



LOURENÇO PEIXOTO CASTANHEIRA EGÍDIO DE SOUSA
Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

MAPEAMENTO DOS EFEITOS DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS NO CLIMA INTERIOR DE EDIFÍCIOS HISTÓRICOS

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL – PERFIL DE CONSTRUÇÃO

Universidade NOVA de Lisboa
Novembro, 2022



MAPEAMENTO DOS EFEITOS DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS NO CLIMA INTERIOR DE EDIFÍCIOS HISTÓRICOS

LOURENÇO PEIXOTO CASTANHEIRA EGÍDIO DE SOUSA

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

Orientador: Doutor Guilherme Barreto Arez Coelho,
Postdoctoral Fellow, Department of the Built Environment, Faculty of Technology, Art and Design, Oslo Metropolitan University, Oslo, Norway

Coorientador: Doutor Fernando Manuel Anjos Henriques,
Professor Catedrático, FCT - NOVA

Júri:

Presidente: Doutora Maria da Graça Neves,
Professora Associada com Agregação, FCT - NOVA

Arguente: Doutor Luís Gonçalo Correia Baltazar,
Professor Auxiliar, FCT - NOVA

Orientador: Doutor Guilherme Barreto Arez Coelho,
Postdoctoral Fellow, Department of the Built Environment, Faculty of Technology, Art and Design, Oslo Metropolitan University, Oslo, Norway

Mapeamento dos efeitos das alterações climáticas no clima interior de edifícios históricos

Copyright © Lourenço Peixoto Castanheira Egídio de Sousa, 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 objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao Professor Doutor Guilherme Coelho por me ter dado a oportunidade de elaborar este trabalho segundo a sua orientação e por ter estado sempre disponível para me ajudar e esclarecer no que fosse preciso, e por todo o tempo que dispôs para mim. Foi uma ajuda incomparável e à qual fico extremamente grato.

Em segundo lugar gostaria de agradecer ao meu coorientador, o Professor Doutor Fernando Henriques por todo o conhecimento transmitido ao longo do curso em inúmeras unidades curriculares leccionadas. Foi claramente um professor que sempre se destacou pelo seu profundo saber e pela sua facilidade em transmitir o seu conhecimento para os alunos.

Em terceiro lugar não poderia deixar de agradecer a todo o corpo docente e não docente da Faculdade de Ciências e Tecnologia, por me terem proporcionado a excelente experiência de tirar o curso nesta magnífica faculdade.

Em último lugar, mas não menos importante, gostaria de agradecer a toda a minha família e amigos que me acompanharam ao longo destes anos e sempre acreditaram em mim, deixando um especial obrigado às pessoas mais próximas que me ajudaram no dia a dia e sempre me deram forças e motivação para continuar, sendo estas os meus pais, o meu irmão, a minha namorada e os meus colegas e amigos Cristiano Santos e Gonçalo Lima.

“Porque eu sou do tamanho do que vejo
E não, do tamanho da minha altura...”
(Alberto Caeiro, em O Guardador de Rebanhos -Poema VII,
Heterónimo de Fernando Pessoa).

RESUMO

O clima exterior vai ser substancialmente afectado pelas alterações climáticas. Consequentemente, as condições de preservação do acervo exibido em edifícios históricos vão ser negativamente afectadas por estas alterações. Esta situação pode inclusive pôr em risco a continuidade do nosso acervo.

No entanto, o efeito das alterações climáticas no clima exterior vai variar consoante a localização geográfica, estimando-se que a Península Ibérica seja uma das zonas mais afectadas da Europa, i.e. com diminuição da precipitação, o aumento da temperatura do ar, entre outros efeitos.

Um dos grandes desafios actuais para o sector da construção, passa por perceber como irá mudar o clima e conseguir construir novos edifícios e reabilitar existentes de forma que os ocupantes dos mesmos se sintam confortáveis, e que para tal os edificadros consumam o mínimo de energia possível. A dificuldade torna-se acrescida quando se trata de edifícios históricos pois não se pretende que estes percam o seu valor arquitectónico com as possíveis reabilitações aplicadas desnecessariamente.

O propósito desta dissertação passa por analisar a variação do clima interior de edifícios históricos ao longo das várias regiões de Portugal continental, com recurso a um modelo higrotérmico já desenvolvido e validado de um edifício histórico. Consequentemente, serão construídos mapas de variação das condições interiores analisadas. Como caso de estudo para perceber os efeitos das alterações climáticas no clima interior de edifícios históricos utilizou-se o modelo da igreja de São Cristóvão, localizada em Lisboa.

Neste sentido, o presente documento apresenta a metodologia em que se baseia a construção dos mapas e os seus resultados. Foram efectuadas simulações tanto para o passado recente como para o futuro – recente e longínquo - e tendo em conta diferentes previsões em como o clima de Portugal poderá evoluir – RCP 4.5 e 8.5.

Através das simulações efectuadas verificam-se substanciais aumentos de temperatura e humidade interiores, sendo que a primeira se destaca no interior do país e a segunda no litoral. Estes aumentos foram também mais pejorativos no RCP 8.5 quando comparado com o RCP 4.5 e/ou no futuro longínquo quando comparado com o futuro próximo.

Palavas chave: Alterações climáticas, Simulação higrotérmica, Conservação, Edifícios históricos, Igreja de São Cristóvão, WUFI®Plus

ABSTRACT

The outdoor climate will be substantially affected by climate change. Consequently, the preservation conditions of the *acquis* exhibited in historic buildings will be negatively affected by these changes. This may even put the continuity of our *acquis* at risk.

However, the effect of climate change on the outdoor climate will vary according to the geographical location, with the Iberian Peninsula estimated to be one of the most affected areas in Europe, i.e. with reduced rainfall, increased air temperature, among other effects.

One of the great current challenges for the construction sector is to understand how the climate will change and to be able to construct new buildings and renovate existing ones in such a way that the occupants feel comfortable and that the buildings consume as little energy as possible. The difficulty becomes even greater when it comes to historic buildings because we do not want them to lose their architectural value with the possible rehabilitation applied unnecessarily.

The purpose of this dissertation is to analyse the indoor climate variation of historic buildings throughout the various regions of continental Portugal, using a hygrothermal model already developed and validated for a historic building. Consequently, maps of variation of the indoor conditions analysed will be constructed. As a case study to understand the effects of climate change on the indoor climate of historic buildings, the model of the Church of São Cristóvão, located in Lisbon, was used.

In this sense, this document presents the methodology on which the construction of the maps and their results are based. Simulations were performed both for the recent past and for the future - near and far - and taking into account different forecasts on how the climate of Portugal may evolve - RCP 4.5 and 8.5.

Through the simulations carried out, substantial increases in indoor temperature and humidity were verified, with the first standing out in the country's interior and the second on the coast. These increases were also more pejorative in RCP 8.5 when compared with RCP 4.5 and/or in the distant future when compared with the near future.

Keywords: Climate change, Hygrothermal simulation, Conservation, Historical buildings, St. Cristóvão church, WUFI@Plus

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contexto e motivação	1
1.2	Problema e objectivos	2
1.3	Organização do documento	2
2	EFEITOS DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS EM EDIFÍCIOS HISTÓRICOS.....	5
2.1	Alterações climáticas.....	5
2.2	Edifícios históricos	9
2.3	Modelação higrotérmica.....	10
2.3.1	Modelação higrotérmica de edifícios históricos.....	11
2.3.2	WUFI®Plus.....	11
2.4	Conservação de artefactos	13
2.5	Conforto térmico	15
2.6	Distribuição geográfica: mapas	16
2.6.1	Conjunção de estudos num quadro síntese	17
2.6.1.1	Metodologias aplicadas	22
2.6.1.2	Diferenças entre os estudos analisados.....	25
2.6.2	Casos de estudo	29
2.6.2.1	Gases poluentes na cidade de Madrid	30
2.6.2.2	Degradação de uma igreja e do seu património em vários pontos da Europa	32
3	METODOLOGIA	37
3.1	Modelo computacional.....	37
3.1.1	Caso de estudo.....	37
3.1.2	Equações de cálculo	40
3.2	Ficheiros climáticos futuros	41
3.2.1	Metodologia da EN 15927-4	42
3.2.2	Modelo Skartveit and Olseth.....	43
3.3	Ficheiros da temperatura interface solo/laje.....	44
3.4	Metodologia da construção de mapas.....	46

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
4.1	Clima de Portugal continental	51
4.2	Localizações seleccionadas	53
4.2.1	Temperatura.....	55
4.2.2	Humidade relativa	57
4.2.3	Irradiação solar global	58
4.2.4	Precipitação	59
4.3	Temperatura interior.....	60
4.3.1	Futuro próximo.....	60
4.3.2	Futuro longínquo	63
4.3.3	Conclusões.....	65
4.4	Humidade interior.....	66
4.4.1	Futuro próximo.....	67
4.4.2	Futuro longínquo	69
4.4.3	Conclusões.....	72
5	CONCLUSÕES.....	75
5.1	Principais conclusões	75
5.2	Desenvolvimentos futuros.....	76
	BIBLIOGRAFIA	77
	ANEXOS.....	83
Anexo A.	Classificação de Köppen	83
Anexo B.	Análise climatológica dos climas seleccionados	84
Anexo B.1	Clima do Porto.....	84
Anexo B.2	Clima de Lisboa.....	85
Anexo B.3	Clima de Faro	86
Anexo B.4	Clima de Bragança	87
Anexo B.5	Clima de Portalegre	88
Anexo B.6	Clima de Beja	89
Anexo C.	Determinação da concentração de vapor de água.....	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Aumento da temperatura global.....	6
Figura 2.2 - Alteração da temperatura média global da superfície (a) e subida do nível médio do mar (b) de 2006 a 2100, em relação ao período 1986-2005	9
Figura 2.3 - Esboço dos parâmetros necessários (inputs) para que o WUFI®Plus funcione na sua capacidade máxima	13
Figura 2.4 - Modelo de conforto térmico	15
Figura 2.5 - Contagem das análises efectuadas	26
Figura 2.6 - Contagem dos modelos utilizados	27
Figura 2.7 - Níveis de NO ₂ em 1995 e 2010	30
Figura 2.8 - Mapas de corrosão obtidos a partir da função dose-resposta de bronze fundido.....	31
Figura 2.9 - Mapas de recessão obtidos a partir da função dose-resposta de calcário Portland.....	31
Figura 2.10 - Previsão da corrosão do bronze fundido e a degradação do calcário de Portland	31
Figura 2.11 - Edifício de referência: exterior (a) e planta com localização dos radiadores (b).....	32
Figura 2.12 - Consumo de energia anual necessário para aquecer o santuário	33
Figura 2.13 - Mapas com as várias previsões: Colonização biológica no edifício de referência - não aquecido (a) e aquecido (b); Multiplicador da vida média dos artefactos do edifício de referência - não aquecido (c) e aquecido (d); Risco de dano no material base dos quadros no edifício de referência - não aquecido (e) e aquecido (f); Risco de dano na camada pictórica dos quadros no edifício de referência - não aquecido (g) e aquecido (h);.....	34
Figura 3.1 - Igreja de São Cristóvão: fachada principal (a) e sala principal (b).....	37
Figura 3.2 - Planta da igreja de São Cristóvão	39
Figura 3.3 - Modelo desenvolvido da Igreja de São Cristóvão, no WUFI®Plus	39
Figura 3.4 - Equilíbrio entre o fluxo de calor e humidade no interior de um edifício.....	40
Figura 3.5 - Fracção difusa vs. <i>Cleanness index</i> para quatro índices de variabilidade para elevação solar de 10° (a) e 60° (b), e fracção difusa vs. índice de claridade para seis elevações solares para horas invariáveis (c).....	44
Figura 3.6 - Avaliação da precisão de cada método sobre o impacto da temperatura solo/laje	45
Figura 3.7 - Variação anual da temperatura interface solo/laje determinada através de seis métodos..	46
Figura 3.8 - Esboço representativo da construção de mapas.....	47

Figura 3.9 - Representação das diferentes simulações efectuadas	48
Figura 4.1 - Clima de Portugal continental: temperatura média anual (a) e precipitação acumulada anual (b).....	51
Figura 4.2 - Clima de Portugal continental, segundo a classificação de <i>Köppen</i>	53
Figura 4.3 - Localização das estações meteorológicas seleccionadas	54
Figura 4.4 - Temperaturas médias mensais máximas, mínimas e médias: Porto vs. Bragança (a) Lisboa vs. Portalegre (b) Faro vs. Beja (c).....	56
Figura 4.5 - Humidade Relativa média mensal: Porto vs. Bragança (a) Lisboa vs. Portalegre (b) Faro vs. Beja (c).....	57
Figura 4.6 - Irradiação solar global mensal, média diária: Porto vs. Bragança (a) Lisboa vs. Portalegre (b) Faro vs. Beja (c).....	58
Figura 4.7 - Quantidade média de precipitação mensal: Porto vs. Bragança (a) Lisboa vs. Portalegre (b) Faro vs. Beja (c).....	59
Figura 4.8 - Variação da temperatura interior em Portugal continental no futuro próximo: RCP 4.5 (a) e RCP 8.5 (b).....	61
Figura 4.9 - Variação da temperatura interior no futuro próximo: Porto vs. Bragança - RCP 4.5 (a) e RCP 8.5 (b); Lisboa vs. Portalegre - RCP 4.5 (c) e RCP 8.5 (d); Faro vs. Beja - RCP 4.5 (e) e RCP 8.5 (f).....	62
Figura 4.10 - Variação da temperatura interior em Portugal continental no futuro longínquo: RCP 4.5 (a) e RCP 8.5 (b)	63
Figura 4.11 - Variação da temperatura interior no futuro longínquo: Porto vs. Bragança - RCP 4.5 (a) e RCP 8.5 (b); Lisboa vs. Portalegre - RCP 4.5 (c) e RCP 8.5 (d); Faro vs. Beja - RCP 4.5 (e) e RCP 8.5 (f).....	64
Figura 4.12 - Variação da humidade relativa interior em Portugal continental no futuro longínquo: RCP 4.5 (a) e RCP 8.5 (b).....	67
Figura 4.13 - Variação da concentração de vapor de água interior no futuro próximo: Porto vs. Bragança - RCP 4.5 (a) e RCP 8.5 (b); Lisboa vs. Portalegre - RCP 4.5 (c) e RCP 8.5 (d); Faro vs. Beja - RCP 4.5 (e) e RCP 8.5 (f).....	68
Figura 4.14 - Variação da humidade relativa interior em Portugal continental no futuro longínquo: RCP 4.5 (a) e RCP 8.5 (b).....	70
Figura 4.15 - Variação da concentração de vapor de água interior no futuro longínquo: Porto vs. Bragança - RCP 4.5 (a) e RCP 8.5 (b); Lisboa vs. Portalegre - RCP 4.5 (c) e RCP 8.5 (d); Faro vs. Beja - RCP 4.5 (e) e RCP 8.5 (f).....	71

ÍNDICE DE FIGURAS - ANEXOS

Figura B.1 - Estatísticas climáticas das estações de aquecimento e arrefecimento do Porto	84
Figura B.2 - Distribuição direccional da radiação solar, retirado do programa de cálculo WUFI® para ficheiro climático do Porto	84
Figura B.4 - Distribuição direccional da radiação solar, retirado do programa de cálculo WUFI® para ficheiro climático de Lisboa	85
Figura B.5 - Estatísticas climáticas das estações de aquecimento e arrefecimento de Faro.....	86
Figura B.6 - Distribuição direccional da radiação solar, retirado do programa de cálculo WUFI® para ficheiro climático de Faro.....	86
Figura B.7 - Estatísticas climáticas das estações de aquecimento e arrefecimento de Bragança.....	87
Figura B.8 - Distribuição direccional da radiação solar, retirado do programa de cálculo WUFI® para ficheiro climático de Bragança.....	87
Figura B.9 - Estatísticas climáticas das estações de aquecimento e arrefecimento de Portalegre.....	88
Figura B.10 - Distribuição direccional da radiação solar, retirado do programa de cálculo WUFI® para ficheiro climático de Portalegre	88
Figura B.11 - Estatísticas climáticas das estações de aquecimento e arrefecimento de Beja.....	89
Figura B.12 - Distribuição direccional da radiação solar, retirado do programa de cálculo WUFI® para ficheiro climático de Beja.....	89

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Especificações da temperatura e humidade relativa para as colecções	14
Quadro 2.2 - Quadro resumo de estudos sobre mapeamento	18
Quadro 2.3 - Número de estudos que aborda cada tipo de edifício.....	28
Quadro 3.1 - Soluções construtivas e propriedades dos materiais do modelo utilizado.....	38
Quadro 4.1 - Diferenciais das temperaturas máximas, médias e mínimas, das localizações seleccionadas	57
Quadro 4.2 - Dados estatísticos da temperatura interior (°C) no futuro próximo, nas várias localizações seleccionadas	63
Quadro 4.3 - Dados estatísticos da temperatura interior (°C) no futuro longínquo, nas várias localizações seleccionadas	65
Quadro 4.4 - Dados estatísticos da concentração de vapor de água interior (g/m ³) no futuro próximo, nas várias localizações seleccionadas.....	69
Quadro 4.5 - Dados estatísticos da concentração de vapor de água interior (g/m ³) no futuro longínquo, nas várias localizações seleccionadas.....	72

ÍNDICE DE QUADROS - ANEXOS

Quadro A.1 - Código para determinar as classificações de <i>Köppen</i> , para os principais climas e respectivos subclimas	83
Quadro A.2 - Código para determinar as classificações de <i>Köppen</i> , para a terceira letra da classificação	83
Quadro B.1 - Dados mensais médios: das temperaturas médias, mínimas e máximas (T média, T min e T max), da irradiação solar global diária (G), da Humidade Relativa (HR) e da quantidade de precipitação no Porto.....	84
Quadro B.2 - Dados mensais médios: das temperaturas médias, mínimas e máximas (T média, T min e T max), da irradiação solar global diária (G), da Humidade Relativa (HR) e da quantidade de precipitação em Lisboa.....	85

Quadro B.3 - Dados mensais médios: das temperaturas médias, mínimas e máximas (T média, T min e T max), da irradiação solar global diária (G), da Humidade Relativa (HR) e da quantidade de precipitação em Faro	86
Quadro B.4 - Dados mensais médios: das temperaturas médias, mínimas e máximas (T média, T min e T max), da irradiação solar global diária (G), da Humidade Relativa (HR) e da quantidade de precipitação em Bragança	87
Quadro B.5 - Dados mensais médios: das temperaturas médias, mínimas e máximas (T média, T min e T max), da irradiação solar global diária (G), da Humidade Relativa (HR) e da quantidade de precipitação em Portalegre	88
Quadro B.6 - Dados mensais médios: das temperaturas médias, mínimas e máximas (T média, T min e T max), da irradiação solar global diária (G), da Humidade Relativa (HR) e da quantidade de precipitação em Beja	89

SIGLAS

ACDD	<i>Adaptive Cooling Degree Days</i> (Graus Dia de Arrefecimento Adaptativo)
AHDD	<i>Adaptive Heating Degree Days</i> (Graus Dia de Aquecimento Adaptativo)
AR4	<i>Fourth Assessment Report</i> (Quarto Relatório de Avaliação)
AR5	<i>Fifth Assessment Report</i> (Quinto Relatório de Avaliação)
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
CORDEX	<i>Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment</i> (Experiência Coordenada de Diminuição Regional do Clima)
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i> (Mecânica de Fluidos Computacional)
ETICS	<i>External Thermal Insulation Composite System</i> (Sistema Composto de Isolamento Térmico Externo)
EN	<i>European Standard</i>
FL	Futuro Longínquo
FP	Futuro Próximo
GCM	<i>General Circulation Models</i>
GEE	Gases de Efeito de Estufa
GIS	<i>Geographical Information System</i>
HR	Humidade Relativa
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (Painel Internacional para as Alterações Climáticas)
IES	<i>Integrated Environmental Solutions</i>

IS	Instalação Sanitária
IT	Isolamento Térmico
LED	<i>Light Emitting Diode</i> (Diodo Emissor de Luz)
LM	<i>Lifetime Multiplier</i> (Multiplicador de Vida Média)
MIROC	<i>Model for Interdisciplinary Research on Climate</i>
MW	<i>Mineral Wool</i> (Lã Mineral)
OMM	Organização Meteorológica Mundial
OSB	<i>Oriented Strand Board</i> (Aglomerado de Partículas de Madeira Longas e Orientadas)
PMV	<i>Predicted Mean Vote</i> (Voto Médio Estimado)
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
PPD	<i>Percentage People Dissatisfied</i> (Percentagem Estimada de Pessoas Desconfortáveis)
PR	Passado Recente
RCP	<i>Representative Concentration Pathway</i> (Vias Representativas de Concentração)
WRF	<i>Weather Research and Forecasting</i>

SIMBOLOGIA

C_i	Quantidade de humidade no ar na zona i (kg)
H_i	Total de entalpia do ar na zona i (J)
k	<i>Clearness index</i> (-)
PM_{10}	Partículas inaláveis de diâmetro inferior a 10 micrómetros (μm)
\dot{Q}_{AVAC}	Quantidade de calor devido à ventilação mecânica (W)
$\dot{Q}_{Comp,j}$	Quantidade de calor transmitida da superfície interna do componente j para a zona i (W)
\dot{Q}_{in}	Quantidade de calor transmitido através da convecção na zona i (W)
\dot{Q}_{Sol}	Quantidade de radiação que passa através dos componentes transparentes para a zona i (W)
\dot{Q}_{vent}	Quantidade de calor devido à ventilação natural (W)
R_{20mm}	Contagem anual de dias em que a precipitação diária é superior a 20 mm por dia (dias)
t	Tempo (s)
T	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
\dot{W}_{AVAC}	Fluxo de humidade devido à ventilação mecânica (kg/s)
$\dot{W}_{Comp,j}$	Fluxo de humidade da superfície interna do componente j para a zona i (kg/s)
\dot{W}_{in}	Produção de humidade na zona i (kg/s)
\dot{W}_{vent}	Fluxo de humidade devido à ventilação (kg/s)

θ	Temperatura (°C)
v	Concentração de vapor de água (kg/m ³)
v_s	Limite de saturação (kg/m ³)
ϕ	Humidade relativa (%)

SÍMBOLOS QUÍMICOS

Al	Alumínio
Ca	Cálcio
Cl	Cloro
CO₂	Dióxido de Carbono
Cu	Cobre
Fe	Ferro
K	Potássio
Mn	Manganês
NO_x	Óxidos de Azoto
NO₂	Dióxido de Azoto
O₃	Ozono
Si	Silício
SO₂	Dióxido de Enxofre
Ti	Titânio
Zn	Zinco



INTRODUÇÃO

1.1 Contexto e motivação

Desde a pré-história que o Homem tem vindo a produzir arte, começou com o que se viria a chamar arte rupestre e até aos dias de hoje tem continuado a produzir, arte moderna e contemporânea. Devido a razões religiosas e ao simples facto dos artefactos representarem momentos do passado e terem sido produzidos pelos nossos antepassados cabe ao ser humano o dever de os conservar o máximo de tempo possível, de forma a que no futuro continue a ser possível contemplar a arte e os artefactos que existem nos dias de hoje.

Com a era industrial começou a haver a possibilidade de controlar melhor o clima interior dos edifícios, através de sistemas mecânicos, tais como o ar-condicionado e controladores de humidade. No entanto, o Homem utilizava estes sistemas mecânicos pensando apenas no seu conforto e não na conservação dos artefactos (no caso dos edifícios que os possuíssem, tais como museus e igrejas).

No final do século XX, as condições do clima interior de edifícios que albergam artefactos, demonstraram ser o factor mais crucial, no que diz respeito à preservação das colecções e dos artefactos. A poluição (e.g. produtos químicos), a humidade, a temperatura e a iluminação podem eventualmente deteriorar ou mesmo destruir os artefactos que são mantidos, protegidos e expostos nas colecções destes edifícios [1].

Com a era industrial surgiu também um grande problema que tem vindo a prejudicar a temática da conservação de edifícios históricos e os seus artefactos, que é o agravamento das alterações climáticas. A comunidade científica tem vindo, cada vez mais, a estudar as alterações climáticas e as consequências que estas trarão para o mundo. No entanto, está nas mãos do Homem o poder de decidir e aplicar medidas políticas que mitiguem os efeitos das alterações climáticas que consequentemente irão contribuir para a preservação do património cultural.

Devido a esta imprevisibilidade, o Painel Internacional para as Alterações Climáticas (IPCC) tem vindo a elaborar relatórios, sendo que já emitiu seis, sobre as alterações climáticas e as suas

consequências. Nestes relatórios foram delineados quatro cenários futuros (uns mais optimistas, outros mais pessimistas), que por sua vez, prevêem diferentes panoramas em como os Gases de Efeito de Estufa (GEE), as emissões de poluentes atmosféricos e as concentrações atmosféricas poderão evoluir no futuro. Com base nestes relatórios e cenários previstos pelo IPCC torna-se possível estudar melhor os efeitos das alterações climáticas no futuro.

1.2 Problema e objectivos

Um dos grandes problemas na mitigação dos efeitos das alterações climáticas nos edifícios históricos é o facto de não haver uma margem tão grande de intervenção, como nos edifícios mais recentes, pois levaria a que o edifício em causa perdesse valor patrimonial. Desta forma grande parte das medidas de reabilitação não podem ser consideradas ou têm que ser devidamente estudadas antes de serem aplicadas por forma que os benefícios ultrapassem as possíveis desvantagens.

Devido a esta dificuldade de reabilitar edifícios históricos comparativamente com os edifícios comuns e adicionando a enorme importância que estes têm por serem responsáveis por albergar grande parte do nosso património cultural, torna-se evidente que é necessário estudá-los detalhadamente antes de qualquer intervenção.

O presente documento tem como objectivo estudar o efeito das alterações climáticas no clima interior dos edifícios históricos, consoante a sua localização em Portugal continental.

Tendo em conta que é muito difícil prever como irá variar o clima mundial nos próximos cem anos existem vários cenários estudados que prevêem diferentes panoramas relativamente ao aumento da temperatura global, a subida do nível médio do mar, emissões anuais antropogénicas de CO₂, pH global da superfície oceânica, entre outros. Este trabalho consiste no estudo de dois cenários possíveis, sendo estes o RCP 4.5 (cenário intermediário) e o RCP 8.5 (cenário mais pessimista com elevadas emissões de GEE), e os seus efeitos na conservação do património cultural ao longo deste século.

1.3 Organização do documento

De forma a facilitar a análise deste trabalho e a consulta dos resultados obtidos, esta dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos:

- Capítulo 1: apresenta-se o contexto e motivação do tema, o problema e objectivos do trabalho, tocando nas principais variáveis e temáticas da dissertação;
- Capítulo 2: faz-se uma introdução aos principais temas do trabalho, sendo estes as alterações climáticas, os edifícios históricos, modelação higratérmica, conservação de artefactos e conforto térmico. Posteriormente surge o foco principal da revisão bibliográfica, o subcapítulo mapas, onde é feita uma introdução ao tema, depois apresenta-se um quadro resumo com os principais artigos estudados para este trabalho

que incluam mapas, e é feita uma análise das características dos mesmos. Seguidamente dois destes artigos são analisados por serem os mais representativos deste tipo de estudos e são mais explanados como casos de estudo.

- Capítulo 3: começa-se por apresentar o caso de estudo, a igreja de São Cristóvão e as suas características. Descreve-se depois toda a metodologia de construção dos mapas, desde as equações de temperatura e humidade utilizadas pelo WUFI®Plus aos ficheiros climáticos futuros e aos ficheiros da temperatura da interface solo/laje.
- Capítulo 4: inicia-se com a caracterização do clima de Portugal continental e analisam-se as principais variáveis climatológicas para certas localizações seleccionadas. Apresentam-se posteriormente, os resultados obtidos através de simulações realizadas com o WUFI®Plus, que foram traduzidos em forma de mapas, gráficos e quadros e discute-se os mesmos.
- Capítulo 5: apresentam-se as principais conclusões retiradas com este trabalho e apresentam-se possíveis desenvolvimentos futuros considerados relevantes para o estudo do tema.

EFEITOS DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS EM EDIFÍCIOS HISTÓRICOS

2.1 Alterações climáticas

Os efeitos das alterações climáticas, em todas as suas vertentes, têm vindo a preocupar cada vez mais o ser humano e, conseqüentemente, cientistas e investigadores de todo o mundo têm vindo a estudar o efeito que estas provocam. No âmbito da Engenharia Civil e em particular na conservação dos edifícios, têm vindo a ser feitos vários estudos [1–7] sobre o efeito das alterações climáticas no interior de edifícios históricos e a dificuldade que será conservar o acervo histórico dentro dos mesmos. Isto deve-se ao facto do património cultural e dos seus edifícios além de serem uma enorme lembrança dos nossos antepassados e da nossa história, são um grande e importante pilar na nossa sociedade devido a questões tanto religiosas e à adoração das suas obras sagradas, como a questões económicas ligadas ao turismo.

O crescimento sucessivo que se tem vindo a observar no turismo para além das positivas contribuições que tem para o local (e.g. económicas e para o elemento a visitar), tem também um impacto negativo em relação à conservação dos edifícios históricos e do seu acervo. A constante entrada e saída de pessoas de um edifício, e a sua permanência dentro dos mesmos, traz inevitavelmente partículas nocivas exteriores e causam libertação de calor, vapor de água e CO₂ o que faz com que haja maiores variações destes índices, o que é prejudicial para a conservação do património cultural [8].

O constante aumento da temperatura média global é também um factor alarmante e preocupante para a conservação do património cultural. A velocidade do aquecimento global aumentou nos últimos 6/7 anos, comparativamente com os dados dos últimos 50 anos (Figura 2.1). O desvio da média de 5 anos (60 meses) com a tendência linear 1970-2015 é bastante acentuado e superior aos restantes anos retractados [9].

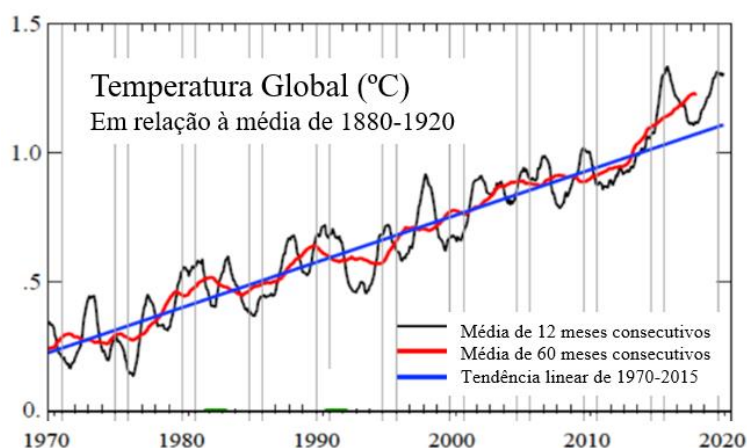


Figura 2.1 - Aumento da temperatura global (adaptado de Ref. [9])

No passado, o controlo do clima interior de edifícios, históricos ou não, mas de cariz importante para a cultura tais como museus, bibliotecas, igrejas, edifícios de grandes instituições/organizações, entre outros, estava direccionado apenas para o conforto das pessoas que os frequentavam. No entanto, vários estudos vieram comprovar que a climatização destes espaços interiores deve estar direccionada para a conservação do acervo histórico, e apenas em segundo plano (mas também é necessário contabilizar) vem o conforto dos ocupantes. [1].

As mudanças de temperatura ou da humidade absoluta traduzem alterações na humidade relativa (HR). Quando a HR aumenta, materiais higroscópicos adsorvem moléculas de vapor de água aumentando assim o seu teor de humidade [10]. Subsequentemente, estes aumentam o seu tamanho, com alterações nas três dimensões não proporcionais e criam tensões internas. Quando a HR diminui, o teor de humidade do artefacto diminui também fazendo com que este diminua de volume. Ciclos de mudança de volume são, a longo prazo, perigosos devido ao seu efeito cumulativo [11]. Até mesmo no caso de materiais não higroscópicos, o estudo do efeito cumulativo de ciclos de temperatura no envelhecimento dos materiais foi claramente provado com alterações das suas propriedades viscoelásticas na cor do revestimento das pinturas, aumentando assim a sua rigidez e a probabilidade de lascarem e partirem [12].

