



# RELATÓRIO

FASE 2 | JUNHO 2020

## Identificação das Ilhas de Calor Urbano e Simulação para Áreas Críticas na Cidade de Lisboa

Cartografia  
de Vulnerabilidade Térmica:  
Mapeamento dos Efeitos  
das Ondas de Calor em Lisboa  
Face às Projecções Climáticas



# ONDAS de CALOR LISBOA

Em parceria com:



75  
anos

Cofinanciado por:





## **IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA**

**Fase 2 – Simulações microclimáticas de duas áreas críticas (Baixa  
e Alta de Lisboa): situação atual e projeções para o futuro com  
modificações no edificado**

**Relatório**

**12/06/20**

## IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 2

De acordo com o Contrato de Aquisição de Serviços Nº 19042458 designado “Identificação das Ilhas de Calor Urbano e Simulação para Áreas Críticas na Cidade de Lisboa” celebrado entre o Município de Lisboa e o Instituto de Geografia e Ordenamento do Território da Universidade de Lisboa, IGOT-ULisboa.

### FICHA TÉCNICA

<b>Coordenador</b>	António Lopes
<b>Membro da Equipa</b>	Márcia Matias
<b>Membro da Equipa</b>	Ezequiel Correia
<b>Membro da Equipa</b>	Ana Oliveira
<b>Membro da Equipa</b>	Cláudia Reis

## IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 2

### ÍNDICE

<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>4</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS</b>	<b>4</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>5</b>
1.1. JUSTIFICAÇÃO DO SOFTWARE UTILIZADO	5
1.2. AS ÁREAS CRÍTICAS ESCOLHIDAS	5
1.3. AS SIMULAÇÕES E OS DADOS METEOROLÓGICOS DE PARTIDA	7
<b>2. SIMULAÇÃO MICROCLIMÁTICA – CLIMA ATUAL E FUTURO</b>	<b>10</b>
<b>3. RESULTADOS</b>	<b>11</b>
3.1 ÁREA CRÍTICA 1: BAIXA DE LISBOA - 12:00 H	12
3.2 ÁREA CRÍTICA 1: BAIXA DE LISBOA - 19:00H	14
3.3 ÁREA CRÍTICA 2: ALTA DE LISBOA – 12:00H.	16
3.4 ÁREA CRÍTICA 2: ALTA DE LISBOA – 19:00H	19
<b>4. COMETÁRIOS AOS RESULTADOS</b>	<b>22</b>
4.1 ÁREA CRÍTICA 1: BAIXA DE LISBOA ÀS 12H (CENÁRIOS: ATUAL E FUTURO, FIGURA 8)	22
4.2 ÁREA CRÍTICA 1: BAIXA DE LISBOA ÀS 19H (CENÁRIOS: ATUAL E FUTURO, FIGURA 9)	23
4.3 ÁREA CRÍTICA 1: ALTA DE LISBOA ÀS 12H (CENÁRIOS: ATUAL E FUTURO, FIGURA 10)	23
4.4 ÁREA CRÍTICA 1: ALTA DE LISBOA ÀS 19H (CENÁRIOS: ATUAL E FUTURO, FIGURA 11)	25
4.5 COMPARAÇÃO DOS RITMOS TÉRMICOS DIÁRIOS ENTRE AS ÁREAS CRÍTICAS E OS CENÁRIOS	25
<b>5. CONCLUSÕES</b>	<b>27</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>28</b>

## Índice de Figuras

Figura 1 - Baixa de Lisboa .....	<b>Erro! Marcador não definido.</b>
Figura 2 - Alta de Lisboa (com os edifícios projetados para o futuro) .....	6
Figura 3 - Modelo completo tridimensional da Baixa de Lisboa usado para as para as simulações atuais. ....	8
Figura 4 – Modelo reduzido tridimensional da Baixa de Lisboa usado para as projeções futuras. ....	8
Figura 5 - Modelo completo tridimensional da Alta de Lisboa usado para as simulações atuais	9
Figura 6 - Modelo completo tridimensional da Alta de Lisboa usado para as projeções futuras (com o edificado projetado).....	9
Figura 7 - Anomalia entre as estações dos Restauradores e Saldanha e o Aeroporto de Lisboa, registadas pela rede de observação do IGOT (2004-2014).....	11
Figura 8 – Saídas do modelo ENVIMET, referentes à temperatura potencial do ar, humidade relativa, temperatura radiativa média, vento (direções e velocidade), e UTCI ( <i>Universal Thermal Climate Index</i> ). na Baixa de Lisboa. Situação atual .....	13
Figura 9 – Saídas do modelo ENVIMET, referentes à temperatura potencial do ar, humidade relativa, temperatura radiativa média, vento (direções e velocidade), e UTCI ( <i>Universal Thermal Climate Index</i> ) na Baixa de Lisboa. Situação futura (RCP 8.5 para o final do século XXI) .....	15
Figura 10 – Saídas do modelo ENVIMET, referentes à temperatura potencial do ar, humidade relativa, temperatura radiativa média, vento (direções e velocidade), e UTCI ( <i>Universal Thermal Climate Index</i> ) na Alta de Lisboa. Situação futura (RCP 8.5 para o final do século XXI)18	18
Figura 11 – Saídas do modelo ENVIMET, referentes à temperatura potencial do ar, humidade relativa, temperatura radiativa média, vento (direções e velocidade), e UTCI ( <i>Universal Thermal Climate Index</i> ) na Alta de Lisboa. Situação futura (RCP 8.5 para o final do século XXI)21	21
Figura 12 – Perspetiva da Baixa de Lisboa, vista de sul. Fonte: Google Earth© .....	22
Figura 13 – Perspetiva da Alta de Lisboa vista de sudeste. Fonte: Google Earth© .....	24
Figura 14 - Área de pormenor usada no modelo reduzido com indicação (a laranja) dos edifícios projetados no futuro. ....	24
Figura 15 – Anomalias térmicas dos modelos atuais e projeções futuras em relação a uma célula estável no canto superior esquerdo do modelo.....	25

## Índice de Tabelas

Tabela 1 - Metadados e parâmetros de iniciação do modelo micrometeorológico da Baixa de Lisboa: situação mediana de ICU de verão. ....	10
Tabela 2 - Metadados e parâmetros de iniciação do modelo micrometeorológico da Alta de Lisboa: situação mediana de ICU de verão. ....	10

## 1. INTRODUÇÃO

Os climas urbanos e os padrões térmicos conhecidos como ilhas de calor urbano (ICU), quando são observados à meso escala (assuntos tratados na fase 1 deste projeto), são a realização de uma multiplicidade de microclimas, cada um dependente das características climáticas regionais, e que resultam sobretudo de uma combinação multivariada de fatores locais, a saber: tipologia do edificado; grande variedade de materiais; ocupação diversificada dos solos urbanos; emissões de calor antrópico e poluentes atmosféricos, entre outros. A existência de um parque edificado mais ou menos denso (e.g. densidade de construção, volumetria), a orientação dos arruamentos (e.g. ruas orientadas aos ventos dominantes, que higienizam as ruas, versus ruas perpendiculares, que bloqueiam a ventilação), a presença ou a ausência de vegetação, os níveis de exposição das fachadas à radiação solar global (e o quanto estas refletem e emitem energia, consoante as propriedades térmicas dos materiais que as constituem), são variáveis descontínuas que determinam o balanço energético em todas as dimensões espaciais dos *canyons* urbanos.

O desafio de qualquer estudo microclimático revela-se por isso exigente, tanto no que diz respeito à recolha e tratamento dos dados, como na determinação da contribuição de cada um destes fatores locais para os microclimas urbanos

### 1.1. JUSTIFICAÇÃO DO SOFTWARE UTILIZADO

Observar localmente a influência de cada um dos fatores ambientais e físicos nos microclimas urbanos é uma tarefa morosa e delicada porque é necessário a instalação temporária de instrumentação meteorológica (temo-higrógrafos, anemómetros, piranómetros, pirgeómetros e outros), que nem sempre está disponível, durante largos períodos (geralmente meses no caso de estudos microclimáticos). Por isso, muitas vezes se utilizam com eficácia modelos micro-meteorológicos, amplamente testados e disponíveis em sistemas computacionais de média capacidade (computadores pessoais).

O software escolhido neste estudo foi o modelo micro-meteorológico tridimensional ENVI\_MET V4.4.4. O software simula os climas urbanos através dos estados atmosfera na camada limite urbana, com possibilidade de introduzir vários tipos de vegetação, diferentes arquiteturas e materiais e simular conjuntos que se adaptam aos cenários escolhidos.

As interações entre os vários espaços e a atmosfera urbana podem ter uma resolução temporal entre os 10 min e uma hora e células uma resolução espacial típica entre 0,5 e 10m (Bruse e Fler, 1998; Bruse, 2004). O ENVIMET foi desenvolvido há mais de duas décadas, contando-se milhares de estudos que o utilizam em fase de projeto ou em cenários reais de avaliação (<https://www.envi-met.com/portfolio/>).

