando comparado com a reduzida dimensão do território, e uma desigual distribuição dos mesmos. Considerando esta desigual distribuição dos recursos existentes, não é possível garantir uma intervenção eficiente e uma resposta atempada em todo o país. Deste modo, surge a necessidade de assegurar uma preparação eficaz para combater qualquer incêndio urbano independentemente da sua localização.

No presente trabalho realiza-se um estudo da situação atual das localizações dos quartéis de bombeiros no distrito do Porto. Posteriormente, recorrendo a modelos de localização, *Set Covering Location Model* e *Max Covering Location Model*, pretende-se otimizar estas localizações perante diferentes cenários.

Os resultados demonstram que a velocidade e a proporção de ocorrências cobertas têm um grande impacto no número e nas localizações selecionadas para a instalação dos quartéis de bombeiros. De um modo geral, as localizações possíveis para os eventos esporádicos mas de grande impacto revelam ter uma elevada influência na seleção das localizações dos quartéis de bombeiros. As análises realizadas confirmam a ineficiência de algumas das atuais localizações e a importância de um estudo estratégico prévio.

**Palavras-chave:** Otimização, Modelos de Localização, Incêndios Urbanos, Quartéis de Bombeiros

## ABSTRACT

In Portugal, the locations of the current fire stations were never strategically studied, regarding the relationship between cost and effectiveness. The installation of several fire brigades came from people's desires and the necessity to obtain a quick response in case of an occurrence. So, there is a high number of fire brigades in Portugal compared to the small size of the territory and an unequal distribution. Considering this unequal distribution of existing resources, it is impossible to guarantee an efficient intervention and a timely response throughout the country. In this way, there is a need to ensure effective preparation for fighting any urban fire, regardless of its location.

In this work, the study of the current situation of the fire station locations in the Porto district is carried out. Later, using location models, Set Covering Location Model and Max Covering Location Model, it is aimed to optimise these locations under different scenarios.

The results show that the speed and proportion of covered events have a huge impact on the number and locations selected for the installation of fire stations. In general, the possible locations for sporadic but high impact events prove to have a high influence on the selection of fire station locations. The analyses performed confirm the inefficiency of some of the current locations and the importance of a strategic study prior to that.

**Keywords:** Optimization, Location Models, Urban Fires, Fire Stations

# ÍNDICE

<b>Índice de Figuras</b>	<b>viii</b>
<b>Índice de Tabelas</b>	<b>x</b>
<b>Siglas</b>	<b>xi</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2 Estado de Arte</b>	<b>3</b>
2.1 Modelos de Otimização . . . . .	3
2.2 Modelos de localização . . . . .	4
2.3 Modelos de natureza estática para a localização de quartéis de bombeiros	6
2.4 Modelos de natureza dinâmica para a localização de quartéis de bombeiros	8
<b>3 Modelação</b>	<b>10</b>
3.1 Notação . . . . .	10
3.2 <i>Set Covering Location Problem</i> . . . . .	11
3.3 <i>Set Covering Location Problem multi-period</i> . . . . .	13
3.4 <i>Max Covering Location Problem</i> . . . . .	14
<b>4 Estudo de Caso</b>	<b>15</b>
4.1 Dados . . . . .	15
4.2 Pressupostos . . . . .	18
4.3 Situação Atual . . . . .	19
4.4 Cenários . . . . .	19
<b>5 Resultados</b>	<b>22</b>
5.1 Modelo de <i>Set Covering</i> . . . . .	22
5.1.1 Análise de Sensibilidade . . . . .	23
5.1.2 Alterações na Função Objetivo . . . . .	31
5.2 Modelo de <i>Set Covering multi-period</i> . . . . .	32

5.2.1	Alterações na Função Objetivo . . . . .	34
5.3	Modelo de <i>Max Covering</i> . . . . .	35
5.3.1	Modelo de <i>Max Covering</i> para o ano de 2020 . . . . .	36
5.3.2	Modelo de <i>Max Covering</i> para todos os anos . . . . .	39
<b>6</b>	<b>Conclusão</b>	<b>41</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>43</b>
	<b>Anexos</b>	
<b>I</b>	<b>Codificação Localizações</b>	<b>46</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

2.1	Classificação dos Modelos de Localização Discreta (Daskin, 2008). . . . .	5
4.1	Localizações dos pontos de referência das freguesias do distrito do Porto. . .	16
4.2	Localizações dos quartéis de bombeiros existentes atualmente no distrito do Porto. . . . .	16
4.3	Localizações das freguesias onde poderão existir eventos esporádicos e dos quartéis de bombeiros existentes atualmente no distrito do Porto. . . . .	18
5.1	Localizações dos quartéis de bombeiros necessários, para cada cenário, considerando os dados do ano 2020. . . . .	23
5.2	Número de quartéis de bombeiros necessários, para o cenário 1, considerando uma dada velocidade média, em km/h. . . . .	24
5.3	Localizações dos quartéis de bombeiros necessários, para o cenário 1, dada uma velocidade média de 30 km/h, no mapa da esquerda, e de 50km/h, no da direita. . . . .	24
5.4	Número de novos quartéis de bombeiros necessários, para o cenário 2, considerando uma dada velocidade média, em km/h. . . . .	25
5.5	Localizações dos quartéis de bombeiros necessários, para o cenário 2, dada uma velocidade média de 30 km/h, no mapa da esquerda, e de 50km/h, no da direita. . . . .	26
5.6	Número de quartéis de bombeiros novos e existentes necessários, para o cenário 3, considerando uma dada velocidade média, em km/h. . . . .	26
5.7	Localizações dos quartéis de bombeiros necessários, para o cenário 3, dada uma velocidade média de 30 km/h, no mapa da esquerda, e de 50km/h, no da direita. . . . .	27
5.8	Número de quartéis de bombeiros novos e existentes necessários, para o cenário 4, considerando uma dada velocidade média, em km/h. . . . .	27
5.9	Localizações dos quartéis de bombeiros necessários, para o cenário 4, dada uma velocidade média de 30 km/h, no mapa da esquerda, e de 50km/h, no da direita. . . . .	28

5.10	Número de quartéis de bombeiros necessários, para cada cenário, considerando uma dada proporção. . . . .	29
5.11	Localizações dos quartéis de bombeiros necessários, para o cenário 1, dada uma proporção de 0.90, onde se assinalam as localizações que se mantêm independentemente da proporção considerada. . . . .	30
5.12	Localizações dos quartéis de bombeiros necessários, para o cenário 2, dada uma proporção de 0.90, onde se assinalam as localizações que se mantêm independentemente da proporção considerada. . . . .	30
5.13	Localizações dos quartéis de bombeiros necessários, para o cenário 3, dada uma proporção de 0.90, onde se assinalam as localizações que se mantêm independentemente da proporção considerada. . . . .	31
5.14	Número de quartéis de bombeiros necessários e de freguesias cobertas para cada cenário, considerando a função objetivo (3.1) no gráfico da esquerda e a (3.6) no gráfico da direita. . . . .	32
5.15	Localizações dos quartéis de bombeiros necessários, para o cenário 1, onde se assinalam as localizações que se mantêm do modelo <i>single-period</i> . . . . .	33
5.16	Localizações dos quartéis de bombeiros necessários, para o cenário 4, onde se assinalam as localizações que se mantêm do modelo <i>single-period</i> . . . . .	34
5.17	Localizações dos quartéis de bombeiros necessários, para o cenário 4, considerando a função objetivo (3.7) no gráfico da esquerda e a (3.6) no gráfico da direita. . . . .	35
5.18	Localizações dos quartéis de bombeiros necessários, para o cenário 1, onde se assinalam as localizações que se mantêm do modelo <i>set covering</i> . . . . .	36
5.19	Localizações dos quartéis de bombeiros necessários, para o cenário 2, onde se assinalam as localizações que se mantêm do modelo <i>set covering</i> . . . . .	37
5.20	Localizações dos quartéis de bombeiros necessários, para a situação 1 considerada no cenário 3, onde se assinalam as localizações que se mantêm do modelo <i>set covering</i> . . . . .	37
5.21	Localizações dos quartéis de bombeiros necessários, para a situação 1 considerada no cenário 4, onde se assinalam as localizações que se mantêm do modelo <i>set covering</i> . . . . .	38
5.22	Proporção máxima de eventos recorrentes cobertos, para cada cenário, considerando o histórico de ocorrências de cada ano bem como o total das ocorrências. . . . .	39

## ÍNDICE DE TABELAS

4.1	Percentagem máxima de eventos recorrentes cobertos, em cada ano em estudo.	19
4.2	Quadro resumo dos cenários analisados. . . . .	21
5.1	Número mínimo de quartéis de bombeiros necessários para cada cenário, considerando os dados do ano 2020. . . . .	22
5.2	Número mínimo de quartéis de bombeiros necessários para cada cenário, considerando os dados dos 9 anos. . . . .	33
5.3	Número de freguesias cobertas quando considerado o número total de ocorrências dos 9 anos, para cada cenário. . . . .	40
I.1	Pontos de referências das freguesias do distrito do Porto. . . . .	46
I.2	Localizações e codificação dos quartéis de bombeiros do distrito do Porto. .	50

## SIGLAS

<b>ANEPC</b>	Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil (pp. 1, 15, 17)
<b>API</b>	<i>Application Programming Interface</i> (p. 17)
<b>BSU</b>	<i>Basic Spatial Unit</i> (p. 6)
<b>CR</b>	Categoria de Risco (pp. 12, 17)
<b>DES</b>	<i>Discrete Event Simulation</i> (p. 8)
<b>FLEET-EXC</b>	<i>Facility Location and Equipment Emplacement Technique model with Expected Covering</i> (pp. 7, 8)
<b>HQM</b>	<i>Hypercube Queuing Model</i> (pp. 6–8)
<b>MCLP</b>	<i>Max Covering Location Problem</i> (pp. 5, 6)
<b>PI</b>	Programação Inteira (p. 4)
<b>PL</b>	Programação Linear (pp. 3, 4)
<b>SCLP</b>	<i>Set Covering Location Problem</i> (pp. 5, 6)

## INTRODUÇÃO

Os sistemas de serviços de emergência têm vindo a ser estudados em diversos países do mundo, em alguns casos, devido ao elevado crescimento em contexto urbano. As localizações bem como o número de quartéis de bombeiros a instalar numa dada região é uma das decisões mais importantes enfrentadas nesta área (Yang et al., 2007).

Em Portugal<sup>1</sup>, as localizações atuais dos quartéis de bombeiros nunca foram alvo de um estudo estratégico que considerasse a relação entre custo e eficácia, como realizado em outros países. No caso português, o maior impulsionador da instalação de diversos quartéis de bombeiros voluntários foi a vontade popular e a sua necessidade de obter uma rápida resposta em caso de uma ocorrência. Tal é possível observar pelos mais de 400 quartéis de bombeiros dependentes de Associações Humanitárias ao longo da extensão de Portugal Continental.

Para além do elevado número de quartéis de bombeiros em Portugal Continental quando comparado com o de outros países com uma maior densidade populacional bem como área territorial, também é de realçar a desigualdade da distribuição destes ao longo do território português.<sup>1</sup> Deste modo, a Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil (ANEPC) gostaria de avaliar se a distribuição dos recursos existente garante uma intervenção eficiente em todo o país e se há uma resposta atempada em áreas com uma menor demografia. Atualmente observa-se na zona litoral uma sobreposição de quartéis de bombeiros, enquanto no interior do país estes parecem ser em número insuficiente. Tendo por base estes fatores, surge a necessidade de assegurar uma preparação eficaz para combater qualquer incêndio urbano independentemente da sua localização.

Esta dissertação surge neste âmbito, cujo objetivo é otimizar as localizações dos quartéis de bombeiros do distrito do Porto, tendo por base a informação histórica dos incêndios urbanos. Considera-se como um incêndio urbano, "a combustão, sem controlo no espaço e no tempo, dos materiais combustíveis existentes em edifícios, incluindo os constituintes dos elementos de construção e revestimento"(Castro & Abrantes, 2005). Pretende-se então que os incêndios urbanos sejam assistidos num dado intervalo de tempo, ou seja, sejam

---

<sup>1</sup>Informações dadas em reunião com o Engenheiro José Pedro Lopes, Diretor Nacional de Bombeiros da Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil (ANEPC).

cobertos. Entende-se por um evento coberto, uma ocorrência que foi atendida respeitando o intervalo de tempo estabelecido como tempo limite.

Recorrendo a modelos de localização discreta baseados na cobertura, pretende-se:

1. Estudar quais as localizações ótimas em que os quartéis de bombeiros deveriam ter sido estabelecidos, se tivesse sido realizado um estudo estratégico prévio;
2. Perceber, com base nas localizações atuais dos quartéis de bombeiros do distrito do Porto, quais as zonas em que existe um déficit de cobertura e onde é necessário instalar novos quartéis de bombeiros;
3. Averiguar quais dos quartéis de bombeiros existentes atualmente são imprescindíveis na resposta atempada às ocorrências, uma vez que existem zonas com sobreposição de quartéis de bombeiros.

Para além da Introdução, esta dissertação está dividida em 5 outros capítulos:

- **Estado de Arte** - É apresentada uma revisão da literatura existente no contexto dos modelos de localização bem como no contexto mais específico dos problemas de localização dos quartéis de bombeiros e respetiva prontidão.
- **Modelação** - Neste capítulo são apresentados os modelos de localização discreta baseados em cobertura utilizados para atingir o objetivo delineado. Os modelos de localização de *Set Covering* e *Max Covering* são aplicados a dois contextos temporais diferentes, isto é, considerando os modelos *single-period* e *multi-period*.
- **Estudo de Caso** - Neste capítulo é apresentado o estudo de caso. Desta forma, são apresentados os dados utilizados e pressupostos considerados. É analisada a situação atual das localizações dos quartéis de bombeiros e são descritos os 4 cenários desenhados, com vista ao alcance dos objetivos descritos.
- **Resultados** - A apresentação e discussão dos resultados obtidos são expressas neste capítulo. É ainda realizada uma análise de sensibilidade aos valores atribuídos a alguns parâmetros e são apresentados os resultados obtidos aplicando cada um dos modelos utilizados.
- **Conclusão** - As considerações finais deste estudo e as sugestões de possíveis trabalhos futuros são expressas neste capítulo.

## ESTADO DE ARTE

Este capítulo está dividido em quatro secções. As duas primeiras abordam os conceitos matemáticos que estão na base da metodologia aplicada e os modelos clássicos de localização. As duas últimas secções prendem-se com uma revisão da literatura relacionada com os trabalhos publicados que abordam a otimização das localizações dos quartéis de bombeiros.

### 2.1 Modelos de Otimização

Os conceitos referentes aos modelos de otimização apresentados nesta secção, salvo referência em contrário, são baseados em Winston e Goldberg (2004).

Um modelo de otimização é um modelo matemático prescritivo, isto é, um modelo que recomenda uma determinada decisão. Este é constituído por uma ou mais funções objetivo, pelas variáveis de decisão e pelas restrições do problema (El Ghaoui et al., 2014). Ou seja, um modelo de otimização determina os valores das variáveis de decisão que otimizam a função objetivo garantindo que as restrições estabelecidas são satisfeitas. No caso da função objetivo é possível ter como propósito a sua maximização ou minimização, podendo existir apenas uma ou várias funções objetivo (Modelo Multi-objetivo). As variáveis de decisão devem descrever todas as decisões a serem tomadas no problema em questão, sendo possível controlar o seu valor, com vista a otimizar o valor da função objetivo. Todos os conjuntos de valores das variáveis de decisão que satisfaçam todas as restrições impostas pelo modelo, ou seja, respeitem todas as suas limitações, definem a região admissível do problema. Assim, a solução ótima para o modelo é qualquer ponto pertencente à região admissível que otimize a função objetivo.

No âmbito dos problemas de otimização, um problema de programação linear (PL) é um problema onde se otimiza (maximiza ou minimiza) uma função linear das variáveis de decisão, a função objetivo. Nestes problemas, os valores das variáveis de decisão devem satisfazer um conjunto de restrições, sendo que cada uma delas é definida por uma equação ou uma desigualdade linear. Cada variável deverá ainda estar associada a uma restrição que estabelece o seu domínio. Quando num problema de programação linear se verificam

condições de integralidade não negativa de uma ou mais variáveis, está-se perante um problema de programação linear inteira mista. Caso todas as variáveis verifiquem as condições de integralidade não negativa, trata-se de um problema de programação inteira (PI). É possível estabelecer uma relação entre os PL e os PI, isto é, quando num problema de programação inteira se omite as restrições de integralidade obtém-se um problema de programação linear, sendo este denominado por relaxação linear do problema de programação inteira. Desta forma, qualquer solução do problema PI é também solução do problema PL e é possível através da solução ótima do problema PL estabelecer um limite, inferior ou superior, dependendo do objetivo do problema, para o problema PI. Ou seja, considerando  $S$  o conjunto de soluções pertencentes à região admissível tem-se que

$$S_{PI} \subseteq S_{PL}. \quad (2.1)$$

Considerando  $z$  a função objetivo, tem-se que, no caso de um problema de minimização, o valor ótimo de  $z$  na relaxação PL é menor ou igual ao valor ótimo de  $z$  na PI, bem como, no caso de um problema de maximização, o valor ótimo de  $z$  na relaxação PL é maior ou igual ao valor ótimo de  $z$  na PI.

Como uma das técnicas mais utilizadas para a resolução de problemas PI surge o algoritmo de *Branch and Bound*. Este algoritmo é baseado no princípio de que a região admissível pode ser dividida em subregiões mais pequenas. Estas subregiões são avaliadas de forma sistemática até ser encontrada a melhor solução. É um método enumerativo que de forma progressiva avalia por comparação soluções candidatas à solução ótima até identificar a melhor.

## 2.2 Modelos de localização

Dentro dos modelos de otimização destacam-se, perante o domínio do presente trabalho, os modelos de localização. Estes baseiam-se principalmente em problemas de programação inteira mista (Caunhye et al., 2011) e pretendem otimizar de acordo com a função objetivo estabelecida, as localizações das instalações, satisfazendo as necessidades da procura. As necessidades por satisfazer constam nas restrições e de modo a encontrar as localizações ótimas para as instalações são conhecidas as localizações onde a procura deve ser satisfeita (ReVelle et al., 2008).

Os modelos de localização, com base no espaço onde os problemas são modelados, são divididos em modelos analíticos, modelos contínuos, modelos em rede e modelos de localização discreta (Daskin, 2008). Os modelos de localização discreta podem ainda ser subdivididos entre modelos baseados na cobertura, modelos baseados na mediana e outros modelos. Esta subdivisão é apresentada na figura 2.1, retirada do artigo de Daskin (2008).