Torna-se assim bastante evidente em como os níveis de HR nos edifícios históricos devem ser controlados e o mais estáveis possíveis. As mudanças de humidade do dia para a noite (e vice-versa) ou entre as estações do ano contribuem para alterações constantes do tamanho e formato dos objectos, e aceleram assim a sua deterioração. No entanto, é de notar que o controlo da humidade absoluta não é suficiente para controlar os efeitos que esta terá nos vários artefactos. Por exemplo, se a humidade for 10 g/m^3 de ar e a temperatura do ar for elevada poderá acontecer que os materiais sequem demasiado, mas por outro lado, se a temperatura for muito baixa poderá eventualmente causar a condensação, que

consiste na mudança do estado gasoso para o estado líquido, não sendo nenhum destes cenários benéfico [1].

O clima interior dos edifícios históricos é geralmente bastante influenciado pelas condições meteorológicas: devido ao enorme valor que estes edifícios têm para a nossa sociedade, colocar isolamento térmico (IT) nas paredes exteriores e/ou acrescentar sistemas de controlo climático não é muitas vezes adequado. Por esta razão, espera-se que as alterações climáticas tenham um impacto significativo nas condições climatéricas interiores dos edifícios históricos. Para além do aumento das temperaturas, também a subida do nível do mar, a deslocação das zonas climáticas e o aumento da intensidade dos eventos de chuva deverão ter efeitos críticos [13]. O aumento da precipitação causa uma maior variação da humidade relativa (HR), que por sua vez pode aumentar o risco de condições microclimáticas desfavoráveis para o clima interior dos edifícios, e assim podem causar danos nos edifícios históricos e nas suas colecções [7].

No âmbito do projecto da União Europeia denominado “*Climate for Culture*”, são avaliados os efeitos das alterações climáticas no interior de edifícios históricos e o possível dano que trarão para os seus artefactos. Fazendo a combinação de modelos de simulação do clima interior dos edifícios com diferentes conjuntos de dados meteorológicos que variam no tempo e localização, é possível aprender e compreender melhor sobre os processos de degradação dos artefactos. Desta forma, o impacto das alterações climáticas pode ser avaliado e apresentado em vários mapas, do país em estudo ou até mesmo da Europa [7].

Projeções para o futuro

O Painel Internacional para as Alterações Climáticas (IPCC) é um organismo internacional que tem como principal objectivo sintetizar e divulgar o conhecimento mais avançado sobre as alterações climáticas. O IPCC foi criado em 1988 pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) e pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) para fornecer aos decisores políticos avaliações regulares com base científica das alterações climáticas, dos seus impactos e riscos futuros, e opções de adaptação e mitigação.

As avaliações do IPCC fornecem uma base científica para os governos desenvolverem políticas relacionadas com o clima, e estão subjacentes às negociações da Conferência das Nações Unidas sobre o Clima. As avaliações são relevantes em termos de política, mas não prescritivas: podem apresentar projecções de futuras alterações climáticas baseadas em diferentes cenários e nos riscos que as alterações climáticas representam e discutir as implicações das opções de resposta, mas não dizem aos decisores políticos que acções devem ser tomadas.

O IPCC tem elaborado diversos cenários que traduzem de que forma o clima poderá evoluir no futuro tendo por base diferentes pressupostos que irão principalmente reflectir na quantidade de Gases de Efeito de Estufa (GEE) emitidos para a atmosfera, nomeadamente o CO₂. Isto porque, o CO₂ é o contribuinte antropogénico dominante, uma vez que as suas fontes de emissão são os consumos de combustíveis fósseis e as alterações do uso do solo, onde o sector da construção é responsável por elevada quantidade de emissões de CO₂ [14, 15].

Desde que foi criado, o IPCC tem realizado diversos relatórios, sendo que até hoje já realizou seis. Para esta dissertação, o 5º relatório - *Fifth Assessment Report (AR5)* será o mais relevante, pois o sexto relatório é muito recente e com pouca informação à data da análise, e por isso será o único a ser explicado.

O *Fifth Assessment Report (AR5)* tem em consideração a avaliação dos cenários climáticos e socioeconómicos, das alterações climáticas e as suas implicações para o desenvolvimento sustentável. Este relatório abrange ainda o tema da alteração do nível do mar, ciclo de carbono e fenómenos climáticos (e.g. monções, El Niño) [16].

Este relatório culminou com a criação dos *Representative Concentration Pathways (RCP's)*, (do inglês, Vias Representativas de Concentração), as quais descrevem quatro formas diferentes em que os GEE e as emissões de poluentes atmosféricos, as concentrações atmosféricas e as mudanças de utilização podem evoluir no futuro, nomeadamente [16]:

- RCP 2.6 - Cenário de mitigação rigoroso onde o IPCC estabelece que as emissões de CO₂ começariam a diminuir em 2020 e chegariam a zero em 2100. Este panorama determina ainda que o aumento da temperatura global se mantém abaixo dos 2 °C;
- RCP 4.5 e RCP 6.0 - Dois cenários intermediários, os quais atingiriam os seus máximos perto de 2040 e 2080, respectivamente, e começariam depois a diminuir;
- RCP 8.5 – Cenário com emissões elevadas de GEE, onde estas emissões continuariam a aumentar até ao final deste século (XXI).

Este último cenário é claramente o panorama mais pessimista (Figura 2.2). Estes cenários foram nomeados de acordo com a sua força radiactiva total em 2100 (W/m²) [16].

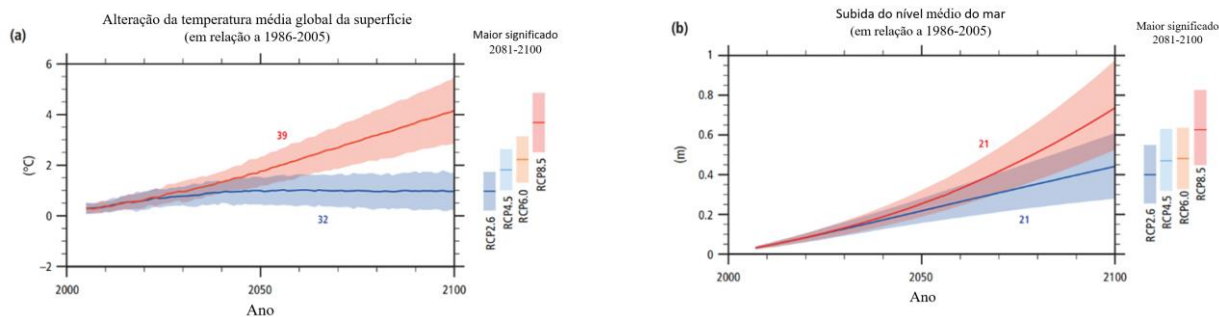


Figura 2.2 - Alteração da temperatura média global da superfície (a) e subida do nível médio do mar (b) de 2006 a 2100, em relação ao período 1986-2005 (adaptado de Ref. [16])

2.2 Edifícios históricos

Os edifícios históricos variam entre 1 e 5 % da totalidade dos edifícios, dependendo da região que se trata, e se contarmos também com os edifícios tradicionais a sua presença varia entre os 10 e os 40 % [5].

Para um edifício ser considerado histórico deverá possuir três atributos, sendo estes: idade suficiente, um nível relativamente alto de integridade e significado histórico [17].

Relativamente a “idade suficiente” muitos vezes considera-se que o edifício deve ter no mínimo cinquenta anos, mas também se pode considerar que basta o edifício ter sido já estudado por historiadores ou arqueólogos para ser considerado antigo o suficiente [17].

Para o edificado ter um nível relativamente alto de integridade significa que deve ter sofrido poucas alterações, isto é, as características que o definem têm de se manter presentes [17].

O significado histórico é a característica mais importante destes edifícios. O seu significado é definido de três formas distintas: através da sua associação directa com indivíduos, eventos ou actividades que moldaram a nossa história ou que reflectem aspectos importantes da nossa história; através também das suas características físicas que possam representar algum estilo arquitectónico ou método de construção relevante; terem a capacidade de armazenar informação importante para a compreensão do nosso passado, através da análise da sua arquitectura, arqueologia ou através de outras características físicas que trazem também significado ao edificado [17].

Estes edifícios têm muitas vezes uma geometria bastante irregular e complexa, e frequentemente uma espessa alvenaria de pedra sem qualquer tipo de isolamento térmico ou membranas para-vapor.

Existem também várias regras que se aplicam à conservação destes edifícios que obrigam a que toda a sua estética e principais características se mantenham [18].

Devido à enorme significância, até agora retractada, que estes edifícios trazem para a nossa sociedade e aos métodos construtivos utilizados antigamente, estes dificultam a tarefa de melhorar o comportamento higrotérmico dos edifícios de forma que a temperatura e a HR variem o menos possível e se mantenham aos níveis ideais consoante os materiais do acervo histórico que cada edifício.

Os métodos utilizados actualmente não são os mais apropriados, pois a integridade e estética dos edifícios seria posta em causa.

Vários estudos comprovam que o impacto energético da reabilitação é muito semelhante tanto em edifícios históricos como em edifícios recentes (não históricos), desde que as características e as soluções construtivas dos edificadas sejam semelhantes. A principal diferença é que no caso de edifícios históricos a necessidade de manter a integridade e a estética do edifício limita bastante o tipo de intervenções que podem ser feitas. Praticamente todos os estudos eliminam logo a priori a utilização de isolamento pelo exterior (ETICS) pois este iria ter um enorme impacto nas características do edificado [5]. No entanto, existem alternativas para estes casos, como o reboco térmico, cuja condutividade térmica é bastante inferior comparada com os rebocos tradicionais [19].

Adaptar os edifícios históricos às alterações climáticas é uma questão actual, do século XXI, muito complexa para a qual ainda não se chegou a uma decisão unânime e que carece ser estudada [20].

2.3 Modelação higrotérmica

Com o desenvolvimento tecnológico exponencial que temos acompanhado e conseqüentemente o crescer da capacidade computacional dos computadores fez com que nos últimos anos tenha crescido bastante o interesse em usar modelos precisos de edifícios em simulações (dinâmicas) e higrotérmicas em estudos de conservação preventiva de edifícios.

Estas simulações eram bastante usadas para determinar a eficiência energética e para otimizar o conforto térmico dos edifícios, no entanto estas simulações dinâmicas de edifícios têm vindo a tornar-se bastante eficientes e eficazes no estudo de microclimas dentro de edifícios históricos e os riscos que as alterações climáticas trarão para a conservação do património cultural [21].

Tanto a temperatura como a humidade relativa podem levar à degradação dos materiais. Principalmente a HR é a principal responsável tanto pela deterioração de artefactos, como também pela diminuição da durabilidade dos vários componentes de um edifício [21]. Por esta razão, uma

análise (através de simulações higrotérmicas) das variações da HR é extremamente necessária para o estudo da conservação de edifícios históricos e dos seus artefactos.

Simulações energéticas consistem na representação virtual e na reprodução de processos energéticos para todo um edifício ou um espaço específico, e conseguem assim ajudar os profissionais relacionados com a construção de edifícios a identificar medidas de conservação de energia relativamente óptimas [22].

Os principais factores que causam limitações na modelação climática são as imprevisibilidades da natureza, que variam consoante a região, a falta de detalhes mais rigorosos em termos de adaptação e comunicação de dados científicos, bem como a previsibilidade das alterações da temperatura do ar e da precipitação ser limitado a alguns anos [23].

2.3.1 Modelação higrotérmica de edifícios históricos

A utilização de modelos de simulação é uma ferramenta importante para a análise microclimática do património cultural, uma vez que nos permite testar possíveis intervenções passivas e/ou diferentes estratégias de controlo climático com um elevado nível de confiança [24]. Além disso, as simulações por computador são não intrusivas para os ocupantes e para o edifício, o que é bastante importante para os edifícios históricos [22].

No entanto, os modelos dos edificadros a estudar devem ser validados em relação às condições interiores do edifício para que possam simular (com resultados fidedignos) o seu comportamento higrotérmico. Modelos mal calibrados ou não calibrados assumem um peso ainda maior para edifícios históricos, uma vez que qualquer intervenção baseada em tais modelos pode levar a danos irreparáveis no edifício [25]. Quanto mais robusto for o modelo higrotérmico, mais próximos da realidade serão os resultados da simulação [24].

Embora os modelos higrotérmicos de edifícios inteiros sejam valiosos como instrumento de investigação, é bastante difícil desenvolvê-los para edifícios históricos devido à falta de informação sobre os materiais de construção, bem como às técnicas que foram utilizadas na construção do edifício, às taxas de ventilação, aos horários de ocupação e à temperatura da interface solo/laje. Na maioria das vezes, apenas a arquitectura e os materiais de superfície do edifício são conhecidos, e devido ao seu valor patrimonial é difícil realizar os testes de caracterização necessários [24].

2.3.2 WUFI®Plus

Vários softwares têm sido utilizados para desenvolver modelos computacionais de edifícios históricos para estudar o comportamento térmico ou higrotérmico de edifícios. Contudo, o WUFI®Plus é um dos softwares mais conhecidos para desenvolver estudos relativos ao comportamento

higrotérmico de edifícios, tornando-o assim uma escolha adequada para o trabalho realizado nesta dissertação.

Uma das vantagens em usar o WUFI®Plus é o facto deste programa estar constantemente a ser sujeito a actualizações [26]. Este factor é bastante relevante pois significa que o programa está sempre actual em termos de modelação.

O WUFI®Plus é de facto um poderoso software de simulação higrotérmica que tem a capacidade de determinar a temperatura e humidade relativa interiores para cada zona do modelo, tendo em consideração a transferências de calor e humidade que ocorrem através dos vários componentes, os ganhos/perdas devidos à ventilação natural e/ou mecânica e os ganhos/perdas devidos a fontes internas de calor ou humidade, ou seja, pessoas, luzes e equipamento [27].

Para que o WUFI®Plus funcione na sua capacidade total, é necessário definir os seguintes parâmetros (Figura 2.3):

- Propriedades básicas dos materiais: massa volúmica (kg/m^3), porosidade (-), calor específico (J/kg.K), condutibilidade térmica (W/m.K), e factor de resistência à difusão de vapor de água dependendo da humidade (-);
- Propriedades avançadas dos materiais: função de armazenamento de humidade, coeficiente de transporte de líquidos (m^2/s), condutibilidade térmica dependente da humidade (W/m.K) e factor de resistência à difusão de vapor de água dependendo da humidade (-), condutibilidade térmica dependente da temperatura (W/m.K) e entalpia específica de fusão (J/kg);
- Ficheiros climáticos (preferencialmente dados horários): velocidade do vento (m/s) e direcção do vento ($^\circ$), precipitação (mm), radiação global e difusa (W/m^2), temperatura do ar ($^\circ\text{C}$), humidade relativa (-) e pressão atmosférica (hPa);
- Cronograma detalhado das fontes internas: horário de ocupação do edifício, iluminação e utilização do equipamento;
- Variáveis das superfícies: resistências de transferência de calor (calculadas em função das características do vento, se necessário), absorção da radiação de onda curta, emissividade de onda longa, factor de sombreamento, ganho solar, coeficientes de transferência de vapor de água, factor adicional de resistência à difusão de vapor de água (para revestimentos de superfície, se necessário), coeficientes de chuva incidente e coeficiente de absorção de chuva (se a carga de chuva for considerada);

- Geometria e disposição das superfícies: orientação e dimensão das superfícies, volume e área do edifício, colocação de janelas e portas.

Se o caso de estudo estiver em contacto directo com o solo, também será necessário introduzir a temperatura da interface solo/laje [28].

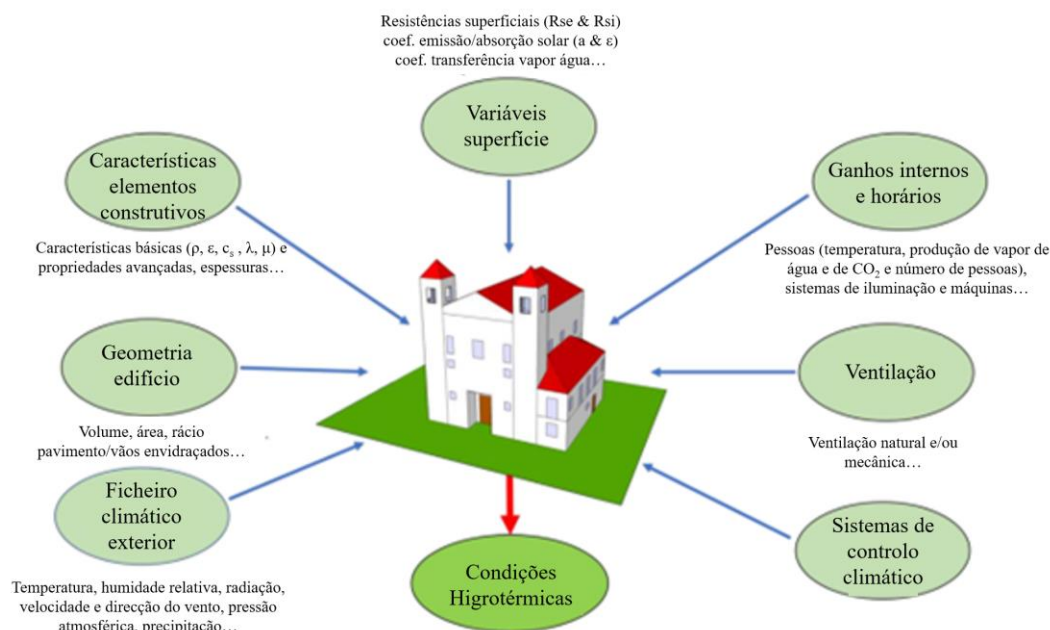


Figura 2.3 - Esboço dos parâmetros necessários (inputs) para que o WUFI®Plus funcione na sua capacidade máxima (adaptado de Ref. [27])

2.4 Conservação de artefactos

Com a era industrial começou a ser possível fazer um melhor controlo climático do interior dos edifícios, com o auxílio de sistemas de ar condicionado e controlo de humidade, onde o principal objectivo seria fazer com que houvesse menores oscilações de humidade e menor amplitude térmica [29]. No entanto, quando se tratava de edifícios que continham artefactos, por falta de evidências científicas sobre o estudo da conservação de artefactos a regularização destes parâmetros (temperatura e humidade) muitas vezes não era feito correctamente, podendo eventualmente agravar ainda mais a conservação dos artefactos [30].

Isto acontecia porque em grande parte dos casos a regularização da temperatura era feita de acordo com o conforto dos visitantes [31], enquanto os valores da HR em definidos com base em estudos desenvolvidos em museus e edifícios históricos, assumindo que a combinação de ambos iria criar ambientes adequados para a conservação, não interessando o tipo ou a localização do edifício [32].

É óbvio que a consciência deste problema levou ao aumento dos estudos focados nas necessidades dos artefactos. Com o tempo, isto resultou na criação de normas/directrizes que controlavam o clima interior com o objectivo de manter a segurança das colecções (por exemplo, *Thomson* [33], ASHRAE [2], EN 15757 [34], entre outros). Estas directrizes visam mitigar o risco de deterioração dos artefactos através da limitação da variação da temperatura interior e da humidade relativa [29].

Thomson [33] sugeriu uma directriz que cujo ponto de referência situa-se nos 20 °C e 50 % RH. Esta directriz divide ainda os edifícios em duas classes principais - classe 1, que visa mitigar os riscos de deterioração limitando as oscilações do clima interior, e é recomendada para a maioria dos museus, e a classe 2, que visa evitar grandes riscos de deterioração, mantendo os custos o mais baixo possível [33].

Outra directriz importante foi preparada pela ASHRAE [2], que se baseia na classificação dos edifícios dentro de cinco classes permitidas, no qual o rigor em termos de condições interiores diminui desde a primeira classe (classe AA) até à última classe (classe D) (Quadro 2.1). Por outras palavras, o gasto de energia para que o edifício cumpra os pontos de referência estabelecidos pela directriz diminui, mas, ao mesmo tempo, os riscos deterioração dos artefactos aumenta [2].

Quadro 2.1 - Especificações da temperatura e humidade relativa para as colecções (adaptado por *Silva* de Ref. [2])

Valor ideal	Flutuações máximas e gradientes em espaços controlados			Observações
	Classe	Flutuações de curta duração	Ciclos sazonais	
HR: 50 % (ou média anual histórica para colecções permanentes)	AA	± 5 % HR ± 2 °C	HR sem variação ± 5 °C	Sem risco de dano mecânico para a maioria dos artefactos e pinturas
	As	± 5 % HR ± 2 °C	± 10 % HR - 5 °C e +10 °C	Risco reduzido de danos mecânicos para os artefactos de alta vulnerabilidade; nenhum risco mecânico para a maioria dos artefactos e pinturas
	A	± 10 % HR ± 2 °C	HR sem variação - 5 °C e +10 °C	Risco moderado de danos mecânicos para os artefactos de alta vulnerabilidade; pequeno risco para a maioria das pinturas
	B	± 10 % HR ± 5 °C	± 10 % HR +10 °C, mas < 30 °C	Alto risco mecânico para os artefactos de alta vulnerabilidade; risco moderado para a maioria das pinturas
	C	T raramente superior 30 °C, normalmente inferior 25 °C		Alto risco de danos mecânicos imediatos ou cumulativos para a maioria dos artefactos e pinturas
T _{média, anual} : 15–25 °C	D	HR inferior 75 %		

Na Europa, a norma que trata da preservação de artefactos é a EN 15757 [34]. Esta norma visa diminuir o risco mecânico induzido pelas condições do clima interior aos materiais higroscópicos orgânicos, mantendo o clima do edifício histórico se as condições não forem prejudiciais para os objectos. Caso o clima seja prejudicial, então esta norma recomendada a exclusão de 14 % das maiores flutuações de curto prazo [35].

Mais recentemente, *Silva et al.* [36, 37] desenvolveram uma orientação de duas classes que visa mitigar o risco de deterioração de artefactos alojados em edifícios históricos para climas temperados. Esta directriz limita a variação da temperatura interior e da humidade relativa em termos de flutuações sazonais e de curto prazo com uma classe mais restrita 1, e uma classe mais flexível 2. Esta directriz foi parcialmente baseada na directriz ASHRAE [2] e na norma EN 15757 [29].

2.5 Conforto térmico

As pessoas que visitam os edifícios são cruciais para a continuidade dos edificados que exibem artefactos porque são uma importante fonte de receitas. Por esta razão, é importante que a gestão do clima interior destes edifícios tenha também em conta o conforto dos visitantes [27].

Em 1970, *Povl Ole Fanger* [38], após uma série de experiências, criou os índices de *Predicted Mean Vote* (PMV) e *Percentage People Dissatisfied* (PPD), (do inglês, Voto Médio Estimado e Percentagem Estimada de Pessoas Desconfortáveis, respectivamente), adoptando uma abordagem estatística para definir e medir, em relação às características metabólicas, o vestuário e as características termofísicas do ambiente e a apreciação subjectiva dos sentimentos sobre as condições de conforto [39].

A literatura científica tem continuado a utilizar estas duas abordagens, efectuando várias alterações às mesmas, o modelo PMV/PPD continua a ser um dos modelos de conforto térmico mais utilizado na literatura actual. Estes índices estão incluídos em várias normas internacionais relativas ao conforto térmico humano, tais como ASHRAE 55 [40] e ISO 7730 [41].

O método adaptativo do ASHRAE 55 [40] pode ter um limite de aceitação de 80 % ou de 90 % (Figura 2.4), que é utilizado apenas quando se procura um nível de conforto mais elevado. Este método é válido para edifícios apenas com ventilação natural, ou seja, sem sistemas AVAC [40].

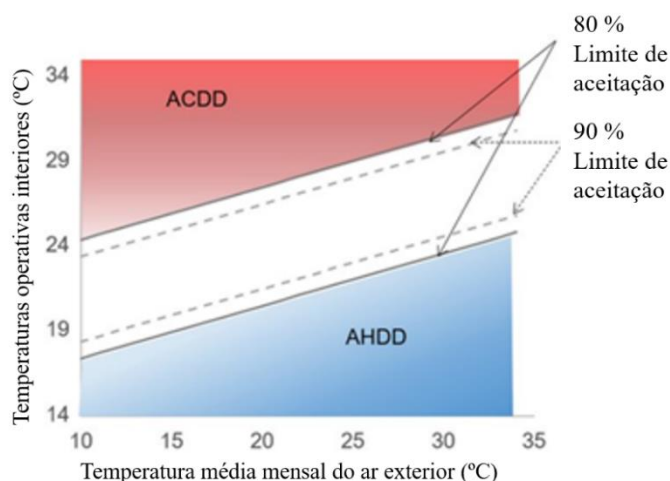


Figura 2.4 - Modelo de conforto térmico (adaptado de Ref. [40])

A Figura 2.4 representa o modelo de conforto térmico adaptativo definido no ASHRAE 55 [40]. A linha contínua representa o limite de aceitação de 80 % e a linha a picotado indica o limite de aceitação de 90 %. A Figura 2.4 representa o método adoptado para calcular *Adaptive Heating Degree Days* (AHDD) e *Adaptive Cooling Degree Days* (ACDD) (do inglês, Graus Dia de Aquecimento Adaptativo e Graus Dia de Arrefecimento Adaptativo, respectivamente). As temperaturas operativas interiores (eixo das ordenadas) que ultrapassam os limites de aceitação de 80 % (tanto para cima como para baixo) multiplicados pela duração para a qual essa temperatura dura são utilizados para calcular ACDD e AHDD, respectivamente. A duração para a qual as temperaturas operativas interiores ultrapassam o limite de 80 % de aceitação para cima (parte vermelha) exigirá um arrefecimento activo para atingir o conforto. Do mesmo modo, a duração para a qual as temperaturas operativas interiores caem abaixo do limite de 80 % de aceitação (parte azul) exigirá um aquecimento activo para alcançar o conforto.

2.6 Distribuição geográfica: mapas

Devido à degradação que se prevê de artefactos e de edifícios é necessário tomar medidas que restrinjam a produção e libertação de vários poluentes.

Para implementar medidas políticas eficazes e eficientes é necessário uma base científica sólida para a avaliação e o cálculo dos efeitos dos diferentes gases poluentes e das alterações climáticas nas diferentes regiões de cada país [42].

Neste contexto, existem dois tipos de utilizadores finais que necessitam de dados fiáveis e actualizados sobre a qualidade do ar e os seus efeitos no património. Sendo estes os vários políticos que representam um país e os proprietários ou gestores de património local [42].

A informação de que necessitam, apesar de vir da mesma fonte (monitorização da poluição, estimativa dos danos e modelação do impacto), claramente necessita de ser interpretada em diferentes escalas [42].

Com o objectivo de apresentar resultados claros e de fácil compreensão, mapas temáticos são criados pois conseguem fornecer informação muito específica sobre localizações exactas e ao mesmo tempo informação mais generalizada sobre padrões espaciais/geográficos que podem ser usados como ferramenta de comparação com outros mapas temáticos idênticos.

O mapeamento do efeito das alterações climáticas é normalmente efectuado com diferentes cenários possíveis (passado recente (PR), futuro próximo (FP) e futuro longínquo (FL)) usando tanto dados medidos para o passado recente como cenários calculados e previstos para o futuro.

2.6.1 Conjunção de estudos num quadro síntese

Pretende-se agora comparar vários estudos onde tenham sido produzidos mapas temáticos. Dos vários artigos lidos foram seleccionados apenas os mais relevantes e representativos para este trabalho (Quadro 2.2). Apesar do foco desta dissertação serem as alterações climáticas e os seus efeitos sobre a conservação dos edifícios históricos e dos seus artefactos, também foram analisados artigos que não se encontravam dentro destas características.

Primeiramente verificou-se que tipo de análises estavam a ser efectuadas nos vários estudos, sendo que estas consistem em análises energéticas, onde por exemplo se estuda a quantidade de energia poupada com um certo tipo de isolamento ou análises do conforto térmico onde o estudo das condições do interior do edifício é focado nos seus utilizadores, por exemplo estudo da temperatura e humidade relativa nos vários compartimentos de um edifício de habitação e se simula a aplicação de medidas passivas (e.g. IT ao nível das paredes e cobertura, introdução de vãos envidraçados de vidro duplo, entre outros) e medidas activas (e.g. iluminação LED e aplicação de sistemas AVAC de elevada eficiência). Por último, sendo as mais relevantes para este trabalho, as análises com foco na conservação de artefactos, sendo que para estas, muitas vezes é primeiramente realizado um estudo dos principais materiais presentes no edifício em questão e as suas características e posteriormente simula-se a degradação dos mesmos tendo em conta os efeitos das alterações climáticas.

De seguida, verificou-se a região analisada, sendo que a grande maioria dos estudos aconteceram na Europa. Dos dezasseis artigos referidos no Quadro 2.2 apenas dois não se realizam na Europa, um deles consiste no estudo do efeito das alterações climáticas numa moradia em Tóquio, Japão e o outro estuda a degradação do pergelissolo¹ devido as alterações climáticas no Canadá.

Em relação aos mapas construídos, apurou-se que programas foram utilizados para as simulações e/ou para as condições atmosféricas, a fineza da grelha de pontos, o tipo de modelo utilizado, sendo que este pode ser o edifício completo, apenas um compartimento ou um modelo simplificado e por sua vez o tipo de edifício estudado (e.g. igreja, museu, edifício de habitação), as suas características (e.g. área, volumetria, ano de construção) e as soluções construtivas. Apurou-se ainda as várias metodologias aplicadas, no entanto, dada a dimensão do Quadro 2.2 optou-se pela sua não apresentação, não obstante, estas serão descritas neste subcapítulo.

Verificou-se ainda se os estudos tinham tido em consideração as alterações climáticas ou não, e de que forma.

¹ Camada do subsolo da crosta terrestre que está permanentemente congelada.