### 1.2. AS ÁREAS CRÍTICAS ESCOLHIDAS

A escolha das áreas críticas decorreu das reuniões entre as várias equipas técnicas do projeto, tendo sido acordado que seriam escolhidos dois bairros: a Baixa e a Alta de Lisboa (a seguir designadas por Alta e Baixa). A primeira (**Erro! A origem da referência não foi encontrada.**), foi escolhida para analisar o efeito das alterações climáticas no final do século XXI numa área consolidada e central da cidade. A segunda (Figura 2), foi escolhida por se tratar de uma área em expansão, onde as novas urbanizações previstas e introduzidas no modelo do futuro

## IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 2

podem servir de referência para avaliar os impactos que o edificado pode ter nos climas locais até ao final do século XXI.

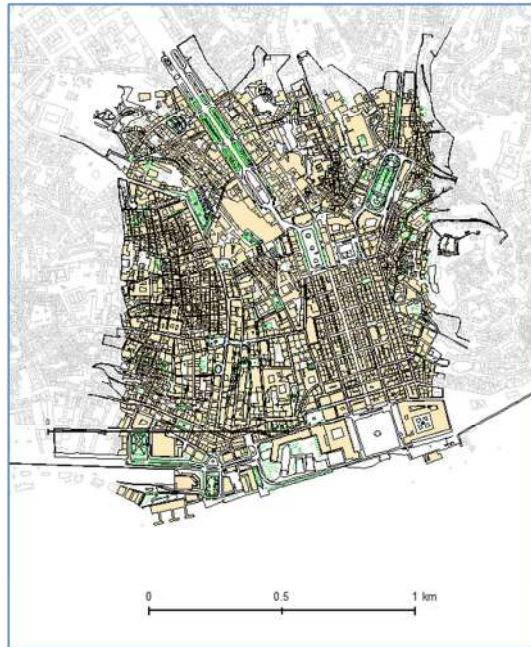


Figura 1 – Baixa de Lisboa

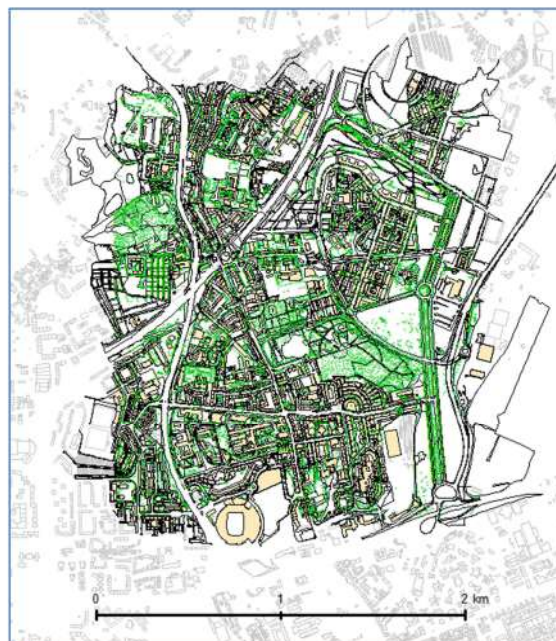


Figura 2 - Alta de Lisboa (com os edifícios projetados para o futuro).

### **1.3. AS SIMULAÇÕES E OS DADOS METEOROLÓGICOS DE PARTIDA**

As simulações requerem dois grupos de dados de input:

- a) A área de estudo com os elementos morfológicos: edifícios, plantas e tipo de solos/coberturas; e locais, tais como a latitude a longitude, altitude, entre outros;
- b) O ficheiro de configuração que contém os dados meteorológicos iniciais, sistemas de forçamento, tempo de simulação, etc.

Os modelos físicos/morfológicos foram construídos no módulo *spaces*, respeitando a ocupação do solo observável nas imagens de alta resolução publicadas pelo Google Maps e utilizando as alturas dos edifícios cedidos pelos serviços da CML.

Para a simulação do clima atual utilizaram-se os dados de um dia (12 de setembro de 2012) com condições reais aproximadas aos valores medianos da Ilha de Calor Urbano de Verão (ver relatório 1) e vento de vento do quadrante NO. Os valores horários de temperatura do ar, humidade relativa e vento (velocidade e direção) foram obtidos através da estação meteorológica da Portela/Aeroporto.

Devido a constrangimentos no tempo e capacidade de computação foram feitas simulações de duas áreas de estudo: uma maior e outra mais reduzida (serão indicadas no texto com “modelo completo” e “modelo reduzido”).

Para a simulação do clima futuro foi utilizado um cenário climático RCP 8.5 (IPCC, 2014) para o final do século XXI, obtido dos resultados publicados pelo Plano Metropolitano de Adaptação às Alterações Climáticas da AML (PMAAC-AML). Na prática projetou-se o dia considerado como representativo da ICU de verão atual (12 de setembro), somando-se os valores das anomalias das temperaturas máximas e mínimas médias de verão do RCP 8.5 publicadas no PMAAC-AML (2019) (tabelas 33 e 34) e reduzindo 5% na humidade relativa (Santos e Miranda, (2006).



**IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA  
CIDADE DE LISBOA | Fase 2**

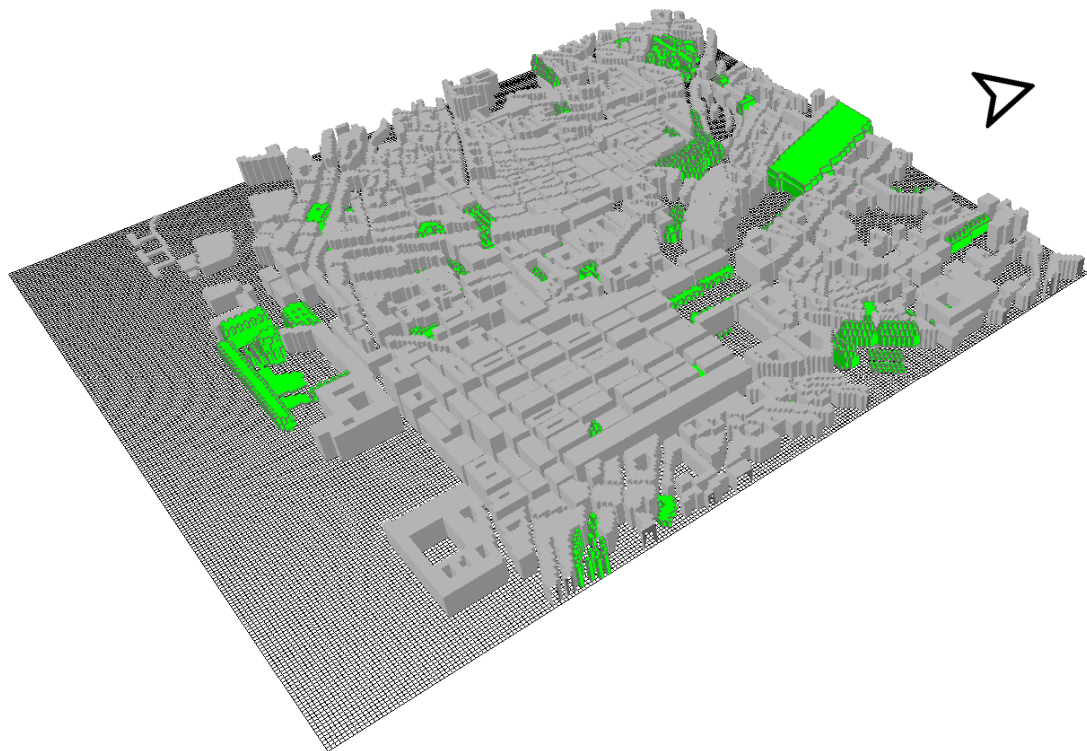


Figura 3 - Modelo completo tridimensional da Baixa de Lisboa usado para as simulações atuais.

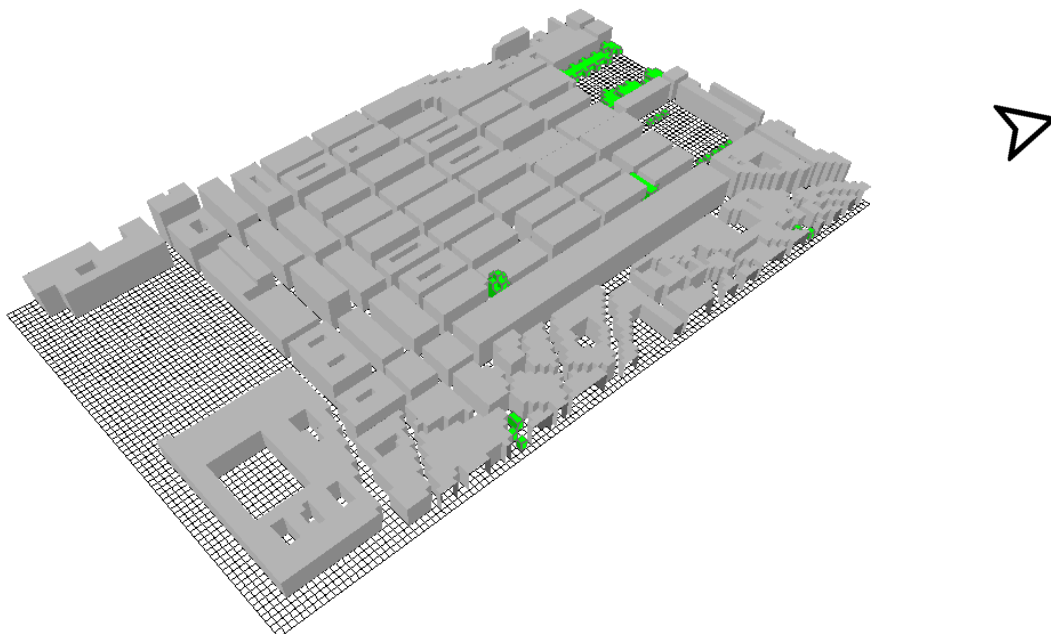


Figura 4 – Modelo reduzido tridimensional da Baixa de Lisboa usado para as projeções futuras.

**IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA  
CIDADE DE LISBOA | Fase 2**

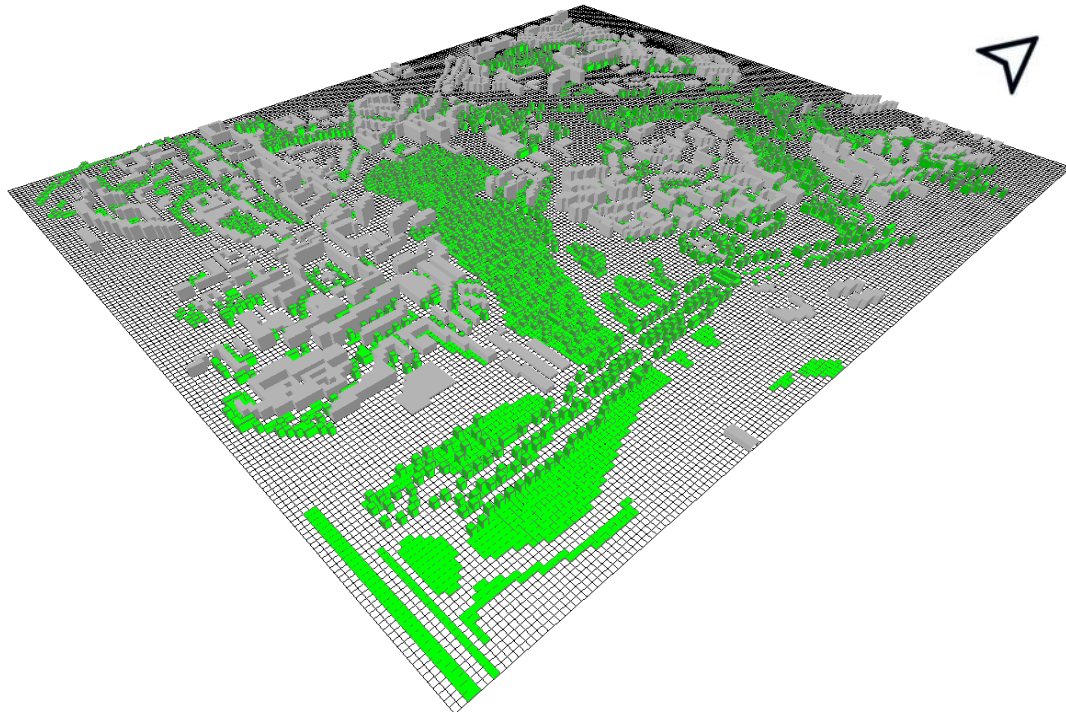


Figura 5 - Modelo completo tridimensional da Alta de Lisboa usado para as simulações atuais

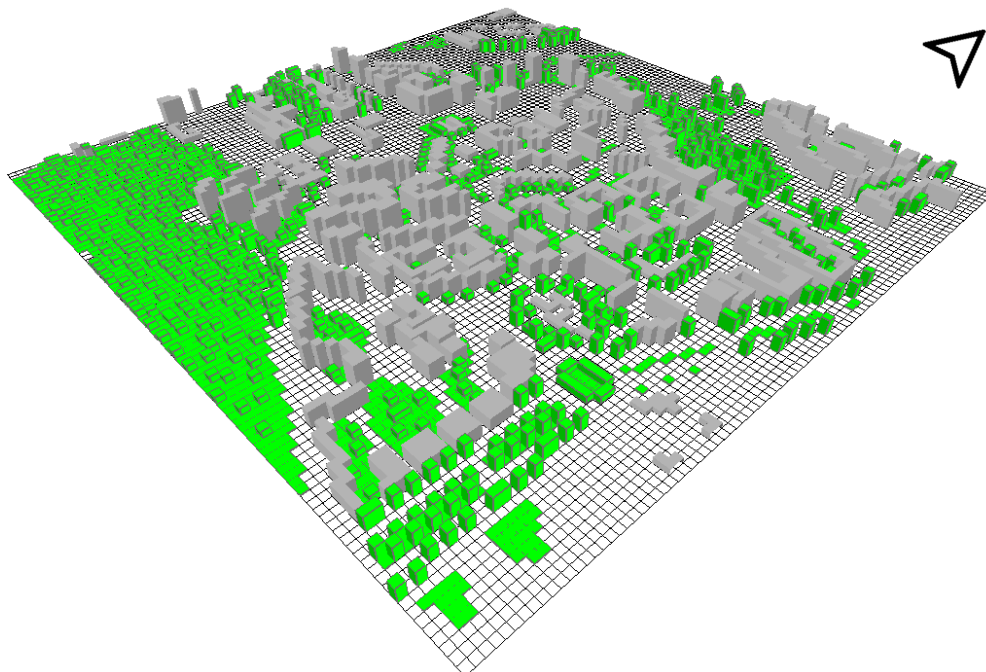


Figura 6 - Modelo completo tridimensional da Alta de Lisboa usado para as projeções futuras (com o edificado projetado)

## IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 2

### 2. SIMULAÇÃO MICROCLIMÁTICA – CLIMA ATUAL E FUTURO

Tabela 1 - Metadados e parâmetros de iniciação do modelo micrometeorológico da Baixa de Lisboa: situação mediana de ICU de verão.

Localização ( $\phi$ , $\lambda$ , alt.)	38,7 N, 9,1 W, $\approx$ 0-70m
Classificação de Köppen	Csa
Área horizontal (modelo completo)	1,38 km <sup>2</sup>
Área horizontal (modelo reduzido)	0,23 km <sup>2</sup>
Data e tempo de simulação (atual)	12/13 de setembro de 2012   48h
Data e tempo de simulação (futuro)	12/13 de setembro de 2012   48h
Dimensão: do modelo (células)   da grelha dx, dy, dz (m):	
Modelo Completo	220, 250, 50   5, 5, 5
Modelo reduzido	75, 125, 90   5, 5, 5
Rugosidade aerodinâmica ( $z_0$ ) na estação de Portela/Aeroporto (m)	0,01
Rotação do Modelo ( $^\circ$ )	343
<i>Nesting grids</i>	5
Modelo forçado:	
Velocidade do vento (m/s) e direção ( $^\circ$ ) (10m)	4,1   10
Temperatura do ar inicial – modelo atual ( $^\circ$ C) (2m)	20
Humidade relativa (%) (2m)	87
Modelo futuro: PMAAC-AML, RCP 8.5   final século XXI - (anomalias de verão adicionadas ao atual)	
Temperatura mínima ( $^\circ$ C):	29,2
Temperatura máxima ( $^\circ$ C):	34,9
Humidade relativa (%) (2m)	(-5,5% em relação ao modelo atual)

Tabela 2 - Metadados e parâmetros de iniciação do modelo micrometeorológico da Alta de Lisboa: situação mediana de ICU de verão.

Localização ( $\phi$ , $\lambda$ , alt. média)	38,8 N, 9,2 W, $\approx$ 100m
Classificação de Köppen	Csa
Área horizontal (modelo completo)	3,04 km <sup>2</sup>
Área horizontal (modelo reduzido)	0,93 km <sup>2</sup>
Data e tempo de simulação (atual)	12/13 de setembro de 2012   48h
Data e tempo de simulação (futuro)	12/13 de setembro de 2012   48h
Dimensão: do modelo (células)   da grelha dx, dy, dz (m):	
Modelo Completo	160, 190, 40   10; 10; 2
Modelo reduzido	98, 95, 40   10; 10; 2
Rugosidade aerodinâmica ( $z_0$ ) na estação de Portela/Aeroporto (m)	0,01
Rotação do Modelo ( $^\circ$ )	0
<i>Nesting grids</i>	5
Modelo forçado:	
Velocidade do vento (m/s) e direção ( $^\circ$ ) (10m)	4,1   10
Temperatura do ar inicial – modelo atual (2m)	20
Humidade relativa (2m)	87
Modelo futuro: PMAAC-AML, RCP 8.5   final século XXI - (anomalias de verão adicionadas ao atual)	
Temperatura mínima ( $^\circ$ C):	29,2
Temperatura máxima ( $^\circ$ C):	34,9
Humidade relativa (%) (2m)	(-5,5% em relação ao modelo atual)

### 3. RESULTADOS

De acordo com o que ficou demonstrado sobre a intensidade das ICU em Lisboa (Relatório 1), no verão as anomalias positivas (quando o centro da cidade se encontra mais aquecido do que a periferia), ocorrem no final da tarde (aproximadamente às 19:00h). No meio do dia (12:00h) verifica-se, pelo contrário, uma ilha de frescura - IF (fig.7). Por este motivo escolheram-se estes dois momentos do dia para ilustrar as variações de temperatura do ar, do vento (direções e velocidade), da humidade relativa e da temperatura radiativa média (parâmetro essencial para a avaliação do conforto térmico) e do UTCI (*Universal Thermal Climate Index*), este para avaliação do conforto termofisiológico humano atual e futuro. Os *layers* de informação correspondem a um corte de 1,50 e 1,80m acima do solo (consoante os modelos).