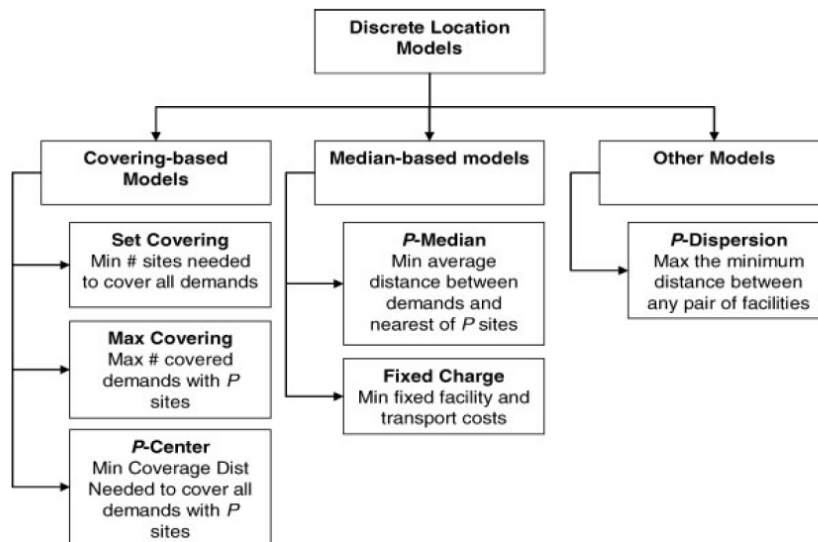


Figura 2.1: Classificação dos Modelos de Localização Discreta (Daskin, 2008).

Com base no objetivo deste trabalho, aprofundar-se-ão os modelos de localização discreta baseados na cobertura. Este tipo de modelos assume que existe algum tempo ou distância crítica de cobertura, dentro da qual as ocorrências têm de ser atendidas para serem consideradas como cobertas. Este tempo ou distância é um valor fixo e pré-determinado (Boonmee et al., 2017).

Destacam-se o *Set Covering Location Problem* (SCLP) e o *Max Covering Location Problem* (MCLP). O SCLP reside na seleção das localizações de forma a minimizar o número de instalações necessárias cobrindo todos os nós de procura. No entanto, em muitas situações tal não é viável ou possível, como no caso dos problemas de localização de quartéis de bombeiros, uma vez que poderia ser necessário instalar um quartel de bombeiros de modo a “cobrir” uma casa cuja localização fosse remota. Deste modo, surgem os problemas de localização de cobertura máxima, *max covering*. Estes pretendem localizar um número pré-estabelecido de instalações, maximizando o número de nós de procura cobertos num dado tempo ou distância pré-determinada. Assim, o MCLP assume que podem não existir instalações suficientes para cobrir todos os nós de procura e, nesse caso, o modelo procura as localizações que cobrem uma maior parte da procura (Daskin, 1995).

Os problemas de localização, tendo em conta as alterações que os parâmetros podem sofrer ao longo do tempo, podem subdividir-se em problemas de natureza estática e problemas de natureza dinâmica (Bolori Arabani & Farahani, 2012). As duas secções seguintes abordam esta diferença e focam a sua atenção na literatura que aborda modelos de localização para apoiar decisões sobre a localização de quartéis de bombeiros e atribuição de veículos de combate a incêndios nesses mesmos quartéis. Estes têm o intuito de assegurar o melhor desempenho possível de todo o sistema, já que uma cobertura suficiente das áreas de procura assegurando os serviços necessários, permite minimizar as perdas causadas pelas ocorrências (Jia et al., 2007).

### 2.3 Modelos de natureza estática para a localização de quartéis de bombeiros

Chevalier et al. (2012) desenvolvem um método eficiente e flexível de apoio à decisão com o propósito de auxiliar as autoridades e de alcançar uma melhor compreensão do funcionamento dos quartéis de bombeiros da Bélgica. No trabalho em questão não se consideram apenas os incêndios urbanos, consideram-se 5 categorias de emergências: incêndios urbanos, incêndios não urbanos, emergências médicas, emergências não médicas e tarefas não urgentes. O território é dividido em unidades espaciais básicas (BSU) e a informação de cada uma é resumida no seu centróide que também é utilizada como potencial localização para um quartel de bombeiros. São ainda considerados dois tipos de riscos: recorrentes e esporádicos. Um risco recorrente é um evento em que é possível estimar a sua frequência com base no histórico de ocorrências. Por sua vez, um risco esporádico é um evento raro em que não é possível determinar a sua probabilidade de ocorrência com base no histórico, mas que é necessário considerar no planeamento dos serviços devido à magnitude das suas possíveis consequências. Pretende-se encontrar a configuração mínima de custos para os serviços de emergência que lhes permita chegar ao local de uma dada proporção de ocorrências dentro de um determinado período. Além disso, pretende-se assegurar a existência de um quartel de bombeiros dentro de um dado raio de tempo de cada risco esporádico. Devido à sua complexidade, o problema é subdividido em dois: o problema da localização e o problema relativo aos recursos humanos e equipamentos. Para tal, o problema de localização trata-se de um SCLP, onde se assume que existe sempre uma equipa disponível em cada quartel e se pretende obter o número mínimo de quartéis de bombeiros necessários e as respetivas localizações, para atingir uma dada cobertura desejada. Seguidamente, no problema de afetação que diz respeito ao número de ambulâncias e número de brigadas com as respetivas equipas, é utilizado o *Hypercube Queuing Model* (HQM) em que os locais dos quartéis de bombeiros são fixados e pretende-se otimizar o número de equipas em cada quartel para satisfazer o nível de serviço requerido a um custo mínimo. Neste segundo problema não são considerados os riscos esporádicos. O facto de Chevalier et al. (2012) distinguir eventos recorrentes de eventos esporádicos, resumir cada BSU ao seu centróide e apresentar um modelo de localização com o objetivo de minimizar o número de quartéis de bombeiros, assumindo uma dada proporção necessária de eventos recorrentes cobertos, revela-se um estudo de interesse para o caso português.

Por sua vez, o problema do estudo apresentado em Murray (2013) é formulado como um problema de localização de cobertura máxima (MCLP). Este pretende estudar quais as localizações para os quartéis de bombeiros que maximizariam a cobertura da procura num dado tempo de resposta, de uma dada proporção das chamadas efetuadas. Estes parâmetros no estudo de caso apresentado são diretrizes pré-estabelecidas. Tal como no estudo Belga, assume-se que existe sempre recursos disponíveis para responder a uma qualquer chamada. Em Murray (2013) são ainda considerados dois cenários, um primeiro

### 2.3. MODELOS DE NATUREZA ESTÁTICA PARA A LOCALIZAÇÃO DE QUARTÉIS DE BOMBEIROS

---

onde não são tidos em conta os quartéis de bombeiros existentes e, posteriormente, um que tem em consideração os quartéis já existentes, estudando o impacto que manter uma parte ou a totalidade dos quartéis existentes terá na solução obtida. É, portanto, estabelecido um total de  $p$  quartéis a contruir, sendo a sua localização a que maximizar a cobertura, já que é irrealista tentar cobrir a totalidade da procura. Variando o número de quartéis a manter e a construir é possível analisar o impacto que diferentes cenários de financiamento têm sobre a procura coberta. De modo a ser ainda possível averiguar qual o número mínimo e localização dos quartéis de bombeiros necessários para satisfazer os parâmetros de tempo de resposta e cobertura das chamadas de serviço pré-estabelecidos, é ainda aplicado o *Threshold Coverage Model* e efetuada, posteriormente, uma análise do impacto do número de quartéis existentes mantidos. Como é irrealista muitas das vezes tentar cobrir todos os eventos, o modelo de localização proposto por Murray (2013) pretende, dado um determinado número de instalações, maximizar a cobertura dos eventos, otimizando assim as suas localizações. Assim, aliando os dois trabalhos apresentados seria possível obter o número mínimo de quartéis através do modelo proposto por Chevalier et al. (2012) e, posteriormente, utilizar esse número como dado inicial no modelo de Murray (2013) e obter a percentagem máxima de cobertura possível, bem como as localizações para as quais tal se verifica.

Yao et al. (2019) propõem um modelo de otimização bi-objetivo com o propósito de otimizar as localizações dos quartéis de bombeiros de Nanjing, na China, tendo em conta o acesso e a cobertura dos quartéis existentes. Procura-se, assim, minimizar o número total de quartéis de bombeiros instalados (objetivo 1) e minimizar a distância total de deslocação entre a localização das ocorrências e a dos quartéis, de modo que os quartéis fiquem localizados nas áreas de maior risco (objetivo 2). Para tal, à semelhança de Murray (2013), são também apresentados ainda dois cenários: um em que se assume que não existem quartéis de bombeiros e outro em que se pretender manter alguns ou todos os quartéis existentes.

Rodriguez et al. (2020) propõem um modelo para a localização ótima dos quartéis de bombeiros da região de Concepción, no Chile, bem como a atribuição de veículos a cada um deles. Neste trabalho obtêm-se as localizações ótimas maximizando a cobertura de emergências esperadas sob um limite de tempo de resposta, sendo possível realocar quartéis de bombeiros já existentes ou instalar novos. Considera-se ainda a possibilidade de envio de veículos em diferente número e de diferentes tipos, dependendo da região e do tipo de emergência em questão. O modelo proposto é um modelo de Localização de Instalações e de Equipamento com Cobertura Esperada (FLEET-EXC), numa abordagem iterativa, em que em cada iteração, é utilizado o HQM. Na sequência deste trabalho, surge o estudo de Rodriguez et al. (2021) onde é apresentada uma abordagem iterativa de simulação-otimização, em que a cada iteração a localização ótima quer dos quartéis de bombeiros quer dos veículos é atualizada com base nos parâmetros de utilização determinados no modelo de simulação. Para o cálculo da solução ótima, é apresentada uma extensão robusta do modelo FLEET-EXC, solução que posteriormente é utilizada

como dado inicial no modelo de simulação de eventos discretos (DES) para calcular os parâmetros de utilização. Caso estes respeitem o nível de precisão desejado, a solução é mantida, caso contrário, uma nova solução é calculada com os novos parâmetros.

Comparativamente com o estudo apresentado em Rodriguez et al. (2020), Rodriguez et al. (2021) verifica que uma formulação robusta irá maximizar o pior cenário de cobertura de emergências, algo desejado nas operações dos bombeiros. É possível ainda verificar que o modelo DES, quando comparado com o HQM, apresenta uma avaliação mais realista da utilização esperada dos veículos. Deste modo, é possível construir um conjunto de incerteza para os parâmetros de utilização e incorporar estes conjuntos como restrições no modelo FLEET-EXC para que a aleatoriedade seja considerada.

## **2.4 Modelos de natureza dinâmica para a localização de quartéis de bombeiros**

Na literatura apresentada até então, os modelos propostos são de natureza estática, ou seja, onde não são consideradas variações temporais e espaciais da procura e do tempo de viagem dos veículos.

De forma a colmatar esta lacuna na literatura, Kumar et al. (2019) desenvolve um modelo para determinar a localização ideal dos quartéis de bombeiros e a respetiva alocação de recursos. Este tem como intuito maximizar a cobertura da procura flexível de veículos de combate a incêndios, onde a variação da procura, do tempo de viagem e a seleção de localizações dependente do espaço urbano são modelados em função do tempo. Para tal, o dia é dividido em 6 períodos de tempo, 4h de duração cada um. Este modelo tem ainda em consideração os custos de instalação de um novo quartel, bem como os custos anuais do mesmo e a ocupação urbana da região em estudo, região sul de Mumbai, Índia. Os autores sugerem a criação de mini quartéis em áreas com uma elevada densidade urbana, de modo a servir a procura, satisfazendo as limitações de tempo impostas. Estes mini quartéis consistem em pequenos postos que permitam o rápido acesso às instalações e aos equipamentos de incêndio. São localizados em zonas com elevada densidade populacional que não possibilitem uma construção das dimensões de um quartel de bombeiros. À semelhança de estudos anteriores, são também considerados dois cenários: o primeiro em que não são consideradas as localizações dos quartéis de bombeiros já existentes e o segundo em que as localizações destes são fixadas. Assim, o problema é formulado como um modelo de programação linear inteira, com o objetivo de determinar a localização espaço temporal de mini quartéis e quartéis de bombeiros, e a distribuição dos veículos de combate a incêndios pelos locais durante diferentes períodos de um dia.

Tendo em consideração a literatura analisada e o objetivo delineado, esta dissertação basear-se-á no trabalho de Chevalier et al. (2012), na aplicação do modelo de minimização do número de quartéis, bem como na distinção entre eventos recorrentes e eventos

#### 2.4. MODELOS DE NATUREZA DINÂMICA PARA A LOCALIZAÇÃO DE QUARTÉIS DE BOMBEIROS

---

esporádicos. O modelo de maximização da cobertura esperada tratado em Murray (2013), onde se estabelece um dado número de quartéis a instalar de modo a maximizar a cobertura de ocorrências, será a base do modelo de localização de *max covering* aplicado. Assim, é possível aliá-lo ao resultado obtido do modelo de minimização do número de quartéis de bombeiros, utilizando esse resultado como dado inicial do modelo de maximização da cobertura.

## MODELAÇÃO

Neste capítulo apresentam-se os modelos aplicados no âmbito da otimização das localizações dos quartéis de bombeiros. À semelhança do realizado em Chevalier et al. (2012), o espaço é discretizado, a informação é agregada ao nível da freguesia, sendo considerado apenas um ponto de referência para cada uma delas. Para os atuais quartéis de bombeiros são consideradas as suas localizações exatas, enquanto para novos quartéis consideram-se como possíveis localizações os pontos de referência das freguesias. Restringe-se que uma freguesia onde exista um quartel de bombeiros, não é uma possível localização para a instalação de um novo quartel. Assume-se, ainda, que qualquer quartel de bombeiros tem os equipamentos e os recursos humanos necessários para fazer face a qualquer tipo de evento. O nível de serviço é modelado através da definição de uma distância máxima permitida entre os quartéis de bombeiros e os locais dos eventos. Assim, considera-se que estes eventos estão cobertos, se for possível garantir que os quartéis e as localizações dos eventos se encontram a uma distância, em tempo, inferior ou igual à pré-definida.

De modo a tornar mais clara a apresentação dos modelos mencionados e a sua explicação, utiliza-se a notação presente na secção 3.1, daqui em diante, no presente trabalho.

### 3.1 Notação

Os modelos aplicados envolvem os seguintes conjuntos, parâmetros e variáveis:

#### *Conjuntos*

- $N$ : conjunto das localizações de todos os pontos de referência das freguesias;
- $G$ : conjunto das localizações dos quartéis de bombeiros já existentes;
- $L$ : conjunto de todas as localizações consideradas, onde  $L = N \cup G$ ;
- $S$ : conjunto de freguesias nas quais é possível ocorrerem eventos esporádicos, em que  $S \subset N$ ;

- $T$ : conjunto dos anos em estudo.

#### Parâmetros

- $P$ : fração de eventos recorrentes que se pretende garantir que está coberta por um quartel de bombeiros dentro do tempo máximo estabelecido;
- $Q$ : número de quartéis a construir;
- $w_i$ : representa o número de eventos recorrentes ocorridos na localização  $i \in N$ ;
- $a_{ij} \in \{0, 1\}$ , onde  $a_{ij} = 1$  se, para eventos recorrentes, um quartel de bombeiros na localização  $i \in L$  se encontra a uma distância aceitável dos eventos ocorridos em  $j \in N$  e  $a_{ij} = 0$  caso contrário;
- $b_{ij} \in \{0, 1\}$ , onde  $b_{ij} = 1$  se, para eventos esporádicos, um quartel de bombeiros na localização  $i \in L$  se encontra a uma distância aceitável dos eventos ocorridos em  $j \in S$  e  $b_{ij} = 0$  caso contrário;
- $\varepsilon$ : representa um valor muito pequeno.

#### Variáveis

- $Y_i \in \{0, 1\}$ , onde  $Y_i = 1$  se existe um quartel de bombeiros na localização  $i \in L$  e  $Y_i = 0$  caso contrário;
- $Z_i \in \{0, 1\}$ , onde  $Z_i = 1$  se a localização  $i \in N$  está a uma distância aceitável, para um evento recorrente, de um quartel de bombeiros, ou seja, se a localização  $i$  se encontra coberta e  $Z_i = 0$  caso contrário.

### 3.2 Set Covering Location Problem

Neste tipo de problema pretende-se selecionar as localizações de forma a minimizar o número de instalações necessárias cobrindo todos os nós de procura. Para tal, segue-se o modelo apresentado em Chevalier et al. (2012), considerando apenas a informação histórica dos incêndios urbanos de um dado ano, com ligeiras alterações na função objetivo. No modelo de Chevalier et al. (2012) a variável de decisão  $Z_i$  não consta na função objetivo. Assim, esta é uma variável livre, em que o seu valor poderá não corresponder efetivamente à cobertura da freguesia. Tendo tal em consideração, utilizando um valor de  $\varepsilon$  suficientemente pequeno, pretende-se ter em conta na função objetivo a variável  $Z_i$ , garantindo que esta não tenha um elevado impacto na mesma e sim que o seu valor esteja de acordo com as freguesias efetivamente cobertas.

Em Portugal encontram-se regulamentadas as disposições de segurança contra incêndio aplicáveis a todos os edifícios (*Decreto-Lei n.º 220/2008*, 2008). Estes edifícios são classificados quanto à sua utilização-tipo, isto é, a classificação do seu uso dominante, e

quanto à sua categoria de risco. Relativamente à categoria de risco (CR), cada edifício está classificado em um de quatro níveis de risco de incêndio: risco reduzido (1ª CR), risco moderado (2ª CR), risco elevado (3ª CR) e risco muito elevado (4ª CR). Deste modo, tal como no modelo proposto por Chevalier et al. (2012), são distinguidos dois tipos de eventos. Os eventos recorrentes são aqueles que correspondem ao histórico dos incêndios urbanos e os eventos esporádicos que correspondem a eventos mais raros que ocorrem em edifícios de 3ª ou 4ª categoria de risco. Tendo presente a dispersão dos eventos recorrentes é irrazoável considerar que todos eles tenham que ser cobertos dentro do tempo/distância desejável. Deste modo, estabelece-se uma percentagem de eventos recorrentes a cobrir. Por outro lado, considera-se a necessidade de cobrir todas as localizações onde exista a possibilidade de ocorrer um evento esporádico.

Apresenta-se, em seguida, o modelo de localização *set covering single-period* aplicado.

$$\min \sum_{i \in L} Y_i - \varepsilon \sum_{i \in N} Z_i w_i \quad (3.1)$$

$$\text{s.a.} \quad \sum_{i \in L} a_{ij} Y_i \geq Z_j, \quad \forall j \in N \quad (3.2)$$

$$\sum_{i \in N} Z_i w_i \geq P \sum_{i \in N} w_i \quad (3.3)$$

$$\sum_{i \in L} b_{ij} Y_i \geq 1, \quad \forall j \in S \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} Y_i &\in \{0, 1\} \quad \forall i \in L \\ Z_i &\in \{0, 1\} \quad \forall i \in N \end{aligned} \quad (3.5)$$

A função objetivo (3.1) minimiza o número de quartéis de bombeiros. De modo, a impor que o valor de  $Z_i$  seja 1 quando uma freguesia se encontra coberta efetivamente por um quartel, é incluído na função objetivo do modelo uma ponderação deste valor ( $\varepsilon \sum_{i \in N} Z_i$ ). De forma, a ter em consideração primeiramente as freguesias com um maior número de ocorrências, reajusta-se a função objetivo do modelo apresentado em Chevalier et al. (2012), como apresentado em (3.1). Pretendendo ter em conta a cobertura de todas as freguesias independentemente de se verificar ou não ocorrências e, caso afirmativo, qual o seu número, têm-se em consideração a função objetivo (3.6):

$$\min \sum_{i \in L} Y_i - \varepsilon \sum_{i \in N} Z_i. \quad (3.6)$$

As restrições (3.2) garantem que cada freguesia  $j \in N$  é considerada coberta se pelo menos existir um quartel de bombeiros localizado a uma distância considerada aceitável. A restrição (3.3) estabelece que pelo menos uma dada fração  $P$  de eventos recorrentes ocorre em freguesias que se encontram cobertas a uma distância considerada aceitável. As restrições (3.4) expressam que deverá existir pelo menos um quartel de bombeiros a uma distância considerada aceitável de todas as freguesias em que existam edifícios de 3ª

e 4ª categorias de risco, ou seja, que deverá existir pelo menos um quartel de bombeiros a uma distância considerada aceitável de todos os eventos esporádicos. As restrições (3.5) estabelecem o domínio das variáveis de decisão.