Quadro 2.2 - Quadro resumo de estudos sobre mapeamento. Tipos de análise efectuadas: E – Energética; C.T. – Conforto Térmico; C.A. – Conservação de Artefactos
n.d. – não definido

Referências	Tipos de análise efectuadas	Região analisada	Fineza da grelha de pontos	Tipos de modelo utilizados	Programa utilizado	Têm em conta as alterações climáticas?	Edifício estudado; características; soluções construtivas
Z. Huijbregts et al. [7]	E, C.T., C.A.	Europa e norte de África	Coordenadas: 30°N – 75°N e 28°W – 45°E; 138 localizações	Compartimento (santuário de igreja)	Meteonorm – previsões meteorológicas; HAMBBase – modelação	Sim	Santuário (758 m ³) de uma igreja de Eindhoven, Holanda do séc XIX
A.W.M.J.van Schijndel et al. [43]	E	Europa e norte de África	300 localizações	Edifício	REMO – previsões meteorológicas; HAMBBase – modelação	A1B e RCP 4.5	4 edifícios históricos e museus (todos com 350 m ³); alvenaria de pedra; modelo simplificado: sala 10x10x3.5m (canto museu)
A. Sardella et al. [44]	C.A.	Europa Central	Resolução espacial de 12x12 km	n.d.	Web GIS - modelação	RCP 4.5 e 8.5; Índice R20mm	n.d.
J. Leissner et al. [45]	E	Europa e norte de África	900 localizações	Edifício e compartimento	REMO - previsões meteorológicas; HAMBBase e WUFI®Plus - modelação	A1B e RCP 4.5	Quarto no Palácio Linderhof, Capela da Santa Cruz no castelo de Karlštejn
Z. Huijbregts et al. [46]	E, C.A.	Europa e norte de África	468 localizações	Edifício, mas com foco num compartimento (o santuário)	KNMI e REMO - previsões meteorológicas; HAMBBase - modelação	A1B	Pequena igreja de Eindhoven, Holanda do séc XIX; Paredes de tijolo maciço, telhados de ardósia e vidro simples
D. de la Fuente et al. [42]	C.A.	Madrid	Resolução espacial de 500x500 m	n.d.	ArcGIS 9.2 com Spatial Analyst Extension	Sim, previsões de Noah's Ark	Calcário de Portland e bronze fundido

Quadro 2.2 (continuação) - Quadro resumo de estudos sobre mapeamento. Tipos de análise efectuadas: E – Energética; C.T. – Conforto Térmico; C.A. – Conservação de Artefactos
n.d. – não definido

Referências	Tipos de análise efectuadas	Região analisada	Fineza da grelha de pontos	Tipos de modelo utilizados	Programa utilizado	Têm em conta as alterações climáticas?	Edifício estudado; características; soluções construtivas
D. Camuffo et al. [12]	E, C.A.	4 museus (Itália, Áustria, Bélgica e Noruega)	n.d.	Compartimentos	n.d.	Não	3 edifícios históricos (Itália, Áustria, Bélgica) - alvenaria de pedra; 1 não histórico (Noruega) com design moderno (feito com vidro e metal)
D. Camuffo et al. [47]	C.T., C.A.	Alpes italianos	n.d.	Edifício	Mecânica de Fluidos Computacional (CFD)	Não	2 igrejas nos Alpes italianos, do séc. XV, alvenaria de pedra com 1m espessura
D. Camuffo et al. [48]	C.A.	Veneza, Itália	n.d.	Edifício	n.d.	Não	Edifício construído entre 1582 e 1640, inicialmente residência de governadores, posteriormente adaptado para um museu. Paredes grossas e vidros duplos
C. Sabbioni et al. [13]	C.A.	Europa e norte de África	n.d.	n.d.	n.d.	Sim, Noah's Ark	n.d.
H. Kikumoto et al. [49]	C.T.	Tóquio, Japão	n.d.	Edifício	Weather Research and Forecasting (WRF) e Model for Interdisciplinary Research on Climate (MIROC) - previsões meteorológicas; TRNSYS – simulações	Sim, prevê um aumento de 1.52 °C de 2007 (presente) para 2034 (futuro)	moradia em Tóquio

Quadro 2.2 (continuação) - Quadro resumo de estudos sobre mapeamento. Tipos de análise efectuadas: E – Energética; C.T. – Conforto Térmico; C.A. – Conservação de Artefactos
n.d. – não definido

Referências	Tipos de análise efectuadas	Região analisada	Fineza da grelha de pontos	Tipos de modelo utilizados	Programa utilizado	Têm em conta as alterações climáticas?	Edifício estudado; características; soluções construtivas
M. Moreno et al. [50]	C.A.	Espanha	12 localizações em Espanha	Edifício	Geographical Information System (GIS); Art-Risk 3.0	Sim	12 igrejas (construídas entre os séculos XI e XVI)
P. Santos et al. [51]	C.T.	moradia no centro de Portugal	n.d.	Edifício e compartimento	EnergyPlus (2010) e DesignBuilder	Sim, conta com aumento da temp. global entre 2 e 4.5 °C em 100 anos (IPCC-AR 4)	moradia com 361m ² , 3 andares, Paredes Ext.: 15 gesso cartonado, 140 MW, 11 OSB, 33 ETICS (mm)
B. Ozarisoy et al. [52]	C.T.	moradia no SE de Inglaterra (51°42'N, 0°22'W)	n.d.	Modelo simplificado	Integrated Environmental Solutions (IES); SunCast;	Não	A = 86.9m ² , B=106.7m ² ; construção leve; Valores U: Paredes Ext 0.15, laje solo 0.14, cobertura 0.09, janelas 1 (W/m ² .K)
J. Gaspari et al. [53]	C.T.	Quarteirão em Bolonha	n.d.	Edifício	ENVI-met	Não	Quarteirão com edifícios residenciais de 1950/1960
Y. Zhang et al. [54]	outras	Canadá	0.5° (latitude/ longitude)	n.d.	n.d.	Sim, com 6 General Circulation Models (GCM): CGCM, CSIRO, ECHAM, GFDL, HadCM e NCAR	n.d.

2.6.1.1 Metodologias aplicadas

Neste subcapítulo será feita uma breve descrição das várias metodologias dos estudos analisados no Quadro 2.2, sendo referidos os aspectos mais relevantes para este trabalho, quer seja por apresentarem alguma semelhança com a metodologia deste trabalho, por se destacarem num aspecto diferente ou por serem inovadores em algum aspecto.

- *Huijbregts et al.* [7] fizeram a comparação de um edifício (uma igreja localizada em Eindhoven, Holanda) para duas situações: com e sem aquecimento, determinaram as degradações biológicas, químicas e mecânicas dos materiais presentes num quadro. Fizeram ainda o mapeamento para ambas as situações do edifício (aquecido e não aquecido) de: temperatura média interior, humidade relativa média interior e previsão de crescimento de fungos, tempo de vida, risco de dano. É importante salientar que a metodologia deste estudo será analisada mais detalhadamente no subcapítulo 2.6.2;
- *Van Schijndel et al.* [43] compararam quatro diferentes níveis de soluções construtivas (desde pano simples de tijolo cerâmico a parede dupla com IT) e com quatro níveis de controlo de temperatura (desde sem qualquer controlo a intervalos de temperatura e humidade controlados), obtendo assim dezasseis tipos diferentes de modelo. Utilizaram sete indicadores: temperatura média interior; humidade relativa média interior; necessidade média de aquecimento; necessidade média de arrefecimento; necessidade média de humidificação; necessidade média de desumidificação; necessidade de energia total. Fizeram o mapeamento dos sete indicadores para os dezasseis modelos, estudo feito para: 1961–1990 (PR), 2021–2050 (FP) e 2071–2100 (FL);
- *Sardella et al.* [44] realizaram um estudo com cinco índices (dias de precipitação muito elevada, precipitação devido a dias extremamente húmidos, maior quantidade de precipitação em cinco dias consecutivos, número máximo de dias secos consecutivos e percentagem de dias extremamente quentes) e com três variáveis (temperatura máxima, temperatura mínima e precipitação). O mapeamento de toda a Europa Central, feito para FP e FL, com máximo, mínimo e média das três variáveis, feito sempre tanto para RCP 4.5 como para RCP 8.5;
- *Leissner et al.* [45] realizaram estudos dos fluxos de ar em dois quartos com os objectivos de: 1) - validar o conceito de ventilação forçada baseada no controlo do clima interior; 2) - detectar as zonas mais críticas do interior. Estudo feito para 1961–1990 (PR), 2021–2050 (FP) e 2071–2100 (FL);

- *Huijbregts et al.* [46] estudaram uma igreja localizada em Eindhoven, Holanda e começaram por mapear a temperatura média e humidade relativa interiores (em toda a Europa e norte de África), posteriormente construíram mapas com as previsões de subida de temperatura e humidade relativa médias no interior da igreja, ambas para FP e FL. Por fim, fizeram mapas com as previsões totais anuais de colonização biológica, de risco de dano para o material base dos quadros, de risco de dano para camada pictórica dos quadros e do multiplicador da vida média dos artefactos, para PR, FP e FL;
- *De la Fuente et al.* [42] realizaram simulações computacionais para 1995 e 2010 (passado) e 2025 (futuro) com objectivo de estudar a presença de SO₂, NO₂, O₃ e PM₁₀ no ar. Estudaram também a degradação do calcário de Portland e do bronze fundido (principais elementos tanto no património cultural móvel como não móvel). É importante salientar que a metodologia deste estudo será analisada mais detalhadamente no subcapítulo 2.6.2;
- *Camuffo et al.* [12] com a finalidade de fazer um diagnóstico ambiental, para monitorizar o microclima interior, a poluição do ar, a deposição e origem das partículas em suspensão e dos microrganismos fizeram então o mapeamento da temperatura, humidade relativa e absoluta no interior dos museus, tanto no Verão como no Inverno e compararam as concentrações de vários elementos medidas nos museus, tais como: Alumínio (Al), Silício (Si), Cloro (Cl), Potássio (K), Cálcio (Ca), Titânio (Ti) Manganês (Mn), Ferro (Fe), Cobre (Cu), Zinco (Zn);
- *Camuffo et al.* [47] no âmbito de um projecto Europeu denominado Friendly-Heating (do inglês, Aquecimento Amigável) com o lema “confortável para as pessoas e compatível com a conservação das obras de arte conservadas nas igrejas” realizaram um estudo de um sistema de aquecimento onde o calor vem de baixo, com o objectivo de aquecer mais os pés, pernas e mãos das pessoas (e aquecendo pouco o resto da igreja) ao invés do contrário (aquecimento vindo de cima). Realizaram o mapeamento da temperatura no tecto da igreja com ambos os sistemas e compararam os resultados;
- *Camuffo et al.* [48] com o intuito de monitorizar o microclima interior, a poluição do ar, a deposição e a origem das partículas em suspensão e microrganismos num museu em Veneza realizaram o mapeamento do interior do edifício em 2 alturas do ano (Verão e Inverno) das seguintes variáveis: Temperatura, humidade relativa, humidade absoluta. Este estudo foi também realizado com objectivo de identificar os problemas

causados pelo sistema de AVAC e os efeitos devidos à presença de tapetes. Foram ainda medidas as concentrações de vários elementos no museu;

- *Sabbioni et al.* [13] com o propósito de estudar o efeito das alterações climáticas no património cultural europeu, realizaram o mapeamento de vários factores, tais como a corrosão do aço de carbono, do bronze e do zinco, a previsão do depósito de cloretos, o risco de deterioração da madeira causado por colonização biológica, entre outros, sendo que a maioria dos mapas foram feitos para FP e FL;
- *Kikumoto et al.* [49] com a intenção de contruírem dados meteorológicos padrão futuros (2031-2035) para serem utilizados em arquitectura. Fizeram o mapeamento da temperatura e vento numa zona do Japão e por sua vez realizaram simulações energéticas para analisar o impacto das alterações climáticas no consumo de energia numa moradia típica de Tóquio (simulações realizadas para o presente (2007) e para o futuro (2034). Os resultados previram um aumento de 15 % (entre os períodos de estudo) da carga de calor sensível;
- *Moreno et al.* [50] criaram um programa (Art-Risk 3.0) inovador, que através da inteligência artificial e de um programa base (*Geographical Information System* (GIS)) determina valores para o perigo, a vulnerabilidade e para a funcionalidade de um edifício histórico., baseados em dados de geotecnia, precipitação, chuvas torrenciais, oscilações térmicas, geadas, terremotos e inundações. Os resultados obtidos destacaram a Igreja de Santiago de Jesus como o edifício mais vulnerável devido a uma falta de programas de conservação preventiva (dentro dos edifícios históricos de Espanha);
- *Santos et al.*[51] utilizaram um modelo avançado de um edifício residencial de aço leve, que foi calibrado de acordo com a norma EN 15265 e realizaram simulações sofisticadas de Mecânica de Fluidos Computacional (CFD). Este modelo calibrado foi utilizado para prever o desempenho térmico de um edifício residencial de aço leve em Portugal para cenários típicos de ocupação. O estudo remete para a preocupação da quantidade de energia utilizada pelos edifícios;
- *Ozarisoy et al.* [52] realizaram a monitorização de uma moradia durante o período mais quente do ano, estudando as variações de temperatura e humidade relativa, com o objectivo de analisar o desconforto dos utilizadores. Simulações demonstram a radiação solar nos vários elementos da habitação. O estudo foca-se no risco de

sobreaquecimento das casas no SE de Inglaterra e com os resultados obtidos determinam as causas do sobreaquecimento;

- *Gaspari et al.* [53] estudaram o microclima de uma parte da cidade de Bolonha, um quarteirão com alguns edifícios e pátios interiores, com o propósito de servir de apoio à reabilitação dos edifícios. Considera-se um estudo inovador pois teve o foco em melhorar o conforto das pessoas ao ar livre.
- *Zhang et al.* [54] estudaram a degradação do pergelissolo (camada do subsolo da crosta terrestre que está permanentemente congelada) devido às alterações climáticas e o impacto que terá na hidrologia e nos ecossistemas. Realizaram simulações da distribuição e da espessura do pergelissolo no Canadá para o passado (1990) e para o futuro (2090) segundo dois cenários (CSIROM e NCAR). De notar que este artigo não se enquadra em nenhum tipo das análises efectuadas (E, C.T. ou C.A.) pois este foca-se numa análise climática.

Analizou-se assim as metodologias utilizadas por investigadores de todo o mundo, algumas mais antigas, mas outras bastante recentes. Verificou-se ainda as diferentes causas que motivaram a realização dos estudos e os vários tipos de mapas construídos.

2.6.1.2 Diferenças entre os estudos analisados

Neste subcapítulo serão analisadas as várias colunas do Quadro 2.2, e comparados os vários estudos em relação às mesmas, destacando as diferenças e semelhanças dos mesmos. Serão ainda referidas as limitações dos estudos analisados.

Tipos de análise efectuadas

No que diz respeito ao tipo de análises efectuadas pode-se constatar que a maioria dos estudos efectuou análises com foco na Conservação de Artefactos, sendo que nove dos dezasseis estudos o fizeram (Figura 2.5). Naturalmente este tipo de análise é o mais encontrado pois é também o foco deste trabalho e por essa razão a pesquisa de estudos incidiu principalmente neste tipo de análise. De seguida, temos a análise de Conforto Térmico, com seis estudos a efectuar este tipo de análise. A análise Energética apenas cinco estudos a fizeram, e por último temos um estudo que não se enquadra em nenhuma destas análises (E., C.T., e/ou C.A.) em que *Zhang et al.* [54] realizam uma análise climática sobre a distribuição e a espessura do pergelissolo no Canadá.

De notar que existem estudos que se focaram apenas num tipo de análise, outros em dois e apenas um deles (*Huijbregts et al.* [7]) realizou os três tipos de análise (E, C.T. e C.A.). Desta forma,

em vários estudos foram contabilizadas mais do que uma análise, perfazendo assim um total de vinte e um, ao invés de dezasseis (total de estudos analisados).

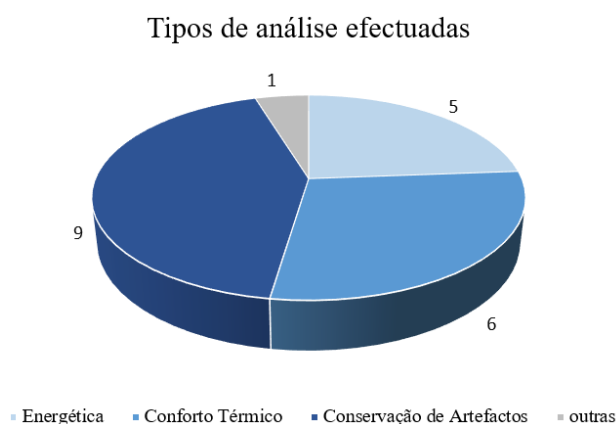


Figura 2.5 - Contagem das análises efectuadas

Região analisada

Em relação à região analisada verifica-se que a grande maioria realizou os estudos na Europa, apenas dois não o fizeram. *Kikumoto et al.* [49] realizaram o estudo sobre Tóquio, Japão e *Zhang et al.* [54] sobre o Canadá.

Tendo em conta os mapas construídos nos vários estudos presentes no Quadro 2.2 constata-se que a maioria destes retracta grandes áreas, muitas vezes toda a Europa e norte de África, outros apenas um país ou cidade. Apenas seis estudos não o fazem, três destes consistem em mapas de isolinhas de temperatura e humidade relativa realizados na planta de uma igreja, todos realizados pela equipa coordenada por *Camuffo* em [12, 47, 48]. Os restantes três representam por sua vez mapas realizados numa moradia [52], num compartimento [51] e num quarteirão [53].

Fineza da grelha de pontos

A respeito da fineza da grelha de pontos, nota-se que metade dos estudos não a referiu, algumas das vezes acontece, pois, este parâmetro pode não ser relevante. Temos os exemplos dos mapas de isolinhas construídos em plantas de igrejas pelas equipas lideradas por *Camuffo* e as simulações realizadas com Mecânica de Fluidos Computacional (CFD) onde realmente a fineza da grelha não é um parâmetro necessário para a construção dos mapas.

Verifica-se que as equipas de Eindhoven (lideradas por *Huijbregts*) realizaram dois estudos bastante semelhantes, onde analisaram o mesmo edifício e construíram mapas para os mesmos parâmetros (colonização biológica, multiplicador da vida média dos artefactos, risco de dano no material base dos quadros, risco de dano na camada pictórica dos quadros no edifício de referência). No entanto, na Ref. [7] o estudo (e os mapas) concentraram-se na comparação entre o edifício ser ou

não aquecido e as suas consequências, enquanto na Ref. [46] focou-se na diferença destes parâmetros para o FP e FL, com o PR como referência. De notar ainda que ambos os estudos realizaram mapas para a Europa e norte de África, no entanto na Ref. [46] (estudo realizado um ano depois de Ref. [7]) utiliza 468 localizações enquanto a Ref. [7] utiliza apenas 138. Conclui-se assim que os autores sentiram a necessidade que aumentar a fineza da sua grelha de pontos de forma a tornar os resultados (mapas) mais precisos e rigorosos.

Tipos de modelo utilizados

Relativamente aos tipos de modelo utilizados, dos dezasseis artigos do Quadro 2.2, metade destes utiliza edifícios inteiros como modelo, cinco usam compartimentos de um edifício e apenas um dos estudos analisados utiliza um modelo simplificado (*Ozarisoy et al.* [52]). De notar que dois dos estudos (*Santos et al.* [51] e *Leissner et al.* [45]) utilizam dois tipos de modelo, um edifício inteiro e um compartimento. Existem ainda quatro estudos em que não é definido o tipo de modelo utilizado, isto acontece pois não é estudado nenhum dos tipos de modelo (edifício, compartimento ou modelo simplificado) mas sim um material em específico (como a degradação do calcário de Portland e do bronze fundido na Ref. [42] ou a deterioração da madeira na Ref. [13]) ou as condições atmosféricas futuras (como nas Ref. [44] e [54]). De notar que, nos dois estudos onde foram utilizados dois tipos de modelo diferentes, foram contabilizados ambos os modelos, perfazendo assim um total de dezoito, ao invés de dezasseis (total de estudos analisados)(Figura 2.6).

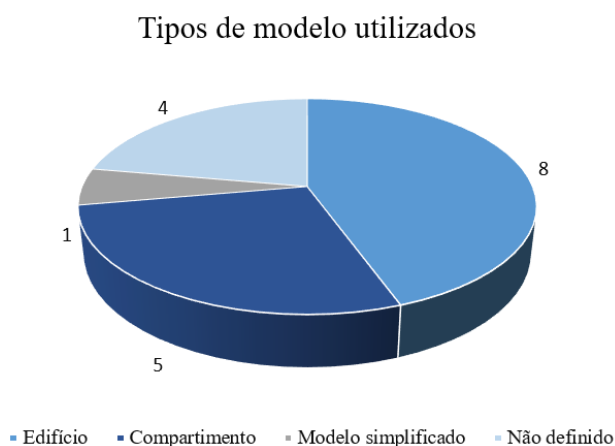


Figura 2.6 - Contagem dos modelos utilizados

Programa utilizado

Sobre os programas utilizados existe uma grande variedade, sendo que o mais utilizado para modelação foi o HAMBase (mencionado em quatro estudos) e para previsões meteorológicas foi o REMO (mencionado em três estudos). O WUFI®Plus e o EnergyPlus foram utilizados apenas uma vez

cada, por *Leissner et al.* [45] e *Santos et al.* [51]. De notar que quatro estudos não referiram os programas utilizados.

Têm em conta as alterações climáticas?

No que diz respeito às alterações climáticas, a maioria dos estudos aborda esta temática. Desta forma, os cenários mais mencionados foram o A1B e o RCP 4.5, ambos cenários intermediários, do Quarto e Quinto Relatórios de Avaliação (AR 4 e AR 5), respectivamente. Cenários estes elaborados pelo Painel Internacional para as Alterações Climáticas (IPCC), como foi explanado no subcapítulo 2.1. Os estudos que não mencionaram esta temática (um total de cinco) não fizeram previsões do clima futuro, apenas a monitorização do clima presente.

Edifício estudado; características; soluções construtivas

Quanto à última categoria analisada no Quadro 2.2, que remete para os edifícios estudados e as suas características, verifica-se que a maioria dos estudos aborda edifícios históricos. Dos dezasseis estudos analisados, nove abordam edifícios históricos, quatro remetem para edifícios de habitação e três não abordam qualquer tipo de edifício. No Quadro 2.3 podemos verificar o número de estudos que abordam cada tipo de edifício, sendo que os tipos de edifícios históricos mencionados nos estudos foram igrejas, museus e palácios.

Quadro 2.3 - Número de estudos que aborda cada tipo de edifício

Edifícios		
Históricos	Igrejas	5
	Museus	3
	Palácios	1
	n.d.	1
Habitação		4

Como era habitual durante a Idade Média e a Idade Moderna, épocas em que os edifícios históricos dos estudos analisados foram construídos (entre os séculos XI e XVII), a construção dos mesmos era feita com alvenaria de pedra com grandes espessuras, consequentemente tinham uma elevada inércia térmica, característica esta de todos os edifícios históricos analisados.

Com a descoberta de novas tecnologias de construção (e mais económicas), como o betão armado por exemplo, caiu em desuso a construção de edifícios com alvenaria de pedra. Desta forma, dos quatro edifícios de habitação referidos no Quadro 2.3, dois destes são de construção leve e os outros dois não especificam.

Limitações

Possivelmente as duas maiores semelhanças entre os vários estudos analisados será o facto de quatorze em dezasseis (87,5 %) se terem realizado na Europa e que todos os estudos que abordam edifícios históricos se passarem na Europa. Estes factores podem também ser vistos como limitações pois claramente existem edifícios históricos nos restantes continentes e seria bastante relevante saber o efeito que as alterações climáticas causariam no clima interior dos mesmos.

A omissão da fineza da grelha de pontos utilizada por metade por autores torna-se também uma limitação pois torna-se assim impossível comparar a mesma com outros estudos e os resultados poderão induzir em erro ou ser pouco precisos por ter sido utilizada uma fineza de grelha de pontos demasiado pequena.

De notar que nenhum dos estudos apresentados revelou se o processo de simulação teria sido feito de forma automatizada ou não, por essa razão não é possível assumir se foi utilizado algum processo de automatização.

2.6.2 Casos de estudo

Serão agora retractados dois casos de estudo onde foram criados mapas temáticos com diferentes objectivos de estudo.

No primeiro caso foi analisada a presença de vários gases poluentes na cidade de Madrid e foram construídos mapas para os anos de 1995, 2010 e 2025 que retractam a sua concentração nos vários pontos da cidade. De seguida, foi feito o levantamento da posição geográfica de todos os monumentos históricos da cidade de Madrid, sendo que foi feita a divisão entre objectos móveis (um total de 1621 objectos) e imóveis (um total de 260 objectos). Posteriormente foi estudada a degradação do bronze fundido e do calcário de Portland pois estes são os principais materiais presentes no património cultural de Madrid.

Este caso de estudo considerou-se bastante relevante para a presente dissertação pois aborda temas como a evolução da presença de vários gases poluentes em vários pontos de uma cidade e retracta também a degradação dos materiais mais presentes em edifícios históricos com a influência desses gases.

No segundo caso, o artigo apresenta uma previsão das condições climáticas interiores de um edifício histórico típico quando o edifício é colocado em vários locais espalhados por toda a Europa. As condições climáticas interiores são calculadas tanto para uma situação não aquecida como para uma situação aquecida. Com base nas condições climáticas interiores previstas, é avaliado o potencial de degradação biológica e química, bem como a degradação mecânica de um objecto específico da

igreja (uma pintura em tela) para cada localização. Os resultados preliminares mostram que é possível prever os danos numa grande área, utilizando simultaneamente dados climáticos regionais. Mostra também que, com base nas condições climáticas interiores previstas, não existem locais na Europa onde não se esperem danos nenhuns nos objectos estudados.

Este caso de estudo foi considerado pois tem uma abordagem bastante diferente do primeiro. Ao invés de se focar numa só cidade, o estudo foi feito para toda a Europa e os materiais estudados foram a base e a tela de um quadro (no interior de uma igreja). Tornou-se também bastante interessante pois compara sempre duas situações: o edifício com e sem aquecimento.

2.6.2.1 Gases poluentes na cidade de Madrid

No caso de *de la Fuente et al.* [42] foi estudada a presença de alguns gases poluentes (SO₂, O₃, NO₂, NO_x, PM₁₀, entre outros) em vários pontos da cidade de Madrid. Com os dados de 1995 e 2010 e com a ajuda do programa ArcGIS 9.2 foram criados mapas temáticos que ilustram a evolução destes gases na atmosfera (Figura 2.7).

Posteriormente, *de la Fuente et al.* [42] resolveram estudar a degradação do património cultural em Madrid, distinguindo-o entre móveis, como esculturas, monólitos, fontes, entre outros, e imóveis tais como museus, igrejas, entre outros.

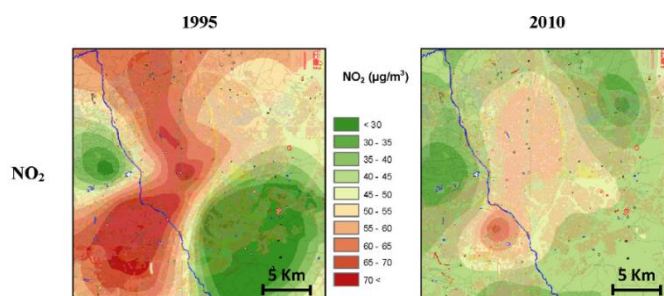


Figura 2.7 - Níveis de NO₂ em 1995 e 2010 (adaptado de Ref. [42])

Pelo facto do bronze fundido ser considerado o principal material do património cultural móvel, encontrado em 26 % (422 objectos), e a pedra calcária de Portland o principal material do património imóvel, encontrado em 47 % (122 objectos) e em 30 % (485 objectos) do património imóvel, sendo estes os materiais metálico e não metálico mais presentes na cidade de Madrid, *de la Fuente et al.* [42] decidiram estudar a sua degradação.

Foram cruzados mapas da localização dos vários objectos móveis considerados património cultural com mapas que mostram a corrosão do bronze fundido. Por sua vez cruzaram-se os mapas com a localização dos edifícios históricos com a degradação do calcário. Mais uma vez fez-se tanto para 1995 como para 2010 (Figura 2.8 e Figura 2.9).

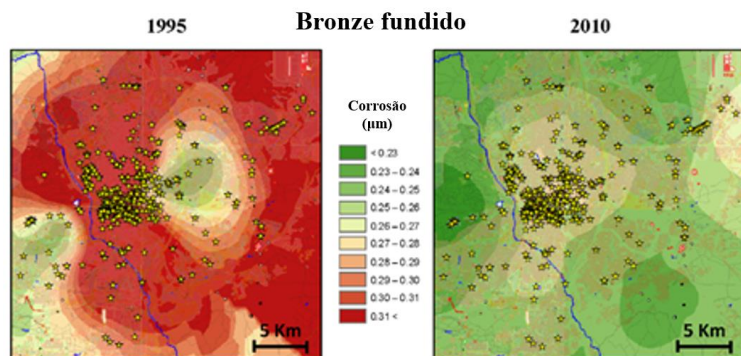


Figura 2.8 - Mapas de corrosão obtidos a partir da função dose-resposta de bronze fundido (adaptado de Ref. [42])

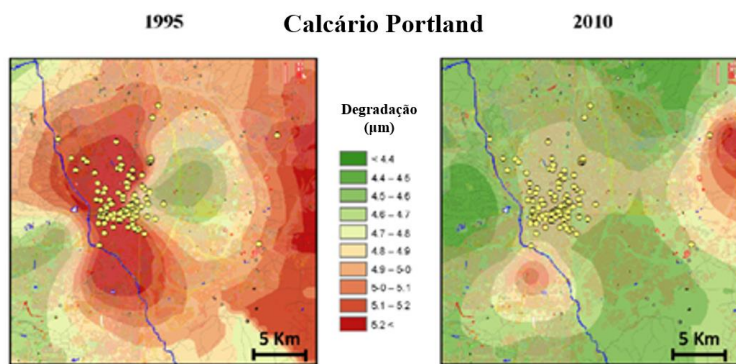


Figura 2.9 - Mapas de recesso obtidos a partir da função dose-resposta de calcário Portland (adaptado de Ref. [42])

Por último, foram construídos mapas com as previsões para 2025 para a corrosão do bronze fundido e da degradação do calcário de Portland (Figura 2.10).

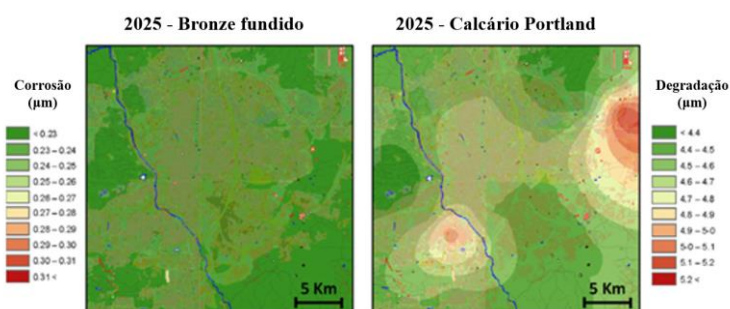


Figura 2.10 - Previsão da corrosão do bronze fundido e a degradação do calcário de Portland (adaptado de Ref. [42])

Com este estudo pôde-se concluir que a presença dos gases poluentes estudados tem vindo a diminuir ao longo dos anos (e prevê-se que continue a diminuir no futuro) e subsequentemente que a degradação do bronze fundido e do calcário de Portland desce para níveis mais seguros, apesar de terem estado sempre abaixo do limite tolerável ($0.6 \mu\text{g}$ para o bronze fundido e $0.8 \mu\text{g}$ para o calcário de Portland) [42].

No entanto, apesar destes parâmetros se encontrarem sempre abaixo do limite máximo tolerável não significa que não existe degradação. Durante as inspeções *in situ* realizadas aos monumentos com o objectivo de preparar a base de dados do património cultural, a grande maioria dos materiais encontrava-se em boas condições devido às baixas taxas de corrosão, mas também pela importância dos trabalhos de restauração/manutenção realizados, especialmente durante as últimas décadas do século XX. Apesar disso, pequenos problemas também foram detectados e, portanto, a manutenção é sempre necessária. A gestão do património a nível local é claramente complexa e pode exigir tanto intervenções activas como passivas. De qualquer modo, é evidente que toda a conservação futura e as estratégias de manutenção devem ter em conta o conceito da sustentabilidade [42].

2.6.2.2 Degradação de uma igreja e do seu património em vários pontos da Europa

Neste caso de estudo foi comparada a situação de um edifício histórico, uma igreja do séc. XIX localizada em Eindhoven, Holanda, com e sem aquecimento. O sistema de aquecimento consiste em vários radiadores espalhados pela igreja, onde a temperatura mínima do santuário (que é a principal divisão da igreja, com 758 m³) durante a semana é regulada para um mínimo de 12 °C e aos domingos das 9 horas às 13 horas para 20 °C Figura 2.11.

a)



b)

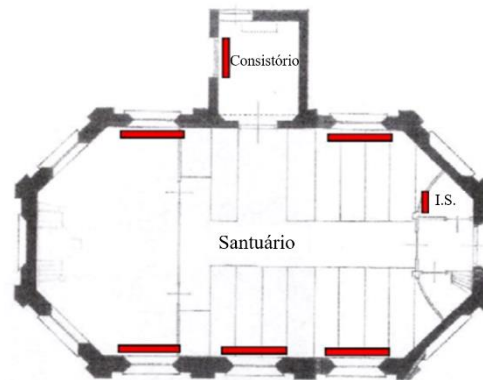


Figura 2.11 - Edifício de referência: exterior (a) e planta com localização dos radiadores (b) (adaptado de Ref. [7])

Através do programa “Meteonorm (2011)” foram obtidos os dados meteorológicos de 138 localizações espalhadas pela Europa para, com o programa “HAMBbase (2006)”, poderem-se realizar simulações higrotérmicas.

Primeiramente foram criados mapas temáticos com a temperatura média exterior e humidade relativa exterior (genérico para ambos os edifícios), temperatura média interior e humidade relativa interiores, para ambas as situações (edifício com e sem aquecimento). Depois foi possível criar um mapa com o consumo de energia anual necessário para manter a igreja nas condições de temperatura já referidas (Figura 2.12).