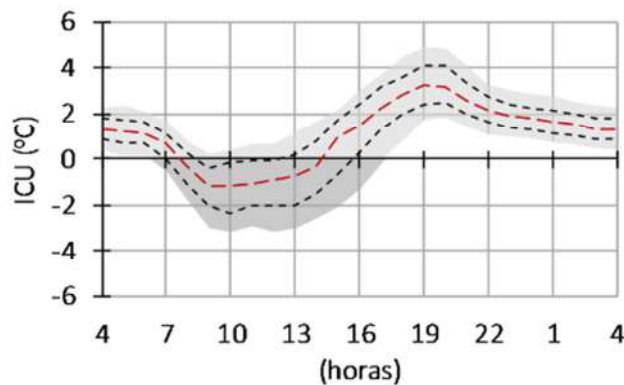
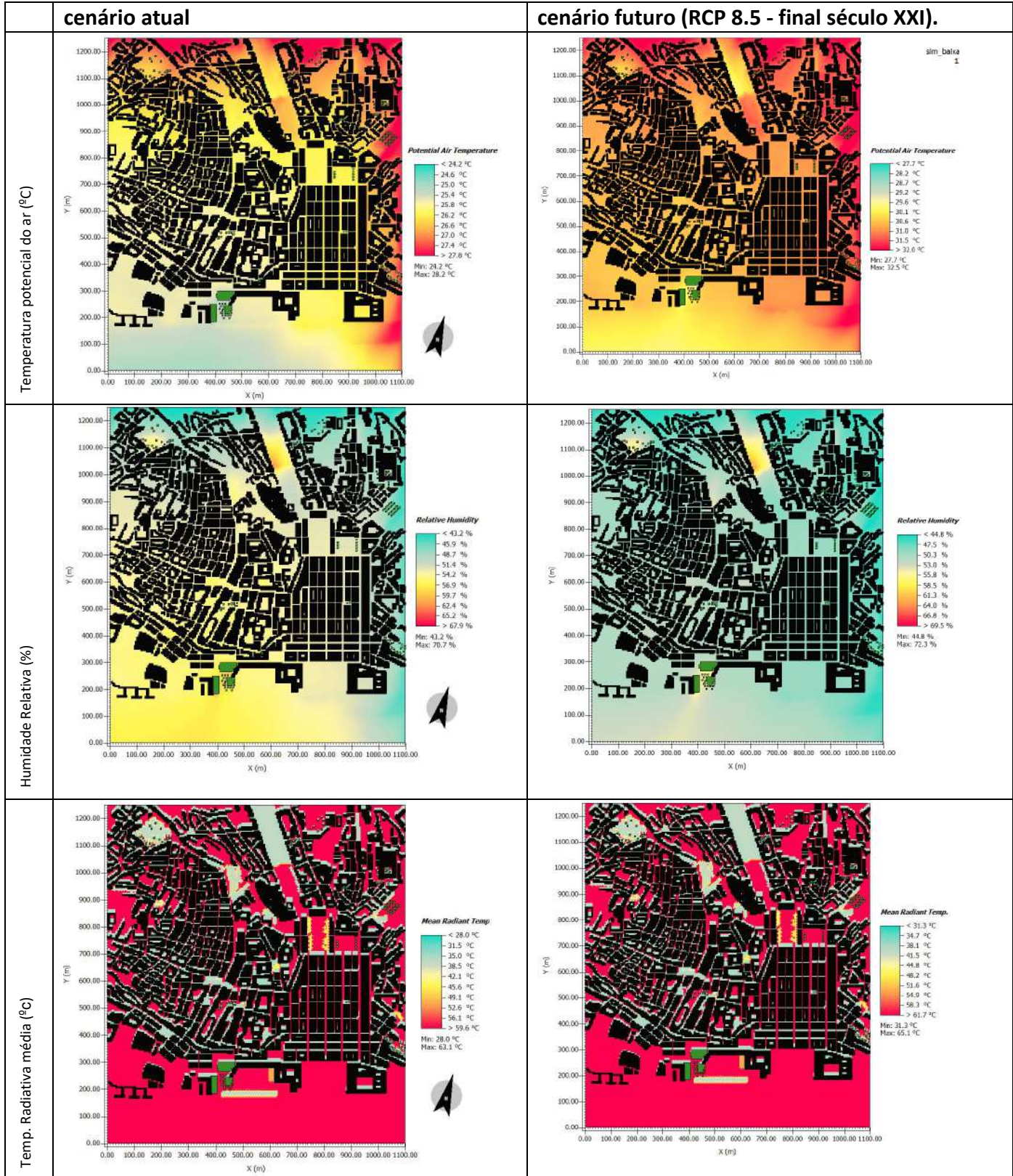


Figura 7 - Anomalia entre as estações dos Restauradores e Saldanha e o Aeroporto de Lisboa, registadas pela rede de observação do IGOT (2004-2014)

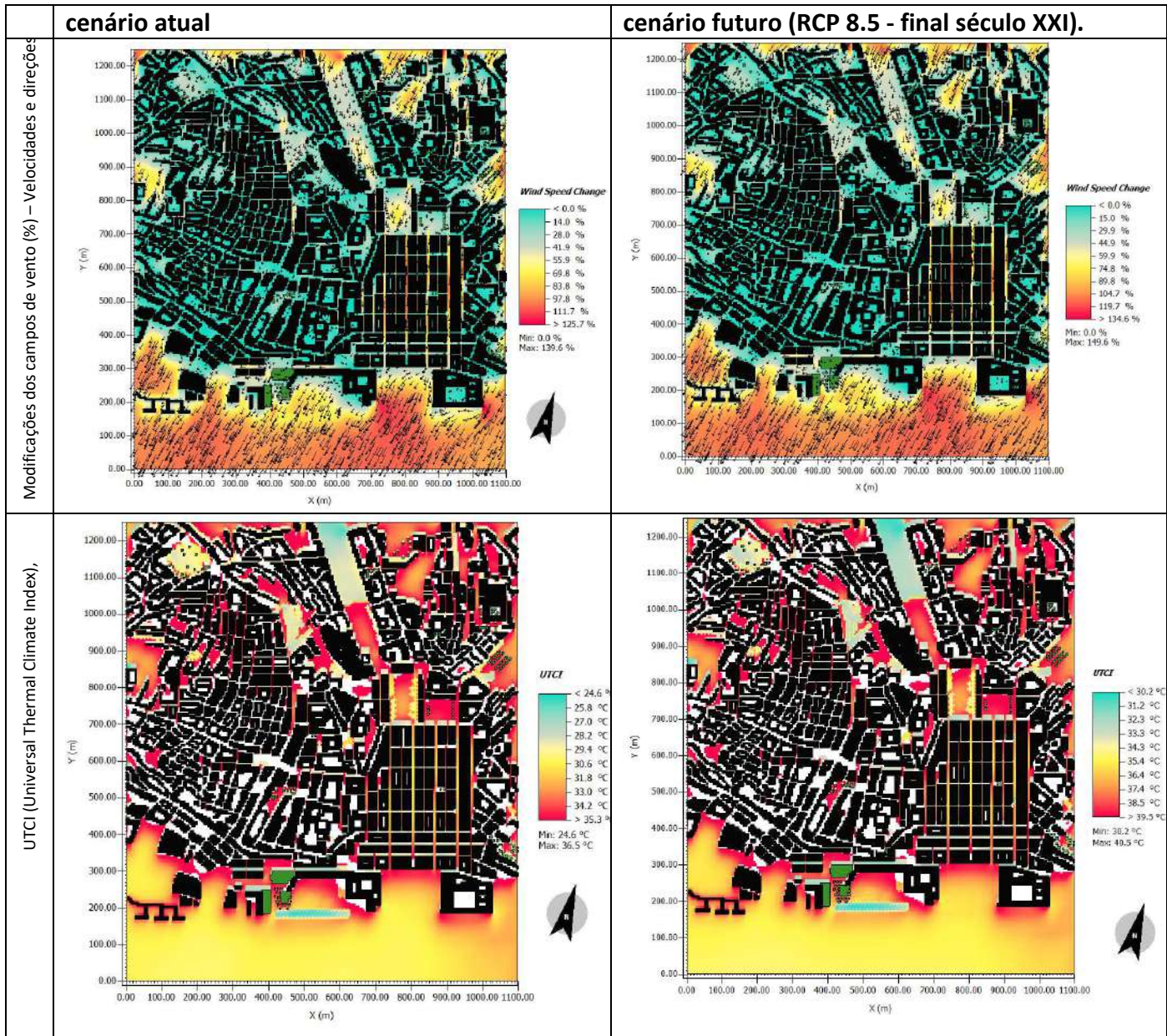
Uma nota deve ser feita acerca da leitura correta das figuras 8 a 11, tendo em atenção que as cores das escalas das variáveis meteorológicas de saída representam valores diferentes entre as 12:00h e as 19:00h. No entanto a comparação entre os cenários “atual” e “futuro” é facilitado porque os valores das escalas apenas diferem nos aumentos futuros da temperatura e variáveis derivadas (temperatura radiativa média e UTCI).