### 3.3 Set Covering Location Problem multi-period

No seguimento do modelo apresentado na secção anterior, um modelo *single-period*, surge a necessidade de estender o modelo e que este considere os dados de vários anos. Desta forma, com base no modelo anterior, procedendo às respetivas alterações necessárias, apresenta-se o modelo de localização *set covering multi-period*. Considere-se  $w_{it}$  o número de eventos recorrentes ocorridos na localização  $i \in N$  no ano  $t \in T$ .

$$\min \sum_{i \in L} Y_i - \varepsilon \sum_{i \in N} Z_i \left( \sum_{t \in T} w_{it} \right) \quad (3.7)$$

$$\text{s.a.} \quad \sum_{i \in L} a_{ij} Y_i \geq Z_j, \quad \forall j \in N \quad (3.8)$$

$$\sum_{i \in N} Z_i w_{it} \geq P \sum_{i \in N} w_{it} \quad \forall t \in T \quad (3.9)$$

$$\sum_{i \in L} b_{ij} Y_i \geq 1, \quad \forall j \in S \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} Y_i &\in \{0, 1\} \quad \forall i \in L \\ Z_i &\in \{0, 1\} \quad \forall i \in N \end{aligned} \quad (3.11)$$

Os dois modelos apresentados apenas diferem no intervalo de tempo considerado, isto é, no modelo da secção anterior consideram-se somente as ocorrências correspondentes a um ano  $t$ , enquanto que no modelo apresentado nesta secção se consideram todos os anos  $t \in T$ . Deste modo, apenas se observam diferenças na função objetivo e nas restrições (3.9).

A função objetivo (3.7) continua a minimizar o número de quartéis de bombeiros. Tal como explicado anteriormente, de forma a forçar que o valor de  $Z_i$  seja 1 quando uma freguesia está coberta por um quartel, é incluído na função objetivo do modelo uma ponderação deste valor ( $\varepsilon \sum_i Z_i$ ). De modo a ser considerado em primeiro lugar as freguesias com maior número de ocorrências, coloca-se a função objetivo como apresentado em (3.7). Caso se pretenda ter em conta a cobertura de todas as freguesias, independentemente se estas tiveram ou não alguma ocorrência, a função objetivo corresponde à segunda função objetivo do modelo anterior, a equação (3.6). As restrições (3.9) estabelecem que, em cada ano  $t \in T$ , pelo menos uma dada fração  $P$  de eventos recorrentes ocorre em freguesias que se encontram a uma distância considerada aceitável de um quartel de bombeiros.

### 3.4 *Max Covering Location Problem*

O problema de localização de máxima cobertura pretende localizar  $Q$  instalações, maximizando o número de eventos recorrentes cobertos. Uma vez que os eventos esporádicos têm que ser cobertos na sua totalidade, este modelo apenas considera os eventos recorrentes. Com base no modelo clássico (Church & ReVelle, 1974) e no modelo apresentado em Murray (2013), efetuando as alterações necessárias tendo em conta a notação e os pressupostos considerados no problema em estudo, apresenta-se, em seguida, o modelo de localização de *max covering* aplicado.

$$\max \frac{\sum_{i \in N} Z_i w_i}{\sum_{i \in N} w_i} \quad (3.12)$$

$$\text{s.a.} \quad \sum_{i \in L} a_{ij} Y_i \geq Z_j, \quad \forall j \in N \quad (3.13)$$

$$\sum_{i \in L} Y_i = Q \quad (3.14)$$

$$\begin{aligned} Y_i &\in \{0, 1\} \quad \forall i \in L \\ Z_i &\in \{0, 1\} \quad \forall i \in N \end{aligned} \quad (3.15)$$

A função objetivo (3.12) maximiza o número de eventos recorrentes cobertos, isto é, maximiza a cobertura esperada. Esta difere da função objetivo do modelo de maximização apresentado em Murray (2013), de modo ao valor ótimo da função objetivo representar a proporção máxima de eventos recorrentes cobertos. As restrições (3.13) garantem que cada freguesia  $j \in N$  é considerada coberta se pelo menos existir um quartel de bombeiros localizado a uma distância considerada aceitável. A restrição (3.14) especifica o número de quartéis de bombeiros a considerar para o cenário em estudo. Neste trabalho, este número  $Q$  é obtido através do número de instalações resultante do modelo de localização *set covering*. As restrições (3.15) estabelecem o domínio das variáveis de decisão.

## ESTUDO DE CASO

### 4.1 Dados

Tendo presente os objetivos estabelecidos para estudar o distrito do Porto e a metodologia apresentada, recorre-se aos dados facultados pela ANEPC. Esses ficheiros dispõem de informações relativas às freguesias, aos quartéis de bombeiros, às ocorrências registadas - local, data e hora - e às localizações dos edifícios de 3<sup>a</sup> e 4<sup>a</sup> categorias de risco. De entre os diversos ficheiros facultados, recolhem-se e analisam-se as seguintes informações relativas a cada freguesia:

- Distrito;
- Concelho;
- Latitude do ponto de referência da freguesia;
- Longitude do ponto de referência da freguesia.

Relativamente a cada quartel de bombeiros, recolhe-se ainda as seguintes informações:

- Freguesia em que se encontra;
- Latitude do quartel de bombeiros;
- Longitude do quartel de bombeiros;
- Designação do respetivo quartel.

Desta forma, foi possível construir os mapas onde se apresentam os pontos de referência das 243 freguesias do distrito do Porto (figura 4.1) e a localização dos 45 quartéis de bombeiros do distrito do Porto (figura 4.2).

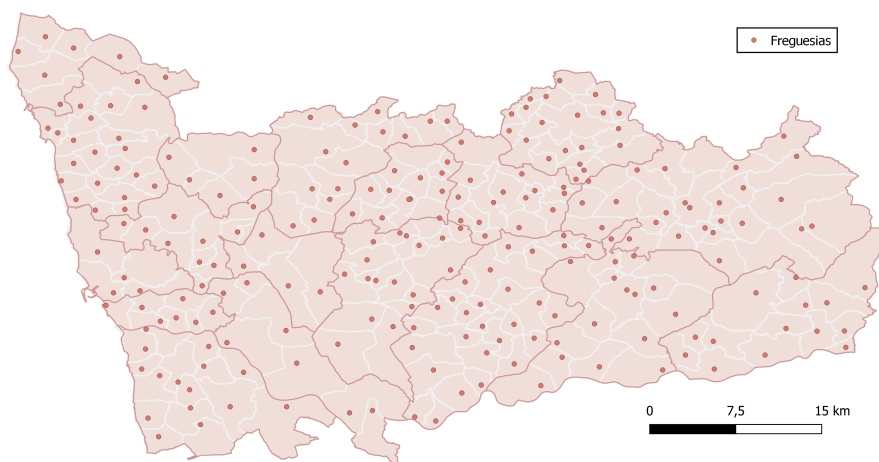


Figura 4.1: Localizações dos pontos de referência das freguesias do distrito do Porto.

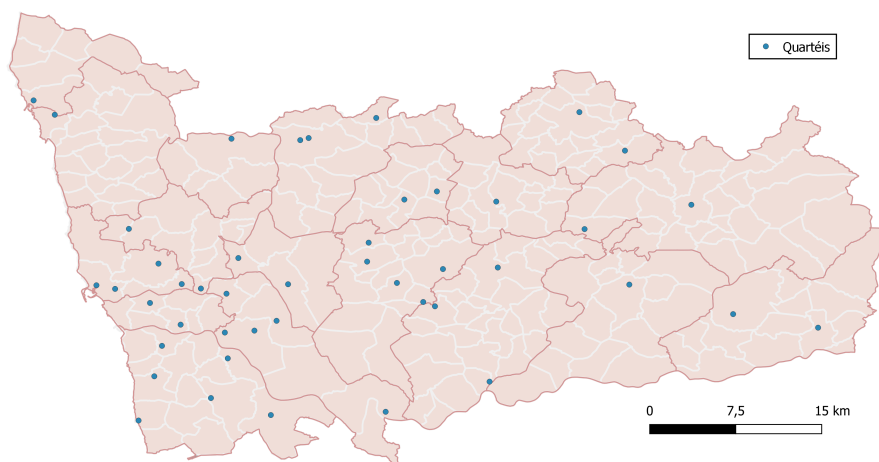


Figura 4.2: Localizações dos quartéis de bombeiros existentes atualmente no distrito do Porto.

Na figura 4.2, onde se apresentam as localizações dos quartéis de bombeiros, é possível observar que existem 3 freguesias onde existem 2 quartéis de bombeiros e 39 freguesias onde existe apenas um quartel, contrastando com as 201 freguesias onde não existe nenhum quartel de bombeiros. É de notar que, ao contrário das freguesias em que é utilizado um ponto de referência para cada uma delas, no caso dos quartéis são utilizadas as localizações exatas dos quartéis de bombeiros atuais. Ou seja, utilizando a notação apresentada na

secção 3.1,  $L$  é o conjunto de todas as localizações possíveis tal que  $L = N \cup G$ , onde  $N \cap G = \emptyset$ .

De forma a facilitar o tratamento dos dados e análise dos resultados obtidos, atribuíram-se códigos quer às freguesias quer aos quartéis de bombeiros existentes no distrito do Porto. Esta codificação bem como as localizações do ponto de referência de cada freguesia e as localizações de cada quartel de bombeiros constam no anexo I.

Como indicado no capítulo 3 onde são apresentados os modelos aplicados, são necessárias as distâncias dos pontos de referências das 243 freguesias entre si bem como a sua distância aos 45 quartéis de bombeiros. Para tal, uma vez que estas não constavam na base de dados facultada, foram calculadas através das coordenadas geográficas e recorrendo à API de Geocodificação do Google (Wang & Xu, 2011).

Verifica-se ainda ser necessário tratar as informações relativas às ocorrências de incêndios urbanos. Para tal, recorre-se à base de dados disponibilizada pela ANEPC, onde se encontram datados os 13 541 incêndios urbanos ocorridos no distrito do Porto entre 2012 e 2020, inclusive. Desta base de dados, de entre as diversas variáveis apresentadas, desde o número de vítimas ao número de recursos utilizados, apenas se fez uso das datas (nomeadamente do ano de ocorrência), da freguesia, concelho e distrito da respetiva ocorrência. Desta forma, para a aplicação dos diversos modelos, utilizou-se o número de ocorrências de uma dada freguesia num determinado ano. Estas ocorrências são os considerados eventos recorrentes.

Por fim, foi realizada uma análise dos edifícios de 3<sup>a</sup> e 4<sup>a</sup> categorias de risco. Considera-se como um evento esporádico, um evento ocorrido num edifício de uma destas categorias de risco. Apesar de não estar definido em Portugal um tempo de cobertura para os eventos recorrentes, no caso dos eventos esporádicos isto não se verifica. Segundo a legislação portuguesa (*Despacho n.º 8903/2020, 2020*), um edifício de 3<sup>a</sup> ou 4<sup>a</sup> categoria de risco deve encontrar-se no máximo a uma distância de 10 km de um quartel de bombeiros ou a não mais do que 10 minutos após o despacho do primeiro alarme. É ainda necessário disponibilidade de determinados veículos. No entanto, como no presente trabalho não são analisados os veículos disponíveis em cada quartel de bombeiros e se assume que qualquer quartel tem o que for necessário para responder a qualquer ocorrência, tal não se revela pertinente aprofundar. Deste modo, e com base nos edifícios de 3<sup>a</sup> e 4<sup>a</sup> CR existentes no distrito do Porto, analisou-se quais as freguesias que possuíam ou não edifícios destas categorias de risco. No caso de uma dada freguesia possuir tais edifícios, esta tem de se encontrar coberta. Recorde-se que uma freguesia se encontra coberta caso exista um quartel de bombeiros a uma distância aceitável da mesma. Apresenta-se, na figura 4.3, um mapa onde se mostram as 73 freguesias do distrito do Porto onde poderão ocorrer eventos esporádicos bem como as localizações dos 45 quartéis de bombeiros existentes atualmente no distrito do Porto.

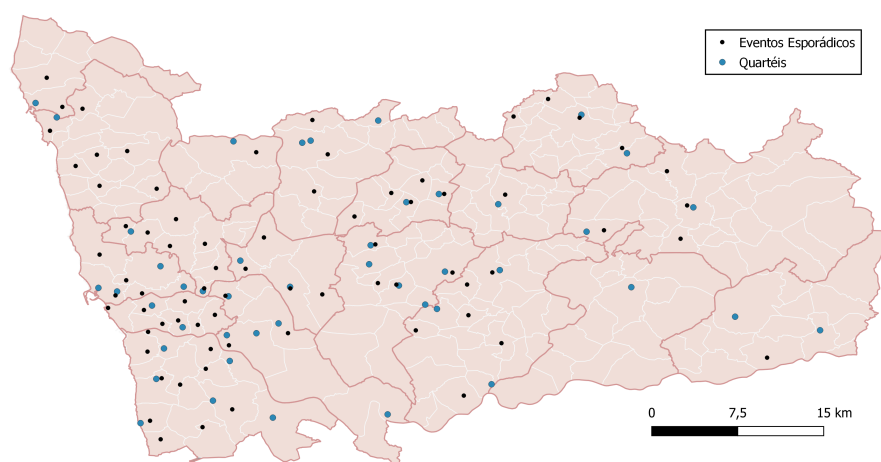


Figura 4.3: Localizações das freguesias onde poderão existir eventos esporádicos e dos quartéis de bombeiros existentes atualmente no distrito do Porto.

## 4.2 Pressupostos

Apesar de em Portugal não se encontrar imposto um tempo limite para atender a um evento recorrente, tem-se, quer pelo que acontece em outros países (Chevalier et al., 2012), quer pela experiência dos bombeiros nacionais, que um incêndio deve ser atendido em menos de 10 minutos. Deste modo, tal como considerado em Chevalier et al. (2012), assumem-se 2 minutos até à saída do quartel e 8 minutos para percorrer a distância do quartel até à localização da ocorrência. Referente aos eventos esporádicos, como se encontra legislado, estes têm de ser atendidos num máximo de 10 minutos após o despacho do primeiro alarme. Considerando, novamente, os 2 minutos para o despacho e saída do quartel, a distância entre o quartel e a ocorrência tem que se percorrida no máximo em 8 minutos. Para tal, uma vez que as distâncias entre localizações se encontram em quilómetros e a distância máxima aceitável é medida em minutos (8 minutos), é necessário considerar uma velocidade média. Tendo em consideração o Código da Estrada português (*Lei n.º 72/2013*, 2013) em que o limite de velocidade, por norma, dentro de uma localidade é de 50km/h, existindo zonas em que o mesmo é de 30 km/h, considera-se uma velocidade média de 40 km/h. Este valor é selecionado de modo a não considerar um valor muito otimista nem pessimista.

É ainda necessário estabelecer um valor para a proporção de eventos recorrentes cobertos. Uma vez que, no modelo de minimização, se segue o trabalho desenvolvido por Chevalier et al. (2012) e se sabe não ser possível uma cobertura total dos eventos, estabelece-se também uma proporção de eventos recorrentes cobertos de 0.90.

### 4.3 Situação Atual

Tendo em consideração os pressupostos estabelecidos, isto é, assumindo uma velocidade de 40km/h e um tempo de cobertura de 8 minutos quer para os eventos recorrentes quer para os eventos esporádicos, analisa-se o panorama atual das localizações dos 45 quartéis de bombeiros do distrito do Porto. Nesta análise, cujos dados são apresentados na tabela 4.1, pretende-se averiguar qual a percentagem máxima de eventos recorrentes que é possível cobrir com o número e localização dos quartéis atuais. Relativamente aos eventos esporádicos, pretende-se analisar a cobertura destes, uma vez que qualquer freguesia onde possa ocorrer eventos deste tipo tem que se encontrar coberta, pelo menos, por um quartel de bombeiros, segundo a legislação portuguesa.

Tabela 4.1: Percentagem máxima de eventos recorrentes cobertos, em cada ano em estudo.

	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Soma
<b>Máxima Cobertura</b>	91.12	90.21	90.26	91.31	89.85	90.17	91.08	91.98	91.31	90.86

Os valores da tabela 4.1 permitem constatar que a percentagem máxima de eventos recorrentes cobertos, ao longo dos anos em estudo, varia entre 89% e 92%. No entanto, esta análise é realizada tendo em conta a melhor cobertura possível que poderá não corresponder à cobertura real, devido às restrições existentes de afetação dos quartéis de bombeiros às ocorrências, que não são consideradas nos modelos aplicados.

Relativamente à cobertura das localizações onde possam ocorrer eventos esporádicos, observa-se, através dos resultados obtidos para o melhor cenário possível, que das 73 freguesias onde poderão ocorrer este tipo de eventos, 11 delas não se encontram cobertas pelos 45 quartéis de bombeiros existentes atualmente no distrito do Porto.

Da análise anterior pode-se concluir que, considerando o melhor cenário possível, apesar dos 45 quartéis permitirem uma cobertura, em quase todos os anos, de pelo menos cerca de 90% dos eventos recorrentes, as suas localizações não garantem o estabelecido por lei no que respeita aos eventos esporádicos. Deste modo, pretende-se estudar as localizações dos quartéis de bombeiros no distrito do Porto, de modo a que todas os eventos esporádicos e que, pelo menos, 90% dos eventos recorrentes se encontrem cobertos.

### 4.4 Cenários

Com o intuito de estudar o distrito do Porto e averiguar quais as zonas do mesmo que se encontravam com défice ou excesso de quartéis de bombeiros, construíram-se 4 cenários para esta análise.

O cenário 1 seria o cenário idílico, no qual não se considera os quartéis de bombeiros já existentes e tem-se por base apenas os pontos de referência das freguesias do Porto. Deste

cenário resulta quais são as localizações em que, inicialmente, deveriam ter sido estabelecidos quartéis de bombeiros, garantindo o cumprimento dos pressupostos estabelecidos. Desta forma, neste cenário, acrescenta-se ao modelo a restrição (4.1):

$$\sum_{i \in G} Y_i = 0. \quad (4.1)$$

Note-se que  $N \cap G = \emptyset$ . Deste modo, a restrição (4.1) não impede a instalação de quartéis de bombeiros nas freguesias onde estão localizados os quartéis atuais.