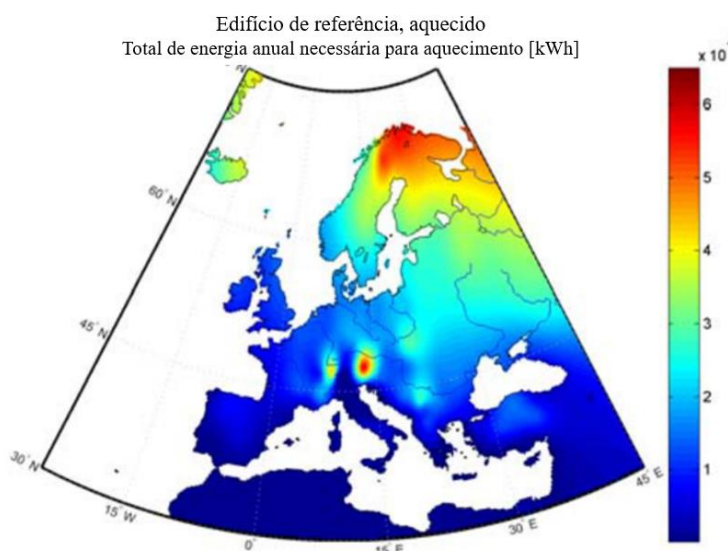


Figura 2.12 - Consumo de energia anual necessário para aquecer o santuário (adaptado de Ref. [42])

Posteriormente foram criados mapas com as previsões totais anuais de colonização biológica, de risco de dano para o material base dos quadros, de risco de dano para camada pictórica dos quadros e do multiplicador da vida média dos artefactos, LM (*Lifetime Multiplier*). Mais uma vez estes mapas foram criados tanto para o edifício com aquecimento como para o edifício sem aquecimento, para ser possível comparar os seus resultados (Figura 2.13).

Quando o edifício é aquecido, as alterações do clima interior do edifício podem causar diferentes riscos de danos. A colonização biológica é evitada na maioria dos casos, mas ainda pode ocorrer em alguns locais. A média anual do multiplicador da vida média do edifício apresenta poucas alterações. Isto pode ser explicado pois quando o edifício é aquecido a HR diminui, ambas as alterações têm efeitos opostos, o aumento da temperatura é prejudicial, ou seja, aumenta a probabilidade de crescimento de fungos, e a diminuição da HR é benéfico.

A estabilização de uma temperatura mínima faz com que a HR seja mais baixa e mais estável. No entanto, com os mapas temáticos vemos que ainda é possível haver dano na base dos quadros na maioria do território europeu.

O dano na tela dos quadros é principalmente causado por longos ciclos de HR ao longo do ano. Na situação do edifício aquecido, faz com que durante os Invernos a HR seja baixa e durante os Verões a HR seja elevada. Este facto pode trazer um risco elevado de dano na parte nordeste da Europa. Na Irlanda e na França ocidental, os riscos são reduzidos, enquanto na região central os danos continuam a ser possíveis de acontecer [7].

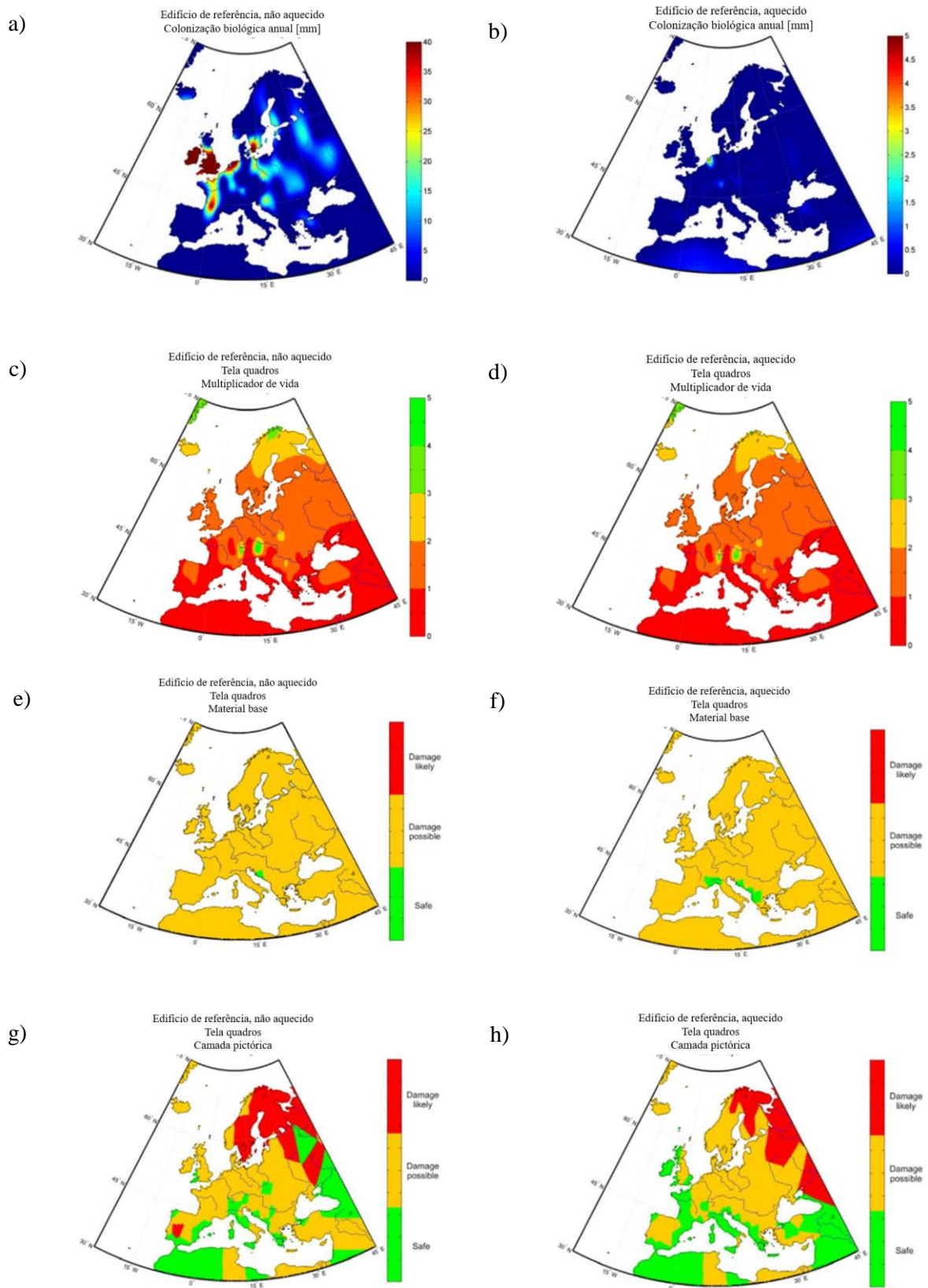


Figura 2.13 - Mapas com as várias previsões: Colonização biológica no edifício de referência - não aquecido (a) e aquecido (b); Multiplicador da vida média dos artefactos do edifício de referência - não aquecido (c) e aquecido (d); Risco de dano no material base dos quadros no edifício de referência - não aquecido (e) e aquecido (f); Risco de dano na camada pictórica dos quadros no edifício de referência - não aquecido (g) e aquecido (h); (adaptado de Ref. [7])

Podemos assim concluir que em climas frios e húmidos, o risco de degradação química é regularmente baixo, enquanto o risco de degradação mecânica é relativamente alto. Em contraste, em climas quentes e secos, o risco de degradação mecânica é regularmente baixo, mas prevê-se um risco elevado de degradação química. O aquecimento do edifício pode reduzir o risco de crescimento de fungos em alguns locais. Adicionalmente, em particular nos climas frios, o aquecimento pode aumentar o risco de degradação mecânica devido a grandes ciclos de HR. Uma comparação entre o multiplicador de tempo de vida útil médio anual na situação não aquecida e a situação aquecida sugere que o impacto do aquecimento no risco de degradação química parece relativamente pequeno em cada local [7].

3 METODOLOGIA

3.1 Modelo computacional

3.1.1 Caso de estudo

A metodologia descrita neste capítulo foi aplicada na Igreja de São Cristóvão (Lat.: 38,7 °N; Lon.: 9,1 °W), situada no Largo de São Cristóvão, na antiga freguesia de São Cristóvão e São Lourenço, actual freguesia de Santa Maria Maior, em Lisboa.

A fachada deste monumento nacional apresenta um estilo Maneirista, típico do século XVII, com um portal no centro, encimado por um nicho com a imagem de São Cristóvão [55] (Figura 3.1).

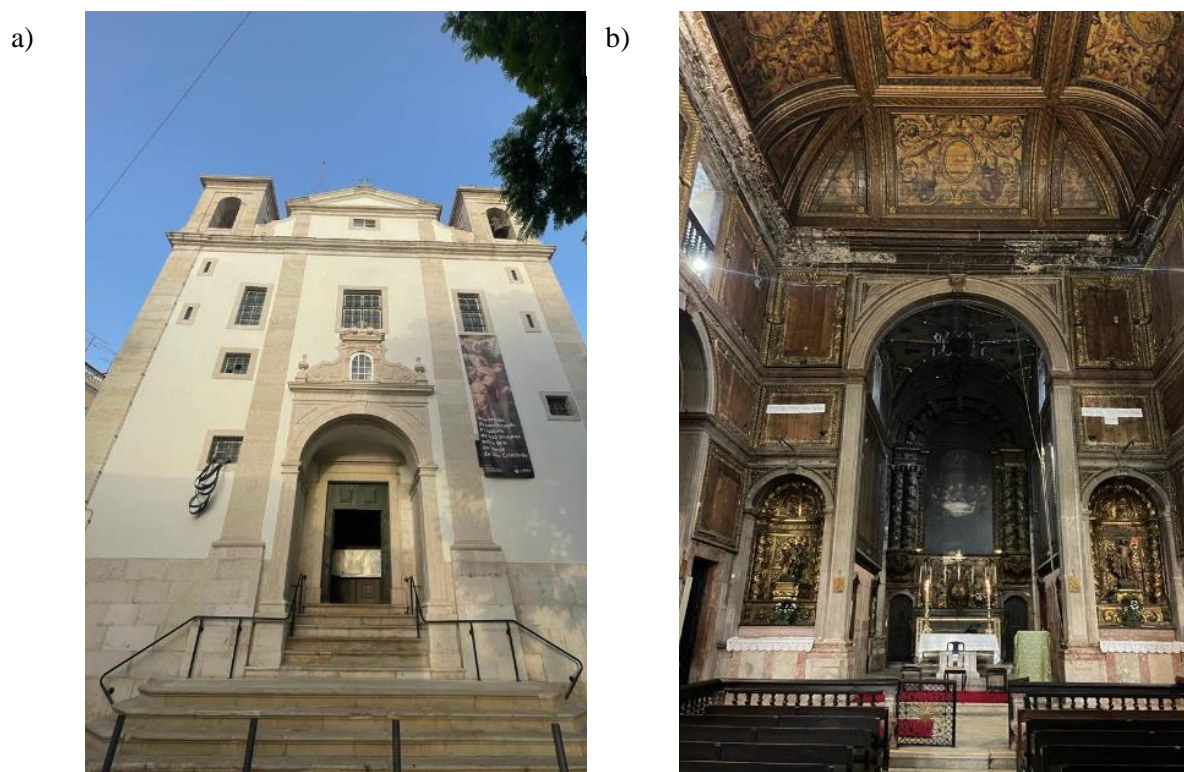


Figura 3.1 - Igreja de São Cristóvão: fachada principal (a) e sala principal (b)

A igreja foi construída no século XII, durante a ocupação árabe, em homenagem à Santa Maria de Alcamim, dando assim o seu nome à igreja. Com a reconquista cristã, a igreja passou a chamar-se

Igreja de São Cristóvão. Esta manteve a sua configuração original até ao século XVI, quando foi gravemente danificada por um incêndio, durante o reinado de D. Manuel I. Consequentemente sofreu grandes obras de restauro entre 1610 e 1672. Foi um dos poucos monumentos de Lisboa que não sofreu grandes danos com o terramoto de 1755 [56].

O monumento caracteriza-se por ter paredes com espessura entre os 0,7 e 1 m, constituídas por calcário e rebocadas com argamassa de cal no exterior, enquanto no interior as paredes estão revestidas por painéis dourados e pintados. A cobertura é inclinada e é constituída por telhas cerâmicas, por sua vez suportadas por uma estrutura de madeira [57] (Quadro 3.1).

Quadro 3.1 - Soluções construtivas e propriedades dos materiais do modelo utilizado (adaptado de Ref. [24])

Componente	Material	Espessura (m)	Condutibilidade térmica (W/m.K)	Valor U (W/m ² .K)
Paredes	Argamassa de cal	0,03	0,70	1,36
	Pedra calcária e argamassa	0,84	1,76	
	Argamassa de cal	0,03	0,70	
Tecto	Carvalho velho	0,02	0,15	1,25
	Caixa de ar	0,20	0,59	
	Carvalho velho	0,02	0,15	
Cobertura	Telha cerâmica	0,02	0,20	5,26
Portas	Carvalho velho	0,05	0,15	2,01
Laje	Pedra calcária	0,20	2,30	3,89
Janelas	Caixilharia de madeira; vidro simples			5,10

A Figura 3.2 apresenta a planta da igreja com uma nave única, capela-mor e corpos anexos de cota inferior, adossados lateralmente (sacristia e casa mortuária).

A igreja tem aproximadamente um volume de 5250 m³, e é constituída por uma sala rectangular com 144 m² e 13 m de altura, com um tecto plano. Apresenta uma sacristia ao norte da sala central (ca. 71 m²) e uma sala funerária ao sul (ca. 93 m²) e tem ainda duas torres, cada uma com 9 m². As caixilharias são de madeira com vãos envidraçadas simples, têm uma área total sensivelmente de 45 m², que quando comparados com os 800 m² das paredes exteriores, tomam uma proporção de 5,6 %. O

edifício tem apenas uma ventilação natural, uma vez que não estão disponíveis quaisquer sistemas de controlo climático [24, 37, 57].

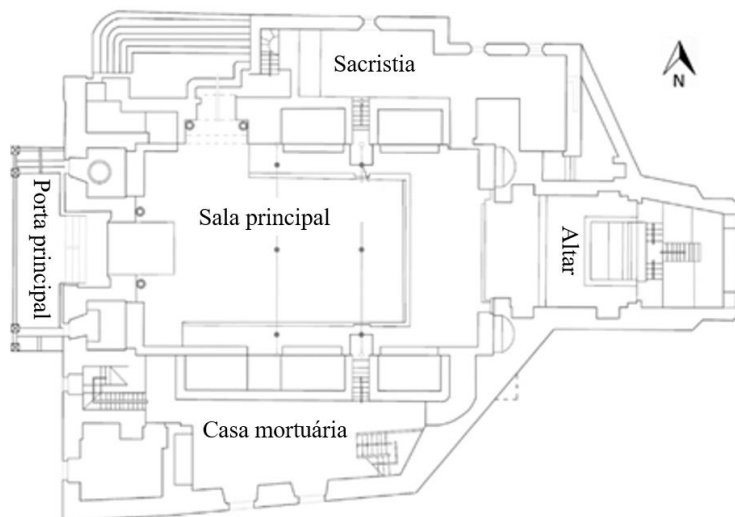


Figura 3.2 - Planta da igreja de São Cristóvão (adaptado de Ref. [37])

Com o intuito de construir um modelo higrotérmico, tornou-se necessário definir a geometria do edifício, que foi concebida no programa SketchUp e posteriormente importada para o WUFI®Plus (Figura 3.3), onde a sua construção foi baseada em plantas existentes e, quando necessário, foram feitas visitas ao edifício para a realização de levantamentos *in-situ* [24], trabalho este realizado por Coelho [27].



Figura 3.3 - Modelo desenvolvido da Igreja de São Cristóvão, no WUFI®Plus[27]

3.1.2 Equações de cálculo

Quando se utiliza o modo higrotérmico do WUFI®Plus, os dois factores mais relevantes são as equações de transferência de calor e de humidade. De notar que o software tem a possibilidade de limitar a simulação, e.g. realizando apenas simulações térmicas.

O WUFI®Plus tem a capacidade de determinar a temperatura interior e a humidade relativa em cada zona do modelo, tendo em consideração as transferências de calor e humidade que ocorrem através das suas envolventes (paredes, tectos, pavimentos, entre outros), os ganhos/perdas devidos à ventilação natural e/ou mecânica e os ganhos/perdas devidos a fontes internas de calor ou humidade, ou seja, pessoas, luzes e equipamento (Figura 3.4).

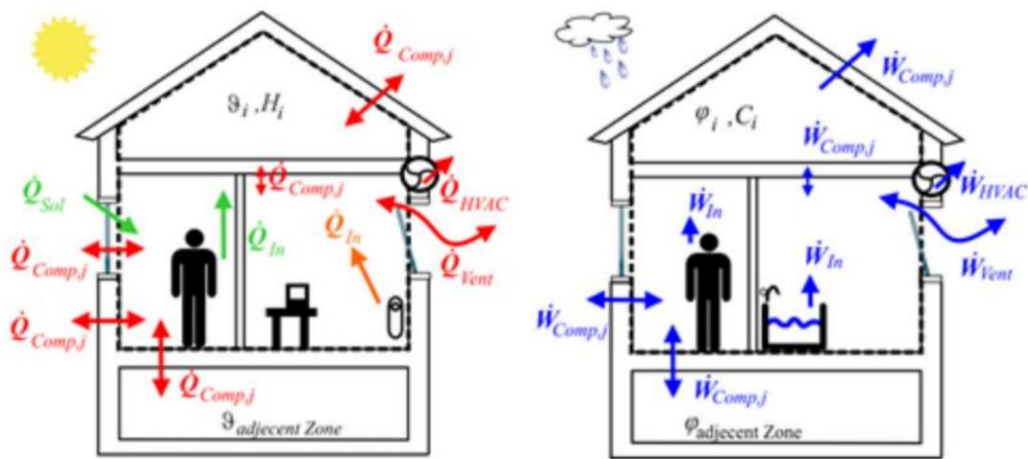


Figura 3.4 - Equilíbrio entre o fluxo de calor e humidade no interior de um edifício [58]

Para calcular a quantidade total de calor num compartimento, a equação de equilíbrio é definida como:

$$\frac{\partial H_i}{\partial t} = \sum_{j=1}^n \dot{Q}_{Comp,j} + \dot{Q}_{Sol} + \dot{Q}_{in} + \dot{Q}_{vent} + \dot{Q}_{AVAC} \quad 3.1$$

Onde H_i é a entalpia do ar na zona i (J), t representa o tempo (s), $\dot{Q}_{Comp,j}$ é a quantidade de calor transmitida da superfície interna do componente j para a zona i (W), \dot{Q}_{Sol} é a quantidade de radiação que passa através dos componentes transparentes para a zona i (W), \dot{Q}_{in} é a quantidade de calor transmitido através da convecção na zona i (W), \dot{Q}_{vent} é a quantidade de calor devido à ventilação natural (W), \dot{Q}_{AVAC} é a quantidade de calor devido à ventilação mecânica (W) [58].

O mesmo processo é utilizada para definir a equação de equilíbrio da humidade:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = \sum_{j=1}^n \dot{W}_{Comp,j} + \dot{W}_{in} + \dot{W}_{vent} + \dot{W}_{AVAC} \quad 3.2$$

Onde C_i é a quantidade de humidade no ar na zona i (kg), $\dot{W}_{Comp,j}$ é o fluxo de humidade da superfície interna do componente j para a zona i (kg/s), \dot{W}_{in} é a produção de humidade na zona i (kg/s), \dot{W}_{vent} é o fluxo de humidade devido à ventilação (kg/s) e \dot{W}_{AVAC} é o fluxo de humidade devido à ventilação mecânica (kg/s) [58].

3.2 Ficheiros climáticos futuros

Os ficheiros climáticos utilizados nas simulações computacionais desempenham um papel importante no desempenho higrotérmico das mesmas.

Para se poder obter mapas precisos utilizaram-se diferentes ficheiros climáticos para as 229 localizações, igualmente distribuídas por Portugal continental², com uma distância entre localizações de 0,2°, que corresponde a 22,2 km de distanciamento tanto longitudinalmente como latitudinalmente.

Em Portugal continental, o clima pode ser genericamente considerado temperado marítimo [10]. As projecções das futuras condições atmosféricas baseiam-se na influência de vários aspectos, tais como as condições socioeconómicas, tecnológicas, a utilização de energia e o uso do solo, bem como as emissões dos GEE. Devido à imprevisibilidade destes factores, existem vários cenários estudados, sendo estes os RCP: 2.5, 4.5, 6.0 e 8.5 W/m², sendo que este valor representa força radiactiva total em 2100, para cada um dos cenários [16].

Nesta dissertação, serão utilizados os RCP 4.5 e 8.5, sendo que o primeiro é um cenário intermédio, no que diz respeito a emissões de GEE, e o último é o cenário mais pessimista, pois não prevê políticas climáticas de redução da emissão de GEE no futuro [16].

Com o objectivo de construir os ficheiros climáticos, foram descarregadas as seguintes variáveis meteorológicas, a partir da base de dados CORDEX (*Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment*, do inglês, Experiência Coordenada de Diminuição Regional do Clima): temperatura do ar (°C), humidade relativa (%), pressão atmosférica (Pa), radiação global (W/m²), radiação contrária global (W/m²), precipitação (mm/h), índice de nuvens (%), velocidade do vento (m/s) e direcção do vento (°) [28].

Em relação à radiação global, esta foi dividida entre a directa e difusa, através do modelo *Skartveit and Olseth* [59], pois este modelo foi o que alcançou melhor desempenho de todos os

² Devido à geometria do país, nas zonas fronteiriças (Espanha e o oceano) não foram realizadas simulações em alguns dos pontos necessários porque ultrapassavam os limites de Portugal continental.

modelos utilizados para dividir a radiação global nas suas duas parcelas analisados, numa comparação feita por *Lanini* [60].

Neste trabalho, com o propósito de correr as simulações necessárias em tempo útil para atingir o objetivo do estudo, utilizou-se a metodologia descrita na norma EN 15927-4 [61], que consiste na construção de um ano (fictício) representativo de um intervalo de trinta anos (tempo que a OMM diz que é necessário para analisar alterações climáticas). Desta forma é possível poupar tempo de simulação, sendo que ao correr simulações para um ano inteiro, esse ano representa trinta anos [62].

3.2.1 Metodologia da EN 15927-4

A norma EN 15927-4 [61] descreve um método para a construção de um ano de referência com valores horários de dados meteorológicos adequados para avaliar a energia média anual para aquecimento e arrefecimento. Outros anos de referência que representem condições médias podem ser construídos para fins específicos. Esta metodologia não é adequada para a construção de anos extremos ou semi extremos.

O procedimento desta norma é descrito em duas etapas e, para construir um ano representativo é necessário o registo dos dados de pelo menos dez anos e são precisas pelo menos quatro variáveis meteorológicas desses mesmos anos, sendo que estes dados terão de estar em valores horários. São estas as variáveis:

- Temperatura (°C);
- Humidade relativa (%);
- Irradiação solar global (W/m²);
- Velocidade do vento a uma altura acima de 10 m do solo (m/s).

A primeira etapa consiste em, através de vários passos, seleccionar os meses mais representativos de toda a base de dados disponível, isto é, o mês de Janeiro mais representativo de entre todos os meses de Janeiro disponíveis para o estudo, depois o mês de Fevereiro, e por assim adiante.

Com o propósito de desacentuar a transição entre os vários meses seleccionados, a segunda etapa desta metodologia consiste em realizar uma interpolação entre as últimas oito horas do mês anterior com as primeiras oito horas do mês seguinte.

A Organização Meteorológica Mundial (OMM) considera que é necessário utilizar os dados meteorológicos de trinta anos para construir um ano representativo pois só assim se poderão analisar alterações dentro desses anos, ou seja, encontrar anos mais atípicos [62].

A título de exemplo será feita a comparação do número de horas necessárias para efectuar as simulações com e sem a metodologia da norma EN 15927-4:

- Com a metodologia da norma EN 15927-4 seriam as 8760 horas que existem em um ano, multiplicadas pelas 229 localizações de Portugal continental e pelos cinco cenários temporais (PR, FP (RCP 4.5), FP (RCP 8.5), FL (RCP 4.5) e FL (RCP 8.5)), cujo total seria de 10 030 200 horas para simular;
- Sem a metodologia da EN 15927-4 pode-se facilmente perceber que seriam as 10 030 200 horas multiplicadas pelos 30 anos, obtendo assim um total de 300 906 000 horas para simular.

Naturalmente o tempo de simulação depende bastante da capacidade dos computadores utilizados, no entanto torna-se evidente que a metodologia da EN 15927-4 é muito útil pois poupa bastante tempo de simulação.

3.2.2 Modelo Skartveit and Olseth

O modelo *Skartveit and Olseth* consiste numa metodologia que divide a radiação global nas radiações directa e difusa, este modelo foi inicialmente desenvolvido em 1986 e depois actualizado em 1998 [59]. A actualização consistiu em acrescentar um índice de variabilidade horária e um albedo de superfície regional aos parâmetros de entrada (*inputs*). Além disso, para evitar irradiações de feixe de incidência normal excessivamente elevadas em elevações solares muito baixas, o modelo não permite que uma transmissão de feixe máxima dependente da elevação solar seja excedida [59].

Existem outros modelos que abordam diferentes métodos para separar a radiação global, no entanto, o modelo *Skartveit and Olseth* já provou ser o mais eficaz, através de uma comparação efectuada por *Lanini* [60].

O estudo deste modelo foi desenvolvido na Noruega e, destacou-se ao descobrirem que a radiação difusa é originada a partir da zona celestial à volta do ângulo de zénite sobre condições meteorológicas devido a céu nublado. Consequentemente, este modelo destaca-se em relação a outro especialmente em zonas com grandes latitudes e terrenos montanhosos, que é o caso da Noruega.

Coelho [27] refez as figuras 2, 3a e 3b da Ref. [59], utilizando o código desenvolvido para a sua tese, que é o mesmo desta dissertação. Obteve assim a Figura 3.5, onde são apresentados os resultados obtidos que, quando comparados com as respectivas figuras da Ref. [59], mostram que os resultados obtidos sobrepõem-se perfeitamente aos valores apresentados na Ref. [59], validando assim o código.

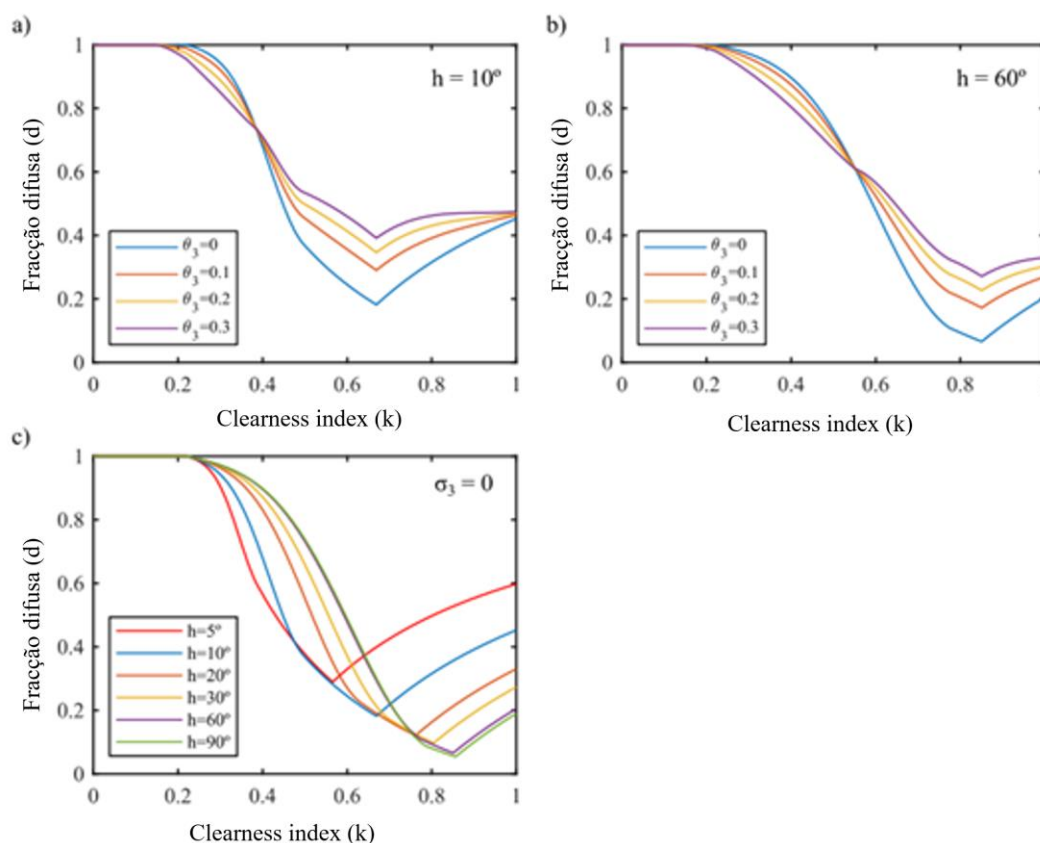


Figura 3.5 - Fracção difusa vs. *Clearness index* para quatro índices de variabilidade para elevação solar de 10° (a) e 60° (b), e fracção difusa vs. índice de claridade para seis elevações solares para horas invariáveis (c) (adaptado de Ref. [27])

3.3 Ficheiros da temperatura interface solo/laje

Os ficheiros da temperatura interface solo/laje são um parâmetro (*input*) bastante relevante e que tem bastante peso na veracidade dos resultados obtidos. No entanto, este tema é raramente mencionado nos artigos científicos que abordam a modelação térmica ou higrotérmica [23].

Todavia o WUFI®Plus não tem a capacidade de simular a temperatura desta interface, logo é necessário fazê-lo através de outro método/programa. O EnergyPlus [63] consegue determinar a temperatura da interface através de quatro métodos diferentes, sendo estes denominados de: *Kusuda-Achenbachand* [64], *Xing* [65], *Finite Difference* [66] e *Detailed Ground Heat Transfer* [67]. Na Figura 3.6 é possível verificar a comparação da precisão destes quatro métodos do EnergyPlus com outros dois métodos.

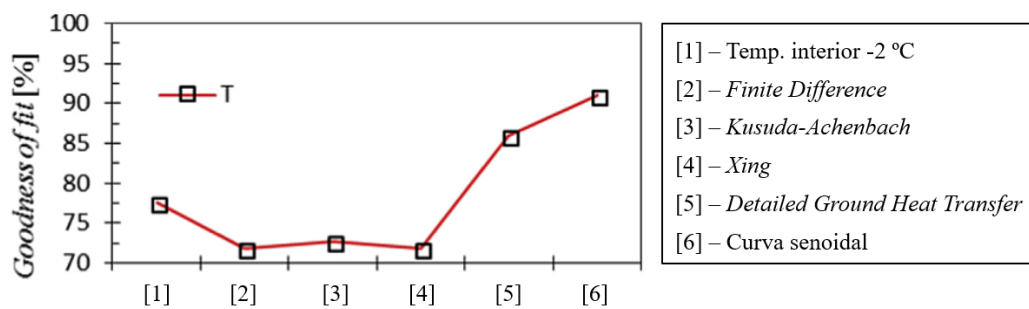


Figura 3.6 - Avaliação da precisão de cada método sobre o impacto da temperatura solo/laje(adaptado de Ref. [24])

- O método mais simples (1) consiste em subtrair 2 °C à temperatura média mensal interior [68];
- O método *Kusuda-Achenbach* [64] (3) assume que a temperatura do solo pode simplesmente ser determinada através de uma função harmónica de tempo. Este método apenas precisa da temperatura média global, a sua amplitude e do dia com a temperatura mais baixa;
- O método *Xing* [65] (4) é um método analítico simplificado que consiste em duas funções harmónicas pois precisa da temperatura média global, duas amplitudes térmicas e duas fases de elevação;
- O método *Finite Difference* (do inglês, Diferença Finita) (2) é um modelo unidimensional implícito de transferência de calor por diferença finita baseado no modelo *Xing* [65] e nos métodos numéricos de *Lee* [69] que utiliza o ficheiro climático para determinar as médias das condições limite diárias e os dados que requer são a fracção de volume de humidade do solo, a fracção de volume de humidade do solo em saturação e a cobertura de evapotranspiração do solo[66];
- O método *Detailed Ground Heat Transfer* (do inglês, Transferência Detalhada de Calor no Solo) (5) necessita da temperatura média mensal interior durante os doze meses de um ano, da relação área/perímetro da laje e da espessura da laje [67]. Uma desvantagem deste método é o facto de exigir a temperatura média interior para cada mês do ano.
- A curva senoidal (6) determina a temperatura da interface solo/laje, utilizando a temperatura média anual e a sua amplitude, bem como o dia com a temperatura mais alta. A escolha desta opção oferece melhores resultados, uma vez que podem ser ajustados ao caso real. No entanto, uma vez que o modelo está adaptado a estas

condições, não pode ser aplicado a outras condições exteriores. Como resultado, esta opção é restritiva, uma vez que não pode ser utilizada em condições diferentes ou em outras situações [27].