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 2

3.1 Área crítica 1: Baixa de Lisboa - 12:00 h



IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 2



UTCI Assessment Scale: categorized in terms of thermal stress

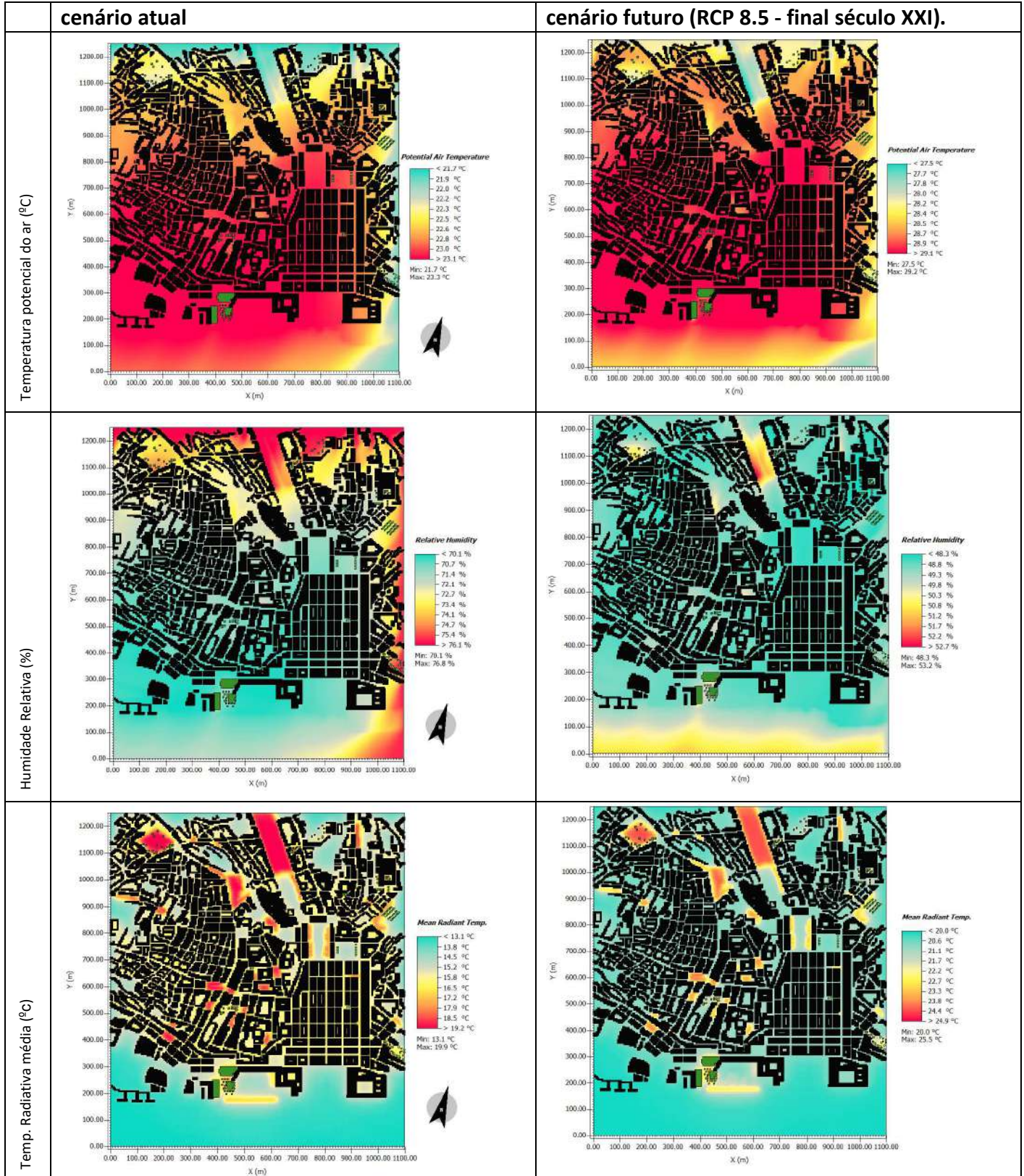
UTCI (°C) range	Stress Category
above +46	extreme heat stress
+38 to +46	very strong heat stress
+32 to +38	strong heat stress
+26 to +32	moderate heat stress
+9 to +26	no thermal stress
+9 to 0	slight cold stress
0 to -13	moderate cold stress
-13 to -27	strong cold stress
-27 to -40	very strong cold stress
below -40	extreme cold stress

Figura 8 – Saídas do modelo ENVIMET, referentes à temperatura potencial do ar, humidade relativa, temperatura radiativa média, vento (direções e velocidade), e UTCI (*Universal Thermal Climate Index*). na Baixa de Lisboa. Situação atual

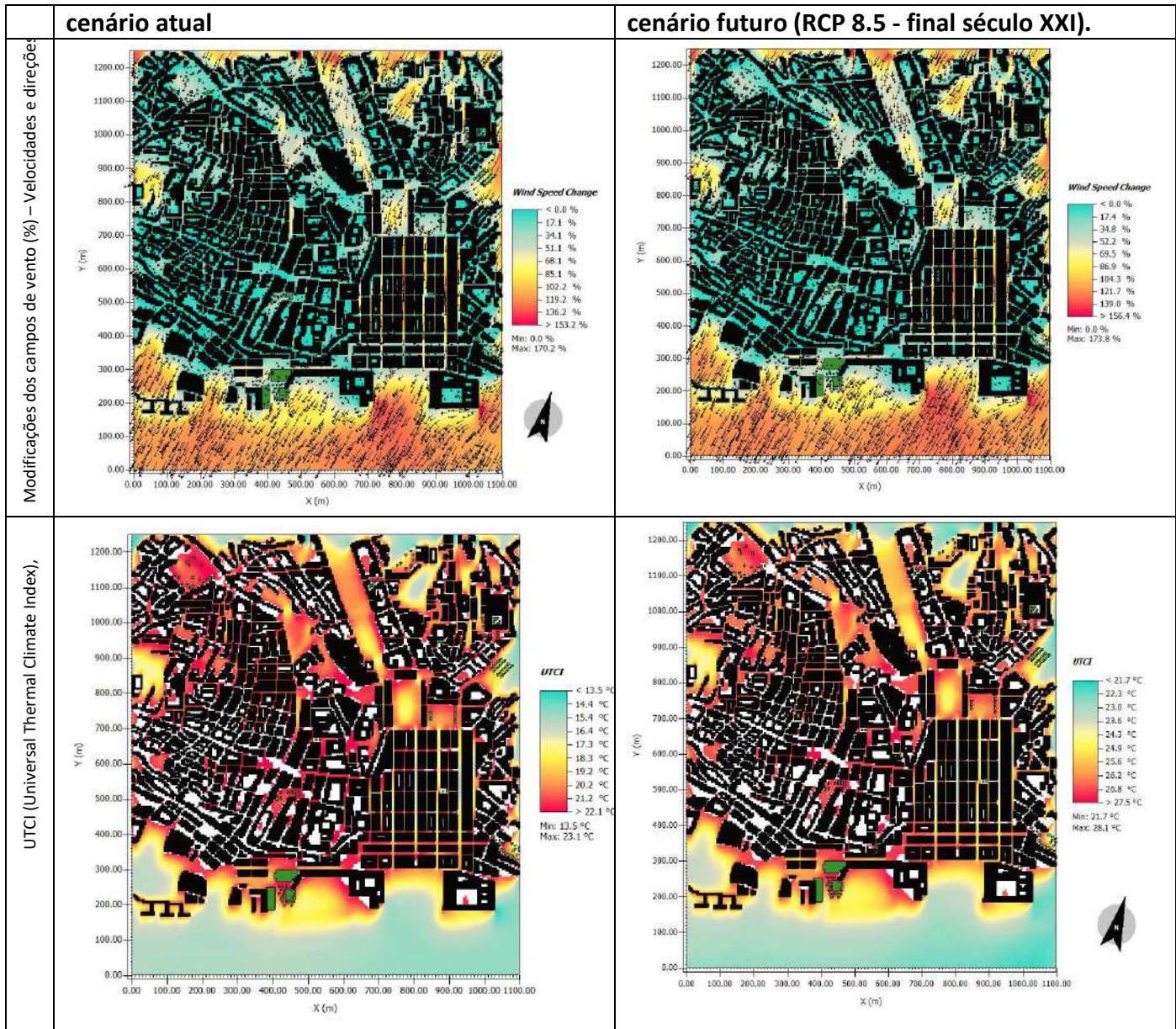
Fonte: Glossary of Terms for Thermal Physiology (2003).