No cenário 2 tem-se em conta o panorama atual, ou seja, consideram-se os 45 quartéis que existem atualmente no distrito do Porto, acrescentando-se a restrição (4.2) ao modelo:

$$Y_i = 1, \quad \forall i \in G. \quad (4.2)$$

Neste cenário pretende-se apenas perceber em que localizações os quartéis de bombeiros se encontram em déficit. Desta forma, consideram-se os pontos de referência das freguesias do Porto como possíveis localizações para os quartéis em falta, garantindo-se que nas freguesias onde já existam quartéis não seja possível construir um outro. Assim, acrescenta-se também a restrição (4.3) ao modelo, considerando  $M = \{i \in N : f(i, j) = 1, \text{ para algum } j \in G\}$ , onde  $f(i, j) = 1$  caso o quartel de bombeiros  $j \in G$  esteja localizado na freguesia  $i \in N$  e  $f(i, j) = 0$  caso contrário:

$$Y_i = 0, \quad \forall i \in M. \quad (4.3)$$

No cenário 3 tendo apenas como possíveis localizações as resultantes do cenário 2, pretende-se averiguar quais os quartéis atualmente existentes que são imprescindíveis de modo a respeitar os pressupostos considerados.

Por fim, no cenário 4 considera-se como possíveis localizações para quartéis de bombeiros quer os pontos de referência das freguesias quer os 45 quartéis do Porto. No entanto, a escolha de uma localização em que não exista um quartel tem um impacto negativo na função objetivo. Assim, havendo um ponto de referência de uma freguesia e um quartel de bombeiros já existente que cobrem a mesma zona, pretende-se dar prioridade ao quartel já existente. Note-se que, tal como no cenário 2, nas freguesias onde já existam quartéis de bombeiros, não é possível construir um outro. Deste modo, obtém-se quais os quartéis existentes indispensáveis e quais os quartéis que devem ser contruídos de forma a cobrir o distrito do Porto, segundo os pressupostos estabelecidos. Apresenta-se, na equação (4.4), para o modelo *single-period*, a função objetivo utilizada:

$$\min \sum_{i \in L} Y_i - \varepsilon \sum_{i \in N} Z_i w_i + 100\varepsilon \sum_{i \in N} Y_i. \quad (4.4)$$

Na tabela 4.2 resumem-se os cenários analisados.

Tabela 4.2: Quadro resumo dos cenários analisados.

	<b>Localizações</b>	<b>Restrições Adicionadas</b>
<b>Cenário 1</b>	Pontos de referência das freguesias	$Y_i = 0, \quad \forall i \in G.$
<b>Cenário 2</b>	Pontos de referência das freguesias e localizações atuais dos quartéis de bombeiros	$Y_i = 1, \quad \forall i \in G;$ $Y_i = 0, \quad \forall i \in M.$
<b>Cenário 3</b>	Localizações obtidas através do Cenário 2	-
<b>Cenário 4</b>	Pontos de referência das freguesias e localizações atuais dos quartéis de bombeiros	$\min \sum_{i \in L} Y_i - \varepsilon \sum_{i \in N} Z_i w_i + 100\varepsilon \sum_{i \in N} Y_i;$ $Y_i = 0, \quad \forall i \in M.$

## RESULTADOS

Com recurso à metodologia apresentada no capítulo 3 e tendo em consideração os dados e a situação atual apresentados no capítulo 4, apresentam-se, neste capítulo, as análises realizadas.

Ao longo do presente capítulo, bem como no capítulo anterior, os mapas do distrito do Porto apresentados são elaborados com recurso a um sistema de informação geográfica que permite a visualização, edição e análise de dados georreferenciados, *QGIS*.

A modelação foi efetuada recorrendo ao software GAMS com o *solver* CPLEX (Distribution 38.1.0) num computador *ASUS VivoBook 14*, modelo *S410U*, com um processador *Intel(R) Core(TM) i5-8250U*.

### 5.1 Modelo de *Set Covering*

Considerando uma velocidade média de 40 km/h e uma percentagem de eventos recorrentes cobertos de 90%, aplica-se o modelo apresentado na secção 3.2 aos dados das ocorrências do ano de 2020, os dados mais recentes em estudo. Com o intuito de minimizar o número de quartéis para cada um dos cenários é possível obter os seguintes dados apresentados na tabela 5.1.

Tabela 5.1: Número mínimo de quartéis de bombeiros necessários para cada cenário, considerando os dados do ano 2020.

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
<b>Quartéis Novos</b>	33	7	7	13
<b>Quartéis Existentes</b>	-	45	28	18
<b>Total</b>	33	52	35	31

Se não se considerar os quartéis de bombeiros existentes atualmente e se instalar apenas quartéis novos, são necessários 33 quartéis de bombeiros (cenário 1 da figura 5.1). Considerando a existência dos 45 quartéis de bombeiros atuais, é necessário instalar mais 7 quartéis para que a cobertura dos eventos esporádicos vá ao encontro da legislação (cenário 2 da figura 5.1). Tendo apenas como possíveis localizações as obtidas através do cenário 2, verifica-se ser necessário manter apenas 28 dos 45 quartéis de bombeiros existentes

atualmente, perfazendo um total de 35 quartés de bombeiros necessários (cenário 3 da figura 5.1). Por fim, considerando quer os pontos de referência das freguesias quer os quartéis de bombeiros existentes, são necessários apenas 31 quartés de bombeiros, 18 dos existentes atualmente e 13 novos quartés (cenário 4 da figura 5.1). Tem-se então, que nos três cenários em que não se impõe a existência dos 45 quartés atuais, é necessário um menor número de quartés do que os existentes atualmente.

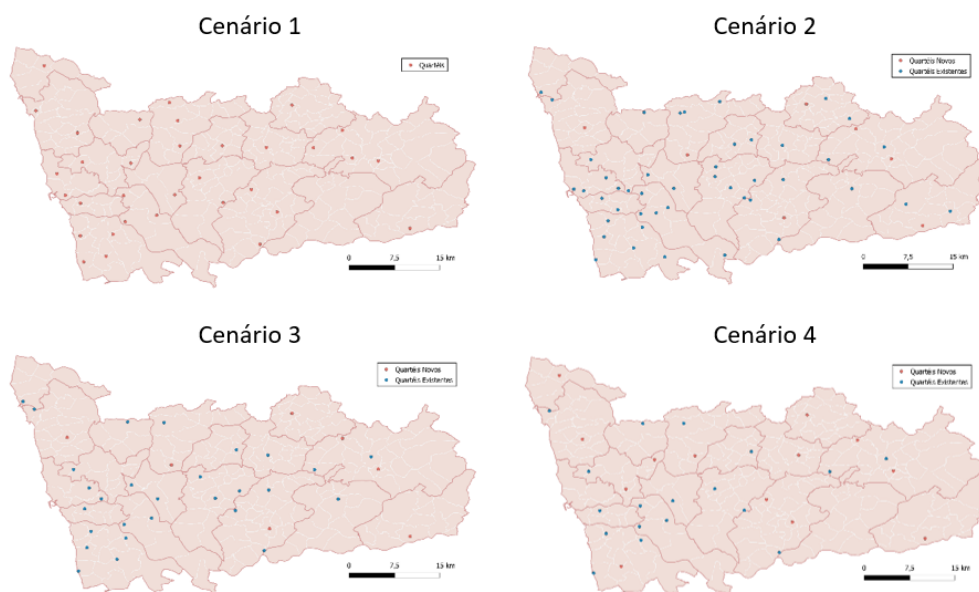


Figura 5.1: Localizações dos quartéis de bombeiros necessários, para cada cenário, considerando os dados do ano 2020.

### 5.1.1 Análise de Sensibilidade

Com o intuito de determinar o efeito que a variação da velocidade média considerada (40 km/h) e a percentagem de eventos recorrentes cobertos (90%) tem nos resultados obtidos, procede-se a análises de sensibilidade destes dois pressupostos. Estas permitem avaliar como os resultados dependem dos valores definidos para os parâmetros em análise. Assim, efetua-se a análise acima descrita no modelo de minimização dos quartés de bombeiros, tendo em conta as ocorrências do ano mais recente, 2020.

#### 5.1.1.1 Velocidade Média

Primeiramente, analisa-se a velocidade média para os 4 cenários considerados, fazendo a mesma variar entre 30 e 50 km/h, com intervalos de 5 km/h, ou seja, variar entre os valores 30, 35, 40, 45 e 50 km/h. A escolha dos extremos deste intervalo é realizada tendo em conta os limites de velocidade dentro das localidades, uma vez que existem zonas com um limite de circulação de 30km/h e, segundo o Código da Estrada Português (*Lei n.º 72/2013, 2013*), caso não exista outra restrição, dentro das localidades o limite de velocidade é de 50km/h.

No caso do **cenário 1**, o número mínimo de quartéis necessários, para cada uma das 5 velocidades consideradas, de modo a respeitar os restantes pressupostos estabelecidos, é apresentado no gráfico da figura 5.2.

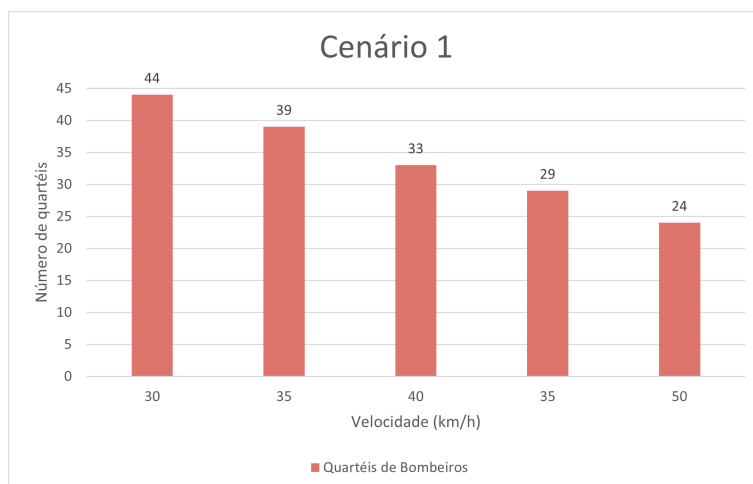


Figura 5.2: Número de quartéis de bombeiros necessários, para o cenário 1, considerando uma dada velocidade média, em km/h.

Através da figura 5.2, é possível inferir que, com o aumento da velocidade média considerada, o número de quartéis necessários para cobrir 90% dos eventos recorrentes, num tempo de cobertura de 8 minutos, diminui. Ao considerar-se uma velocidade média de 30km/h, o número mínimo de quartéis necessários (44) é inferior ao número de quartéis existentes atualmente, o que confirma mais uma vez o excesso do número de quartéis de bombeiros existentes no distrito do Porto.

De forma a analisar as localizações obtidas, apresenta-se em seguida, os mapas da figura 5.3 com as localizações dos quartéis considerando a velocidade mínima e máxima analisadas.

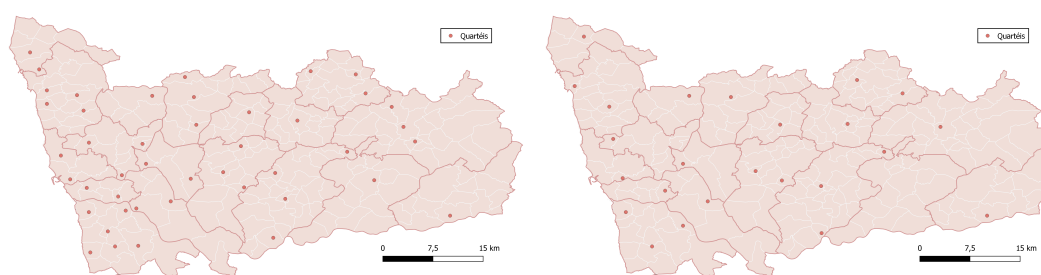


Figura 5.3: Localizações dos quartéis de bombeiros necessários, para o cenário 1, dada uma velocidade média de 30 km/h, no mapa da esquerda, e de 50km/h, no da direita.

Ao analisar as localizações apresentadas na figura 5.3 é notória a redução de 20 quartéis de bombeiros quando considerada uma velocidade média de 50km/h, em comparação com uma velocidade de 30km/h.

Considerando as localizações obtidas para cada uma das velocidades analisadas, é possível verificar que existem 5 freguesias no distrito do Porto que, independentemente da velocidade média considerada, necessitam da instalação de um quartel de bombeiros. Essas freguesias são a freguesia de i) Santa Cruz do Douro e São Tomé de Covelas, ii) Fânzeres e São Pedro da Cova, iii) Santo Tirso, Couto (Santa Cristina e São Miguel) e Burgães, iv) Bougado (São Martinho e Santiago) e v) Serzedo e Perosinho. Comparando com a situação atual dos quartéis existentes no distrito do Porto que não são considerados neste cenário, é possível verificar que das 5 freguesias mencionadas, apenas as freguesias de i) Santa Cruz do Douro e São Tomé de Covelas e de ii) Serzedo e Perosinho não possuem quartel de bombeiros e que a freguesia de Santo Tirso, Couto (Santa Cristina e São Miguel) e Burgães tem 2 quartéis de bombeiros.

Quando analisado o **cenário 2**, são considerados os 45 quartéis de bombeiros existentes atualmente no distrito do Porto. Desta forma, apresenta-se o gráfico na figura 5.4, onde se mostra o número de novos quartéis necessários instalar.

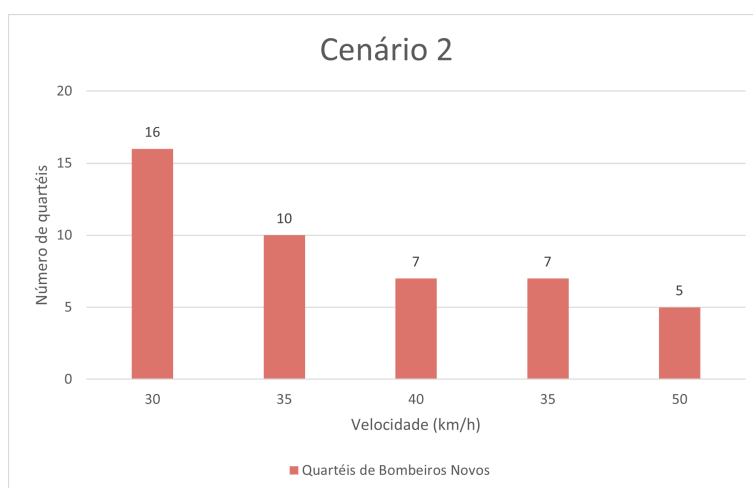


Figura 5.4: Número de novos quartéis de bombeiros necessários, para o cenário 2, considerando uma dada velocidade média, em km/h.

Tendo em conta que se mantêm os 45 quartéis de bombeiros existentes atualmente, seria expectável que o número de novos quartéis de bombeiros a instalar fosse consideravelmente inferior ao do cenário 1. Comparativamente com a situação atual, verifica-se ser necessário, independentemente da velocidade, instalar novos quartéis de bombeiros de modo a garantir as restrições impostas. Tal deve-se ao facto de existirem freguesias onde poderão ocorrer eventos esporádicos que não se encontram cobertas.

De modo a analisar as localizações dos novos quartéis de bombeiros necessários apresenta-se, em seguida, os mapas da figura 5.5 com as localizações desses mesmos quartéis para a velocidade mínima e máxima consideradas.

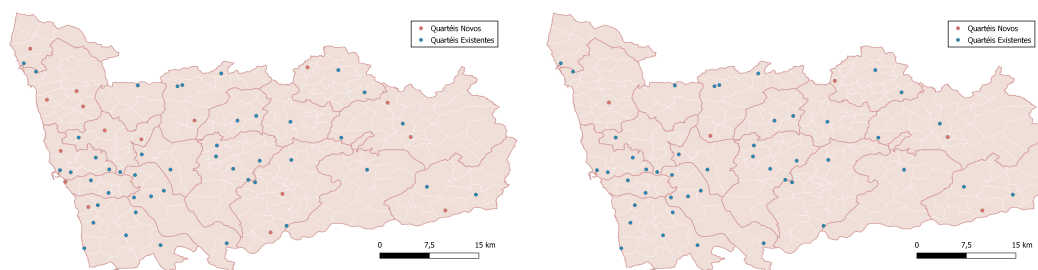


Figura 5.5: Localizações dos quartéis de bombeiros necessários, para o cenário 2, dada uma velocidade média de 30 km/h, no mapa da esquerda, e de 50km/h, no da direita.

Os resultados mostram que existem duas freguesias, i) Lomba e ii) Santa Cruz do Douro e São Tomé de Covelas, que, independentemente da velocidade considerada, necessitam de um quartel de bombeiros. Deste modo, é possível concluir que as zonas destas duas freguesias, segundo o panorama atual, se encontram com um défice de resposta atempada em caso de ocorrer um incêndio urbano. É de notar que a freguesia de Santa Cruz do Douro e São Tomé de Covelas também é uma das freguesias, no cenário 1, que, independentemente da velocidade considerada, necessita de um quartel de bombeiros.

No seguimento dos resultados obtidos para o cenário 2, estes são utilizados como possíveis localizações no **cenário 3**. Assim, apresenta-se na figura 5.6 o número de quartéis novos e existentes necessários tendo em consideração os pressupostos e restrições deste cenário.

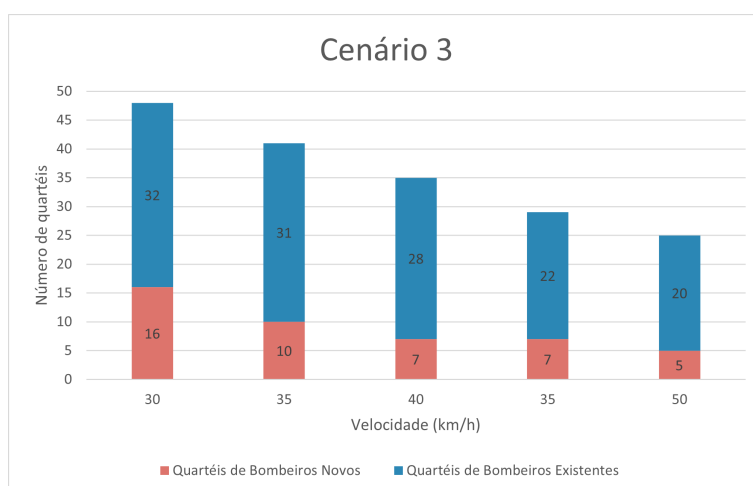


Figura 5.6: Número de quartéis de bombeiros novos e existentes necessários, para o cenário 3, considerando uma dada velocidade média, em km/h.

Comparativamente com o cenário 2, o número de quartéis de bombeiros novos necessários mantém-se, no entanto, o número de quartéis existentes, como se esperava, diminui. Através das localizações obtidas, para cada uma das velocidades considerada, é

possível verificar ainda que 14 das 42 freguesias que possuam pelo menos um quartel de bombeiros, para qualquer uma das velocidades consideradas, mantêm o quartel, ou seja, verifica-se ser imprescindível existir um quartel em 14 das freguesias que já o têm. Apresentam-se na figura 5.7 as respetivas localizações para a velocidade mínima e máxima consideradas.