Pelas condições descritas acima de cada um dos métodos e com as percentagens de acerto indicadas na Figura 3.6, *Coelho et al.* [23] chegaram à conclusão de que o método *Detailed Ground Heat Transfer* (5) seria o mais indicado para determinar a temperatura da interface solo/laje. Não seria viável utilizar o método com melhor precisão (a curva senoidal) pois este não é viável quando se pretende simular diferentes condições climáticas.

Na Figura 3.7 é possível verificar as diferenças dos vários modelos analisados e comparar as variações das temperaturas da interface solo/laje ao longo de um ano.

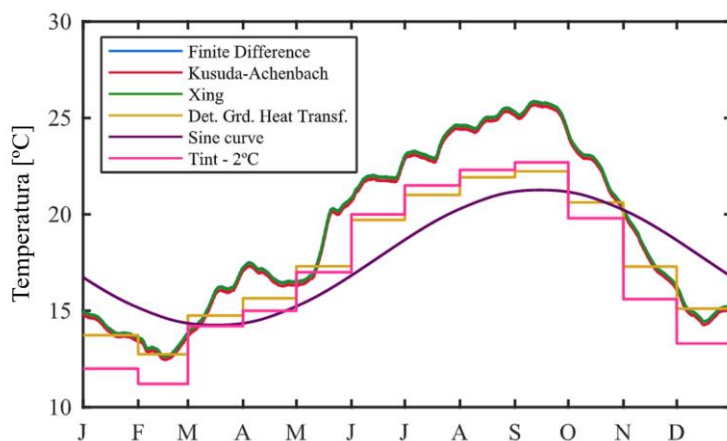


Figura 3.7 - Variação anual da temperatura interface solo/laje determinada através de seis métodos diferentes (adaptado de [27])

3.4 Metodologia da construção de mapas

No presente subcapítulo pretende-se apresentar a metodologia da construção dos mapas, sendo que os principais conceitos e *inputs* já foram explicados anteriormente.

Como representado simbolicamente na Figura 3.8, encontra-se um retângulo azul com vários segmentos de recta, verticais e horizontais, e com pequenos círculos vermelhos nas suas intersecções que representam a grelha de pontos utilizada sobreposta no mapa de Portugal continental, sendo que existem 229 pontos/localizações, com igual distância entre cada um, ou seja, 0,2° (que correspondem a 22,2 km) de distanciamento tanto longitudinalmente como latitudinalmente.

O intuito deste trabalho consiste em transformar este retângulo simbólico num mapa representativo, que irá dar informações sobre, por exemplo, a temperatura e humidade relativa interiores, não só nas 229 localizações da grelha de pontos, mas sim em todo o mapa de Portugal continental.

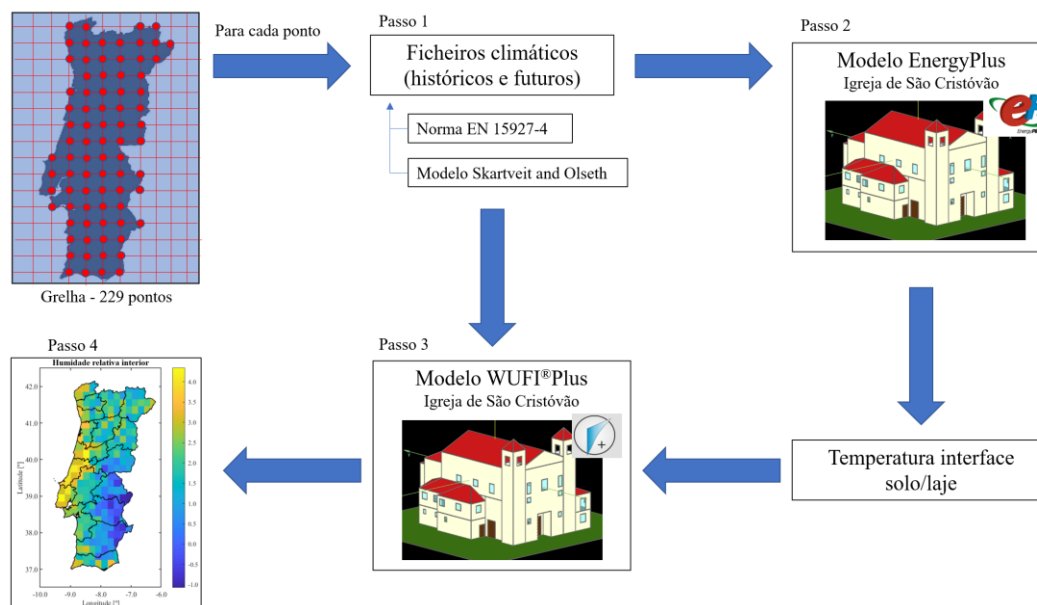


Figura 3.8 - Esboço representativo da construção de mapas

O passo 1 consiste em, para cada uma das simulações realizadas, obter previamente um ficheiro climático com vários dados meteorológicos (como a temperatura, humidade, precipitação, entre outros) para cada hora do ano a ser simulado, ou seja, cada ficheiro climático tem informações sobre as 8760 horas do ano. Estes dados meteorológicos foram obtidos através da base de dados do CORDEX [70]. A norma EN 15927-4 entra neste passo de forma a obter os ficheiros climáticos de um ano que seja representativo de trinta anos. O modelo Skartveit and Olseth é também necessário nesta fase para dividir a radiação global nas radiações directa e difusa, pois o WUFI®Plus precisa destas duas parcelas separadas.

Por sua vez, o modelo da igreja de São Cristóvão é inserido no EnergyPlus e procede-se a uma simulação térmica (passo 2) com a finalidade de obter o ficheiro com a temperatura da interface solo/laje, conseguido através do método *Detailed Ground Heat Transfer*, do EnergyPlus, como explicado no subcapítulo 3.3. À semelhança do ficheiro climático, os ficheiros com a temperatura da interface solo/laje terão também dados para as 8760 horas do ano a simular.

Seguidamente, no passo 3, o modelo da igreja de São Cristóvão é inserido no WUFI®Plus, de forma a realizar uma simulação higrotérmica. Naturalmente são necessários todos os parâmetros descritos no subcapítulo 2.3.2, tais como as propriedades (básicas e avançadas) dos materiais, as variáveis das superfícies, entre outros. De forma simplificada, cada simulação consiste em colocar o modelo do edifício em estudo (a igreja de São Cristóvão) em cada uma das 229 localizações da grelha de pontos, submeter o ficheiro climático e o ficheiro da temperatura da interface solo/laje correspondentes ao ano e cenário que se pretende simular e simular as 8760 horas do ano em questão.

Com os resultados obtidos da simulação higrotérmica, pode-se finalmente construir os mapas (passo 4). Devido à grande variedade de parâmetros obtidos nas simulações higrotérmicas, existe uma grande variedade na escolha de mapas a construir. Decidiu-se, no entanto, construir mapas para a temperatura e humidade relativa interiores pois estes são os dois factores mais relevantes no que diz respeito à conservação de artefactos.

Para cada localização da grelha de pontos foram feitas cinco simulações, uma no PR (que representa os anos de 1970 a 1999), duas no FP (que representam os anos de 2020 a 2050) e outras duas para o FL (que representam os anos de 2070 a 2100), sendo que para cada tempo futuro (FP e FL) foram feitas simulações para dois cenários possíveis, um deles intermédio (RCP 4.5) e outro mais pessimista (RCP 8.5), como se encontra representado na Figura 3.9.

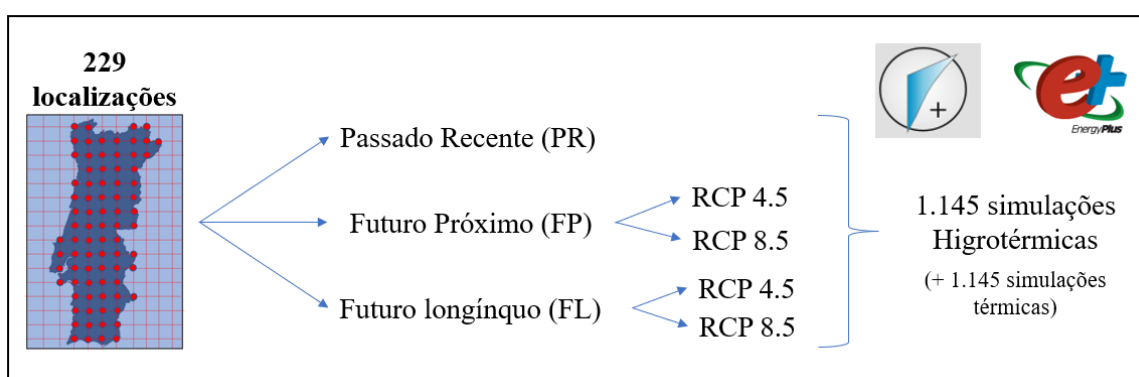


Figura 3.9 - Representação das diferentes simulações efectuadas

Naturalmente o tempo necessário para simular as 8760 horas depende bastante da capacidade computacional dos computadores utilizados. Tendo em conta que foram utilizados os computadores do laboratório 3.14 do Departamento de Engenharia Civil (DEC), com as seguintes características: CPU Intel(R) Core (TM) i5-650 a 3,20 GHz, com 4 GB de RAM e um sistema operativo de 64 bits, as 8760 horas (1 ano) demoram cerca de 3 horas a simular. Sabendo que é necessário simular os cinco cenários possíveis nas 229 localizações da grelha, o que corresponde a 1 145 simulações e, que cada simulação demora no mínimo 3 horas, obtém-se um total de cerca de 3 435 horas (mais de 143 dias). No entanto, com o objectivo de tornar possível efectuar todas as simulações dentro do tempo disponível, utilizou-se os vinte computadores do laboratório 3.14 do DEC.

De notar que, para simplificar o trabalho de preparação das simulações utilizou-se um algoritmo desenvolvido em MATLAB por *Coelho* [27], de forma a automatizar o processo de preparação das simulações. Processo este, considerado inovador comparado com os estudos analisados no Quadro 2.2 resumo (vd. subcapítulo 2.6.1), visto que nenhum dos estudos analisados referiu ter utilizado algo semelhante.

Diferenças/limitações

Comparando a metodologia do presente trabalho com os estudos analisados no Quadro 2.2, este trabalho destaca-se pela fineza da grelha de pontos utilizada, pois quanto maior a fineza mais precisos serão os resultados. Apesar dos mapas terem sido construídos apenas para Portugal continental, ao invés de toda a Europa e norte de África (como acontece em vários estudos analisados) a fineza da grelha é bastante maior neste trabalho, sendo que foi utilizada uma grelha de pontos com 229 localizações, com um distanciamento entre pontos de 0,2° (longitudinalmente e latitudinalmente) que corresponde a uma distância de 22,2 km. As grelhas mais finas analisadas foram as de *Leissner et al.* [45] com 900 localizações em toda a Europa e norte de África e de *Zhang et al.* [54] com um distanciamento entre pontos de 0,5° (longitudinalmente e latitudinalmente) em todo o Canadá. A única grelha com uma fineza superior à do presente trabalho foi o caso de *de la Fuente et al.* [42] onde utilizaram uma resolução espacial de 500 x 500 m, no entanto os seus mapas foram construídos apenas para a cidade de Madrid.

Quanto aos programas utilizados, foi utilizado o CORDEX para obtenção das variáveis meteorológicas, o EnergyPlus para determinar a temperatura da interface solo/laje e por fim o WUFI®Plus para realizar as simulações higrotérmicas. Nenhum dos estudos referiu ter utilizado a base de dados CORDEX, no entanto, o WUFI®Plus e o EnergyPlus foram mencionados.

Relativamente às restantes categorias analisadas no Quadro 2.2, o presente trabalho segue um raciocínio semelhante à maioria dos estudos analisados. Em relação ao tipo de análise efectuada, o tipo de modelo utilizado, e o edifício estudado, o presente trabalho realizou uma análise de Conservação de Artefactos (C.A.) e utilizou como modelo um edifício inteiro, sendo este um edifício histórico, uma igreja, tal como maioria dos estudos analisados.

No que diz respeito às alterações climáticas, naturalmente este trabalho aborda o tema (como a maioria dos estudos analisados), e foram realizadas simulações para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, sendo que o RCP 4.5 foi o cenário mais referido dos estudos analisados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Clima de Portugal continental

O clima de Portugal pode variar bastante consoante a localização geográfica que se analisa, no entanto, o clima de Portugal pode ser genericamente considerado temperado marítimo [10].

Na Figura 4.1 pode-se constatar que a temperatura do ar de Portugal pode variar drasticamente de acordo com a localização, por exemplo na zona do interior norte e centro (eg. na zona da Serra da Estrela) verifica-se uma temperatura média anual por volta dos 7 °C, enquanto em várias zonas do interior do Baixo Alentejo ronda os 18 °C.

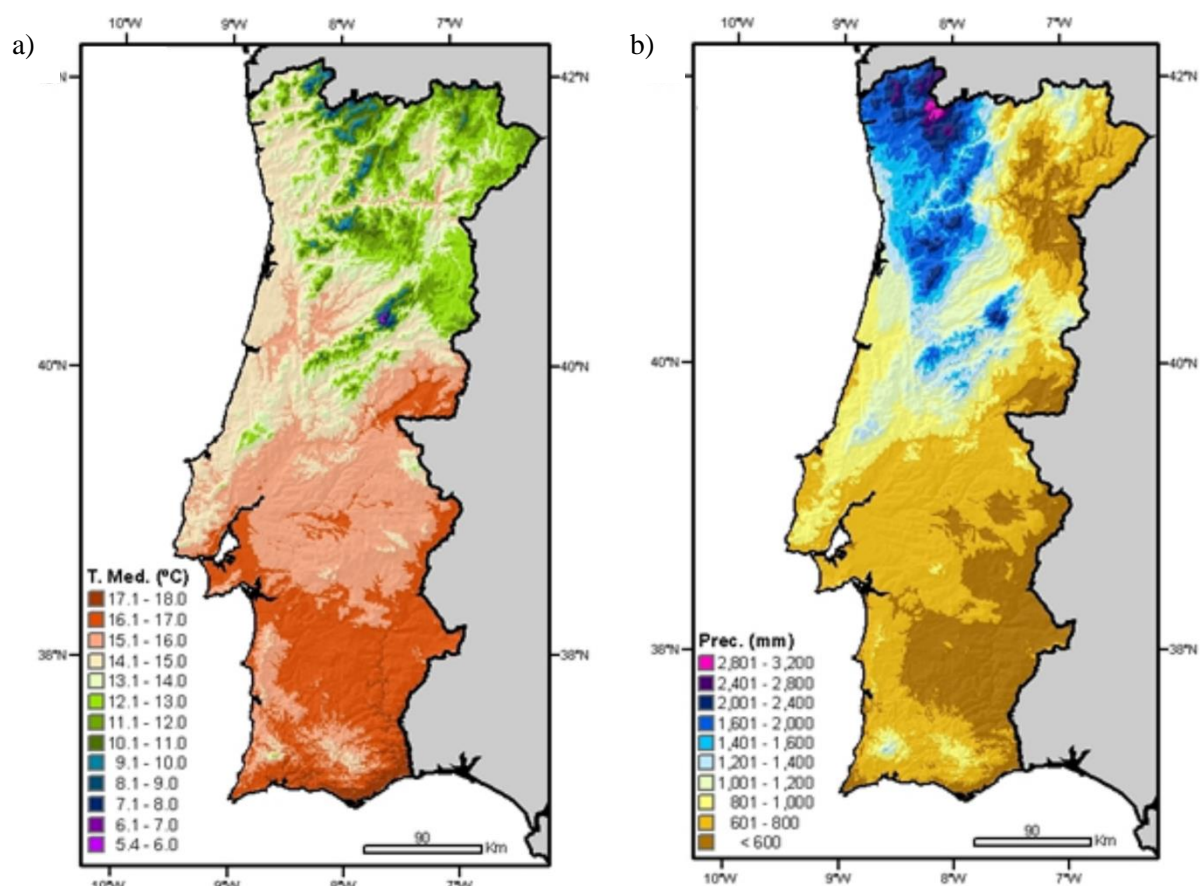


Figura 4.1 - Clima de Portugal continental: temperatura média anual (a) e precipitação acumulada anual (b) (adaptado de Ref. [71])

Relativamente à precipitação, esta também varia bastante consoante a localização, atingindo os valores mais altos no Minho e Douro Litoral e os valores mais baixos no interior do Baixo Alentejo [71].

Os mapas da Figura 4.1 foram construídos com base nas normais de 1961-1990 [71]. Segundo a Organização Meteorológica Mundial (OMM), o valor normal de um elemento climático corresponde ao valor médio correspondente a um número de anos suficientemente extenso para se poder considerar que este representa o valor predominante daquele elemento climático da localização geográfica analisada [72]. De acordo com a OMM, foi estipulado um período de trinta anos para as normais climatológicas e que estas começam sempre no primeiro ano de cada década, sendo que as normais de referência são: 1901-1930, 1931-1960, 1961-1990, e seguintes períodos. No entanto, também é possível calcular as normais climatológicas para os períodos intercalares, por exemplo 1941-1970 ou 1981-2010 [72].

A primeira classificação quantitativa dos climas terrestres foi apresentada pelo cientista alemão *Wladimir Köppen* em 1900 [73], tendo sido apresentada como um mapa do mundo, que foi actualizado em 1954 e 1961 por *Rudolf Geiger* [74]. A classificação de *Köppen* divide o clima terrestre em cinco grupos: A - Clima tropical; B - Clima árido; C - Clima temperado; D - Clima continental e E - Clima polar (vd. Anexo A).

Esta classificação é baseada nas temperaturas de cada região, com excepção do clima árido que é definido com base na precipitação e evapotranspiração da região. Cada um destes cinco grupos divide-se em subclimas, de acordo com a precipitação de cada região, e por sua vez este subclima volta a dividir-se numa outra categoria, novamente determinada através das temperaturas [74].

Na Figura 4.2 pode-se analisar o clima de Portugal continental, segundo a classificação de *Köppen*. Esta classificação dividiu o país entre três climas:

- Clima temperado com Verão quente e seco (Csa) nas regiões interiores do vale do Douro (parte do distrito de Bragança), assim como nas regiões a sul do sistema montanhoso Montejunto-Estrela (excepto no litoral oeste do Alentejo e Algarve);
- Clima temperado com Verão seco e suave (Csb) em quase todas as regiões a Norte do sistema montanhoso Montejunto-Estrela e nas regiões do litoral oeste do Alentejo e Algarve;
- Clima árido de estepe fria (BSk) numa pequena região do Baixo Alentejo, no distrito de Beja.

De notar que a região com o clima árido de estepe fria (BSk) surgiu apenas com a normal de 1971-2000, na normal anterior (1961-1990) a classificação de *Köppen* dividia Portugal continental em

apenas dois climas, o clima temperado com Verão quente e seco (Csa) e o clima temperado com Verão seco e suave (Csb) [71, 72]. Esta mudança revela que o nosso país se tornou mais quente, possivelmente uma consequência das alterações climáticas.

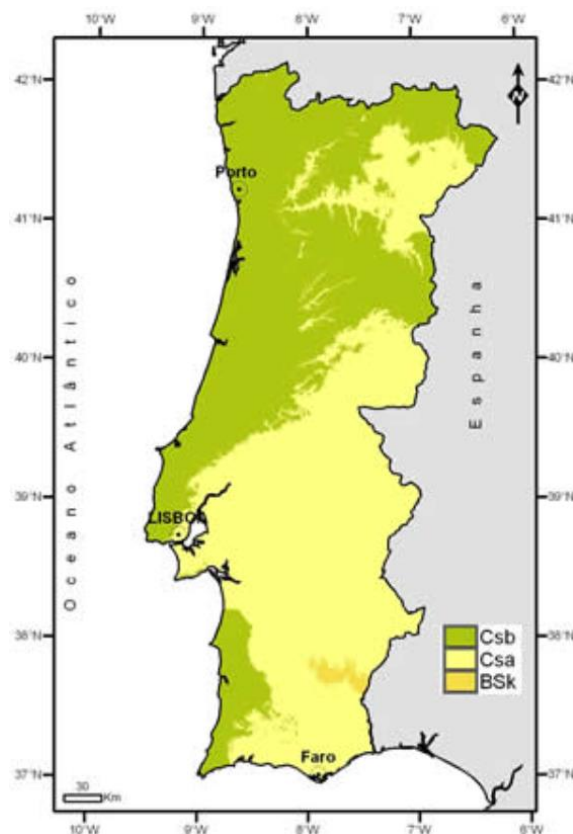


Figura 4.2 - Clima de Portugal continental, segundo a classificação de Köppen (adaptado de Ref. [71])

4.2 Localizações seleccionadas

De forma a facilitar a análise e comparação de resultados, foram seleccionadas seis localizações (Figura 4.3), com climas bastante diferentes e utilizadas também por *Henriques* [10] para caracterizar o clima de Portugal, sendo que três destas se encontram no litoral:

- Porto (Lat.: 41,3 °N; Lon.: 08,6 °W; Alt.: 94 m);
- Lisboa (Lat.: 38,9 °N; Lon.: 09,2 °W; Alt.: 109 m);
- Faro (Lat.: 37,3 °N; Lon.: 08,0 °W; Alt.: 145 m).

E as restantes três encontram-se no interior:

- Bragança (Lat.: 41,6 °N; Lon.: 07,1 °W; Alt.: 680 m);
- Portalegre (Lat.: 39,1 °N; Lon.: 07,6 °W; Alt.: 246 m);

- Beja (Lat.: 37,9 °N; Lon.: 07,9 °W; Alt.: 178 m).

Para analisar as seis estações meteorológicas decidiu-se agrupá-las em pares para facilitar a comparação e verificar padrões existentes entre as localizações do litoral e do interior. Para tal comparou-se uma localização do litoral com uma localização do interior com as latitudes mais semelhantes, ou seja, agrupou-se Porto com Bragança, Lisboa com Portalegre e Faro com Beja.

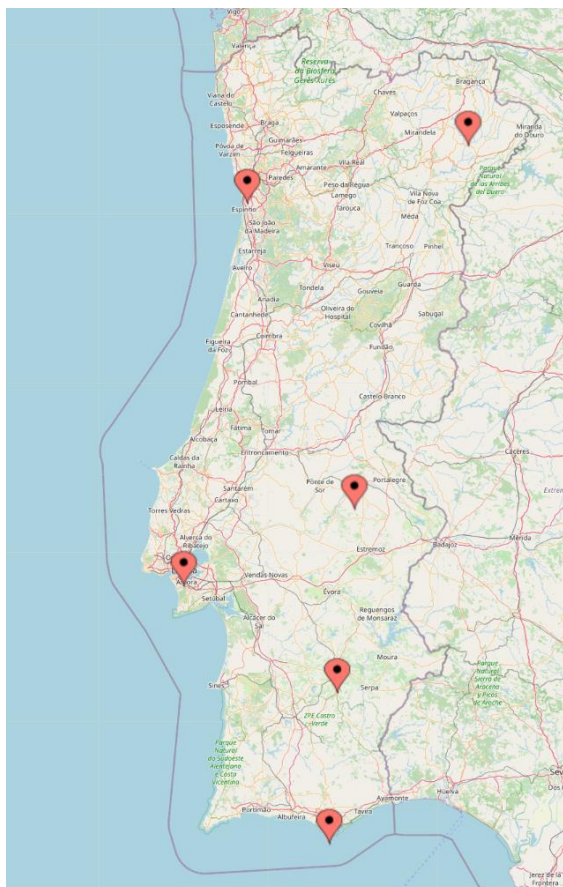


Figura 4.3 - Localização das estações meteorológicas seleccionadas

Decidiu-se analisar as seguintes variáveis: 1) temperaturas médias, mínimas e máximas (Figura 4.4), 2) humidade relativa (Figura 4.5), 3) irradiação solar global (Figura 4.6) e a 4) precipitação (Figura 4.7). Para as temperaturas, humidade relativa e irradiação solar global recorreu-se a um Excel desenvolvido pela Direcção Geral de Energia e Geologia (DGEG) [75], cujos dados foram facultados pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera, Instituto Público (IPMA, I.P.). O IPMA, I.P. através dos dados horários das variáveis referidas da normal climatológica de 1971-2000, criou um ano representativo desse período (vd. Anexo B). Para os dados referentes à precipitação recorreu-se directamente à normal climatológica de 1971-2000 disponível pelo IPMA, I.P..

De notar que nos gráficos das Figura 4.4, Figura 4.5, Figura 4.6 e Figura 4.7 as estações meteorológicas encontram-se apresentadas por ordem decrescente de latitude, ou seja, a primeira

figura é sempre do Porto vs. Bragança, a segunda de Lisboa vs. Portalegre e a última figura é de Faro vs. Beja, com as estações do litoral representadas pela cor azul e as do interior pela cor verde.

4.2.1 Temperatura

A Figura 4.4 representa as médias das temperaturas mensais médias, máximas e mínimas para as seis estações meteorológicas, analisadas aos pares referidos anteriormente. As curvas a traço contínuo, representam as temperaturas médias mensais, e as barras verticais representam as médias das temperaturas máximas e mínimas para cada mês. No Quadro 4.1 são apresentados os diferenciais entre os valores máximos e mínimos das temperaturas máximas, médias e mínimas mensais (vd. Anexo B).

Relativamente à temperatura média verifica-se que Bragança e Beja destacam-se com os valores mínimos e máximos, respectivamente, Bragança com uma temperatura média de 5,5 °C em Janeiro e Beja com 26,1 em Julho. Comparando as localizações do litoral com os respectivos pares do interior verifica-se que as estações meteorológicas do litoral registam sempre temperaturas médias mais baixas nos meses mais quentes do ano e temperaturas médias mais altas nos meses mais frios, o caso que mais se destaca é o de Lisboa e Portalegre onde as temperaturas médias de Lisboa são inferiores de Maio a Setembro e superiores de Novembro a Março (em Abril e Outubro as temperaturas médias são bastante semelhantes em ambas as localizações). Em relação às médias das temperaturas mínimas e máximas verifica-se a mesma situação, geralmente as estações do litoral registam temperaturas máximas mais baixas e mínimas mais altas na estação de arrefecimento e temperaturas máximas e mínimas mais altas na estação de aquecimento, quando comparadas com as respectivas estações do interior. Pode-se ainda constatar, tanto através da Figura 4.4 como do Quadro 4.1, que as localizações do interior têm sempre maiores amplitudes térmicas quando comparadas com as localizações do litoral respectivas. Analisando o Quadro 4.1 de forma genérica, verifica-se que Bragança é o local com maiores amplitudes térmicas e o Porto com as menores.

Os padrões referidos podem ser justificados devido ao efeito que o oceano Atlântico tem sobre a temperatura das zonas costeiras. Designados como os fenómenos da maritimidade e continentalidade relacionam a distância de um certo local a grandes quantidades de água (como os oceanos ou mares) com a interferência que esta terá sobre a temperatura das diferentes regiões [76]. As grandes massas de água têm a capacidade de reter o calor por mais tempo (do que o solo), absorvendo o calor durante o dia (diminuindo assim as temperaturas máximas das zonas costeiras durante o Verão) e liberta-o durante a noite (aumentando assim as temperaturas mínimas das zonas costeiras durante o Verão), e fazendo o oposto no Inverno, diminui assim as amplitudes térmicas das zonas costeiras [76].

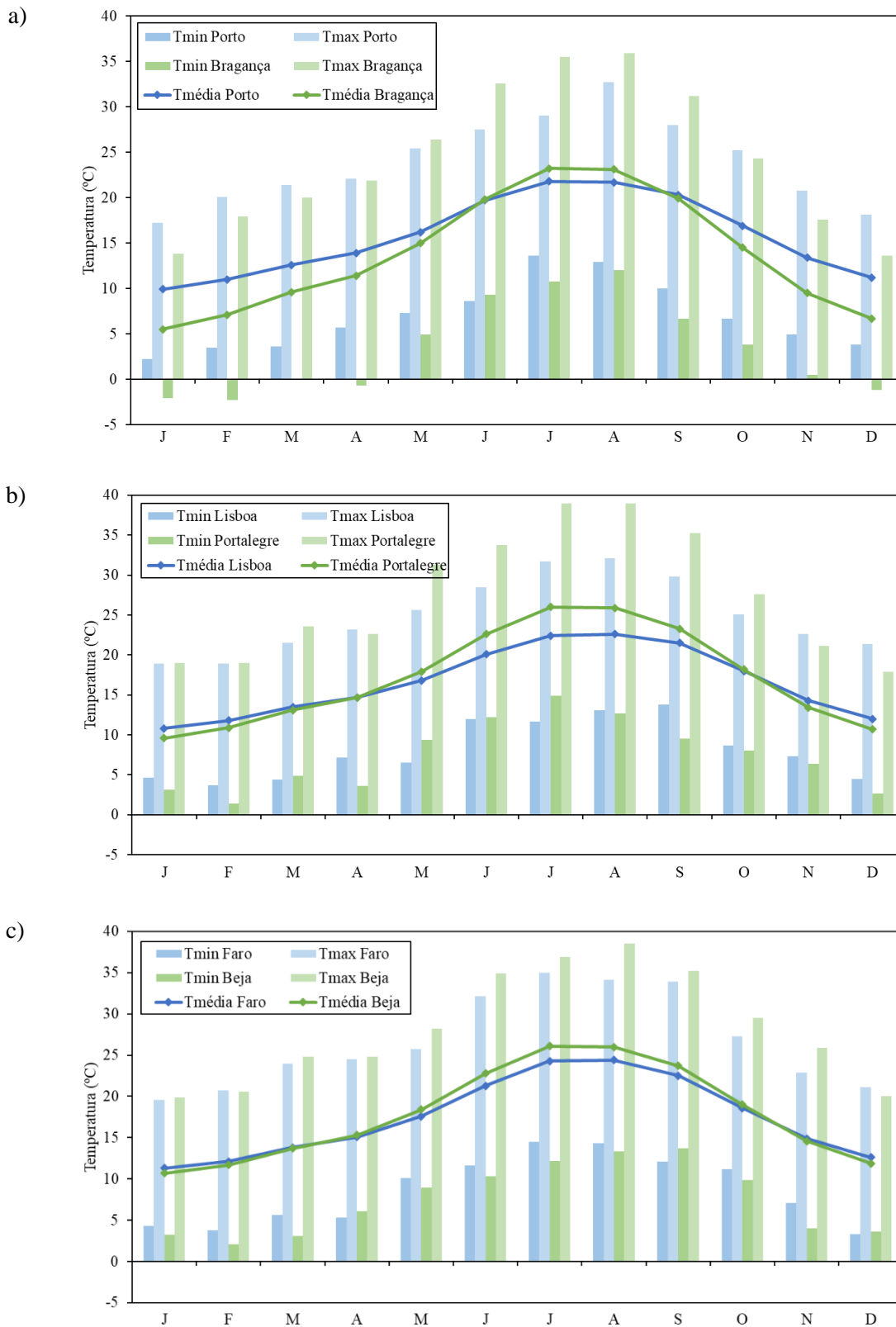


Figura 4.4 - Temperaturas médias mensais máximas, mínimas e médias: Porto vs. Bragança (a) Lisboa vs. Portalegre (b) Faro vs. Beja (c)

Pode-se fazer uma analogia aos edifícios com uma elevada inércia térmica (bastante comum nos edifícios históricos), que o mesmo efeito sobre o clima interior dos mesmos. Com o fenómeno da continentalidade acontece o contrário, fazendo com que as zonas afastadas dos oceanos e mares tenham uma amplitude térmica maior.