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 2

3.2 Área crítica 1: Baixa de Lisboa - 19:00h



IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 2



UTCI Assessment Scale: categorized in terms of thermal stress

UTCI (°C) range	Stress Category
above +46	extreme heat stress
+38 to +46	very strong heat stress
+32 to +38	strong heat stress
+26 to +32	moderate heat stress
+9 to +26	no thermal stress
+9 to 0	slight cold stress
0 to -13	moderate cold stress
-13 to -27	strong cold stress
-27 to -40	very strong cold stress
below -40	extreme cold stress

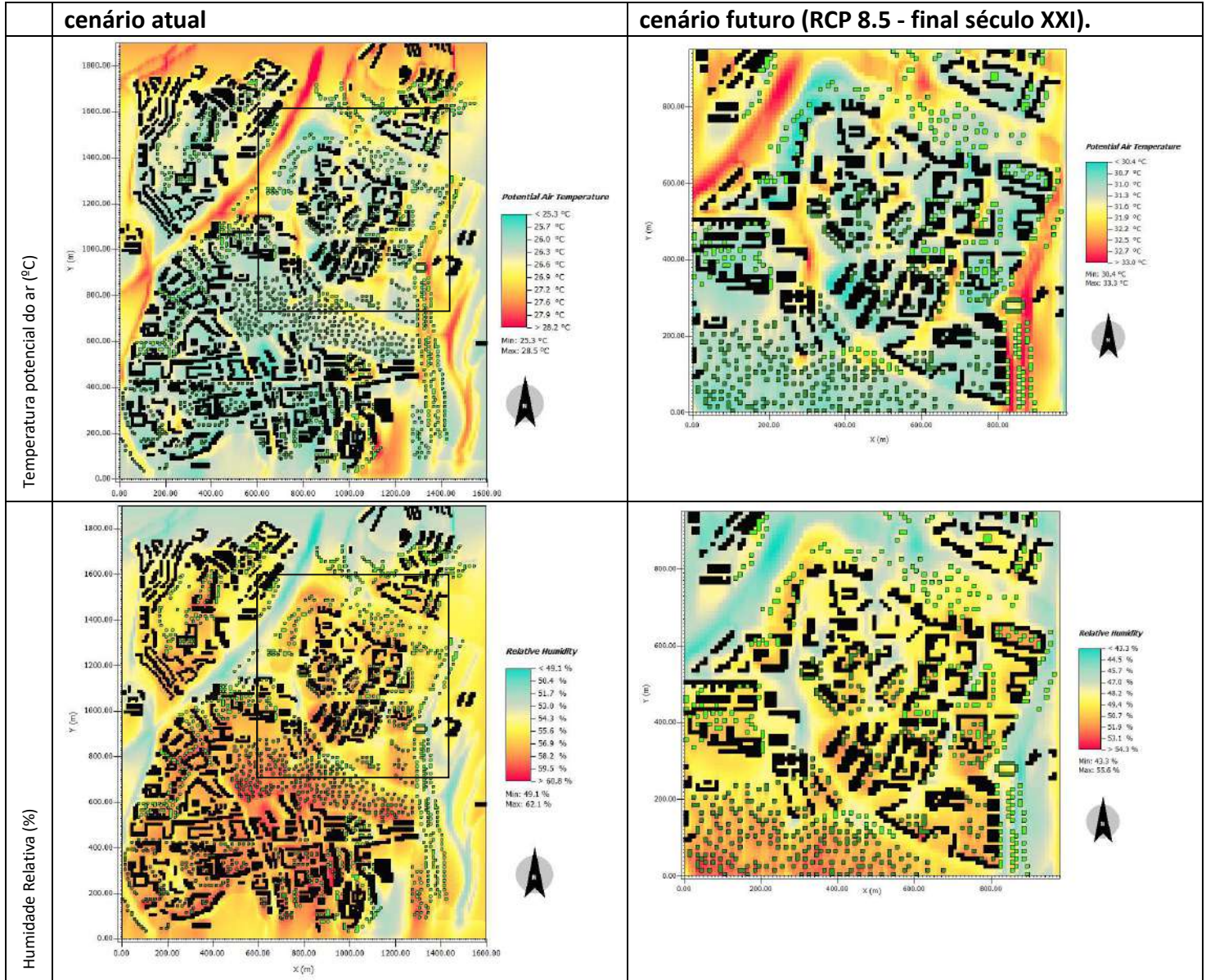
Figura 9 – Saídas do modelo ENVIMET, referentes à temperatura potencial do ar, humidade relativa, temperatura radiativa média, vento (direções e velocidade), e UTCI (*Universal Thermal Climate Index*) na Baixa de Lisboa. Situação futura (RCP 8.5 para o final do século XXI)

Fonte: Glossary of Terms for Thermal Physiology (2003).