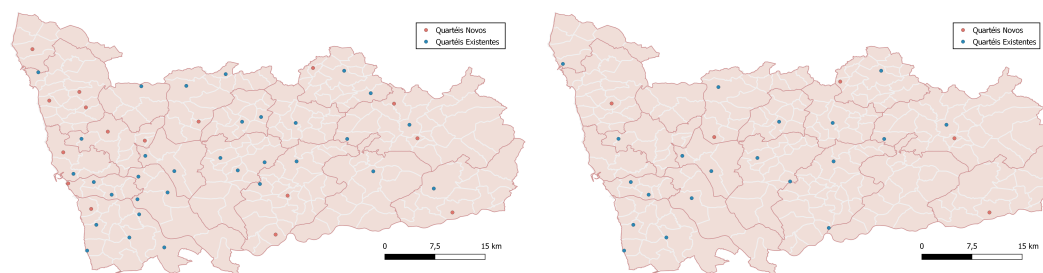


Figura 5.7: Localizações dos quartéis de bombeiros necessários, para o cenário 3, dada uma velocidade média de 30 km/h, no mapa da esquerda, e de 50km/h, no da direita.

No **cenário 4** são consideradas como possíveis localizações para os quartéis de bombeiros quer as localizações onde estes já se encontram, quer os pontos de referência das freguesias. Apresenta-se no gráfico da figura 5.8 o número mínimo de quartéis necessários obtido, para cada uma das velocidades médias consideradas.

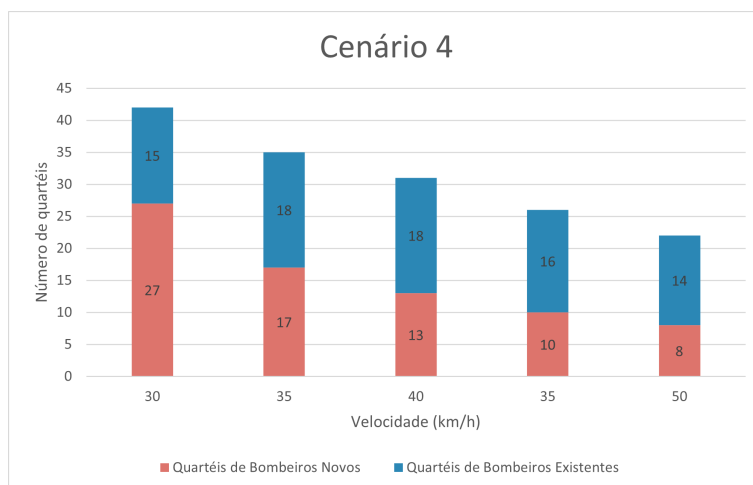


Figura 5.8: Número de quartéis de bombeiros novos e existentes necessários, para o cenário 4, considerando uma dada velocidade média, em km/h.

Verifica-se que o número de novos quartéis necessários diminui com o aumento da velocidade média, ao contrário do número de quartéis existentes a manter. Esta evidência reforça as questões existentes sobre a relevância e eficiência das localizações atuais dos quartéis de bombeiros do distrito do Porto, já que, o modelo, para uma velocidade média de 30km/h, prioriza um número muito mais elevado de novos quartéis e uma diminuição

no número de quartéis existentes a manter quando comparado com a velocidade média de 35 km/h.

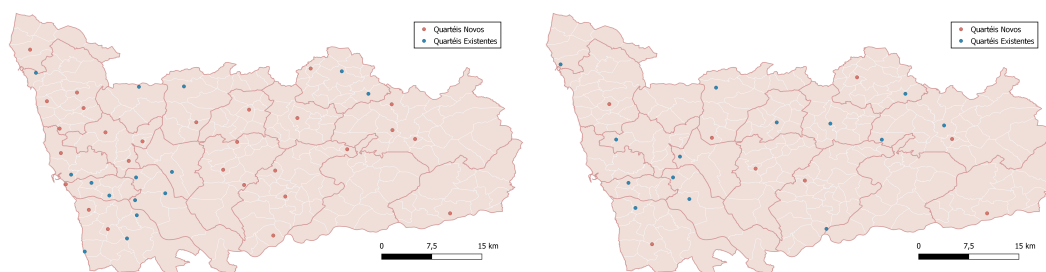


Figura 5.9: Localizações dos quartéis de bombeiros necessários, para o cenário 4, dada uma velocidade média de 30 km/h, no mapa da esquerda, e de 50km/h, no da direita.

Através dos mapas da figura 5.9 e das localizações obtidas para as restantes velocidades consideradas, advém que existem duas freguesias, i) Lomba e ii) Santa Cruz do Douro e São Tomé de Covelas, tal como no cenário 2, que, independentemente da velocidade considerada, necessitam de um quartel de bombeiros. Relativamente aos quartéis de bombeiros existentes, tem-se que as freguesias de i) Gondomar (São Cosme), Valbom e Jovim e ii) Santo Tirso, Couto (Santa Cristina e São Miguel) e Burgães que possuem dois quartéis de bombeiros atualmente, em qualquer das velocidades consideradas, mantém um desses quartéis, tal como acontece no cenário 3.

De um modo geral, é importante concluir que com o aumento da velocidade média considerada, o número mínimo de quartéis de bombeiros necessários para cobrir 90% dos eventos recorrentes e a totalidade dos eventos esporádicos, considerando um tempo de cobertura de 8 minutos, diminui. Dado que com o aumento da velocidade média, o tempo necessário para percorrer uma mesma distância diminui, verifica-se necessário um menor número de quartéis para cobrir uma mesma área. Assim sendo, realça-se o impacto que a escolha da velocidade média tem nos resultados obtidos.

#### 5.1.1.2 Proporção

Como referido no capítulo 4, este modelo bem como a escolha deste parâmetro têm como base o trabalho desenvolvido por Chevalier et al. (2012), onde se considera uma proporção de eventos recorrentes cobertos de 0.90. Deste modo e para analisar o impacto que a percentagem considerada de eventos recorrentes cobertos tem nos resultados obtidos pelo modelo, varia-se este valor entre 0.80 e 0.99. Os resultados referentes aos valores 0.80, 0.85, 0.90, 0.92, 0.95 e 0.99, apresentam-se na figura 5.10.



Figura 5.10: Número de quartéis de bombeiros necessários, para cada cenário, considerando uma dada proporção.

A escolha dos valores limite para a análise de sensibilidade deste parâmetro prende-se com o facto de não ser possível atingir a cobertura total para os eventos recorrentes de forma viável, considerando assim como limite superior 0.99. Como em cada um dos cenários considerados, para as proporções de 0.80 e 0.85, é possível constatar que os resultados obtidos são iguais, não se revela necessário analisar o impacto de um valor inferior a 0.80 para a proporção. Esta igualdade de resultados está associada à restrição da cobertura total dos eventos esporádicos. Isto é, com o intuito das localizações obtidas permitirem a totalidade da cobertura dos eventos esporádicos, são necessários mais quartéis de bombeiros do que os que permitiriam uma cobertura de eventos recorrentes de apenas 0.80. Assim, as localizações dos quartéis de bombeiros necessários para respeitar uma cobertura de eventos recorrentes de 0.80 permitem na verdade uma cobertura de pelo menos 0.85.

Analisando o **cenário 1**, o número de localizações para quartéis de bombeiros para garantir uma proporção de 0.90 eventos recorrentes cobertos também é igual ao número obtido para as proporções 0.80 e 0.85. No entanto, as suas localizações não permanecem iguais. Desta forma, tem-se que ao instalar 33 quartéis de bombeiros no distrito do Porto é possível atingir uma percentagem de pelo menos 90% de eventos recorrentes cobertos, valor inferior ao número de quartéis existentes atualmente. Analisando as localizações obtidas para os diferentes valores de proporção considerados, averigua-se que, para qualquer uma das proporções consideradas existem 25 localizações, assinaladas no mapa da figura 5.11 que se mantêm, ou seja, que se relevam de extrema necessidade, segundo o cenário considerado.

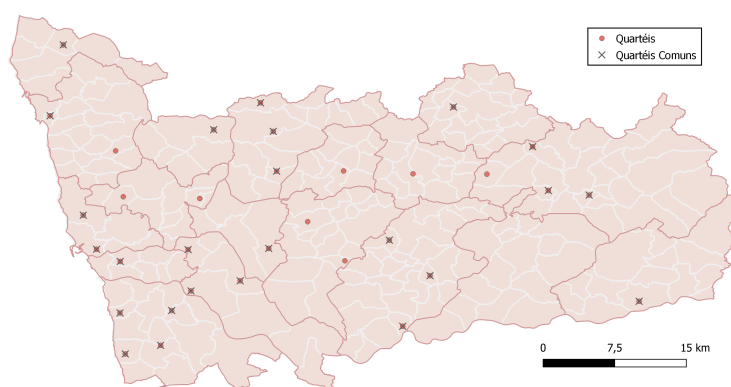


Figura 5.11: Localizações dos quartéis de bombeiros necessários, para o cenário 1, dada uma proporção de 0.90, onde se assinalam as localizações que se mantêm independentemente da proporção considerada.

No **cenário 2**, como observado no gráfico da figura 5.10, o número de novos quartéis mantém-se igual até uma proporção de 0.92 eventos recorrentes cobertos. Desta forma, a instalação de 7 novos quartéis nas localizações obtidas para a proporção de 0.92, garante na realidade uma proporção de 0.93. Quando analisadas as restantes proporções, é visível o aumento do número de quartéis necessários, com o aumento da proporção de eventos recorrentes cobertos.

Ao analisar as localizações dos novos quartéis de bombeiros necessários, verifica-se que, das 7 localizações encontradas para uma proporção de 0.90, 5 delas se mantêm ao longo das proporções estudadas, assinaladas no mapa da figura 5.12. Ou seja, estas freguesias e as suas imediações encontram-se com um défice de resposta atempada em caso de ocorrência. Comparativamente com as 25 localizações necessárias para o cenário 1 para qualquer proporção, averigua-se ainda que 3 delas - i) Lomba, ii) Santa Cruz do Douro e São Tomé de Covelas e iii) Torrados e Sousa - são comuns.

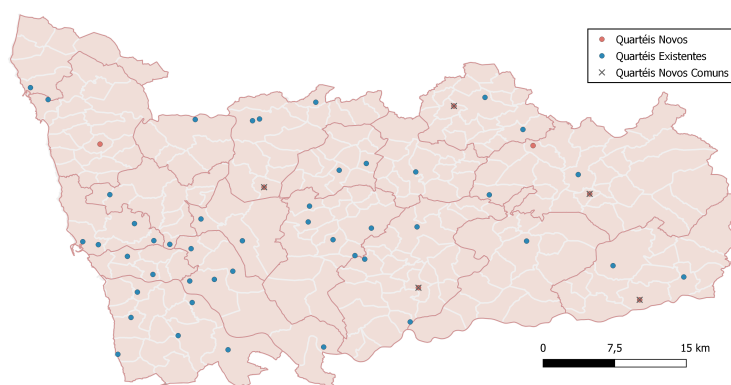


Figura 5.12: Localizações dos quartéis de bombeiros necessários, para o cenário 2, dada uma proporção de 0.90, onde se assinalam as localizações que se mantêm independentemente da proporção considerada.

No seguimento dos resultados obtidos para o cenário 2, estes são utilizados como

possíveis localizações perante o **cenário 3**. Apresenta-se, em seguida, o mapa da figura 5.13 com as localizações dos quartéis que são necessários instalar e os que se deverão manter, para uma proporção de eventos recorrentes cobertos de 0.90, bem como se assinalam quais as localizações que se mantêm independentemente da proporção considerada.

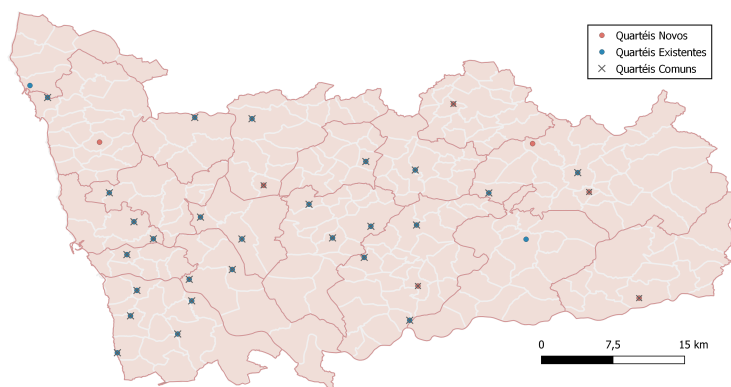


Figura 5.13: Localizações dos quartéis de bombeiros necessários, para o cenário 3, dada uma proporção de 0.90, onde se assinalam as localizações que se mantêm independentemente da proporção considerada.

Das 28 localizações dos quartéis de bombeiros que se recomenda que se mantenham, considerando uma proporção de eventos recorrentes cobertos de 0.90, apenas duas delas, nas freguesias de i) Marco e de ii) Póvoa de Varzim, Beiriz e Argivai, não se mantêm em todos os valores analisados para a proporção.

Por fim, analisa-se os resultados obtidos para o **cenário 4**, através do gráfico correspondente da figura 5.10. Quando comparado com o número de quartéis necessários para o cenário 3, o número total de quartéis e de quartéis existentes necessários diminuiu, no entanto, o número de novos quartéis aumenta. Esta evidência reforça as questões existentes sobre a relevância e eficiência das localizações atuais dos quartéis de bombeiros do distrito do Porto.

De um modo geral, através da variação do valor da proporção de eventos recorrentes cobertos, apura-se que considerar um valor inferior a 0.85 não tem impacto nas localizações obtidas já que estas são influenciadas pelas localizações dos edifícios de 3ª e 4ª categorias de risco. Porém, ao considerar-se percentagens de cobertura mais elevadas, é notório o seu impacto no número de quartéis necessários, já que, para valores de proporção mais elevados, com o aumento da proporção existe também um aumento do número de quartéis de bombeiros necessários.

### 5.1.2 Alterações na Função Objetivo

Na metodologia apresentada no capítulo 3, especificamente, nos modelos de *set covering* são apresentadas duas possibilidades de função objetivo para ambos os modelos. Considerando o modelo *single-period* cujo intuito é minimizar o número de quartéis de

bombeiros no distrito do Porto, com base nos dados do ano de 2020, pretende-se a analisar o impacto das funções objetivo (3.1) e (3.6).

A primeira considera, para além do facto da freguesia  $i$  se encontrar ou não coberta, o número de ocorrências em cada freguesia  $i$ . Já a segunda tem em conta apenas a cobertura de todas as freguesias independentemente do seu número de ocorrências. Ou seja, na primeira função objetivo utilizada pretende-se dar preferência à cobertura das freguesias com um maior número de ocorrências e, caso uma dada freguesia não tenha nenhuma ocorrência, esta não será considerada na função objetivo.

Para analisar o impacto que esta consideração na função objetivo tem nos resultados obtidos, considera-se os parâmetros escolhidos inicialmente, isto é, uma velocidade média de 40km/h e uma proporção de eventos recorrentes cobertos de 0.90.

Apresenta-se, em seguida, dois gráficos na figura 5.14, um para cada função objetivo, com os resultados obtidos.

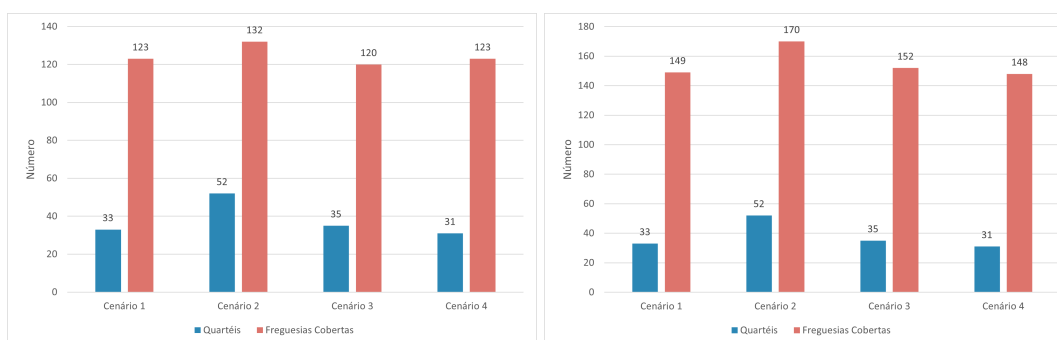


Figura 5.14: Número de quartéis de bombeiros necessários e de freguesias cobertas para cada cenário, considerando a função objetivo (3.1) no gráfico da esquerda e a (3.6) no gráfico da direita.

Pela análise da figura 5.14, infere-se que o número de quartéis de bombeiros necessários se mantém, sendo este inferior ao número atual em qualquer cenário que não imponha a existência dos 45 quartéis existentes (Cenário 1, 3 e 4). No entanto, não se mantêm as suas localizações. Em cada um dos cenários, quando considerando ou não o número de ocorrências na função objetivo, existe uma alteração de uma localização de um quartel de bombeiros necessário construir. É de notar ainda que, quando não se considera o número de ocorrências na função objetivo, o número de freguesias que se encontram cobertas aumenta significativamente. Este aumento deve-se às freguesias que não apresentam ocorrências para o ano de 2020. Quando se utiliza a função objetivo (3.6), o facto da cobertura destas freguesias ser considerada na função objetivo leva a que o modelo, para respeitar as restrições impostas, tenha em consideração que as freguesias mesmo sem ocorrências se encontram cobertas.

## 5.2 Modelo de *Set Covering multi-period*

Considerando o modelo inicial apresentado na secção 3.3, pretende-se analisar qual

o número mínimo de quartéis de bombeiros necessários perante cada um dos cenários, utilizando o histórico dos 9 anos em estudo. Desta forma, encontra-se na tabela 5.2 o número de quartéis obtido para cada um dos cenários.

Tabela 5.2: Número mínimo de quartéis de bombeiros necessários para cada cenário, considerando os dados dos 9 anos.

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
<b>Quartéis Novos</b>	35	7	7	15
<b>Quartéis Existentes</b>	-	45	29	17
<b>Total</b>	35	52	36	32

Comparando os dados apresentados na tabela 5.2 com os obtidos utilizando o modelo *single-period* (tabela 5.1), observa-se que o número mínimo de quartéis de bombeiros necessários, de um modo geral, aumenta, com a exceção do cenário 2, em que este se mantém.

No **cenário 1**, considerando o modelo *multi-period*, são necessários 35 quartéis de bombeiros de modo a garantir a totalidade da cobertura dos eventos esporádicos e ainda a cobertura de pelo menos 90% dos eventos recorrentes em cada um dos anos em análise. Assim, são necessários mais 2 quartéis do que no modelo *single-period*, mas menos 10 quartéis do que os existentes atualmente. Quando comparadas as localizações destes 35 quartéis de bombeiros com as localizações dos 33 quartéis obtidas para o modelo *single-period*, constata-se que 30 delas se mantêm. Estas 30 localizações encontram-se assinaladas na figura 5.15 e revelam-se imprescindíveis, independentemente do espaço temporal considerado, para o cenário 1.