Quadro 4.1 - Diferenciais das temperaturas máximas, médias e mínimas, das localizações seleccionadas

Diferencial (°C)	Porto	Bragança	Lisboa	Portalegre	Faro	Beja
Máximas	15,5	22,3	13,2	21,1	15,4	18,6
Médias	11,9	17,7	11,8	16,4	13,1	15,4
Mínimas	11,4	14,3	10,1	13,5	11,2	11,6

De notar que na Figura 4.4c e no Quadro 4.1 se verifica que não existe uma variação tão significativa entre as temperaturas médias de Faro e Beja como existe na Figura 4.4a e na Figura 4.4b. Possivelmente deve-se ao facto de que Faro não sofre uma influência tão grande do oceano Atlântico como Lisboa e Porto, estando mais próximo de mar mediterrânico que tem temperaturas mais altas e assim o fenómeno da maritimidade não será tão acentuado.

4.2.2 Humidade relativa

Na Figura 4.5 são apresentadas as médias mensais de HR para as várias localizações seleccionadas. Observa-se um padrão geral em que a HR diminui no Verão. Isto acontece, pois, é nestes meses que a temperatura é mais elevada e consequentemente o ar quente tem maior capacidade do que nos meses mais frios) de armazenar vapor de água, diminuindo assim a HR [10].

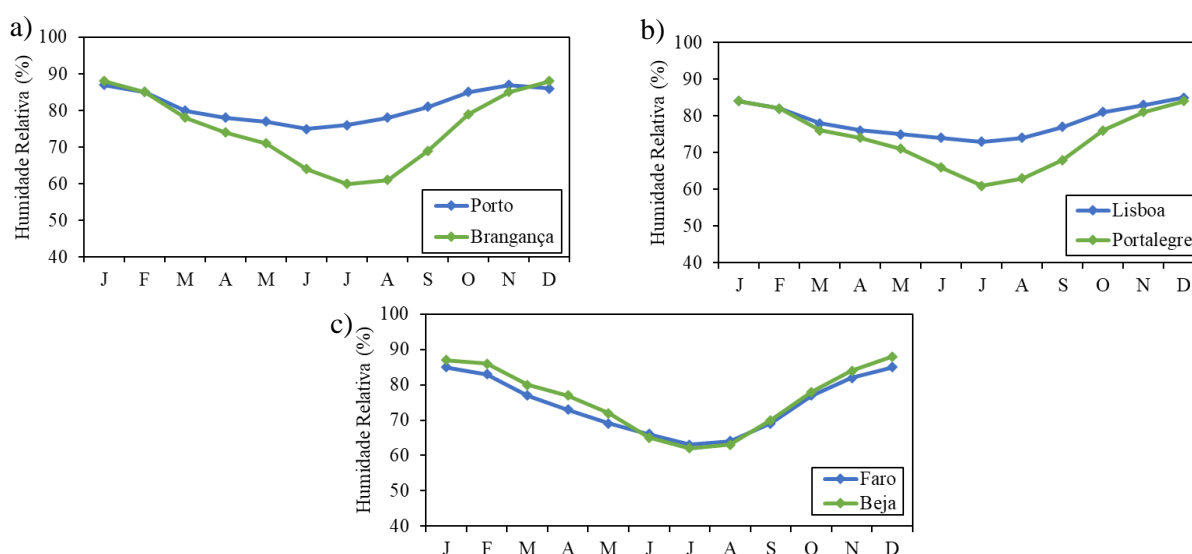


Figura 4.5 - Humidade Relativa média mensal: Porto vs. Bragança (a) Lisboa vs. Portalegre (b) Faro vs. Beja (c)

Verifica-se também que as localizações do litoral registam maioritariamente valores de HR superiores aos registados pelas localizações do interior, principalmente nos meses mais quentes, sendo que Porto e Bragança chegam a atingir uma diferença de 17 % de HR no mês de Agosto.

Este padrão pode ser mais uma vez explicado pelos fenómenos da maritimidade e continentalidade. Nas regiões do interior do país, durante o Verão as temperaturas atingem valores muito superiores às temperaturas no litoral e conseqüentemente o ar por estar mais quente tem maior capacidade de absorver vapor de água, diminuindo assim a HR [10].

Com a excepção de Faro que registou valores de HR muito semelhantes aos de Beja, chega inclusive a ter a maioria dos meses com valores de HR inferiores aos de Beja. Esta incongruência pode ser novamente explicada pelo facto de que Faro não sofrer uma influência tão significativa do oceano Atlântico como as restantes cidades costeiras.

4.2.3 Irradiação solar global

Em relação à irradiação solar global observa-se na Figura 4.6 que se trata de um fenómeno sazonal, com a sua incidência maioritariamente nos meses de Verão, chegando a atingir valores quase cinco vezes superiores aos valores registados nos meses de Inverno.

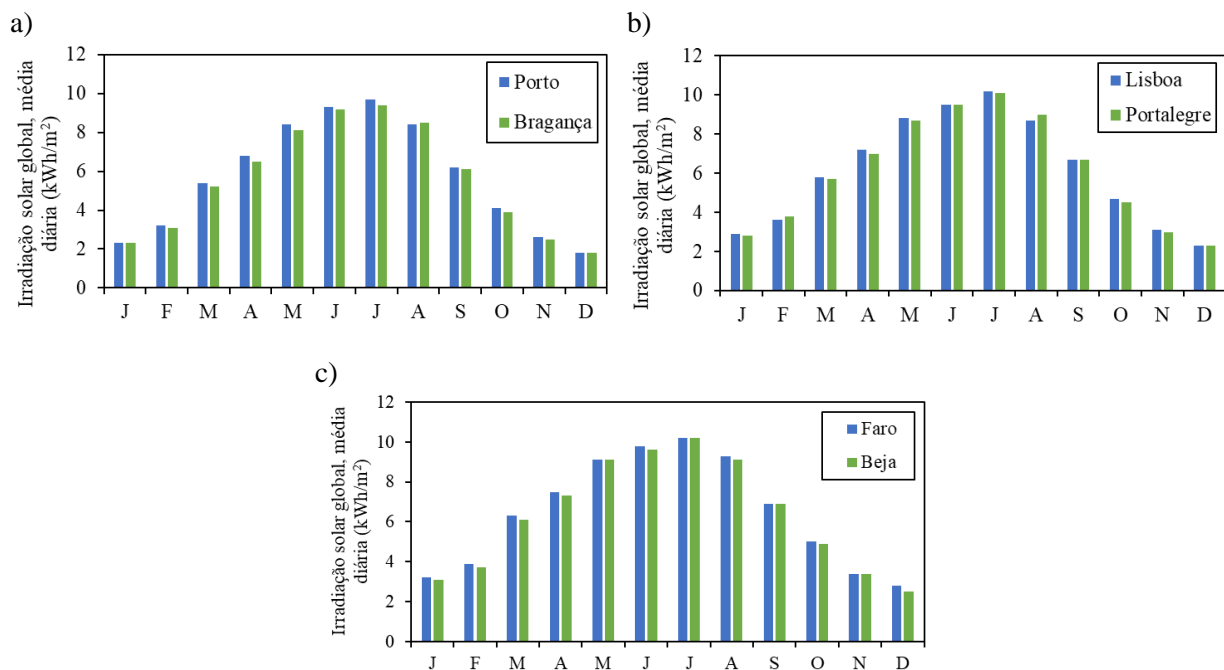


Figura 4.6 - Irradiação solar global mensal, média diária: Porto vs. Bragança (a) Lisboa vs. Portalegre (b) Faro vs. Beja (c)

Irradiação solar global total anual:

- Porto 2 080 kWh/m² vs. Bragança 2 031 kWh/m²;

- Lisboa 2 241 kWh/m² vs. Portalegre 2 229 kWh/m²;
- Faro 2 360 kWh/m² vs. Beja 2 315 kWh/m².

Verifica-se que a irradiação solar global diminui com o aumento da latitude, ou seja, quanto mais a Norte a estação meteorológica se encontra, menor será a irradiação solar global.

4.2.4 Precipitação

No que diz respeito à precipitação em Portugal continental, esta é bastante diversa, como se pode verificar na Figura 4.7. É possível notar que a precipitação média também é um fenómeno sazonal com a sua incidência principalmente no Inverno, e que em todas as localizações as maiores quantidades de precipitação ocorrem em Dezembro e as menores em Julho e Agosto (e.g. Lisboa atinge um valor de 121,8 mm em Dezembro e apenas 6,1 mm em Julho).

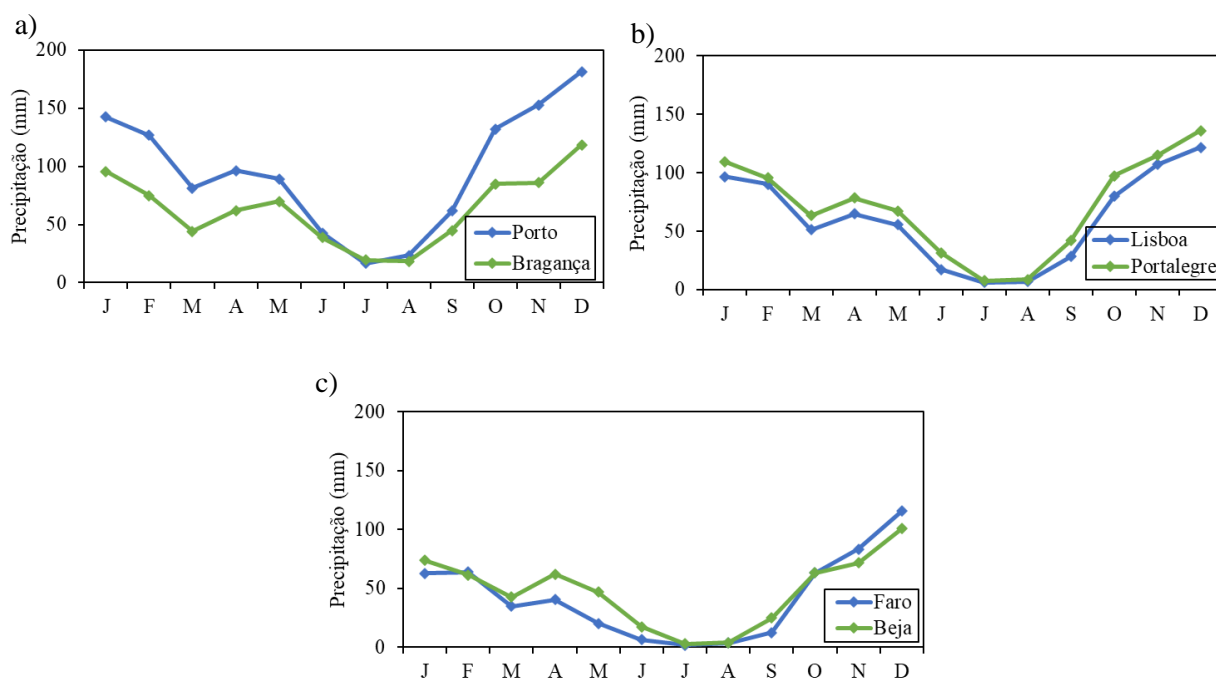


Figura 4.7 - Quantidade média de precipitação mensal: Porto vs. Bragança (a) Lisboa vs. Portalegre (b) Faro vs. Beja (c)

Quantidade média de precipitação total anual:

- Porto - 1 147 mm vs. Bragança - 758 mm;
- Lisboa - 726 mm vs. Portalegre - 852 mm;
- Faro - 509 mm vs. Beja - 572 mm.

Observa-se que a precipitação aumenta com o aumento da latitude, ou seja, quanto mais a Norte a estação meteorológica se encontra, maior a quantidade média de precipitação total anual. Verifica-se

ainda que a estação com maior precipitação (Porto) tem mais do dobro da precipitação média total anual da estação com menor precipitação (Faro).

4.3 Temperatura interior

Neste subcapítulo serão analisados os resultados obtidos através das simulações realizadas no WUFI®Plus, para a temperatura interior da igreja de São Cristóvão, obtidos a partir da metodologia descrita no capítulo 3.

Como explicado nesse capítulo, foram realizadas simulações térmicas e higrotérmicas para o Passado Recente (PR), Futuro Próximo (FP) e Futuro Longínquo (FL). No entanto, optou-se por construir mapas para os seus diferenciais, tendo sempre o PR como referência, ou seja, ao invés de se construir um mapa para cada período de tempo (três mapas) construiu-se apenas dois, um para a diferença entre o FP e o PR e outro para a diferença entre o FL e o PR. Desta forma, torna-se mais clara a análise da evolução da temperatura em ambos os cenários futuros.

Após a apresentação dos mapas construídos de Portugal continental para ambos os tempos futuros (FP e FL), são apresentadas as figuras com a variação da temperatura interior ao longo do ano e um quadro resumo com os valores máximos, mínimos e médios, e os percentis 95º e 5º da diferença de temperatura nas várias localizações seleccionadas (Porto e Bragança, Lisboa e Portalegre, Faro e Beja). No final do subcapítulo é apresentada uma secção com as conclusões retiradas da análise dos vários mapas, gráficos e quadros relativos à temperatura interior.

4.3.1 Futuro próximo

Na Figura 4.8 encontram-se os mapas de Portugal continental construídos relativos à diferença de temperatura interior, no Futuro Próximo, que corresponde ao período 2020-2050, para ambos os cenários estudados, o RCP 4.5 e o RCP 8.5.

Após a análise dos mapas construídos verifica-se um ligeiro padrão em que os maiores aumentos de temperatura ocorrem no interior do país. No cenário do RCP 4.5 (Figura 4.8a) observam-se zonas esverdeadas principalmente na zona litoral do país, enquanto no interior observa-se mais tons amarelos claros (que representam maiores aumentos de temperatura). No cenário do RCP 8.5 (Figura 4.8b) repete-se o mesmo padrão, com o litoral com tons mais azulados e o interior com mais alguns tons de amarelo.

Verifica-se no cenário RCP 8.5 que se prevêem maiores aumentos de temperatura, sendo que este é um cenário mais pessimista do que o RCP 4.5. De salientar que a escala de cores não é igual para ambos os mapas pois representam diferentes aumentos de temperatura, com o mapa da Figura

4.8a a começar inclusive com uma diferença de temperatura negativa e o mapa da Figura 4.8b começa com diferenças positivas.

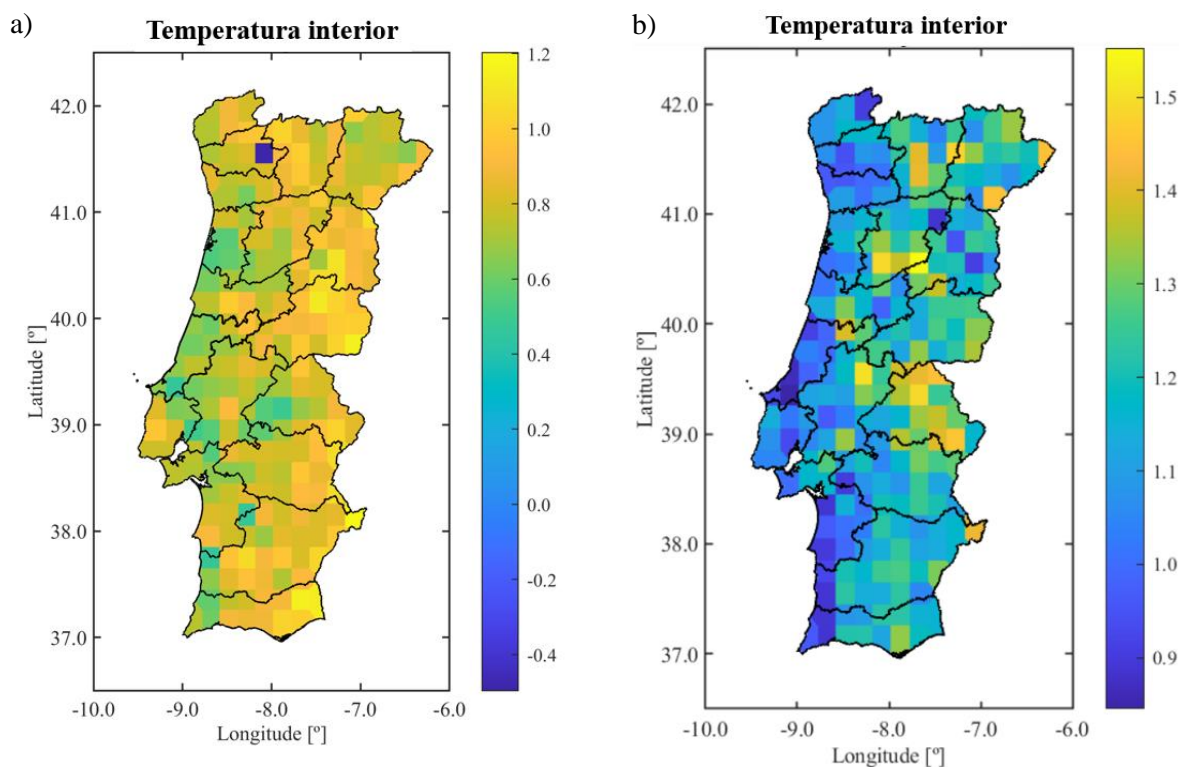


Figura 4.8 - Variação da temperatura interior em Portugal continental no futuro próximo: RCP 4.5 (a) e RCP 8.5 (b)

Na Figura 4.9 apresentam-se as variações da diferença de temperatura interior ao longo dos doze meses do ano representativo do FP, nas seis localizações seleccionadas, comparadas aos pares (Porto vs. Bragança, Lisboa vs. Portalegre e Faro vs. Beja).

Relativamente aos gráficos da Figura 4.9 verificam-se grandes flutuações de diferenças de temperatura, tanto positivas como negativas, no entanto maioritariamente positivas. Destacam-se Portalegre e Beja nas Figura 4.9a, Figura 4.9b e Figura 4.9c com grandes diferenças de temperaturas negativas, a acontecerem pontualmente durante os meses de Verão.

As localizações do litoral quando comparadas com as localizações do interior têm variações de temperatura relativamente semelhantes, com excepção do meses de Verão onde as variações no interior são maiores (em valor absoluto) e em alguns outros casos pontuais.

No Quadro 4.2 são apresentados vários dados estatísticos relativos às diferenças de temperatura interior entre o FP e o PR, das seis localizações seleccionadas, tais como: valores máximos, mínimos e médios, e os percentis 95° e 5°.

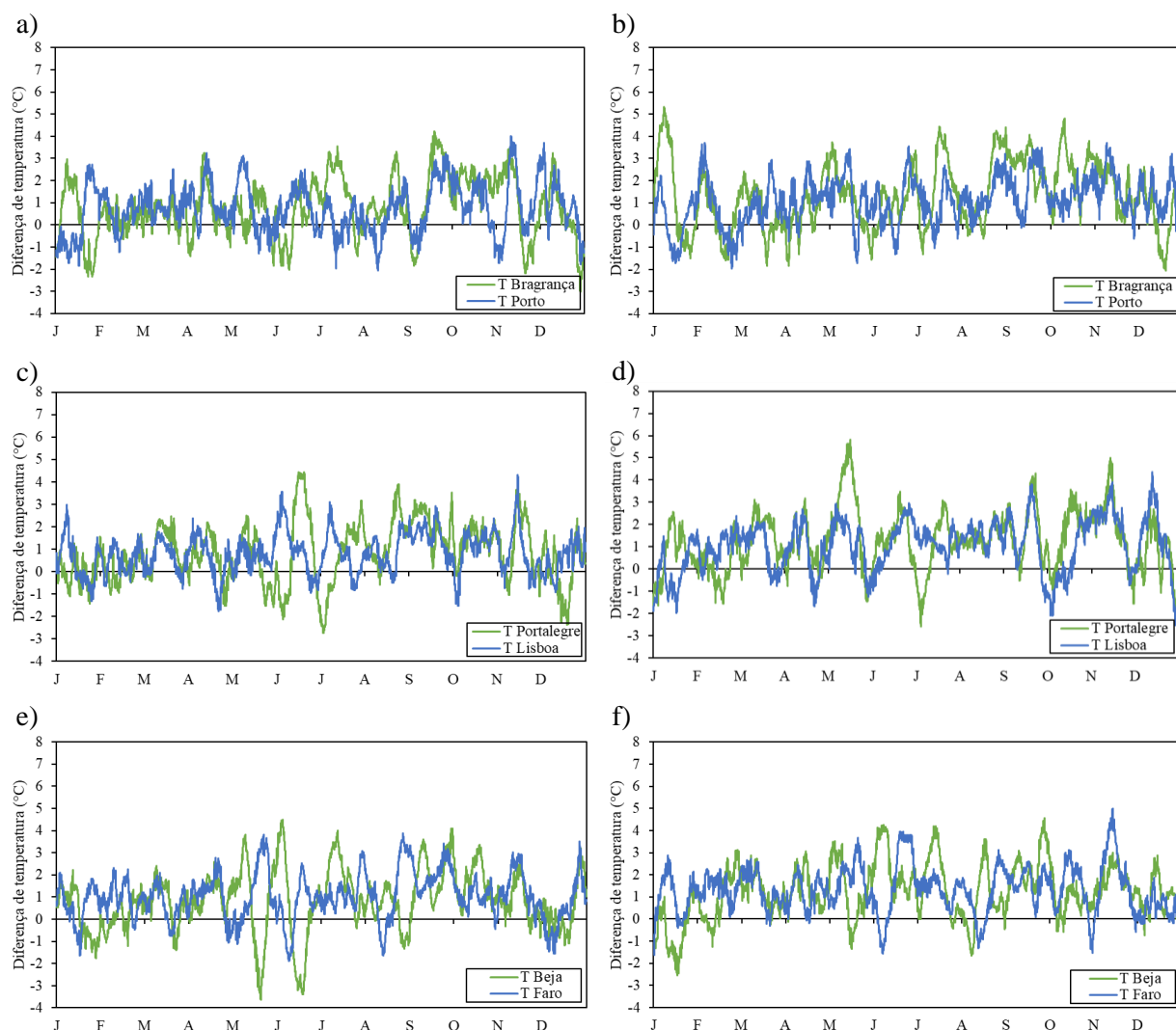


Figura 4.9 - Variação da temperatura interior no futuro próximo: Porto vs. Bragança - RCP 4.5 (a) e RCP 8.5 (b); Lisboa vs. Portalegre - RCP 4.5 (c) e RCP 8.5 (d); Faro vs. Beja - RCP 4.5 (e) e RCP 8.5 (f)

Através da análise do Quadro 4.2 é possível confirmar o padrão verificado na Figura 4.9, onde se observa maiores diferenças de temperatura no interior do país. Os valores máximos e o percentil 95º são sempre superiores nas localizações no interior quando comparadas com a respectiva localização do litoral, em ambos os cenários. O valor médio é também superior no interior, na maioria dos casos. O percentil 5º e valor mínimo é inferior nas localizações do interior.

Destacam-se Portalegre e Beja com valores máximos e mínimos registados, respectivamente. Portalegre registou uma diferença de 5,8 °C com o RCP 8.5, no dia 17 de Maio entre as 19 e as 20 horas. Beja registou uma diferença de -3,6 °C com o RCP 4.5, no dia 21 de Maio entre as 20 e as 21 horas. Os valores médios encontram-se entre os 0,7 e 1,0 °C para o RCP 4.5 e entre os 1,0 e 1,3 °C para o RCP 8.5, das localizações seleccionadas.

Quadro 4.2 - Dados estatísticos da temperatura interior (°C) no futuro próximo, nas várias localizações seleccionadas

Cenário	(°C)	Bragança	Porto	Portalegre	Lisboa	Beja	Faro
RCP 4.5	Max	4,2	4,0	4,4	4,3	4,5	3,9
	95°	2,9	2,6	2,9	2,2	3,2	2,9
	Média	0,8	0,7	0,8	0,8	0,8	1,0
	5°	-1,6	-1,1	-1,3	-0,6	-1,3	-0,8
	Min	-3,0	-2,1	-2,7	-1,8	-3,6	-1,9
RCP 8.5	Max	5,3	3,7	5,8	4,4	4,6	5,0
	95°	3,8	2,9	3,5	2,7	3,4	3,2
	Média	1,3	1,1	1,2	1,0	1,2	1,3
	5°	-1,1	-0,9	-1,0	-1,1	-1,0	-0,3
	Min	-2,1	-2,0	-2,6	-2,5	-2,5	-1,7

4.3.2 Futuro longínquo

Na Figura 4.10 encontram-se os mapas de Portugal continental construídos relativos à diferença de temperatura interior, no Futuro Longínquo, que corresponde ao período 2070-2100, para ambos os cenários estudados, o RCP 4.5 e o RCP 8.5.

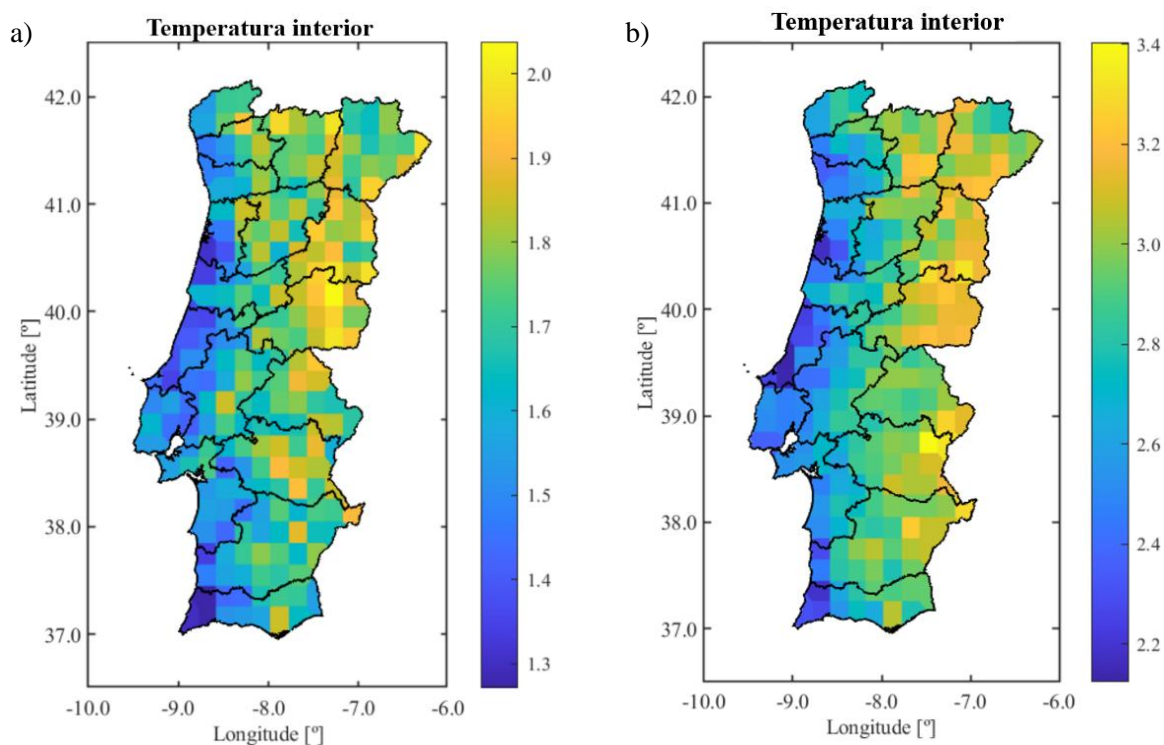


Figura 4.10 - Variação da temperatura interior em Portugal continental no futuro longínquo: RCP 4.5 (a) e RCP 8.5 (b)

Através dos mapas construídos na Figura 4.10 verifica-se que o padrão observado para o Futuro Próximo (Figura 4.8) acentua-se ainda mais no Futuro Longínquo, salientando-se o interior do país, principalmente na Beira Alta e na Beira Baixa com um aumento de temperatura superior, enquanto o litoral do país regista os menores aumentos de temperatura particularmente o lado Oeste de Portugal continental, que sofre maior influência do oceano Atlântico.

Na Figura 4.11 apresentam-se as variações da diferença de temperatura interior ao longo dos doze meses do ano representativo do FL, nas seis localizações seleccionadas, comparadas aos pares (Porto vs. Bragança, Lisboa vs. Portalegre e Faro vs. Beja).

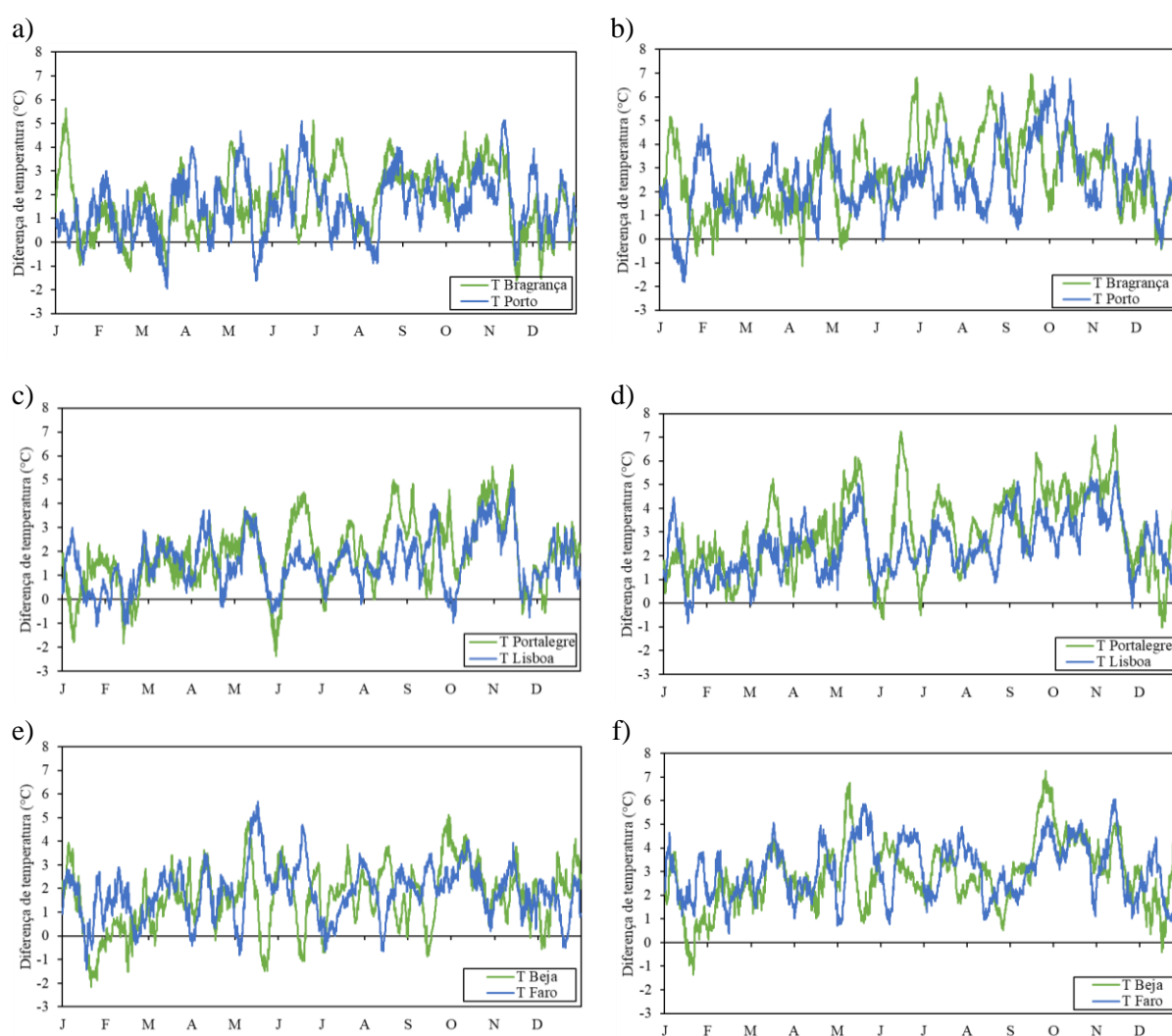


Figura 4.11 - Variação da temperatura interior no futuro longínquo: Porto vs. Bragança - RCP 4.5 (a) e RCP 8.5 (b); Lisboa vs. Portalegre - RCP 4.5 (c) e RCP 8.5 (d); Faro vs. Beja - RCP 4.5 (e) e RCP 8.5 (f)

Através da análise dos gráficos da Figura 4.11 acentua-se o padrão verificado nos gráficos relativos ao FP (Figura 4.9) onde as diferenças de temperatura entre o litoral e o interior intensificavam-se no Verão, enquanto no resto no ano tinham comportamentos semelhantes. No

entanto, no FL (Figura 4.11) verifica-se também maiores variações (tanto no interior como no litoral) no Verão e no resto do ano variações mais pequenas. Observa-se ainda uma considerável diferença entre ambos os cenários (RCP 4.5 e RCP 8.5) com o último a atingir valores superiores.