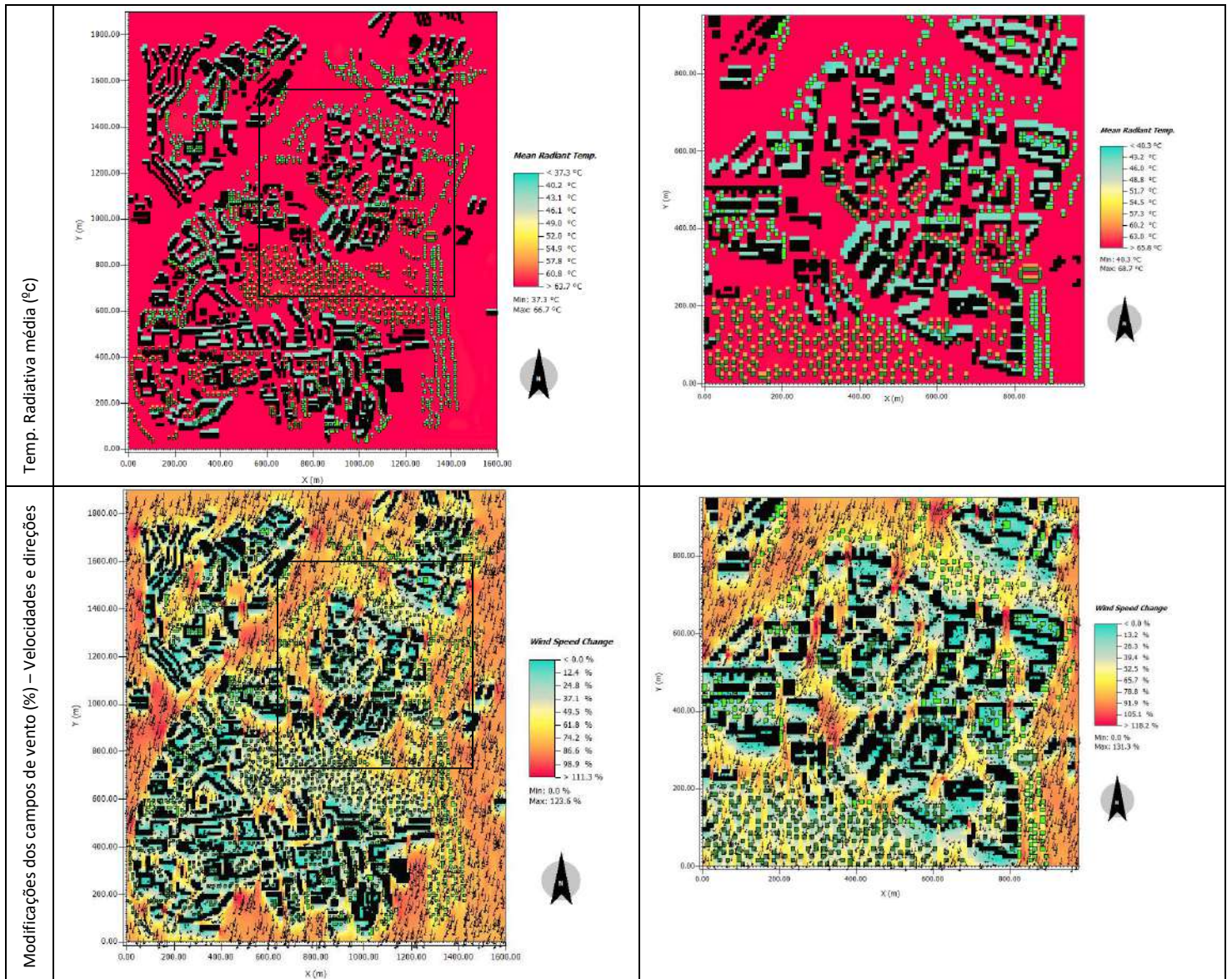


IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 2

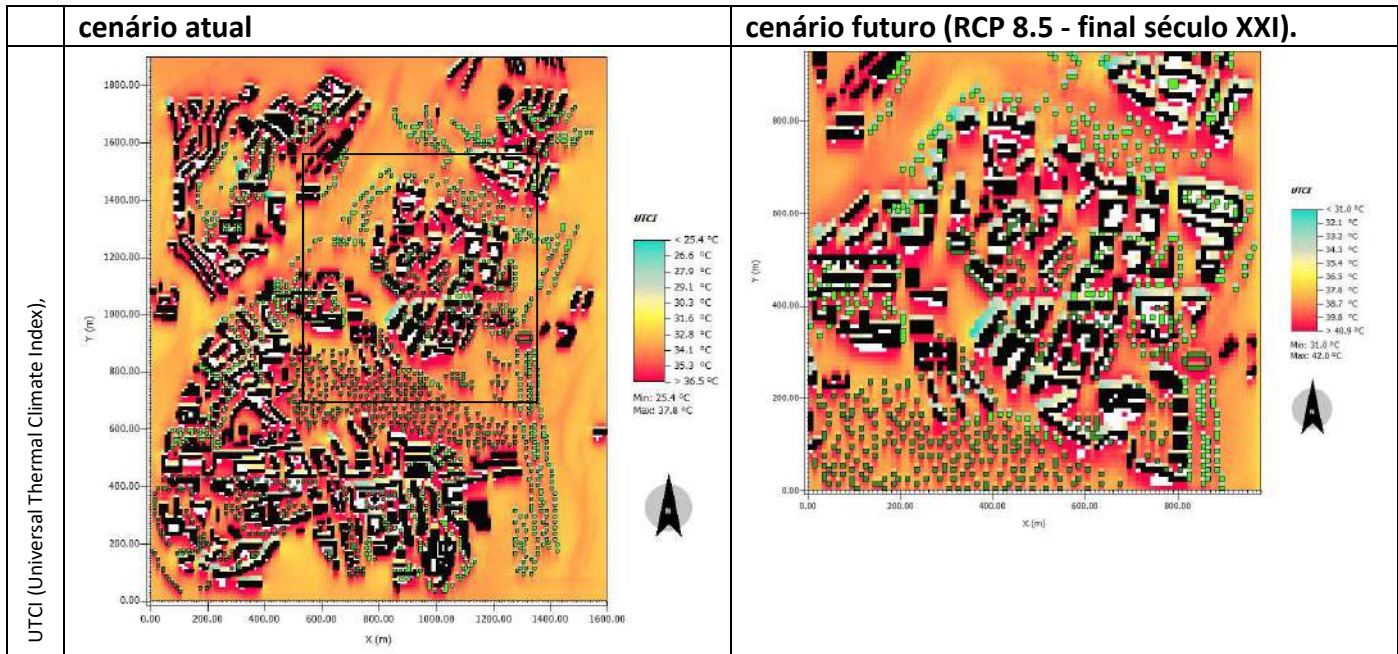
3.3 Área crítica 2: Alta de Lisboa – 12:00h.



IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 2



IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 2



UTCI Assessment Scale: categorized in terms of thermal stress

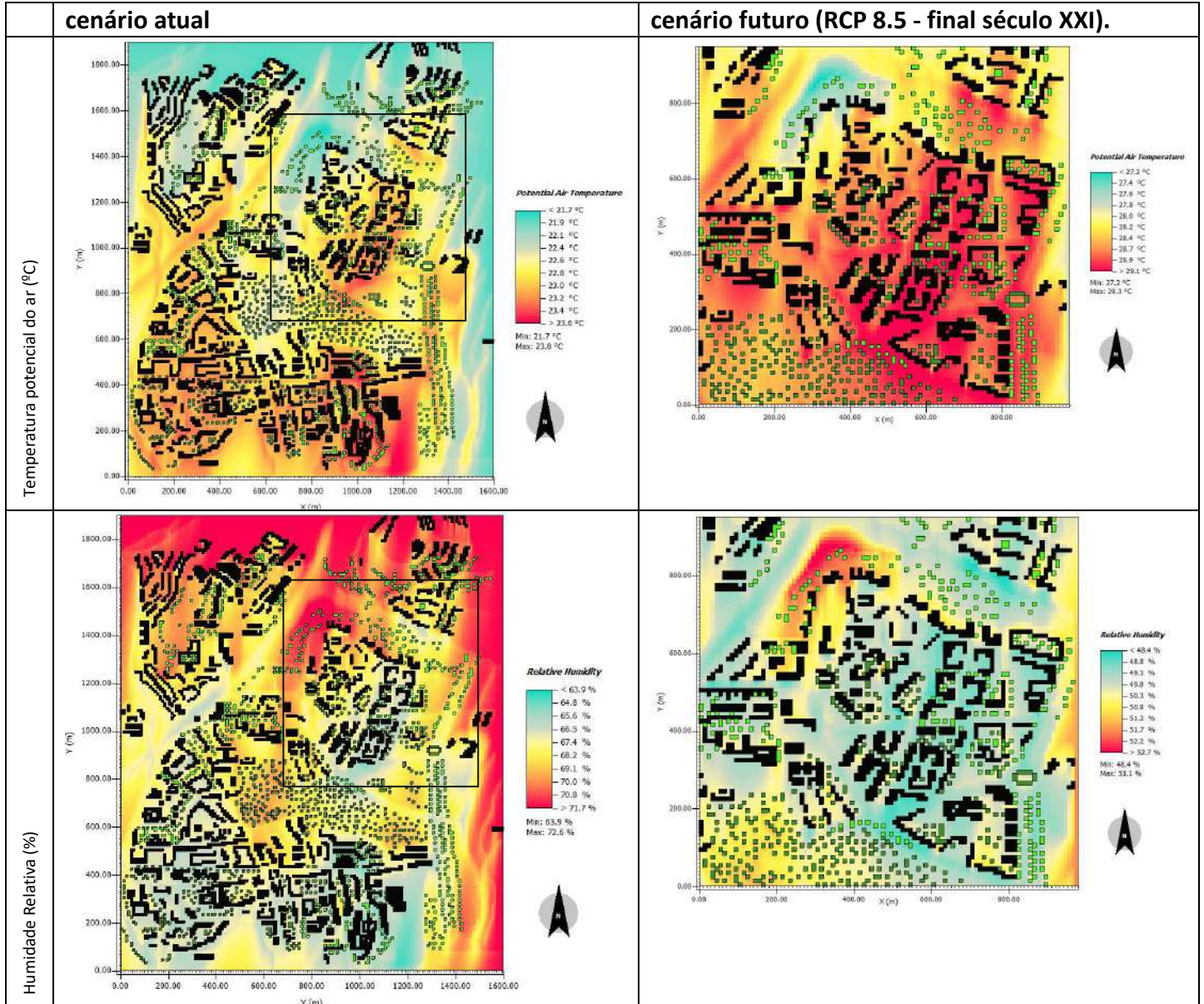
UTCI (°C) range	Stress Category
above +46	extreme heat stress
+38 to +46	very strong heat stress
+32 to +38	strong heat stress
+26 to +32	moderate heat stress
+9 to +26	no thermal stress
+9 to 0	slight cold stress
0 to -13	moderate cold stress
-13 to -27	strong cold stress
-27 to -40	very strong cold stress
below -40	extreme cold stress

Figura 10 – Saídas do modelo ENVIMET, referentes à temperatura potencial do ar, humidade relativa, temperatura radiativa média, vento (direções e velocidade), e UTCI (*Universal Thermal Climate Index*) na Alta de Lisboa. Situação futura (RCP 8.5 para o final do século XXI)