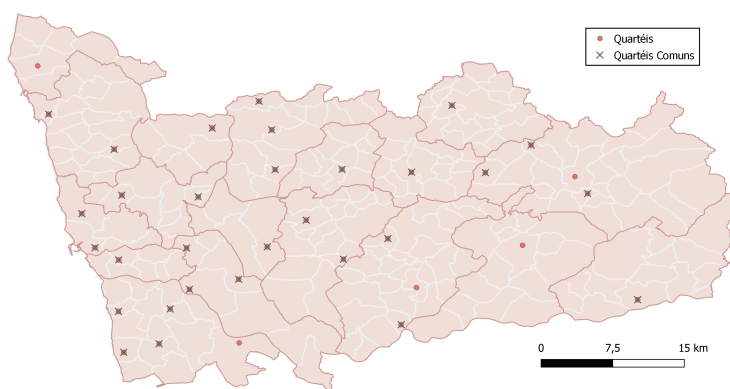


Figura 5.15: Localizações dos quartéis de bombeiros necessários, para o cenário 1, onde se assinalam as localizações que se mantêm do modelo *single-period*.

O **cenário 2** é o único onde o número de quartéis se mantém. No entanto, existe uma localização para um quartel de bombeiros a instalar que difere. O modelo *single-period*, para minimizar o número de quartéis necessários, sugere localizar um quartel de bombeiros na freguesia de Agrela. Já o modelo *multi-period* seleciona a freguesia de Lamelas e Guimarei como a localização onde se deve instalar um novo quartel, permitindo a cobertura de pelo

menos 90% dos eventos recorrentes ocorridos em cada um dos 9 anos analisados.

Os resultados obtidos para o cenário 2 são utilizados como as possíveis localizações para o cenário 3. Desta forma, a análise do **cenário 3** detém-se com as localizações dos quartéis de bombeiros existentes que se deverão manter. Quando comparados os resultados obtidos para o modelo *single-period* com os do modelo *multi-period*, é necessário manter mais um quartel de bombeiros, mais precisamente, o quartel de bombeiros existente na freguesia de Sandim, Olival, Lever e Crestuma. É ainda de notar que na freguesia de Santo Tirso, Couto (Santa Cristina e São Miguel) e Burgães, que possui dois quartéis de bombeiros, torna-se relevante manter o quartel 2, em vez do quartel 1, como no modelo *single-period*.

O **cenário 4** é aquele que evidencia mais alterações nas localizações dos quartéis de bombeiros quando comparados os resultados obtidos para os modelos *single-period* e *multi-period*.

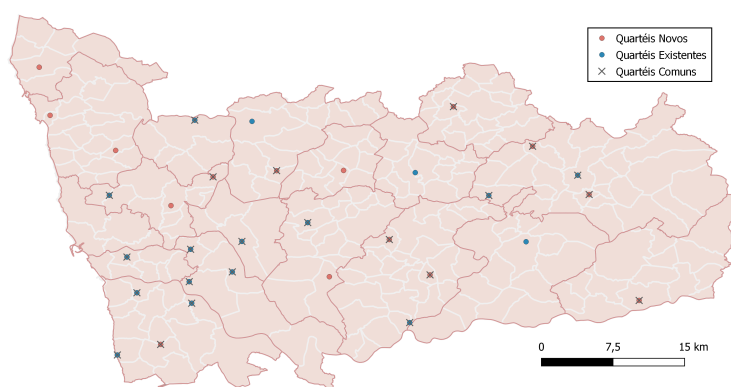


Figura 5.16: Localizações dos quartéis de bombeiros necessários, para o cenário 4, onde se assinalam as localizações que se mantêm do modelo *single-period*.

No modelo *multi-period* constata-se que apesar do número total de quartéis necessários apenas aumentar em uma unidade, o número de quartéis existentes imprescindíveis diminui uma unidade, sendo necessário recorrer à instalação de mais dois quartéis de bombeiros. Tal revela uma menor eficiência das localizações dos quartéis de bombeiros já existentes.

Analisando os 4 cenários de um modo geral, o número mínimo de quartéis necessários, quando se considera o modelo *multi-period*, aumenta uma unidade nos cenários 3 e 4, duas unidades no cenário 1 e mantém-se no cenário 2. Era expectável que o número de quartéis de bombeiros necessários aumentasse, já que existem no modelo *single-period* para os dados do ano de 2020, 65 freguesias sem registo de qualquer ocorrência, enquanto no modelo *multi-period*, recorrendo aos dados dos 9 anos em estudo, apenas a freguesia de Fridão não apresenta nenhum registo de ocorrências.

### 5.2.1 Alterações na Função Objetivo

Considerando o modelo que pretende minimizar o número de quartéis de bombeiros

tendo em conta as ocorrências entre 2012 e 2020, inclusive, pretende-se analisar o impacto das funções objetivo (3.7) e (3.6).

Inicialmente, utiliza-se a função objetivo onde se pretende dar preferência à cobertura das freguesias com um maior número de ocorrências, a função objetivo (3.7). Posteriormente, considera-se apenas se a freguesia se encontra coberta ou não, não tendo em conta o seu número de ocorrências, função objetivo (3.6).

Ao contrário do que acontece no modelo *single-period*, para os três primeiros cenários, os resultados obtidos, considerando ou não o número de ocorrências na função objetivo, não tem qualquer influência nas localizações dos quartéis de bombeiros nem nas freguesias que se encontram cobertas por esses quartéis. No entanto, no cenário 4, existem algumas alterações. Apesar do número de quartéis necessários ser igual, quer no número de quartéis a construir quer no número de quartéis a manter, as suas localizações não se mantêm. Para proceder a esta análise apresenta-se os dois mapas da figura 5.17.

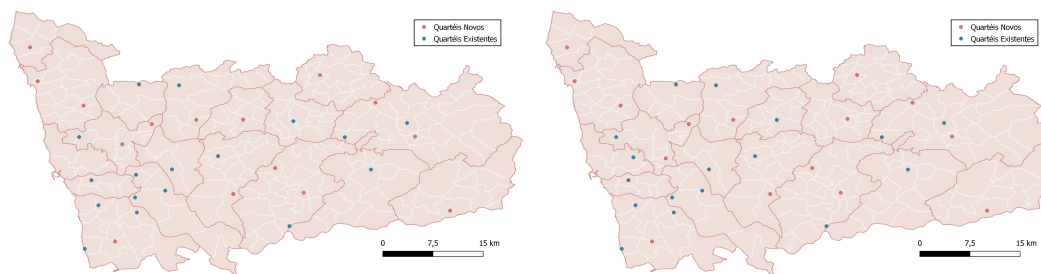


Figura 5.17: Localizações dos quartéis de bombeiros necessários, para o cenário 4, considerando a função objetivo (3.7) no gráfico da esquerda e a (3.6) no gráfico da direita.

Tal como é possível verificar comparando os mapas apresentados na figura 5.17, duas das localizações obtidas para a instalação de novos quartéis e duas das localizações de quartéis a manter, mudam. Tem-se, considerando o número de ocorrências na função objetivo, a necessidade de instalar um novo quartel de bombeiros nas freguesias i) Nogueira e Silva Escura e ii) Ferreira e manter os quartéis das freguesias i) Rio Tinto e ii) Cristelos, Boim e Ordem. Por sua vez, se não se considerar o número de ocorrências na função objetivo, dever-se-á manter os quartéis das freguesias i) Custóias, Leça do Balio e Guifões e ii) São Mamede de Infesta e Senhora da Hora e instalar um novo quartel nas freguesias i) Aveleda e ii) Águas Santas. Relativamente às freguesias que se encontram cobertas, este número também não se mantém. Ao não considerarmos o número de ocorrências na função objetivo é possível cobrir mais uma freguesia, 154 freguesias no total, mas que nos leva a cobrir menos uma ocorrência ao longo dos 9 anos analisados.

### 5.3 Modelo de *Max Covering*

Para este modelo é necessário estabelecer um número de quartéis a localizar,  $Q$ .

Assim, perante cada cenário e de acordo com os dados utilizados, é escolhido o valor de  $Q$ , consoante o número de quartéis necessários obtido através do modelo de *set covering*. Note-se que no modelo de *max covering* não são considerados os eventos esporádicos, ou seja, não se garante que todas as freguesias onde poderão ocorrer eventos esporádicos se encontram cobertas.

### 5.3.1 Modelo de *Max Covering* para o ano de 2020

Recorrendo ao número de quartéis de bombeiros obtido através do modelo de minimização, para o ano de 2020, aplica-se o modelo de maximização da cobertura, também para os dados do ano de 2020. Desta forma, utilizando o número mínimo de quartéis de bombeiros para obter uma cobertura de 90% dos eventos recorrentes, pretende-se verificar qual a cobertura máxima possível com esse mesmo número de quartéis. É de notar que no modelo de minimização são considerados também os eventos esporádicos que têm de estar cobertos na sua totalidade o que condiciona algumas localizações de quartéis de bombeiros. Já no modelo de maximização estes não são considerados, apenas se pretende cobrir o máximo de eventos recorrentes, pois são estes que não se encontram totalmente cobertos.

Recorde-se o número mínimo de quartéis de bombeiros necessários obtidos através do modelo apresentado na secção 3.2, apresentados na tabela 5.1. Considerando esse número de quartéis, aplica-se o modelo de maximização da cobertura e analisa-se os resultados obtidos em cada um dos cenários. Para tal, apresenta-se, ao longo desta secção, os mapas com as localizações obtidas, para cada cenário, através do modelo de maximização da cobertura. Nestes encontram-se distinguidas as localizações que se mantêm nos dois modelos aplicados.

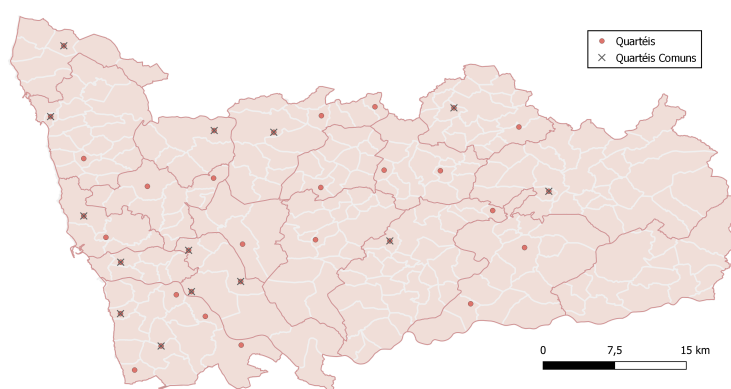


Figura 5.18: Localizações dos quartéis de bombeiros necessários, para o cenário 1, onde se assinalam as localizações que se mantêm do modelo *set covering*.

Para o **cenário 1**, localizam-se 33 novos quartéis de bombeiros de acordo com o mapa da figura 5.18. Estas localizações permitem uma percentagem de cobertura máxima de 95.44%. No entanto, como expectável, as localizações dos 33 quartéis não são as mesmas obtidas para o modelo de *set covering*. Estas novas localizações permitem cobrir apenas 62

das 73 freguesias onde é possível ocorrer eventos esporádicos, cerca de 85% das freguesias. Quando comparadas as localizações obtidas nos dois modelos para o cenário 1, verifica-se que apenas 14 dessas localizações se mantêm, como é possível observar no mapa da figura 5.18.

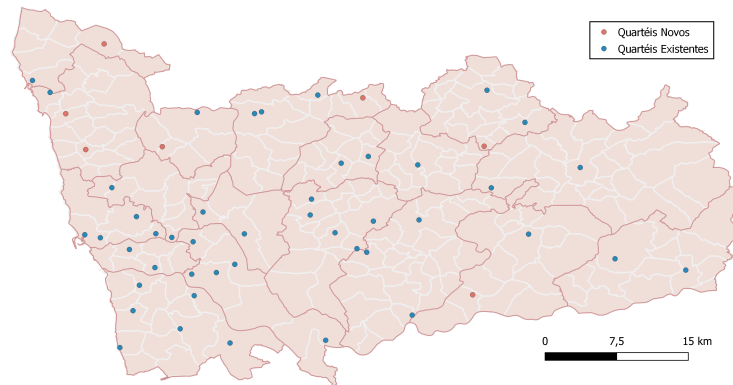


Figura 5.19: Localizações dos quartéis de bombeiros necessários, para o cenário 2, onde se assinalam as localizações que se mantêm do modelo *set covering*.

Já no **cenário 2**, como observado na figura 5.19, dos 7 quartéis de bombeiros a localizar, nenhuma das localizações se mantêm, no que se refere aos quartéis que são necessários instalar. As localizações apresentadas nesse mapa permitem uma cobertura de cerca de 96.78% dos eventos recorrentes. Relativamente aos eventos esporádicos, que não são considerados neste modelo, as localizações selecionadas permitem uma cobertura de 64 das 73 freguesias onde poderão ocorrer este tipo de eventos.

Nos cenários 3 e 4 são consideradas duas situações no modelo de *max covering*. Na primeira estabelece-se um número de quartéis a construir e um número de quartéis existentes a manter, obtidos através do modelo de *set covering* para o respetivo cenário. Na segunda situação considera-se apenas o número total de quartéis, independentemente, se estes já existem ou não.

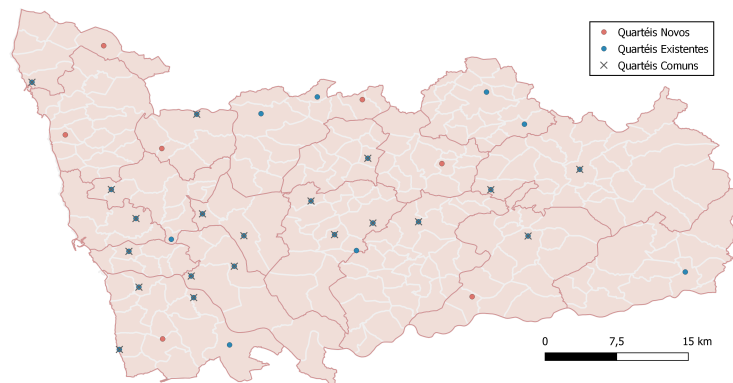


Figura 5.20: Localizações dos quartéis de bombeiros necessários, para a situação 1 considerada no cenário 3, onde se assinalam as localizações que se mantêm do modelo *set covering*.

Considerando o **cenário 3**, na primeira situação, como observado no mapa da figura 5.20, nenhuma das localizações de quartéis de bombeiros a instalar se mantém nos dois modelos. Relativamente aos quartéis de bombeiros existentes que se revelam imprescindíveis, das 28 localizações, 20 delas mantêm-se nos dois modelos considerados. Verifica-se ainda que, no caso da freguesia de Santo Tirso, Couto (Santa Cristina e São Miguel) e Burgães, que apresenta dois quartéis de bombeiros, o modelo seleciona o outro quartel. Estas localizações apresentadas no mapa da figura 5.20 permitem uma cobertura de cerca de 95.68% dos eventos recorrentes. Quando analisado, posteriormente, o número de freguesias onde poderão ocorrer eventos esporádicos que se encontram cobertas verifica-se que, tal como no cenário 1, apenas 62 das 73 freguesias se encontram cobertas. Na segunda situação testada, ao considerar apenas um total de 35 localizações necessárias para os quartéis de bombeiros, verifica-se que o modelo de maximização dá preferência a que 25 dos quartéis de bombeiros sejam em localizações novas e que apenas 10 sejam quartéis de bombeiros já existentes. Deste modo, tem-se que o modelo prioriza as localizações possíveis para a instalação de novos quartéis de bombeiros em detrimento das localizações dos quartéis de bombeiros existentes. Pode-se, então, depreender que as localizações atuais dos quartéis de bombeiros não mostram ser as mais eficientes, já que estas localizações permitem garantir uma cobertura de cerca de 97.75% dos eventos recorrentes, 2% superior às obtidas considerando a restrição para o número de quartéis novos e existentes. Relativamente ao número de freguesias onde poderão ocorrer eventos esporádicos, este número também aumenta, sendo possível, nesta segunda situação, cobrir 67 das 73 freguesias.

Por fim, no **cenário 4**, consideram-se também as duas situações acima descritas para o modelo de maximização. O mapa da figura 5.21 representa a primeira situação considerada, onde as localizações apresentadas permitem a cobertura máxima de 95.56% dos eventos recorrentes.

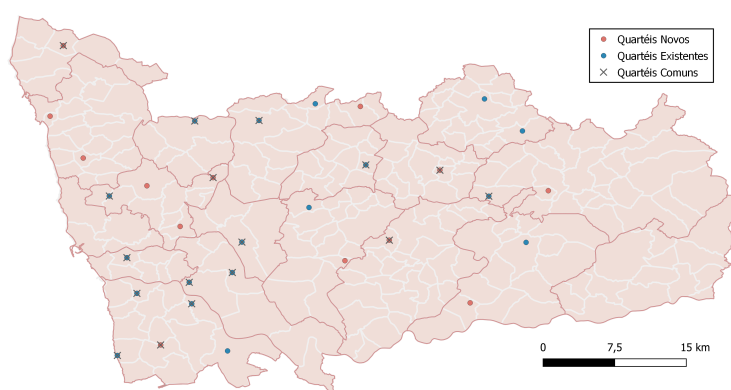


Figura 5.21: Localizações dos quartéis de bombeiros necessários, para a situação 1 considerada no cenário 4, onde se assinalam as localizações que se mantêm do modelo *set covering*.

Das 13 localizações obtidas para os quartéis de bombeiros em falta, apenas 5 delas se mantêm e, das 18 localizações de quartéis de bombeiros existentes, 12 são iguais nos

resultados dos dois modelos comparados. Por outro lado, na segunda situação, verifica-se que o número de quartéis necessário construir aumenta de 13 para 22, enquanto que, apenas são necessários 9 em vez de 18 quartéis de bombeiros existentes. Tais localizações permitem atingir uma cobertura máxima de cerca de 95.99% dos eventos recorrentes. Um valor ligeiramente superior ao obtido na primeira situação considerada. Quando analisado o número de freguesias onde poderão ocorrer eventos esporádicos que se encontram cobertas pelas localizações selecionadas, na situação 1, apenas 63 das 73 freguesias se encontram cobertas e, na situação 2, encontram-se 66 das 73 freguesias.

De um modo geral, nos 4 cenários, é possível otimizar a cobertura máxima para pelo menos 95%. Desta forma, para os cenários 1, 3 e 4, com um menor número de quartéis do que os existentes atualmente, é possível cobrir uma maior percentagem de eventos recorrentes. Da conclusão anterior e do observado pelas duas situações consideradas nos cenários 3 e 4, é possível depreender que as localizações atuais dos quartéis de bombeiros não mostram ser as mais eficientes, quando considerado o distrito do Porto no seu global.