No Quadro 4.3 são apresentados vários dados estatísticos relativos às diferenças de temperatura interior entre o FL e o PR, das seis localizações seleccionadas, tais como: valores máximos, mínimos e médios, e os percentis 95° e 5°.

Quadro 4.3 - Dados estatísticos da temperatura interior (°C) no futuro longínquo, nas várias localizações seleccionadas

Cenário	(°C)	Bragança	Porto	Portalegre	Lisboa	Beja	Faro
RCP 4.5	Max	5,6	5,1	5,6	4,9	5,1	5,7
	95°	4,0	3,7	4,4	3,6	3,7	3,5
	Média	1,8	1,6	1,9	1,5	1,6	1,8
	5°	-0,3	-0,4	-0,5	-0,2	-0,7	-0,1
	Min	-1,6	-2,0	-2,4	-1,1	-2,1	-1,4
RCP 8.5	Max	7,0	6,8	7,5	5,5	7,3	6,1
	95°	5,5	5,1	5,8	4,5	5,1	4,9
	Média	2,8	2,5	3,0	2,4	2,9	3,1
	5°	0,3	0,4	0,4	0,7	0,7	1,3
	Min	-1,1	-1,8	-1,0	-0,9	-1,3	0,4

Através na análise do Quadro 4.3 verifica-se novamente que no FL as diferenças entre os cenários acentuam-se, sendo que os valores médios no RCP 4.5 variam entre os 1,5 e 1,9 °C e no RCP 8.5 entre os 2,4 e 3,0 °C. Portalegre assinalou as maiores diferenças de temperatura, tanto positiva como negativa, com uma diferença de 7,5 °C registados a 26 de Setembro entre as 8 e as 9 horas e uma diferença de -2,4 °C registados a 31 de Maio entre as 18 e as 19 horas.

4.3.3 Conclusões

Relativamente aos mapas construídos é possível constatar que as maiores diferenças de temperatura ocorrem no interior do país, com foco na Beira Alta e na Beira Baixa. Verifica-se uma acentuação deste padrão na seguinte ordem: FP - RCP 4.5 (Figura 4.8a), FP - RCP 8.5 (Figura 4.8b), FL - RCP 4.5 (Figura 4.10a) e por último o mapa com este padrão mais acentuado é o FL - RCP 8.5 (Figura 4.10b) onde a escala da diferença de temperaturas (comparativamente com o PR) atinge os 3,4 °C. Naturalmente os mapas referentes ao RCP 8.5 prevêem sempre aumentos de temperatura superiores aos mapas referentes ao RCP 4.5 (comparando o mesmo tempo futuro), visto que o RCP

8.5 é mais pessimista e representa um crescimento contínuo nas emissões de gases de efeito de estufa durante o séc. XXI. A diferença entre os dois cenários torna-se mais evidente no FL do que no FP.

O facto das diferenças de temperatura serem bastante superiores nas zonas do interior quando comparadas com as do litoral deve-se aos fenómenos da maritimidade e continentalidade, que foram explicados no subcapítulo 4.2.1. Este padrão torna-se bastante evidente quanto mais tarde seja o tempo futuro analisado e mais pessimista seja o cenário, verificando uma mudança drástica na escala de cores à medida que se muda de longitude, desde o lado Oeste ao lado Este do país.

Em relação aos gráficos que exibem as variações das diferenças de temperatura observa-se que existem grandes flutuações (mas na grande maioria do tempo diferenças positivas), o que irá causar maiores amplitudes térmicas comparativamente com o período de referência (PR). Verifica-se também que as maiores diferenças entre as localizações do litoral e do interior ocorrem durante os meses de Verão, pois é durante este período que as temperaturas são mais altas (e os fenómenos da maritimidade e continentalidade acentuam-se mais). Durante os restantes meses do ano as localizações do litoral e do interior têm variações relativamente idênticas.

Com a construção dos quadros que albergam os dados estatísticos das seis localizações seleccionadas é possível confirmar que as maiores diferenças de temperatura irão ocorrer no interior do país, sendo que o percentil 95º das cidades do interior é sempre superior às do litoral, em ambos os tempos futuros e ambos os cenários. As variações máximas, médias, mínimas e o percentil 5º são também maioritariamente superiores no interior, com pontuais excepções.

4.4 Humidade interior

Neste subcapítulo serão analisados os resultados obtidos através das simulações realizadas no WUFI®Plus, para a humidade interior da igreja de São Cristóvão, obtidos a partir da metodologia descrita no capítulo 3.

À semelhança do subcapítulo 4.3, a análise da humidade interior será realizada segundo a diferença entre os cenários futuros e o cenário histórico, para verificar as variações de humidade no FP e no FL, relativamente ao PR. Serão apresentados mapas de Portugal continental com as variações de Humidade Relativa (HR) em ambos os tempos futuros (FP e FL) e ambos os cenários estudados (RCP 4.5 e RCP 8.5).

Devido ao facto da humidade relativa ser definida pelo quociente da concentração de vapor de água pelo limite de saturação correspondente à temperatura do ambiente que esteja a ser analisado, está assim dependente de duas variáveis (temperatura e humidade absoluta), consequentemente decidiu-se analisar também a concentração de vapor de água (v), que representa a quantidade de vapor

de água que existe no ar, visto que esta não varia com a temperatura, torna-se assim a análise deste conceito mais objectiva [10].

Através dos valores de temperatura e humidade relativa obtidos nas simulações higrotérmicas realizadas no WUFI®Plus e das equações da norma DIN 4108 (vd. Anexo C) obteve-se as concentrações de vapor de água (expressas em gramas de vapor de água por unidade de volume de ar (m^3)) para as seis localizações seleccionadas.

São apresentados gráficos com a variação das concentrações de vapor de água interiores ao longo do ano e um quadro com os valores máximos, mínimos e médios, e os percentis 95º e 5º da diferença das concentrações de vapor de água interiores nas várias localizações seleccionadas (Porto, Bragança, Lisboa, Portalegre, Faro e Beja). No final do subcapítulo é apresentada uma secção com as conclusões retiradas da análise dos vários mapas, gráficos e quadros relativos à humidade interior.

4.4.1 Futuro próximo

Na Figura 4.12 encontram-se os mapas de Portugal continental construídos relativos à diferença de humidade relativa interior, no Futuro Próximo, que corresponde ao período 2020-2050, para ambos os cenários estudados, o RCP 4.5 e o RCP 8.5.

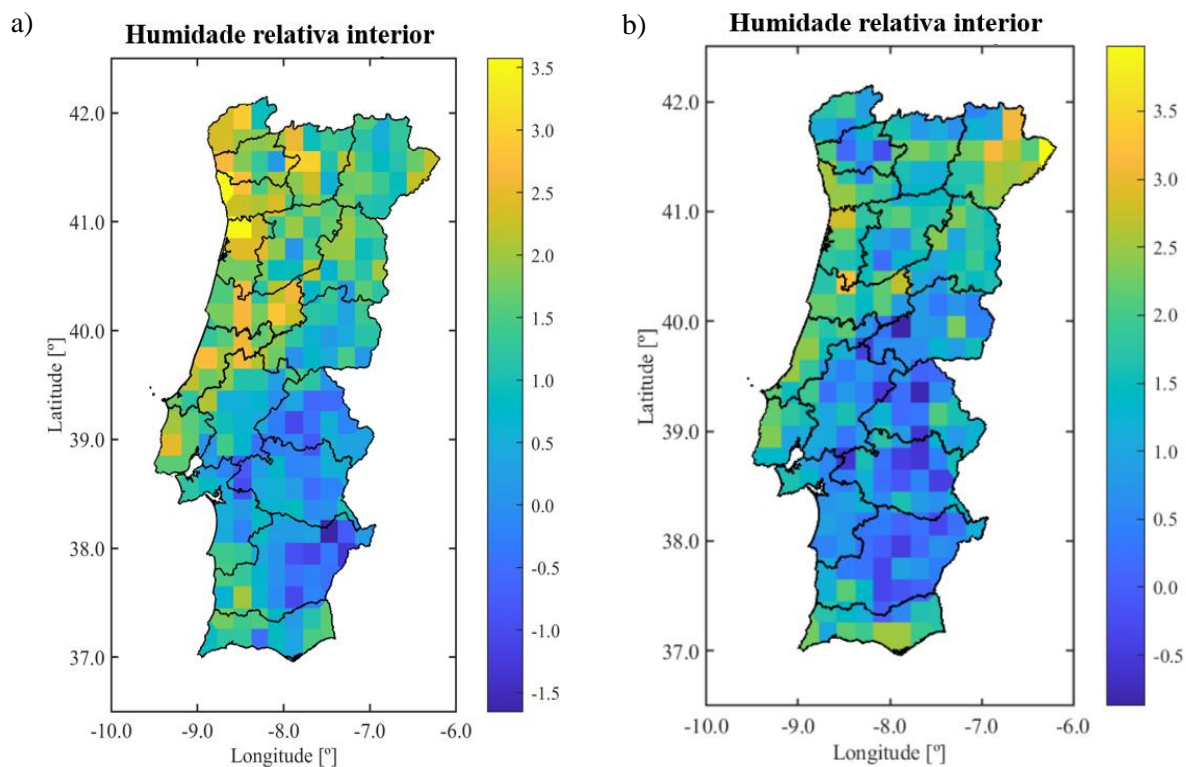


Figura 4.12 - Variação da humidade relativa interior em Portugal continental no futuro longínquo: RCP 4.5 (a) e RCP 8.5 (b)

Através da análise dos mapas da Figura 4.12 observam-se maiores aumentos de Humidade Relativa no litoral do país, principalmente de Lisboa a Viana do Castelo, enquanto os menores aumentos situam-se no interior do país, nomeadamente no Alto Alentejo e Baixo Alentejo.

Na Figura 4.13 apresentam-se as variações das diferenças de concentração de vapor de água interior ao longo dos doze meses do ano representativo do FP, nas seis localizações seleccionadas, comparadas aos pares (Porto vs. Bragança, Lisboa vs. Portalegre e Faro vs. Beja).

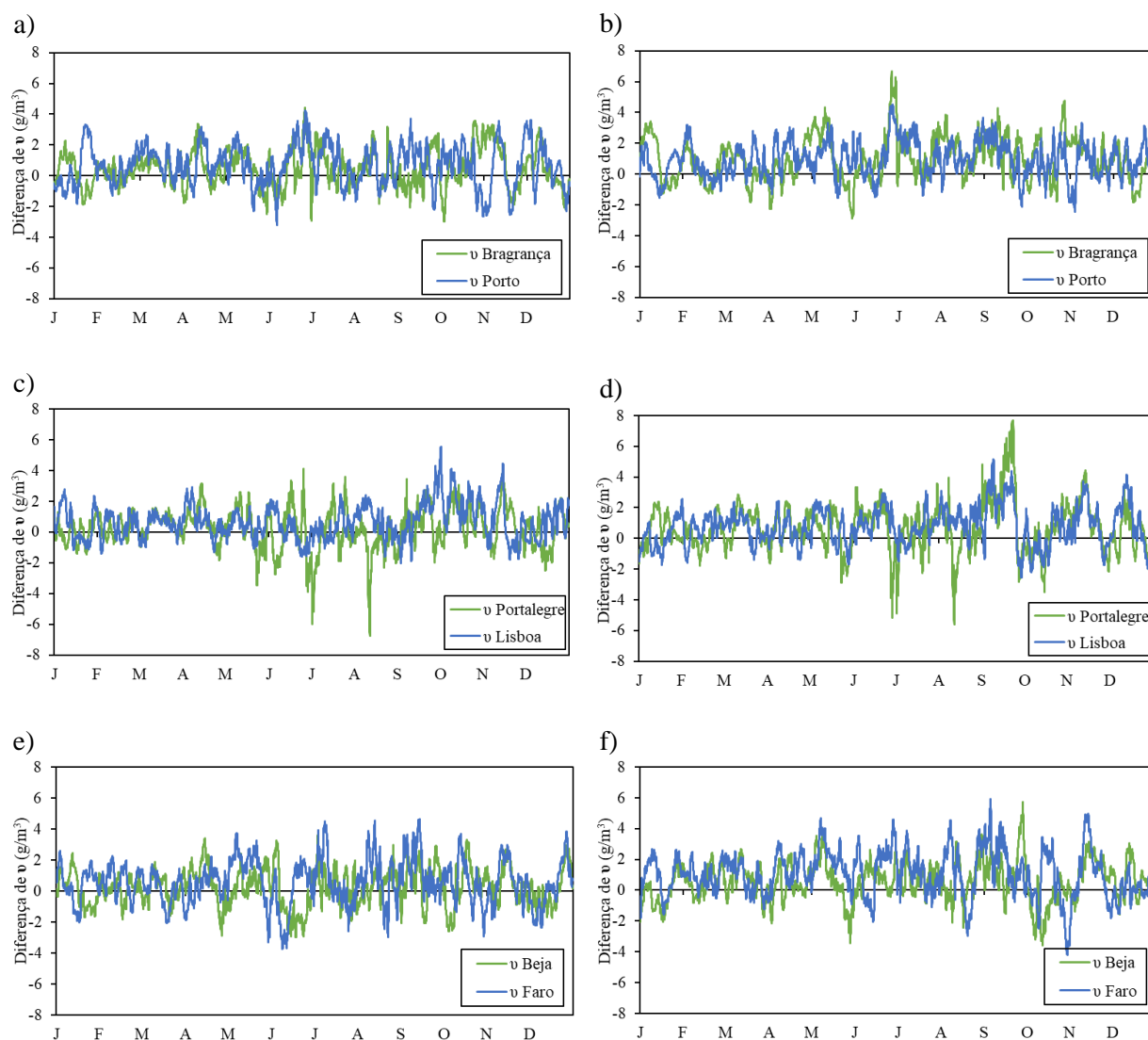


Figura 4.13 - Variação da concentração de vapor de água interior no futuro próximo: Porto vs. Bragança - RCP 4.5 (a) e RCP 8.5 (b); Lisboa vs. Portalegre - RCP 4.5 (c) e RCP 8.5 (d); Faro vs. Beja - RCP 4.5 (e) e RCP 8.5 (f)

Através dos gráficos da Figura 4.13 é possível observar grandes flutuações nas diferenças de concentração de vapor de água, mas maioritariamente verificam-se valores positivos. Destaca-se Portalegre com diferenças negativas bastante acentuadas em Julho e Agosto.

As localizações do litoral e do interior têm variações relativamente idênticas, com algumas excepções (a ocorrerem principalmente nos meses de Verão) em que as variações das localizações do interior se intensificam.

No Quadro 4.4 são apresentados vários dados estatísticos relativos às diferenças de concentração de vapor de água interior entre o FP e o PR, das seis localizações seleccionadas, tais como: valores máximos, mínimos e médios, e os percentis 95° e 5°.

Quadro 4.4 - Dados estatísticos da concentração de vapor de água interior (g/m^3) no futuro próximo, nas várias localizações seleccionadas

Cenário	(g/m^3)	Bragança	Porto	Portalegre	Lisboa	Beja	Faro
RCP 4.5	Max	4,4	4,2	4,1	5,5	3,6	4,6
	95°	2,6	2,8	2,2	2,5	2,3	3,0
	Média	0,4	0,7	0,2	0,6	0,3	0,6
	5°	-1,5	-1,5	-1,9	-1,0	-1,8	-1,9
	Min	-3,0	-3,2	-6,8	-2,1	-3,0	-3,7
RCP 8.5	Max	6,6	4,5	7,7	5,2	5,7	5,9
	95°	3,2	2,8	3,0	3,0	2,6	3,5
	Média	1,0	0,9	0,7	0,8	0,5	1,1
	5°	-1,1	-1,1	-1,8	-1,3	-1,6	-1,4
	Min	-2,9	-2,8	-5,6	-2,6	-3,6	-4,2

Com o Quadro 4.4 verifica-se que na maioria dos casos as maiores variações da concentração de vapor de água acontecem nas localizações do litoral. Portalegre destaca-se com os valores máximos e mínimos, sendo que registou (com o RCP 8.5) uma diferença de $7,7 \text{ g/m}^3$ no dia 23 de Setembro entre as 16 e as 17 horas e uma diferença de $-6,8 \text{ g/m}^3$ no dia 12 de Agosto entre as 21 e as 22 horas.

Os valores médios no RCP 4.5 variam entre os $0,2$ e $0,7 \text{ g/m}^3$, enquanto no RCP 8.5 já são registados valores médios entre os $0,5$ e $1,1 \text{ g/m}^3$.

4.4.2 Futuro longínquo

Na Figura 4.14 encontram-se os mapas de Portugal continental construídos relativos à diferença de humidade relativa interior, no Futuro Longínquo, que corresponde ao período 2070-2100, para ambos os cenários estudados, o RCP 4.5 e o RCP 8.5.

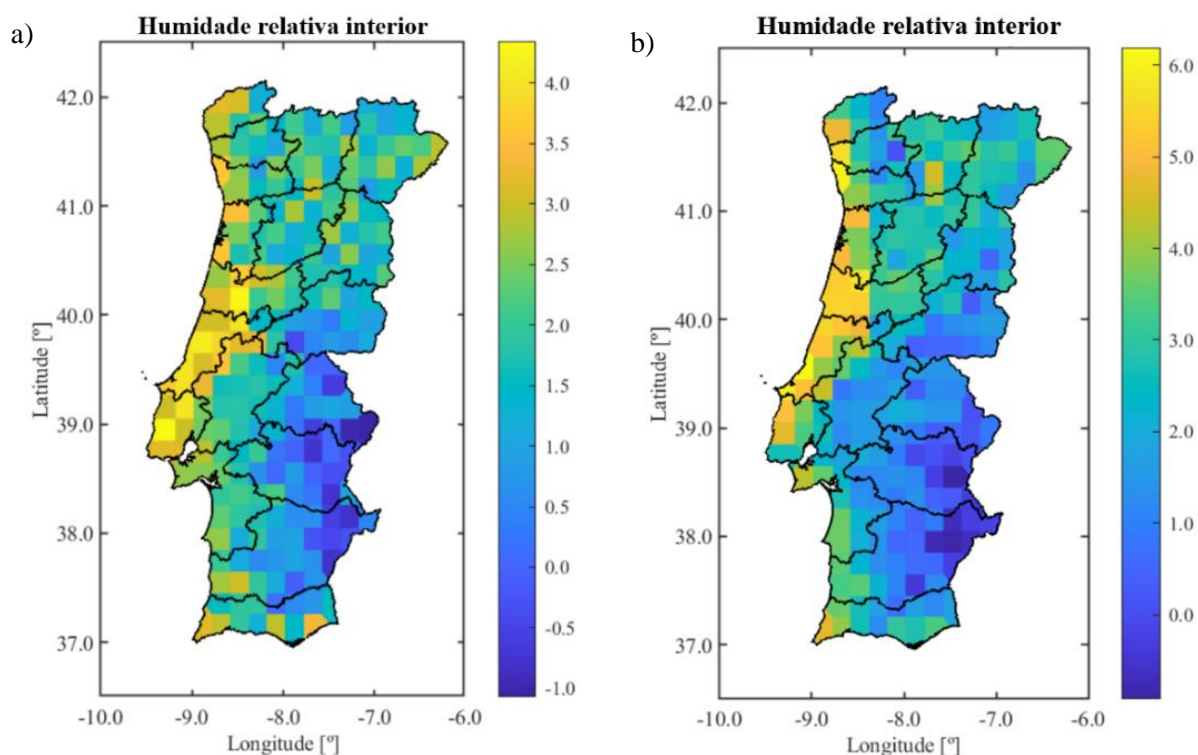


Figura 4.14 - Variação da humidade relativa interior em Portugal continental no futuro longínquo: RCP 4.5 (a) e RCP 8.5 (b)

Com a construção dos mapas da Figura 4.14 verifica-se uma maior acentuação do padrão visualizado no FP (Figura 4.12) em que a zona do litoral do país (principalmente de Lisboa a Viana do Castelo) destaca-se com maiores aumentos de HR. Acentua-se também o facto das menores diferenças de HR ocorrerem no interior do país, sobretudo no Alto Alentejo e Baixo Alentejo.

Na Figura 4.15 apresentam-se as variações da diferença de concentração de vapor de água interior ao longo dos doze meses do ano representativo do FL, nas seis localizações seleccionadas, comparadas aos pares (Porto vs. Bragança, Lisboa vs. Portalegre e Faro vs. Beja).

Nos gráficos da Figura 4.15 observam-se grandes flutuações da concentração de vapor de água e verifica-se que as localizações do litoral variam de forma semelhante às localizações do interior. Destaca-se Portalegre com algumas variações negativas mais acentuadas, a ocorrem nos meses mais quentes do ano.

Verifica-se também aumentos da concentração de vapor de água, mais constantes, a ocorrerem entre Setembro e Novembro, principalmente nas localizações de Lisboa e Portalegre, e de forma mais ligeira em Faro e Beja.

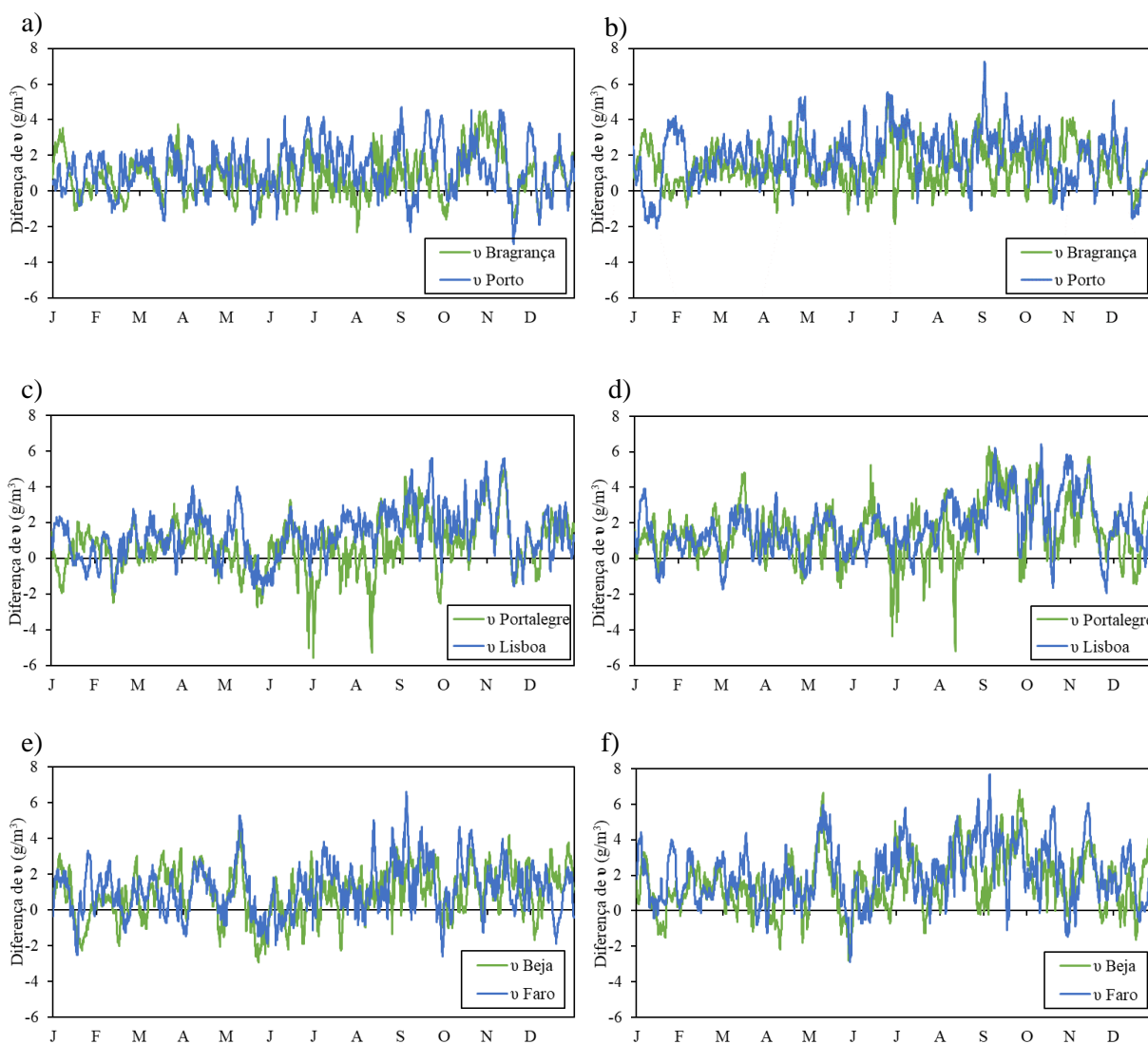


Figura 4.15 - Variação da concentração de vapor de água interior no futuro longínquo: Porto vs. Bragança - RCP 4.5 (a) e RCP 8.5 (b); Lisboa vs. Portalegre - RCP 4.5 (c) e RCP 8.5 (d); Faro vs. Beja - RCP 4.5 (e) e RCP 8.5 (f)

No Quadro 4.5 são apresentados vários dados estatísticos relativos às diferenças de humidade relativa interior entre o FL e o PR, das seis localizações seleccionadas, tais como: valores máximos, mínimos e médios, e os percentis 95° e 5°.

Através dos valores expressos no Quadro 4.5 volta-se a observar um aumento da concentração de vapor de água em todas as localizações, sendo especialmente maior a diferença no RCP 8.5, com valores médios entre os 1,4 e os 2,1 g/m^3 , enquanto no RCP 4.5 varia entre 0,7 e 1,4 g/m^3 .

Faro destaca-se por ter registado a maior variação de v , no RCP 8.5, atingindo um valor de 7,7 g/m^3 a 5 Setembro entre as 20 e as 21 horas, enquanto Portalegre registou o valor da diferença mínima de -5,6 g/m^3 no RCP 4.5 a 2 Julho entre as 22 e as 23 horas.

Quadro 4.5 - Dados estatísticos da concentração de vapor de água interior (g/m^3) no futuro longínquo, nas várias localizações seleccionadas

Cenário	(g/m^3)	Bragança	Porto	Portalegre	Lisboa	Beja	Faro
RCP 4.5	Max	4,5	4,7	5,0	5,6	4,8	6,6
	95°	2,9	3,5	3,1	3,7	3,0	3,5
	Média	0,8	1,2	0,7	1,4	0,9	1,2
	5°	-0,9	-0,9	-1,7	-0,9	-1,5	-1,0
	Min	-2,3	-3,0	-5,6	-2,0	-2,9	-2,6
RCP 8.5	Max	5,4	7,3	6,3	6,4	6,8	7,7
	95°	3,3	4,2	4,6	4,5	4,3	4,9
	Média	1,4	1,9	1,5	1,7	1,6	2,1
	5°	-0,3	-0,7	-0,8	-0,6	-0,8	-0,2
	Min	-1,9	-2,1	-5,2	-1,9	-2,8	-2,9

4.4.3 Conclusões

Relativamente às variações de humidade relativa interior, constata-se através dos mapas construídos um padrão oposto à variação de temperatura, sendo que neste caso as maiores variações ocorrem no litoral do país, destacando-se as zonas costeiras localizadas entre Lisboa e Viana do Castelo, e as menores variações ocorrem no interior do país, nomeadamente no Alto Alentejo e Baixo Alentejo. Este padrão não é tão claro no FP mas torna-se bastante visível nos mapas construídos para o FL (Figura 4.14). Verifica-se uma acentuada mudança na escala de cores ao variar a longitude do local.

Através da análise dos gráficos construídos verifica-se novamente que as concentrações de vapor de água nas localizações do litoral irão sofrer um aumento superior às do interior. As variações das concentrações de vapor de água flutuam bastante ao longo do ano, no entanto mantêm-se maioritariamente positivas na generalidade do tempo. Destacam-se os gráficos de Portalegre com variações pontuais bastante negativas, por volta de Julho e Agosto.

As variações máximas e médias das concentrações de vapor de água do litoral são sempre superiores quando comparadas com as do interior. As restantes variações (mínima e os percentis 95° e 5°) são de forma geral, também superiores no litoral, sendo que existem algumas excepções.

De notar que através dos quadros construídos com os dados estatísticos das seis localizações seleccionadas, os valores do RCP 8.5 são sempre superiores aos do RCP 4.5. Verificou-se também que

nos valores máximos e mínimos registados, os primeiros ocorreram sempre com o RCP 8.5 e os últimos com o RCP 4.5.

É possível assim concluir que a humidade (relativa e absoluta) interior tende a aumentar no futuro, os aumentos serão mais acentuados no litoral do país e verificam-se mais acentuados no futuro longínquo com o RCP 8.5, sendo este o cenário mais pessimista e consequentemente é o que regista valores mais elevados.

5 CONCLUSÕES

5.1 Principais conclusões

Devido aos avanços da economia e da tecnologia que por sua vez causam poluição, estes irão causar alterações no clima exterior futuro. Consequentemente, o clima interior dos edifícios irá sofrer alterações, que serão prejudiciais para a conservação de artefactos no interior de edifícios históricos.

Com a realização deste trabalho, foi possível simular os efeitos que as alterações climáticas terão no clima interior da igreja de São Cristóvão e construir mapas com os efeitos das mesmas para todo o país (Portugal continental). Foram tidos em conta dois cenários possíveis para as previsões do clima exterior (RCP 4.5 e RCP 8.5) e foram realizadas simulações para o FP e FL.

Com a apresentação do Quadro 2.2 (no subcapítulo 2.6.1), que contém vários estudos onde são feitas análises energéticas, de conservação de artefactos e/ou de conforto térmico pôde-se constatar que as simulações realizadas no presente trabalho utilizam uma grelha de pontos mais fina do que todos os estudos analisados. Consequentemente os resultados obtidos são mais precisos e rigorosos.

Pode-se concluir também que o presente trabalho foi inovador na sua metodologia por ter sido utilizado um algoritmo desenvolvido em MATLAB, trabalho este realizado por *Coelho* [27], que automatizou a preparação das simulações, tornando este processo mais simples e rápido. De todos os estudos analisados, nenhum faz menção de ter utilizado uma metodologia idêntica, por essa razão assume-se que não foi utilizado qualquer tipo de automatização na preparação das simulações.

Através da análise dos resultados obtidos com as simulações térmicas e higrotérmicas realizadas com o WUFI®Plus é possível concluir que se prevê um aumento significativo de temperatura e humidade no clima interior dos edifícios históricos localizados em Portugal continental, desde que estes possuam características e soluções construtivas idênticas às do edifício utilizado como caso de estudo (igreja de São Cristóvão), sendo que a primeira atingiu um aumento máximo de 7,5 °C e a segunda de 7,7 g/m³. O aumento da temperatura interior prevê-se que seja mais significativo na zona interior do país, onde se destaca a Beira Alta e Beira Baixa, enquanto o aumento da humidade interior deverá ocorrer de forma mais acentuada no litoral do país, com destaque para o Alto Alentejo e Baixo Alentejo.

Conclui-se ainda que os efeitos das alterações climáticas, nomeadamente o aumento da temperatura e humidade interiores, são substancialmente diferentes de acordo com o cenário proposto pelo Painel Internacional para as Alterações Climáticas (IPCC) em estudo, sendo que os resultados obtidos com o RCP 8.5 destacaram-se bastante dos resultados obtidos com o RCP 4.5, com o primeiro a obter aumentos de temperatura e humidade interiores bastante superiores. Ao comparar os dois tempos futuros estudados (futuro próximo e futuro longínquo), verifica-se que o último também se destacou do primeiro com resultados mais pejorativos para a conservação dos edifícios históricos e do seu património cultural.

5.2 Desenvolvimentos futuros

Com o intuito de fortalecer o presente trabalho propõem-se os seguintes desenvolvimentos futuros:

- Alargamento do estudo a Espanha, visto ser o nosso país vizinho, com um clima idêntico e por a Península Ibérica ser uma das zonas que se prevê que será mais afectada com as alterações climáticas.
- Simulação, com o mesmo edifício, com controlo climático (sistemas AVAC) de forma que se possam comparar os resultados segundo uma das normas de limitação do clima interior para a preservação dos artefactos (e.g. Thomson [33]). Esta comparação será bastante relevante pois o seu resultado poderá vir a traduzir-se numa intervenção ao edifício e aplicação de sistemas AVAC (reabilitação activa).
- Aumento da fineza da grelha de pontos, de forma a aumentar o número de localizações e conseqüentemente de simulações e de forma que também possa ser estudada a influência que a fineza da grelha tem nos resultados. Desta forma também seria possível alargar o estudo para os arquipélagos dos Açores e da Madeira pois assim já haveria mais do que uma localização em cada ilha e conseqüentemente os resultados já seriam fidedignos/mais reais.
- Análise das conseqüências que o clima interior estudado neste trabalho teria na conservação de artefactos, com as ferramentas de análise da preservação de artefactos adaptadas por *Martens* [11]. Consoante os vários materiais encontrados no interior da igreja, seria possível com os resultados obtidos nesta dissertação ver os danos que as alterações de temperatura e humidade relativa teriam sobre estes.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Pavlogeorgatos G. Environmental parameters in museums. *Build Environ* 2003; 38: 1457–1462.
- [2] American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). *ASHRAE Handbook-HVAC Applications*, Atlanta, USA, 2015.
- [3] Lucchi E. Review of preventive conservation in museum buildings. *Journal of Cultural Heritage* 2018; 29: 180–193.
- [4] Sharif-Askari H, Abu-Hijleh B. Review of museums' indoor environment conditions studies and guidelines and their impact on the museums' artifacts and energy consumption. *Build Environ* 2018; 143: 186–195.
- [5] Webb AL. Energy retrofits in historic and traditional buildings: A review of problems and methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2017; 77: 748–759.
- [6] Silva HE, Henriques FMA. Análise microclimática de um edifício histórico em clima temperado: limites sustentáveis para a correta conservação dos materiais. *Ambiente Construído* 2015; 15: 65–77.
- [7] Huijbregts Z, Martens MHJ, Conen CMH, et al. Damage risk assessment of museum objects in historic buildings due to shifting climate zones in Europe. In: *Proceedings of the 5th International Building Physics Conference. Eindhoven University of Technology, Eindhoven, The Netherlands*. 2012.
- [8] Silva H, Coelho G, Rocha B, et al. Impacto dos visitantes na conservação do património cultural em Portugal. *Construção* 2018.
- [9] Hansen J, Sato M. Global Warming Acceleration. *Earth Institute*, 2020.
- [10] Henriques FMA. *Comportamento Higrotérmico de Edifícios*. Monte de Caparica: FCT-UNL, 2016.
- [11] Martens MHJ. Climate risk assessment in museums: degradation risks determined from temperature and relative humidity data. Epub ahead of print 2012. DOI: 10.6100/IR729797.
- [12] Camuffo D, Grieken V, Busse H-J, et al. Environmental monitoring in four European museums. *Atmospheric Environment*, 2001; 35: 127–140.
- [13] Sabbioni C, Brimblecombe P, Cassar M, et al. *The atlas of climate change impact on European cultural heritage: scientific analysis and management strategies*. Anthem, 2010.
- [14] de Wilde P, Coley D. The implications of a changing climate for buildings. *Building and Environment* 2012; 55: 1–7.

- [15] Nakicenovic N, Alcamo J, Davis G, de VB, et al. Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press, Geneva, Cambridge 2000*.
- [16] Pachauri RK, Mayer Leo, Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate change 2014 : synthesis report*. 2015.
- [17] Mazarella L. Energy retrofit of historic and existing buildings. the legislative and regulatory point of view. *Energy and Buildings 2015*; 95: 23–31.
- [18] SPPC - Sociedade para a Preservação do Património Construído. Carta de Veneza, 1964.
- [19] Maia J, Ramos NMM, Veiga R. Evaluation of the hygrothermal properties of thermal rendering systems. *Build Environ 2018*; 144: 437–449.
- [20] Cassar M. *Sustainable Heritage: Challenges and Strategies for the Twenty-First Century*. 2009.
- [21] Frasca F, Cornaro C, Siani AM. Performance assessment of a heat and moisture dynamic simulation model in IDA ICE by the comparison with WUFI Plus. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018*; 364. DOI: 10.1088/1757-899X/364/1/012024.
- [22] Yang Z, Becerik-Gerber B. A model calibration framework for simultaneous multi-level building energy simulation. *Applied Energy, 2015*; 149: 415–431.
- [23] Deser C, Knutti R, Solomon S. Communication of the role of natural variability in future North American climate. *Nature Climate Change 2012*; 2: 775–779.
- [24] Coelho GBA, Silva HE, Henriques FMA. Calibrated hygrothermal simulation models for historical buildings. *Building and Environment, 2018*; 142: 439–450.
- [25] Roberti F, Oberegger UF, Gasparella A. Calibrating historic building energy models to hourly indoor air and surface temperatures: Methodology and case study. *Energy Build 2015*; 108: 236–243.
- [26] WUFI® Plus / WUFI® Passive Updates | WUFI (en), <https://wufi.de/en/software/wufi-plus/wufi-plus-wufi-passive-updates/> (accessed 12 September 2022).
- [27] Coelho G. *Optimization of historic buildings that house artefacts considering climate change*. Tese Doutorado, FCT-UNL, 2020.
- [28] Antretter F, Winkler M, Fink M, et al. *WUFI ® Plus 3.1 Manual Authors*, www.wufi-wiki.com.
- [29] Coelho GBA, Entradas Silva H, Henriques FMA. Impact of climate change in cultural heritage: from energy consumption to artefacts’ conservation and building rehabilitation. *Energy and Buildings, 2020*; 224. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.110250.
- [30] Legnér M. On the early history of museum environment control: Nationalmuseum and Gripsholm Castle in Sweden, C. 1866-1932. *Studies in Conservation 2011*; 56: 125–137.
- [31] Bratasz Ł. Allowable microclimatic variations for painted wood. *Studies in Conservation 2013*; 58: 65–79.

- [32] Padfield Timothy, Borchersen Karen, Christensen MChr, et al. *Museum microclimates : contributions to the Copenhagen conference 19-23 November 2007*. National Museum of Denmark, 2007.
- [33] Thomson G. The Museum Environment. In: *Butterworth-Heinemann*. 1986.
- [34] European Committee for Standardization (CEN). EN 15757:2010. *Conservation of Cultural Property - Specifications for temperature and relative humidity to limit climate-induced mechanical damage in organic hygroscopic materials, 2010*.
- [35] Camuffo D. *Microclimate for Cultural Heritage: Conservation, Restoration, and Maintenance of Indoor and Outdoor Monuments*. New York, USA, 2014.
- [36] Silva HE, Henriques FMA. Hygrothermal analysis of historic buildings: Statistical methodologies and their applicability in temperate climates. *Structural Survey* 2016; 34: 12–23.
- [37] Silva HE, Henriques FMA. Microclimatic analysis of historic buildings: A new methodology for temperate climates. *Build Environ* 2014; 82: 381–387.
- [38] Fanger PO. *Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering*. Copenhagen, Denmark: Danish Technical Press, 1970.
- [39] Fabbri K. The Indices of Feeling—Predicted Mean Vote PMV and Percentage People Dissatisfied PPD. In: *Indoor Thermal Comfort Perception*. Springer International Publishing, 2015, pp. 75–125.
- [40] American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). *ASHRAE 55:2013*. 2013.
- [41] ISO 7730:2005. Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. *International Organization for Standardization (ISO)*.
- [42] de la Fuente D, Vega JM, Viejo F, et al. Mapping air pollution effects on atmospheric degradation of cultural heritage. *Journal of Cultural Heritage*, 2013; 14: 138–145.
- [43] van Schijndel AWMJ, Schellen HLH. Mapping future energy demands for European museums. *J Cult Herit* 2018; 31: 189–201.
- [44] Sardella A, Palazzi E, von Hardenberg J, et al. Risk Mapping for the Sustainable Protection of Cultural Heritage in Extreme Changing Environments. DOI: 10.3390/atmos11070700.
- [45] Leissner J, Kilian R, Kotova L, et al. Climate for culture: Assessing the impact of climate change on the future indoor climate in historic buildings using simulations. *Heritage Science*, 2015; 3. DOI: 10.1186/s40494-015-0067-9.
- [46] Huijbregts Z, Martens MHJ, Schijndel van, AWM, et al. Computer modelling to evaluate the risks of damage to objects exposed to varying indoor climate conditions in the past, present, and future. In: *Contributions to building physics : proceedings of the 2nd central European conference on building physics*. 2013.
- [47] Camuffo D, Pagan E, Rissanen S, et al. An advanced church heating system favourable to artworks: A contribution to European standardisation. *J Cult Herit* 2010; 11: 205–219.

- [48] Camuffo D, Brimblecombe P, van Grieken R, et al. *Indoor air quality at the Correr Museum, Venice, Italy*. 1999.
- [49] Kikumoto H, Ooka R, Arima Y, et al. Study on the future weather data considering the global and local climate change for building energy simulation. *Sustain Cities Soc* 2015; 14: 404–413.
- [50] Moreno M, Ortiz R, Cagigas-Muñiz D, et al. ART-RISK 3.0 a fuzzy-based platform that combine GIS and expert assessments for conservation strategies in cultural heritage. *Journal of Cultural Heritage*, 2022.
- [51] Santos P, Gervásio H, Simões da Silva L, et al. Influence of climate change on the energy efficiency of light-weight steel residential buildings. *Civil Engineering and Environmental Systems* 2011; 28: 325–352.
- [52] Ozarisoy B, Elsharkawy H. Assessing overheating risk and thermal comfort in state-of-the-art prototype houses that combat exacerbated climate change in UK. *Energy and Buildings*, 2019; 187: 201–217.
- [53] Gaspari J, Fabbri K. A Study on the Use of Outdoor Microclimate Map to Address Design Solutions for Urban Regeneration. In: *Energy Procedia*. Elsevier Ltd, 2017, pp. 500–509.
- [54] Zhang Y, Chen W, Riseborough DW. Transient projections of permafrost distribution in Canada during the 21st century under scenarios of climate change. *Glob Planet Change* 2008; 60: 443–456.
- [55] Igreja de São Cristovão - Lisboa | Guia para visitar em 2022 - oGuia, <https://www.guiadacidade.pt/pt/poi-igreja-de-sao-cristovao-17801> (accessed 15 September 2022).
- [56] Monsalve M. *Igreja Paroquial de São Cristóvão: relatório de inventário e diagnóstico*. Lisboa: Lisboa: Igreja Paroquial de São Cristóvão, 2011.
- [57] Silva HE, Henriques FMA. Preventive conservation of historic buildings in temperate climates. The importance of a risk-based analysis on the decision-making process. *Energy and Buildings*, 2015; 107: 26–36.
- [58] Antretter F, Künzle H, Winkler M, et al. *WUFI® Plus-Fundamentals*. 2017.
- [59] Skartveit A, Asle Olseth J, Tuft ME. *An hourly diffuse fraction model with correction for variability and surface albedo*. 1998.
- [60] Lanini F. *Division of Global Radiation into Direct Radiation and Diffuse Radiation (MSc dissertation)*. Faculty of Science, University of Bern, 2010.
- [61] European Committee for Standardization (CEN). EN ISO 15927-4:2005. Hygrothermal performance of buildings - Calculation and presentation of climatic data - Part 4: Hourly data for assessing the annual energy use for heating and cooling, 2005.
- [62] World Meteorological Organization (WMO). *Calculation of monthly and annual 30-year standard normals*. Meeting of Experts, 1989.
- [63] EnergyPlus. EnergyPlus - Version 8.8.0. *US Department of Energy's (DOE) - Building Technologies Office (BTO)*.

- [64] Kusuda PR. *Earth Temperatures and Thermal Diffusivity at Selected Stations in the United States*. 1965.
- [65] Xing L, Spitler JD. Prediction of undisturbed ground temperature using analytical and numerical modeling. Part I: Model development and experimental validation. *Sci Technol Built Environ* 2017; 23: 787–808.
- [66] U.S. Department of Energy. *Engineering Reference (version 8.8.0)*. 2017.
- [67] U.S. Department of Energy. *Auxiliary Programs (version 8.8.0)*. 2017.
- [68] U.S. Department of Energy. *Input Output Reference (version 8.8.0)*. 2017.
- [69] Lee ES. *An improved hydronic loop system solution algorithm with a zone-coupled horizontal ground heat exchanger model for whole building energy simulation*. 2006.
- [70] Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment (CORDEX), <https://esgf-data.dkrz.de/search/cordex-dkrz/> (accessed 19 November 2022).
- [71] Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA, IP), <https://www.ipma.pt/pt/educativa/tempo.clima/> (accessed 10 October 2022).
- [72] Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA, IP) - Clima Normais, <https://www.ipma.pt/pt/oclima/normais.clima/> (accessed 10 October 2022).
- [73] Köppen W. *Versuch einer Klassifikation der Klimate, vorzugsweise nach ihren Beziehungen zur Pflanzenwelt*.
- [74] Kottek M, Grieser J, Beck C, et al. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift* 2006; 15: 259–263.
- [75] SCE.ER, <https://www.dgeg.gov.pt/pt/areas-setoriais/energia/energias-renovaveis-e-sustentabilidade/sce-er/> (accessed 18 October 2022).
- [76] Maritimidade e Continentalidade - InfoEscola, <https://www.infoescola.com/geografia/maritimidade-e-continentalidade/> (accessed 19 November 2022).

Anexo A. Classificação de Köppen

Quadro A.1 - Código para determinar as classificações de Köppen, para os principais climas e respectivos subclimas

Type	Description	Criterion
A	Equatorial climates	$T_{\min} \geq +18\text{ °C}$
Af	Equatorial rainforest, fully humid	$P_{\min} \geq 60\text{ mm}$
Am	Equatorial monsoon	$P_{\text{ann}} \geq 25(100 - P_{\min})$
As	Equatorial savannah with dry summer	$P_{\min} < 60\text{ mm in summer}$
Aw	Equatorial savannah with dry winter	$P_{\min} < 60\text{ mm in winter}$
B	Arid climates	$P_{\text{ann}} < 10 P_{\text{th}}$
BS	Steppe climate	$P_{\text{ann}} > 5 P_{\text{th}}$
BW	Desert climate	$P_{\text{ann}} \leq 5 P_{\text{th}}$
C	Warm temperate climates	$-3\text{ °C} < T_{\min} < +18\text{ °C}$
Cs	Warm temperate climate with dry summer	$P_{\text{smin}} < P_{\text{wmin}}, P_{\text{wmax}} > 3 P_{\text{smin}}$ and $P_{\text{smin}} < 40\text{ mm}$
Cw	Warm temperate climate with dry winter	$P_{\text{wmin}} < P_{\text{smin}}$ and $P_{\text{smax}} > 10 P_{\text{wmin}}$
Cf	Warm temperate climate, fully humid	neither Cs nor Cw
D	Snow climates	$T_{\min} \leq -3\text{ °C}$
Ds	Snow climate with dry summer	$P_{\text{smin}} < P_{\text{wmin}}, P_{\text{wmax}} > 3 P_{\text{smin}}$ and $P_{\text{smin}} < 40\text{ mm}$
Dw	Snow climate with dry winter	$P_{\text{wmin}} < P_{\text{smin}}$ and $P_{\text{smax}} > 10 P_{\text{wmin}}$
Df	Snow climate, fully humid	neither Ds nor Dw
E	Polar climates	$T_{\text{max}} < +10\text{ °C}$
ET	Tundra climate	$0\text{ °C} \leq T_{\text{max}} < +10\text{ °C}$
EF	Frost climate	$T_{\text{max}} < 0\text{ °C}$

Quadro A.2 - Código para determinar as classificações de Köppen, para a terceira letra da classificação

Type	Description	Criterion
h	Hot steppe / desert	$T_{\text{ann}} \geq +18\text{ °C}$
k	Cold steppe /desert	$T_{\text{ann}} < +18\text{ °C}$
a	Hot summer	$T_{\text{max}} \geq +22\text{ °C}$
b	Warm summer	not (a) and at least 4 $T_{\text{mon}} \geq +10\text{ °C}$
c	Cool summer and cold winter	not (b) and $T_{\min} > -38\text{ °C}$
d	extremely continental	like (c) but $T_{\min} \leq -38\text{ °C}$

Anexo B. Análise climatológica dos climas seleccionados

Anexo B.1 Clima do Porto

Estatísticas climáticas		
	Referência	Porto
i Estação de aquecimento		
Período:	6.2	6.2 meses
T média:	9.9	9.9 °C
Graus-dia:	1250	1250 °C
i Estação de arrefecimento		
T média:	20.9	20.9 °C

Figura B.1 - Estatísticas climáticas das estações de aquecimento e arrefecimento do Porto

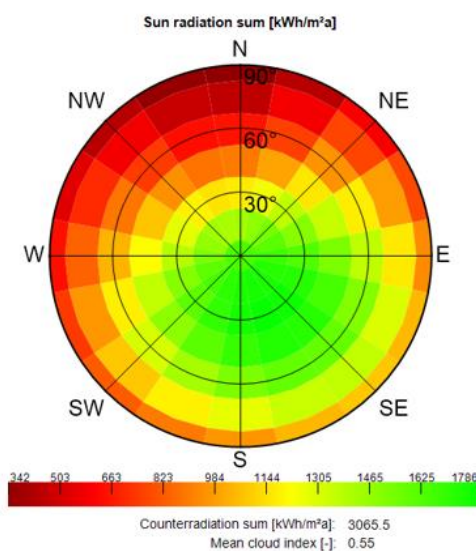


Figura B.2 - Distribuição direccional da radiação solar, retirado do programa de cálculo WUFI® para ficheiro climático do Porto

Quadro B.1 - Dados mensais médios: das temperaturas médias, mínimas e máximas (T média, T min e T max), da irradiação solar global diária (G), da Humidade Relativa (HR) e da quantidade de precipitação no Porto

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
T média	9,9	11	12,6	13,9	16,2	19,7	21,8	21,7	20,3	16,9	13,4	11,2	°C
T min	2,2	3,5	3,6	5,7	7,3	8,6	13,6	12,9	10	6,7	4,9	3,8	
T max	17,2	20,1	21,4	22,1	25,4	27,5	29	32,7	28	25,2	20,8	18,1	
G	2,3	3,2	5,4	6,8	8,4	9,3	9,7	8,4	6,2	4,1	2,6	1,8	kWh/m²
HR	87	85	80	78	77	75	76	78	81	85	87	86	%
Precipitação	142,4	126,7	81,5	96,4	89,4	42,9	16,5	23,3	61,6	132,1	152,9	181,4	mm

Anexo B.2 Clima de Lisboa

Estatísticas climáticas		
	Referência	Lisboa
i	Estação de aquecimento	
	Período:	5.3 5.3 meses
	T média:	10.8 10.8 °C
	Graus-dia:	1071 1071 °C
i	Estação de arrefecimento	
	T média:	21.7 21.7 °C

Figura B.3 - Estatísticas climáticas das estações de aquecimento e arrefecimento de Lisboa

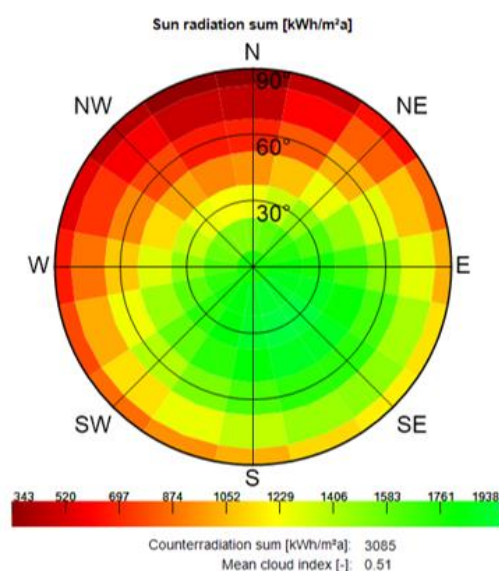


Figura B.4 - Distribuição direccional da radiação solar, retirado do programa de cálculo WUFI® para ficheiro climático de Lisboa

Quadro B.2 - Dados mensais médios: das temperaturas médias, mínimas e máximas (T média, T min e T max), da irradiação solar global diária (G), da Humidade Relativa (HR) e da quantidade de precipitação em Lisboa

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
T média	10,8	11,8	13,5	14,7	16,8	20,1	22,4	22,6	21,5	18	14,3	12	°C
T min	4,6	3,7	4,4	7,2	6,5	12	11,7	13,1	13,8	8,7	7,3	4,5	
T max	18,9	18,9	21,5	23,2	25,6	28,5	31,7	32,1	29,8	25,1	22,6	21,4	
G	2,9	3,6	5,8	7,2	8,8	9,5	10,2	8,7	6,7	4,7	3,1	2,3	kWh/m ²
HR	84	82	78	76	75	74	73	74	77	81	83	85	%
Precipitação	96,8	90,2	51,2	64,7	55,6	17,2	6,1	6,8	28,5	79,8	107,1	121,8	mm

Anexo B.3 Clima de Faro

Estatísticas climáticas		
	Referência	Faro
Estação de aquecimento		
Período:	4.8	4.8 meses
T média:	11.3	11.3 °C
Graus-dia:	987	987 °C
Estação de arrefecimento		
T média:	23.1	23.1 °C

Figura B.5 - Estatísticas climáticas das estações de aquecimento e arrefecimento de Faro

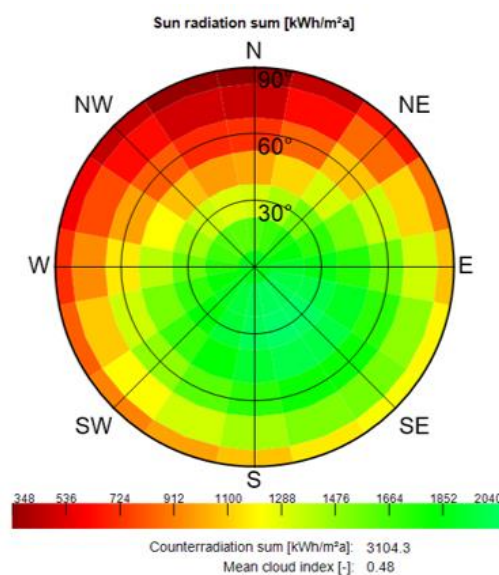


Figura B.6 - Distribuição direccional da radiação solar, retirado do programa de cálculo WUFI® para ficheiro climático de Faro

Quadro B.3 - Dados mensais médios: das temperaturas médias, mínimas e máximas (T média, T min e T max), da irradiação solar global diária (G), da Humidade Relativa (HR) e da quantidade de precipitação em Faro

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
T média	11,3	12,1	13,8	15,1	17,6	21,3	24,3	24,4	22,5	18,6	14,9	12,6	°C
T min	4,3	3,8	5,6	5,3	10,1	11,6	14,5	14,3	12,1	11,2	7,1	3,3	
T max	19,6	20,7	24	24,5	25,7	32,1	35	34,1	33,9	27,3	22,9	21,1	
G	3,2	3,9	6,3	7,5	9,1	9,8	10,2	9,3	6,9	5	3,4	2,8	kWh/m²
HR	85	83	77	73	69	66	63	64	69	77	82	85	%
Precipitação	62,7	63,9	34,9	40,6	20,1	6,6	1,9	3,5	12,5	63,3	83,5	115,6	mm

Anexo B.4 Clima de Bragança

Estatísticas climáticas		
	Referência	Bragança
i Estação de aquecimento		
Período:	7.3	7.3 meses
T média:	5.5	5.5 °C
Graus-dia:	2015	2015 °C
i Estação de arrefecimento		
T média:	21.5	21.5 °C

Figura B.7 - Estatísticas climáticas das estações de aquecimento e arrefecimento de Bragança

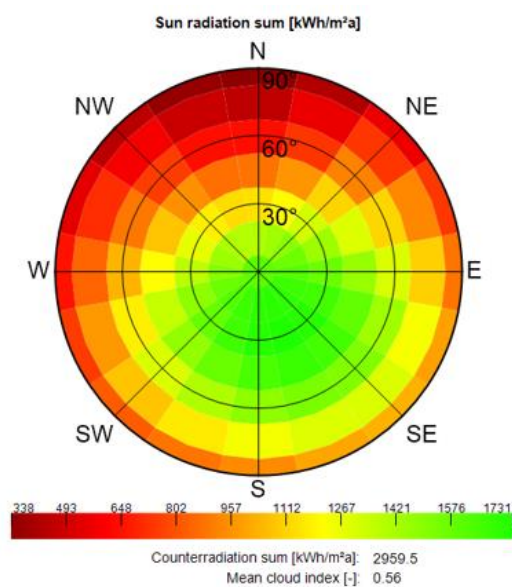


Figura B.8 - Distribuição direccional da radiação solar, retirado do programa de cálculo WUFI® para ficheiro climático de Bragança

Quadro B.4 - Dados mensais médios: das temperaturas médias, mínimas e máximas (T média, T min e T max), da irradiação solar global diária (G), da Humidade Relativa (HR) e da quantidade de precipitação em Bragança

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
T média	5,5	7,1	9,6	11,4	15	19,8	23,2	23,1	19,9	14,5	9,5	6,7	°C
T min	-2,1	-2,3	0	-0,7	4,9	9,3	10,8	12	6,7	3,8	0,5	-1,2	
T max	13,8	17,9	20	21,9	26,4	32,6	35,5	35,9	31,2	24,3	17,6	13,6	
G	2,3	3,1	5,2	6,5	8,1	9,2	9,4	8,5	6,1	3,9	2,5	1,8	kWh/m²
HR	88	85	78	74	71	64	60	61	69	79	85	88	%
Precipitação	95,8	75	44,3	62,1	70	38,7	19,6	18,4	45	84,8	86	118,6	mm

Anexo B.5 Clima de Portalegre

Estatísticas climáticas		
	Referência	Portalegre
i Estação de aquecimento		
Período:	5.3	5.3 meses
T média:	9.6	9.6 °C
Graus-dia:	1221	1221 °C
i Estação de arrefecimento		
T média:	24.5	24.5 °C

Figura B.9 - Estatísticas climáticas das estações de aquecimento e arrefecimento de Portalegre

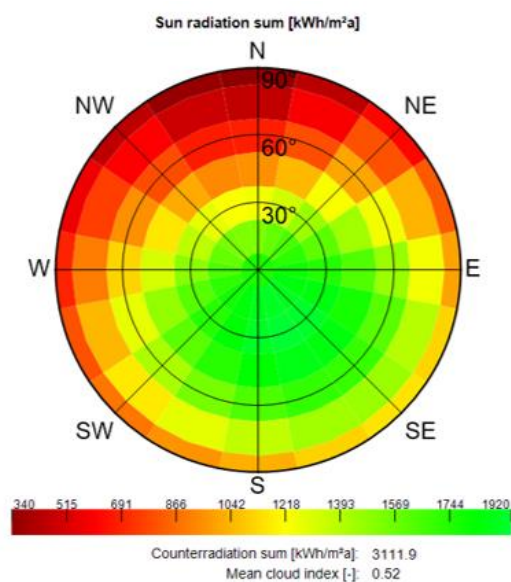


Figura B.10 - Distribuição direccional da radiação solar, retirado do programa de cálculo WUFI® para ficheiro climático de Portalegre

Quadro B.5 - Dados mensais médios: das temperaturas médias, mínimas e máximas (T média, T min e T max), da irradiação solar global diária (G), da Humidade Relativa (HR) e da quantidade de precipitação em Portalegre

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
T média	9,6	10,9	13,1	14,7	17,9	22,6	26	25,9	23,3	18,2	13,4	10,7	°C
T min	3,1	1,4	4,9	3,6	9,4	12,2	14,9	12,7	9,5	8	6,4	2,7	
T max	19	19	23,6	22,6	31,3	33,8	39	39	35,3	27,6	21,1	17,9	
G	2,8	3,8	5,7	7	8,7	9,5	10,1	9	6,7	4,5	3	2,3	kWh/m ²
HR	84	82	76	74	71	66	61	63	68	76	81	84	%
Precipitação	109,6	95,5	63,3	78,4	67,5	31,6	7,5	8,5	42,1	97,5	114,9	136	mm

Anexo B.6 Clima de Beja

Estatísticas climáticas		
	Referência	Beja
Estação de aquecimento		
Período:	5.0	5.0 meses
T média:	10.7	10.7 °C
Graus-dia:	1068	1068 °C
Estação de arrefecimento		
T média:	24.7	24.7 °C

Figura B.11 - Estatísticas climáticas das estações de aquecimento e arrefecimento de Beja

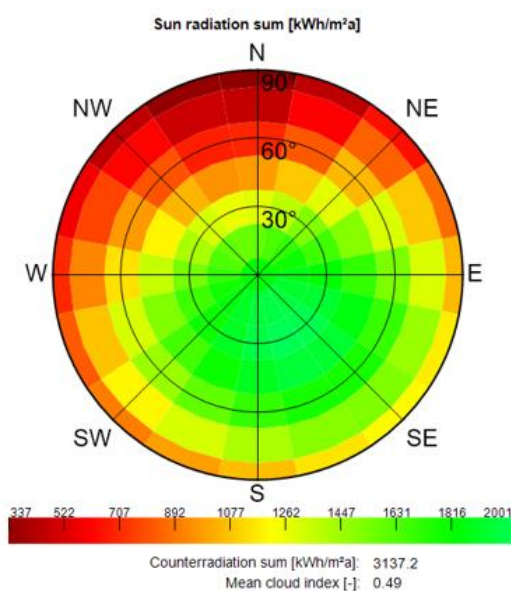


Figura B.12 - Distribuição direccional da radiação solar, retirado do programa de cálculo WUFI® para ficheiro climático de Beja

Quadro B.6 - Dados mensais médios: das temperaturas médias, mínimas e máximas (T média, T min e T max), da irradiação solar global diária (G), da Humidade Relativa (HR) e da quantidade de precipitação em Beja

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
T média	10,7	11,7	13,7	15,3	18,4	22,8	26,1	26	23,7	19	14,6	11,9	°C
T min	3,2	2,1	3,1	6,1	8,9	10,3	12,2	13,3	13,7	9,9	4	3,6	
T max	19,9	20,6	24,8	24,8	28,2	34,9	36,9	38,5	35,2	29,5	25,9	20	
G	3,1	3,7	6,1	7,3	9,1	9,6	10,2	9,1	6,9	4,9	3,4	2,5	kWh/m²
HR	87	86	80	77	72	65	62	63	70	78	84	88	%
Precipitação	73,7	61,5	42,5	62,2	47	17,6	2,9	4	24,7	63,3	71,8	100,6	mm

Anexo C. Determinação da concentração de vapor de água

Define-se a concentração de vapor de água por v , que representa a quantidade de vapor de água que existe no ar, e vem expressa em kg/m^3 , ou equivalente.

Começa-se por determinar o limite de saturação (v_s), expresso também em kg/m^3 visto que também se trata de uma concentração de vapor de água, apenas com a particularidade de se tratar do valor máximo que este pode atingir (para uma determinada temperatura). Considera-se o limite de saturação a quantidade máxima de vapor de água que o ar tem capacidade de conter, acima desta quantidade o vapor de água em excesso condensaria, ou seja, passaria para o estado líquido [10].

O cálculo do limite de saturação é determinado de acordo com o valor da temperatura θ (em $^{\circ}\text{C}$) e através das seguintes expressões (norma DIN 4108):

$$v_s = 0,6257 \cdot \frac{\left(1,098 + \frac{\theta}{100}\right)^{8,02}}{\theta + 273,15} \quad \text{C.1}$$

para valores de temperatura $\theta \geq 0^{\circ}\text{C}$, ou

$$v_s = 0,01016 \cdot \frac{\left(1,486 + \frac{\theta}{100}\right)^{12,3}}{\theta + 273,15} \quad \text{C.2}$$

para valores de temperatura entre -20°C e 0°C .

Sendo que através das simulações térmicas e higrotérmicas realizadas no WUFI®Plus são obtidos os valores de temperatura (θ) e humidade relativa (φ) interiores e com o valor da temperatura se obtém o limite de saturação (equações C.1 e C.2) facilmente de determina o valor da concentração de vapor de água (v) interior, através da seguinte expressão:

$$\varphi = \frac{v}{v_s} \cdot 100 \quad \text{C.3}$$