### 5.3.2 Modelo de *Max Covering* para todos os anos

Após a contínua análise dos resultados obtidos tendo em consideração os dados para o ano de 2020, de modo a perceber o que acontece ao longo dos 9 anos em análise, aplica-se o modelo de maximização exposto na secção 3.4, para cada cenário, para os dados relativamente a cada um dos anos em estudo bem como para a totalidade de ocorrências. Para tal, recorre-se ao número de quartéis obtido no modelo de *set covering multi-period*, pretendendo obter uma cobertura de pelo menos 0.90 em cada um dos anos considerados. Apresenta-se na figura 5.22 as proporções máximas de eventos recorrentes cobertos para cada um dos cenários, recorrendo ao número de ocorrências de cada um dos 9 anos, bem como ao número total das mesmas.

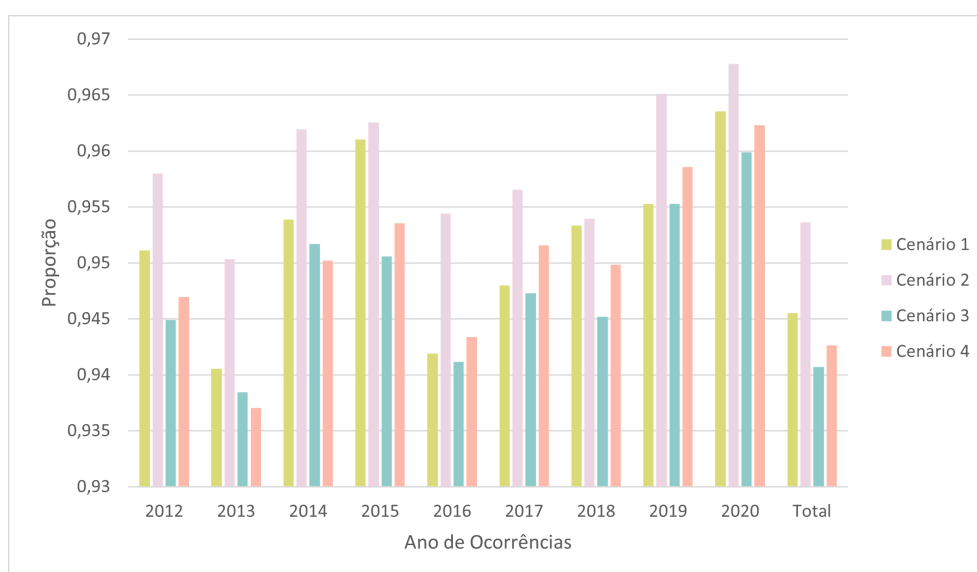


Figura 5.22: Proporção máxima de eventos recorrentes cobertos, para cada cenário, considerando o histórico de ocorrências de cada ano bem como o total das ocorrências.

De um modo geral, é possível concluir que em qualquer ano considerado, o cenário 2 é o que apresenta uma proporção de eventos recorrentes cobertos superior. Considerando que neste cenário se mantêm os 45 quartéis de bombeiros existentes e se pretende instalar 7 novos quartéis, sendo deste modo o cenário com o maior número de quartéis, seria expectável que permitisse uma maior cobertura máxima. É ainda possível constatar que considerando as ocorrências do ano de 2020, é onde se consegue obter as maiores percentagens de cobertura máxima para cada um dos 4 cenários. Para 2020 é o cenário 3 o que apresenta uma menor percentagem de cobertura, ligeiramente inferior a 96% (95.99%). Verifica-se ainda que independentemente do cenário e do ano em causa, é possível maximizar a cobertura para um valor de pelo menos 93.70%.

Analisando o número de freguesias cobertas para cada ano de ocorrências considerado, verifica-se que, para cada um dos cenários, é quando se considera o número total de ocorrências dos 9 anos que se consegue cobrir um maior número de freguesias do distrito do Porto. Apresenta-se na tabela 5.3 esse número para cada cenário.

Tabela 5.3: Número de freguesias cobertas quando considerado o número total de ocorrências dos 9 anos, para cada cenário.

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
<b>Freguesias Cobertas</b>	166	178	160	161

Comparando o número de freguesias cobertas com a percentagem máxima de eventos recorrentes cobertos obtida considerando o total de ocorrências, constata-se que quanto maior a percentagem máxima conseguida, maior o número de freguesias cobertas.

No que concerne as localizações obtidas através deste modelo para os quartéis de bombeiros, verifica-se que no cenário 2 e 3 quando comparadas as 7 localizações para os novos quartéis, nenhuma dessas localizações se mantêm. Já no caso do cenário 4, quando comparadas as 15 localizações para novos quartéis de bombeiros, tem-se que 2 delas se mantêm e, no caso do cenário 1, em 35 localizações, mantêm-se 8 delas. No que respeita ao cenário 3 e 4 é ainda possível analisar as localizações de quartéis existentes que se deverão manter. No caso do cenário 4, dos 17 quartéis de bombeiros existentes dever-se-ão manter 11, enquanto que no cenário 3, dos 29 manter-se-ão 17. Ou seja, como esperado, quanto menor o número de localizações a comparar, menor o número de localizações em comum. Desta forma, verifica-se que o histórico de ocorrências faz oscilar consideravelmente as localizações que otimizam a percentagem de cobertura dos eventos, já que a maioria destas não se mantêm ao longo dos anos.

## CONCLUSÃO

O trabalho desenvolvido teve como objetivo otimizar as localizações dos quartéis de bombeiros do distrito do Porto tendo em consideração apenas as ocorrências relacionadas com o combate a incêndios urbanos. Em Portugal, as localizações dos quartéis de bombeiros não foram alvo de estudo estratégico, existindo assim regiões com sobreposição e outras com défice de cobertura. Desta forma, recorre-se a modelos de localização discreta baseados na cobertura, pretendendo-se minimizar o número de quartéis de bombeiros de forma a que seja possível garantir uma cobertura total dos eventos esporádicos e uma cobertura parcial dos eventos recorrentes. Obtido o número mínimo de quartéis de bombeiros necessários, pretende-se estudar qual a cobertura máxima conseguida com esse mesmo número de quartéis. Para tal, esta aplicação baseia-se no trabalho realizado por Chevalier et al. (2012), no âmbito dos modelos de localização de *set covering*, e Murray (2013), nos modelos de localização de *max covering*.

De acordo com os resultados obtidos, infere-se que a velocidade média considerada e a proporção de eventos recorrentes cobertos têm um elevado impacto nos mesmos. Ou seja, o número de quartéis necessários diminui, com o aumento da velocidade considerada e/ou com a diminuição da proporção de eventos recorrentes cobertos. Ao analisar as alterações consideradas na função objetivo, constata-se que considerar o número de ocorrências na mesma, têm um impacto no número de freguesias que o modelo considera estarem cobertas, mas que na maioria dos casos, não demonstra ser relevante nas localizações selecionadas para a instalação de quartéis de bombeiros.

Comparando os dois modelos de *set covering* aplicados, é possível perceber que o modelo *multi-period* ao considerar diversos anos e um maior número de ocorrências, que por sua vez se encontram mais dispersas, necessita, na maioria dos cenários, de um maior número de quartéis, mesmo que seja um número reduzido.

É ainda de notar as diferenças nas localizações obtidas pelos dois modelos, o de *set covering* e o de *max covering*. Deste modo, conclui-se que as localizações dos eventos esporádicos, que não são considerados no modelo de *max covering*, têm uma grande influência nas localizações selecionadas pelo modelo, dado que, o modelo de *set covering* impõe que todas as freguesias onde possam ocorrer eventos esporádicos têm que estar

cobertas.

Em suma, é possível através das diversas análises realizadas, constatar que, na maioria dos casos, o modelo aplicado prioriza, caso tenha possibilidade de escolha, a abertura de um novo quartel em vez de manter um quartel já existente. Deste modo, conclui-se que as localizações atuais dos quartéis de bombeiros do distrito do Porto não demonstram ser as mais eficientes.

Para dar continuidade ao estudo realizado deveriam ser consideradas outras atividades dos quartéis de bombeiros, como os incêndios industriais ou as emergências médicas. Este tipo de atividades também possuem restrições e necessidades de cobertura que deverão ser tidas em consideração aquando a localização dos quartéis de bombeiros. Também se sugere considerar um maior número de pontos de referências, isto é, que cada freguesia não se resume apenas a um ponto, sem critério de escolha. No caso do cálculo das distâncias, em tempo, estas são calculadas recorrendo às distâncias reais, em kms, e utilizando uma velocidade média. Seria pertinente obter o tempo necessário real para percorrer uma dada distância.

Por fim, este estudo foca-se no distrito do Porto e seria relevante estendê-lo a Portugal Continental. Para tal, basta recolher os dados referentes a todo o país, já que os modelos a aplicar seriam os apresentados nesta dissertação.

Este trabalho foi financiado por fundos nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., no âmbito do projeto DSAIPA/DS/0088/2919.

## BIBLIOGRAFIA

- Boloori Arabani, A. & Farahani, R. Z. (2012). Facility location dynamics: An overview of classifications and applications. *Computers & Industrial Engineering*, 62(1), 408–420. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.09.018> (ver p. 5)
- Boonmee, C., Arimura, M. & Asada, T. (2017). Facility location optimization model for emergency humanitarian logistics. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 24, 485–498. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2017.01.017> (ver p. 5)
- Castro, C. F. d. & Abrantes, J. M. B. (2005). *Combate a Incêndios Urbanos e Industriais* (2nd ed, Vol. 10). Escola Nacional de Bombeiros. (Ver p. 1).
- Caunhye, A. M., Nie, X. & Pokharel, S. (2011). Optimization models in emergency logistics: A literature review. *Socio-Economic Planning Sciences*, 46, 4–13. <https://doi.org/doi:10.1016/j.seps.2011.04.004> (ver p. 4)
- Chevalier, P., Thomas, I., Geraets, D., Goetghebeur, E., Janssens, O., Peeters, D. & Plastria, F. (2012). Locating fire stations: An integrated approach for Belgium. *Socio-Economic Planning Sciences*, 46(2), 173–182. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2012.02.003> (ver pp. 6–8, 10–12, 18, 28, 41)
- Church, R. & ReVelle, C. (1974). The maximal covering location problem. *Papers in Regional Science*, 32(1), 101–118 (ver p. 14).
- Daskin, M. S. (1995). Discrete Network Location Problems. *Network and Discrete Location: Models, Algorithms, and Applications*, 498 (ver p. 5).
- Daskin, M. S. (2008). What you should know about location modeling. *Naval Research Logistics*, 55(4), 283–294. <https://doi.org/10.1002/nav.20284> (ver pp. 4, 5)
- Decreto-Lei n.º 220/2008 (Diário da República n.º 220/2008, Série I de 2008-11-12). (2008). Ministério da Administração Interna. (Ver p. 11).
- Despacho n.º 8903/2020 (Diário da República n.º 182/2020, Série II de 2020-09-17, páginas 56 - 59). (2020). Administração Interna - Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil. (Ver p. 17).
- El Ghaoui, L., Calafiore, G. C. & Calafiore, G. C. (2014). *Optimization models* (1. publ). Cambridge Univ. Press. (Ver p. 3).

- Jia, H., Ordóñez, F. & Dessouky, M. M. (2007). Solution approaches for facility location of medical supplies for large-scale emergencies. *Computers & Industrial Engineering*, 52(2), 257–276. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2006.12.007> (ver p. 5)
- Kumar, V., Ramamritham, K. & Jana, A. (2019). Resource allocation for handling emergencies considering dynamic variations and urban spaces: Fire fighting in Mumbai. *ACM International Conference Proceeding Series*. <https://doi.org/10.1145/3287098.3287099> (ver p. 8)
- Lei n.º 72/2013* (Diário da República n.º 169/2013, Série I de 2013-09-03). (2013). Assembleia da República. (Ver pp. 18, 23).
- Lourenço, J. M. (2021). *The NOVAthesis L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X Template User's Manual*. NOVA University Lisbon. <https://github.com/joamlourenco/novathesis/raw/master/template.pdf>. (Ver p. ii)
- Murray, A. T. (2013). Optimising the spatial location of urban fire stations. *Fire Safety Journal*, 62(PART A), 64–71. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2013.03.002> (ver pp. 6, 7, 9, 14, 41)
- ReVelle, C. S., Eiselt, H. A. & Daskin, M. S. (2008). A bibliography for some fundamental problem categories in discrete location science. *European Journal of Operational Research*, 184(3), 817–848. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.12.044> (ver p. 4)
- Rodriguez, S. A., De la Fuente, R. A. & Aguayo, M. M. (2020). A facility location and equipment emplacement technique model with expected coverage for the location of fire stations in the Concepcion province, Chile. *Computers and Industrial Engineering*, 147(March), 106522. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106522> (ver pp. 7, 8)
- Rodriguez, S. A., De la Fuente, R. A. & Aguayo, M. M. (2021). A simulation-optimization approach for the facility location and vehicle assignment problem for firefighters using a loosely coupled spatio-temporal arrival process. *Computers and Industrial Engineering*, 157(March). <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107242> (ver pp. 7, 8)
- Wang, F. & Xu, Y. (2011). Estimating O–D travel time matrix by Google Maps API: implementation, advantages, and implications. *Annals of GIS*, 17(4), 199–209. <https://doi.org/10.1080/19475683.2011.625977> (ver p. 17)
- Winston, W. L. & Goldberg, J. B. (2004). *Operations research: applications and algorithms* (4th ed). Thomson/Brooks/Cole. (Ver p. 3).
- Yang, L., Jones, B. F. & Yang, S.-H. (2007). A fuzzy multi-objective programming for optimization of fire station locations through genetic algorithms. *European Journal of Operational Research*, 181(2), 903–915. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.07.003> (ver p. 1)
- Yao, J., Zhang, X. & Murray, A. T. (2019). Location optimization of urban fire stations: Access and service coverage. *Computers, Environment and Urban Systems*, 73(October 2018), 184–190. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2018.10.006> (ver p. 7)



## CODIFICAÇÃO LOCALIZAÇÕES

Tabela I.1: Pontos de referências das freguesias do distrito do Porto

Código	Concelho	Freguesia	Latitude	Longitude
1	Amarante	Aboadela, Sanche e Várzea	41.2781141	-7.9879678
2	Amarante	Amarante (São Gonçalo), Madalena, Cepelos e Gatão	41.2746398	-8.0874448
3	Amarante	Ansiães	41.2505318	-7.9562064
4	Amarante	Bustelo, Carneiro e Carvalho de Rei	41.2696357	-8.0826488
5	Amarante	Candemil	41.2477458	-7.9667489
6	Amarante	Figueiró (Santiago e Santa Cristina)	41.297162	-8.187498
7	Amarante	Fregim	41.2643962	-8.1070351
8	Amarante	Freixo de Cima e de Baixo	41.308643	-8.1371354
9	Amarante	Fridão	41.3111865	-8.034718
10	Amarante	Gondar	41.2534661	-8.0282989
11	Amarante	Gouveia (São Simão)	41.2147452	-8.051974
12	Amarante	Jazente	41.2438414	-8.0585203
13	Amarante	Lomba	41.2486425	-8.0668172
14	Amarante	Louredo	41.2543276	-8.1175741
15	Amarante	Lufrei	41.2746389	-8.051974
16	Amarante	Mancelos	41.27583	-8.1587744
17	Amarante	Olo e Canadelo	41.3227203	-7.9719689
18	Amarante	Padronelo	41.255816	-8.0503229
19	Amarante	Rebordelo	41.3437573	-7.985203
20	Amarante	Salvador do Monte	41.2401683	-8.0942354
21	Amarante	Telões	41.3100705	-8.1083421
22	Amarante	Travanca	41.2745674	-8.193961
23	Amarante	Vila Caiz	41.2373584	-8.1451618
24	Amarante	Vila Chã do Marão	41.2901939	-8.027199
25	Amarante	Vila Garcia, Aboim e Chapa	41.2696357	-8.0826488
26	Amarante	Vila Meã	41.2489266	-8.1735357
27	Baião	Ancede e Ribadouro	41.1025689	-8.0572191
28	Baião	Baião (Santa Leocádia) e Mesquinhata	41.1170923	-8.0871254
29	Baião	Campelo e Ovil	41.18149	-8.0140239
30	Baião	Frende	41.1250501	-7.9211223
31	Baião	Gestaçó	41.1711605	-7.9406514
32	Baião	Gove	41.1313226	-8.0582561
33	Baião	Grilo	41.1355284	-8.0768261
34	Baião	Loivos da Ribeira e Tresouras	41.1420406	-7.9225276
35	Baião	Loivos do Monte	41.1974185	-7.972723
36	Baião	Santa Cruz do Douro e São Tomé de Covelas	41.1170422	-8.0046437
37	Baião	Santa Marinha do Zêzere	41.1417802	-7.9508489
38	Baião	Teixeira e Teixeira	41.186878	-7.9011868
39	Baião	Valadares	41.1445971	-7.9829411
40	Baião	Viarez	41.168751	-7.9626627
41	Felgueiras	Aião	41.2990125	-8.2004395
42	Felgueiras	Airães	41.3145112	-8.1964206
43	Felgueiras	Friande	41.3678203	-8.1721205
44	Felgueiras	Idães	41.3395549	-8.2519171
45	Felgueiras	Jugueiros	41.4012723	-8.2173165
46	Felgueiras	Macieira da Lixa e Caramos	41.3515114	-8.1564959
47	Felgueiras	Margaride (Santa Eulália), Várzea, Lagares, Varziela e Moure	41.3654043	-8.1987555
48	Felgueiras	Pedreira, Rande e Sernande	41.3287634	-8.2114357
49	Felgueiras	Penacova	41.3734712	-8.2522038
50	Felgueiras	Pinheiro	41.3674441	-8.1558425
51	Felgueiras	Pombeiro de Ribavizela	41.3848047	-8.2314213
52	Felgueiras	Refontoura	41.3319016	-8.1944169
53	Felgueiras	Regilde	41.3666753	-8.2671528
54	Felgueiras	Revinhade	41.3492474	-8.2696272
55	Felgueiras	Sendim	41.3867221	-8.1801768

Código	Concelho	Freguesia	Latitude	Longitude
56	Felgueiras	Torrados e Sousa	41.357847	-8.235547
57	Felgueiras	Unhão e Lordelo	41.3203583	-8.2285694
58	Felgueiras	Vila Cova da Lixa e Borba de Godim	41.3341055	-8.154742
59	Felgueiras	Vila Fria e Vizela (São Jorge)	41.3822863	-8.2477626
60	Felgueiras	Vila Verde e Santão	41.3084073	-8.1921189
61	Gondomar	Baguim do Monte (Rio Tinto)	41.1918929	-8.5411684
62	Gondomar	Fânzeres e São Pedro da Cova	41.1424361	-8.5007116
63	Gondomar	Foz do Sousa e Covelo	41.1086629	-8.4895988
64	Gondomar	Gondomar (São Cosme), Valbom e Jovim	41.1298751	-8.561866
65	Gondomar	Lomba	41.0596486	-8.4112032
66	Gondomar	Melres e Medas	41.0572803	-8.434873
67	Gondomar	Rio Tinto	41.1811059	-8.565452
68	Lousada	Aveleda	41.2798303	-8.2523757
69	Lousada	Caíde de Rei	41.2674492	-8.2243252
70	Lousada	Cernadelo e Lousada (São Miguel e Santa Margarida)	41.3046343	-8.2564694
71	Lousada	Cristelos, Boim e Ordem	41.275059	-8.2857642
72	Lousada	Figueiras e Covas	41.2805425	-8.3223352
73	Lousada	Lodares	41.2403904	-8.2946613
74	Lousada	Lustosa e Barrosas (Santo Estêvão)	41.3374338	-8.3191966
75	Lousada	Macieira	41.287216	-8.243039
76	Lousada	Meinedo	41.2489628	-8.2593785
77	Lousada	Nespereira e Casais	41.2544327	-8.3006322
78	Lousada	Nevoilde	41.2561888	-8.3197563
79	Lousada	Silvares, Pias, Nogueira e Alvarenga	41.2857875	-8.2758227
80	Lousada	Sousela	41.2980824	-8.3098466
81	Lousada	Torno	41.2906434	-8.2132079
82	Lousada	Vilar do Torno e Alentém	41.2844393	-8.2124808
83	Maia	Águas Santas	41.2098544	-8.5753202
84	Maia	Castêlo da Maia	41.2604484	-8.6166617
85	Maia	Cidade da Maia	41.232647	-8.6229403
86	Maia	Folgosa	41.2706372	-8.5343766
87	Maia	Milheirós	41.2132809	-8.5902666
88	Maia	Moreira	41.2466065	-8.6460217
89	Maia	Nogueira e Silva Escura	41.2349088	-8.5867315
90	Maia	Pedrouços	41.1888	-8.5874796
91	Maia	São Pedro Fins	41.2445019	-8.550901
92	Maia	Vila Nova da Telha	41.2531913	-8.668614
93	Marco De Canaveses	Alpendorada, Várzea e Torrão	41.0854364	-8.2368445
94	Marco De Canaveses	Avessadas e Rosém	41.1493996	-8.1813176
95	Marco De Canaveses	Banho e Carvalhosa	41.2371977	-8.1638851
96	Marco De Canaveses	Bem Viver	41.1147763	-8.214782
97	Marco De Canaveses	Constance	41.2136706	-8.1597664
98	Marco De Canaveses	Marco	41.1799366	-8.139383
99	Marco De Canaveses	Paredes de Viaduros e Manhuncelos	41.1340216	-8.1294055
100	Marco De Canaveses	Penha Longa e Paços de Gaiolo	41.1016086	-8.1106931
101	Marco De Canaveses	Sande e São Lourenço do Douro	41.1048771	-8.1762214
102	Marco De Canaveses	Santo Isidoro e Livração	41.2197154	-8.1405892
103	Marco De Canaveses	Soalhães	41.1592403	-8.0973163
104	Marco De Canaveses	Sobretâmega	41.1966745	-8.1608675
105	Marco De Canaveses	Tabuado	41.1864561	-8.1200049
106	Marco De Canaveses	Várzea, Aliviada e Folhada	41.1845043	-8.1477551
107	Marco De Canaveses	Vila Boa de Quires e Maureles	41.2139071	-8.20617
108	Marco De Canaveses	Vila Boa do Bispo	41.1298235	-8.2201345
109	Matosinhos	Custóias, Leça do Balio e Guifões	41.1971825	-8.6682332
110	Matosinhos	Matosinhos e Leça da Palmeira	41.1815056	-8.6793127
111	Matosinhos	Perafita, Lavra e Santa Cruz do Bispo	41.2237371	-8.6957862
112	Matosinhos	São Mamede de Infesta e Senhora da Hora	41.183583	-8.6518083
113	Paços De Ferreira	Carvalhosa	41.300547	-8.3615865
114	Paços De Ferreira	Eiriz	41.3078862	-8.3882723
115	Paços De Ferreira	Ferreira	41.2785916	-8.3721381
116	Paços De Ferreira	Figueiró	41.3054441	-8.3391094
117	Paços De Ferreira	Frazão Arreigada	41.2590478	-8.4011018
118	Paços De Ferreira	Freamunde	41.2865608	-8.338962
119	Paços De Ferreira	Meixomil	41.2875505	-8.3937532
120	Paços De Ferreira	Paços de Ferreira	41.2782034	-8.3734136
121	Paços De Ferreira	Penamaior	41.2886374	-8.4129396
122	Paços De Ferreira	Raimonda	41.3168616	-8.3334851
123	Paços De Ferreira	Sanfins Lamoso Codessos	41.2782034	-8.3734136
124	Paços De Ferreira	Seroa	41.2631768	-8.4318669
125	Paredes	Aguiar de Sousa	41.1282869	-8.4469525
126	Paredes	Astromil	41.1961503	-8.4156809
127	Paredes	Baltar	41.1926727	-8.3884721
128	Paredes	Beire	41.248222	-8.319987
129	Paredes	Cete	41.1794441	-8.3690199
130	Paredes	Cristelo	41.2305679	-8.3628916
131	Paredes	Duas Igrejas	41.2404309	-8.3760958
132	Paredes	Gandra	41.2007707	-8.4400543
133	Paredes	Lordelo	41.2343167	-8.4102508
134	Paredes	Louredo	41.2380863	-8.3386238
135	Paredes	Parada de Todeia	41.167279	-8.3704583

ANEXO I. CODIFICAÇÃO LOCALIZAÇÕES

Código	Concelho	Freguesia	Latitude	Longitude
136	Paredes	Paredes	41.2051674	-8.3303867
137	Paredes	Rebordosa	41.2156589	-8.4168006
138	Paredes	Recarei	41.1542951	-8.411886
139	Paredes	Sobreira	41.1465489	-8.3898193
140	Paredes	Sobrosa	41.2588812	-8.3415949
141	Paredes	Vandoma	41.1942458	-8.4076441
142	Paredes	Vilela	41.2434724	-8.3827917
143	Penafiel	Abraão	41.1577476	-8.2222555
144	Penafiel	Boelhe	41.134519	-8.2437191
145	Penafiel	Bustelo	41.2291633	-8.2705298
146	Penafiel	Cabeça Santa	41.13206	-8.2796774
147	Penafiel	Canelas	41.0777839	-8.3186665
148	Penafiel	Capela	41.1015646	-8.3480146
149	Penafiel	Castelões	41.2304298	-8.1873578
150	Penafiel	Croca	41.2245967	-8.2455673
151	Penafiel	Duas Igrejas	41.1852972	-8.2708034
152	Penafiel	Eja	41.0860541	-8.2985774
153	Penafiel	Fonte Arcada	41.14532	-8.3683889
154	Penafiel	Galegos	41.1610064	-8.3138849
155	Penafiel	Guilhufe e Urró	41.192759	-8.3152595
156	Penafiel	Irivo	41.1751145	-8.3282181
157	Penafiel	Lagares e Figueira	41.1248165	-8.3700068
158	Penafiel	Luzim e Vila Cova	41.1710421	-8.2384523
159	Penafiel	Oldrões	41.14689	-8.2972913
160	Penafiel	Paço de Sousa	41.1663369	-8.3437242
161	Penafiel	Penafiel	41.2052808	-8.2891305
162	Penafiel	Perozelo	41.1488366	-8.2646283
163	Penafiel	Rans	41.1695408	-8.2994514
164	Penafiel	Recezinhos (São Mamede)	41.2407727	-8.2130958
165	Penafiel	Recezinhos (São Martinho)	41.2302178	-8.2123661
166	Penafiel	Rio de Moinhos	41.1078917	-8.2643193
167	Penafiel	Rio Mau	41.0530542	-8.3674684
168	Penafiel	Sebolido	41.048798	-8.3456322
169	Penafiel	Termas de São Vicente	41.1193531	-8.2928977
170	Penafiel	Valpedre	41.1360951	-8.3143192
171	Porto	Aldoar, Foz do Douro e Nevogilde	41.1685583	-8.6870055
172	Porto	Bonfim	41.1510153	-8.5940618
173	Porto	Campanhã	41.1613679	-8.5763932
174	Porto	Cedofeita, Santo Ildefonso, Sé, Miragaia, São Nicolau e Vitória	41.1555894	-8.6144229
175	Porto	Lordelo do Ouro e Massarelos	41.1520861	-8.6307489
176	Porto	Paranhos	41.1753841	-8.607517
177	Porto	Ramalde	41.1663721	-8.6498773
178	Póvoa De Varzim	Aguçadoura e Navais	41.4312668	-8.7780304
179	Póvoa De Varzim	Aver-o-Mar, Amorim e Terroso	41.4068118	-8.7505154
180	Póvoa De Varzim	Balazar	41.4046018	-8.6253698
181	Póvoa De Varzim	Estela	41.4465283	-8.7498232
182	Póvoa De Varzim	Laundos	41.4348539	-8.7205877
183	Póvoa De Varzim	Póvoa de Varzim, Beiriz e Argivai	41.3766361	-8.734351
184	Póvoa De Varzim	Rates	41.426006	-8.6728939
185	Santo Tirso	Agrela	41.2569258	-8.4715699
186	Santo Tirso	Água Longa	41.2508051	-8.4933473
187	Santo Tirso	Areias, Sequeiró, Lama e Palmeira	41.3630652	-8.4754513
188	Santo Tirso	Aves	41.3690522	-8.4058137
189	Santo Tirso	Carreira e Refojos de Riba de Ave	41.2892584	-8.4469945
190	Santo Tirso	Lamelas e Guimarei	41.2891704	-8.4736806
191	Santo Tirso	Monte Córdova	41.3161926	-8.4385171
192	Santo Tirso	Negrelos (São Tomé)	41.348127	-8.4003255
193	Santo Tirso	Rebordões	41.3551886	-8.4291568
194	Santo Tirso	Reguenga	41.2783338	-8.4553816
195	Santo Tirso	Roriz	41.3435561	-8.3773116
196	Santo Tirso	Santo Tirso, Couto (Santa Cristina e São Miguel) e Burgães	41.3275597	-8.4595557
197	Santo Tirso	Vila Nova do Campo	41.3591465	-8.3512865
198	Santo Tirso	Vilarinho	41.3591622	-8.3337408
199	Trofa	Alvarelhos e Guidões	41.321772	-8.6219172
200	Trofa	Bougado (São Martinho e Santiago)	41.3297055	-8.5336013
201	Trofa	Coronado (São Romão e São Mamede)	41.282184	-8.56904
202	Trofa	Covelas	41.2996544	-8.5336525
203	Trofa	Muro	41.2985251	-8.6006338
204	Valongo	Alfena	41.2414762	-8.5256062
205	Valongo	Campo e Sobrado	41.1825535	-8.4652022
206	Valongo	Ermesinde	41.2090826	-8.544636
207	Valongo	Valongo	41.1887594	-8.498352
208	Vila Do Conde	Árvore	41.3394498	-8.7206765
209	Vila Do Conde	Aveleda	41.2670365	-8.698078
210	Vila Do Conde	Azurara	41.347023	-8.7370252
211	Vila Do Conde	Bagunte, Ferreiró, Outeiro Maior e Parada	41.3735012	-8.6469224
212	Vila Do Conde	Fajozes	41.3271067	-8.6985716
213	Vila Do Conde	Fornelo e Vairão	41.3309144	-8.6671787
214	Vila Do Conde	Gião	41.310449	-8.6755759

<b>Código</b>	<b>Concelho</b>	<b>Freguesia</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>
215	Vila Do Conde	Guilhabreu	41.2919387	-8.6366816
216	Vila Do Conde	Junqueira	41.3752101	-8.6822958
217	Vila Do Conde	Labruge	41.2781543	-8.718171
218	Vila Do Conde	Macieira da Maia	41.3414277	-8.673811
219	Vila Do Conde	Malta e Canidelo	41.3034417	-8.6555135
220	Vila Do Conde	Mindelo	41.3154764	-8.7205877
221	Vila Do Conde	Modivas	41.2949456	-8.69582
222	Vila Do Conde	Retorta e Tougues	41.3623483	-8.7026628
223	Vila Do Conde	Rio Mau e Arcos	41.4000946	-8.6545583
224	Vila Do Conde	Touguinha e Touguinhó	41.3747311	-8.71346
225	Vila Do Conde	Vila Chã	41.2974213	-8.7334683
226	Vila Do Conde	Vila do Conde	41.3519329	-8.7471423
227	Vila Do Conde	Vilar de Pinheiro	41.2678482	-8.6675703
228	Vila Do Conde	Vilar e Mosteiró	41.2800924	-8.6678896
229	Vila Nova De Gaia	Arcozelo	41.0517695	-8.6435589
230	Vila Nova De Gaia	Avintes	41.0991885	-8.544636
231	Vila Nova De Gaia	Canelas	41.0811868	-8.6005274
232	Vila Nova De Gaia	Canidelo	41.1233052	-8.6461724
233	Vila Nova De Gaia	Grijó e Sermonde	41.0451491	-8.5891921
234	Vila Nova De Gaia	Gulpilhares e Valadares	41.0957523	-8.6314929
235	Vila Nova De Gaia	Madalena	41.102569	-8.6501117
236	Vila Nova De Gaia	Mafamude e Vilar do Paraíso	41.0891434	-8.6123939
237	Vila Nova De Gaia	Oliveira do Douro	41.126008	-8.5807051
238	Vila Nova De Gaia	Pedroso e Seixezelo	41.0635619	-8.5584366
239	Vila Nova De Gaia	Sandim, Olival, Lever e Crestuma	41.0635417	-8.5000342
240	Vila Nova De Gaia	Santa Marinha e São Pedro da Afurada	41.1437534	-8.6455855
241	Vila Nova De Gaia	São Félix da Marinha	41.0325798	-8.6325611
242	Vila Nova De Gaia	Serzedo e Perosinho	41.0624007	-8.5996056
243	Vila Nova De Gaia	Vilar de Andorinho	41.1055643	-8.5858466

ANEXO I. CODIFICAÇÃO LOCALIZAÇÕES

Tabela I.2: Localizações e codificação dos quartéis de bombeiros do distrito do Porto.

Código	Concelho	Freguesia	Quartel	Latitude	Longitude
10020	Amarante	Amarante (São Gonçalo), Madalena, Cepelos e Gaíão	B.V. de Amarante	41.2726405	-8.0810041
10260	Amarante	Vila Meã	B.V. de Vila Meã	41.2474566	-8.1915627
10290	Baião	Campelo e Ovil	B.V. de Baião	41.1594556	-8.0377394
10370	Baião	Santa Marinha do Zêzere	B.V. de Santa Marinha do Zêzere	41.1454161	-7.9497635
10470	Felgueiras	Margaride (Santa Eulália), Várzea, Lagares, Varziela e Moura	B.V. de Felgueiras	41.3685037	-8.1969282
10580	Felgueiras	Vila Cova da Lixa e Borba de Godim	B.V. de Lixa	41.3286529	-8.1497421
10620	Gondomar	Fânzeres e São Pedro da Cova	B.V. de São Pedro da Cova	41.1525367	-8.5104852
10641	Gondomar	Gondomar (São Cosme), Valbom e Jovim	B.V. de Gondomar	41.1423721	-8.5334083
10642	Gondomar	Gondomar (São Cosme), Valbom e Jovim	B.V. de Valbom	41.1403709	-8.5640344
10660	Gondomar	Melres e Medas	B.V. de Melres	41.0583523	-8.397511
10670	Gondomar	Rio Tinto	B.V. da Areosa-Rio Tinto	41.1806033	-8.5623244
10710	Lousada	Cristelos, Boim e Ordem	B.V. de Lousada	41.2759187	-8.2830167
10880	Maia	Moreira	B.V. de Moreira da Maia	41.2477	-8.6633832
10900	Maia	Pedrouços	B.V. de Pedrouços	41.1859319	-8.5888116
10980	Marco de Canaveses	Marco	B.V. de Marco de Canaveses	41.1900059	-8.1452247
11090	Matosinhos	Custóias, Leça do Balio e Guifões	B.V. de Leça do Balio	41.2117215	-8.6327541
11101	Matosinhos	Matosinhos e Leça da Palmeira	B.V. de Matosinhos-Leça	41.1892886	-8.66970007
11102	Matosinhos	Matosinhos e Leça da Palmeira	B.V. de Leixões	41.1855637	-8.6776617
11120	Matosinhos	São Mamede de Infesta e Senhora da Hora	B.V. de São Mamede de Infesta	41.1905622	-8.6086531
11180	Paços de Ferreira	Freamunde	B.V. de Freamunde	41.2864321	-8.3444821
11200	Paços de Ferreira	Paços de Ferreira	B.V. de Paços de Ferreira	41.2780124	-8.3781798
11270	Paredes	Baltar	B.V. de Baltar	41.191724	-8.38586
11290	Paredes	Cete	B.V. de Cete	41.1719997	-8.3586216
11330	Paredes	Lordelo	B.V. de Lordelo	41.2334278	-8.4151241
11360	Paredes	Paredes	B.V. de Paredes	41.2060959	-8.3381918
11370	Paredes	Rebordosa	B.V. da Rebordosa	41.2137797	-8.416711
11520	Penafiel	Eia	B.V. de Entre-os-Rios	41.0895552	-8.2899279
11600	Penafiel	Paço de Sousa	B.V. de Paço de Sousa	41.1675345	-8.3464587
11610	Penafiel	Penafiel	B.V. de Penafiel	41.2076697	-8.2814092
11740	Porto	Cedofeita, Santo Ildefonso, Sé, Miragaia, São Nicolau e Vitória	B.V. do Porto	41.1485369	-8.6098052
11770	Porto	Ramalde	B.V. Portugueses	41.1710001	-8.6415182
11830	Póvoa de Varzim	Póvoa de Varzim, Beiriz e Argivai	B.V. da Póvoa de Varzim	41.3806709	-8.7620567
11880	Santo Tirso	Aves	B.V. de Vila das Aves	41.3625044	-8.4072879
11961	Santo Tirso	Santo Tirso, Couto (Santa Cristina e São Miguel) e Burgães	B.V. de Santo Tirso	41.3395373	-8.4859652
11962	Santo Tirso	Santo Tirso, Couto (Santa Cristina e São Miguel) e Burgães	B.V. Tirsenses	41.3417093	-8.4772584
12000	Trofa	Bougado (São Martinho e Santiago)	B.V. da Trofa	41.3410142	-8.5571659
12060	Valongo	Ermesinde	B.V. de Ermesinde	41.2174902	-8.5500425
12070	Valongo	Valongo	B.V. de Valongo	41.1903761	-8.4985568
12260	Vila do Conde	Vila do Conde	B.V. de Vila do Conde	41.36581	-8.740107
12290	Vila Nova de Gaia	Arcozelo	B.V. da Aguda	41.0493078	-8.6533707
12300	Vila Nova de Gaia	Avintes	B.V. de Avintes	41.113642	-8.5609893
12340	Vila Nova de Gaia	Gulpihares e Valadares	B.V. de Valadares	41.0950829	-8.6370527
12380	Vila Nova de Gaia	Pedroso e Seixezelo	B.V. de Carvalhos	41.072573	-8.578421
12390	Vila Nova de Gaia	Sandim, Olivais, Leiver e Crestuma	B.V. de Crestuma	41.0549738	-8.5163822
12400	Vila Nova de Gaia	Santa Marinha e São Pedro da Aturada	B.V. de Coimbraes	41.1266056	-8.6291083