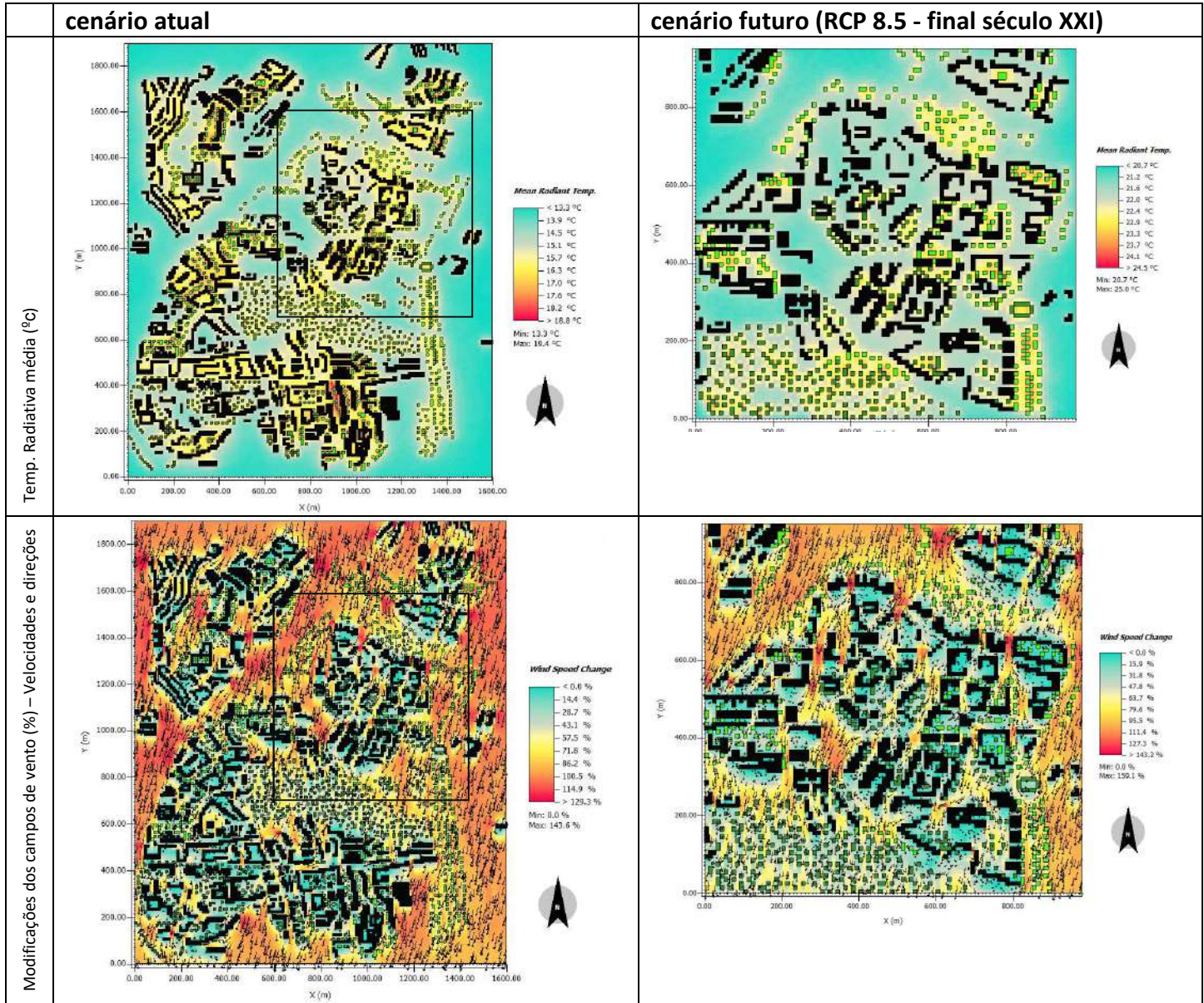
Fonte: Glossary of Terms for Thermal Physiology (2003).

IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 2

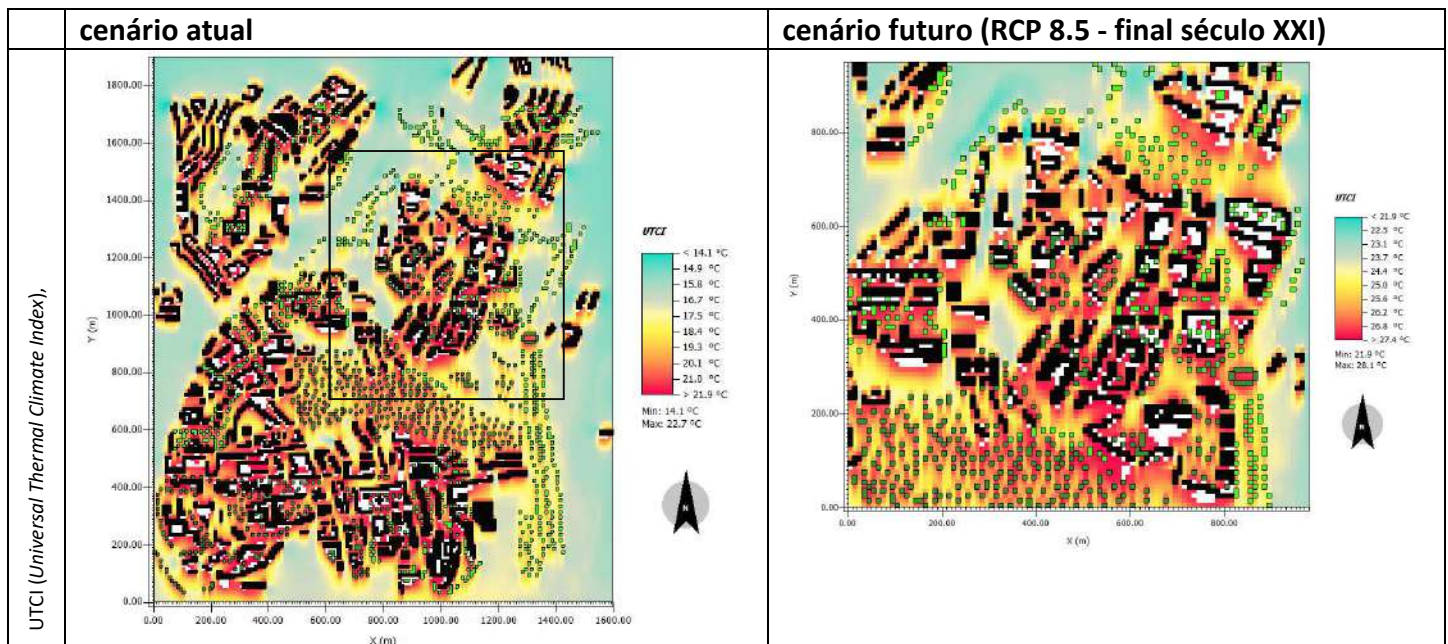
3.4 Área crítica 2: Alta de Lisboa – 19:00h



IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 2



IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 2



UTCI Assessment Scale: categorized in terms of thermal stress

UTCI (°C) range	Stress Category
above +46	extreme heat stress
+38 to +46	very strong heat stress
+32 to +38	strong heat stress
+26 to +32	moderate heat stress
+9 to +26	no thermal stress
+9 to 0	slight cold stress
0 to -13	moderate cold stress
-13 to -27	strong cold stress
-27 to -40	very strong cold stress
below -40	extreme cold stress

Figura 11 – Saídas do modelo ENVIMET, referentes à temperatura potencial do ar, humidade relativa, temperatura radiativa média, vento (direções e velocidade), e UTCI (*Universal Thermal Climate Index*) na Alta de Lisboa. Situação futura (RCP 8.5 para o final do século XXI)

Fonte: Glossary of Terms for Thermal Physiology (2003).

## 4. COMETÁRIOS AOS RESULTADOS

Nesta secção descrevem-se alguns dos resultados obtidos com os modelos do software ENVIMET, ressalvando-se que devem ser “lidos” como aproximações da realidade atual e cenários plausíveis para o futuro (e não previsões). A apresentação destes comentários tem os seguintes objetivos:

- 1) Comparar os cenários atuais com os futuros, à mesma hora (12:00h ou 19:00h) e descrevendo as características climáticas que sobressaem em cada área crítica.
- 2) No caso da Baixa de Lisboa, que é uma área consolidada, a análise comparativa (cenário atual/futuro) permitirá verificar as principais modificações nos padrões climáticos decorrentes das alterações climáticas urbanas.
- 3) No caso da Alta de Lisboa, será escolhido uma urbanização com edificado projetado (junto à Quinta das Conchas) e a análise verificará se, para além do efeito previsto das alterações climáticas futuras, a urbanização projetada agravará, ou não, o efeito térmico).
- 4) Sempre que possível, tentar-se-á responder aos padrões observados com o conhecimento científico atualizado do clima urbano de Lisboa.

### 4.1 Área crítica 1: Baixa de Lisboa às 12h (cenários: atual e futuro, figura 8)

A Baixa de Lisboa é o centro histórico da cidade, com características urbanas marcadas pela profunda remodelação efetuada após o terramoto de 1755. De malha regular e ortogonal na sua parte central - que foi devastada pelo terramoto e pelo tsunami que se seguiu, possui nas vertentes do vale que ladeia um conjunto edificado que resistiu mais ao terramoto, com ruas sinuosas e estreitas, tanto do lado do castelo de S. Jorge como no Bairro Alto a ocidente (Figura 12). Do ponto de vista climático é uma área de densidade urbana média a elevada: apesar da rugosidade aerodinâmica moderada, possui uma compacidade muito elevada e índice de volumetria elevado (Correia, 2019).



Figura 12 – Perspetiva da Baixa de Lisboa, vista de sul. Fonte: Google Earth©

O dia típico de verão de Ilha de Calor Urbano (ICU), com vento fraco de norte (4,1 m/s) apresenta um padrão típico na zona ribeirinha da cidade, com temperaturas ligeiramente mais baixas e humidade relativa mais elevada junto ao Tejo e na Av. da Liberdade, onde a vegetação, através do sombreamento e da evapotranspiração, consegue reduzir a carga térmica e melhorar o conforto termofisiológico (ver UTCI na figura). Note-se, por exemplo, a diferença na classe de stresse térmico na Praça dos Restauradores (*strong heat stress*) e na Av. da Liberdade sem stresse ou stress moderado (parte norte do modelo), caracterizado pela diminuição forte da temperatura radiativa média. No cenário futuro, as classes de conforto acentuam-se, mas onde existe vegetação arbórea ele será provavelmente um pouco reduzido (stress moderado), confirmando a importância que os espaços verdes terão, no futuro, no conforto e na saúde dos Lisboaetas (Reis & Lopes, 2019). Este fator é tanto mais importante já que neste setor da cidade o vento não exerce um efeito refrescante, porque a densidade urbana impede o correto arejamento dos espaços exteriores (Lopes, Saraiva, Alcoforado, Lopes, & Saraiva, 2011). Noutras situações, por exemplo durante a ocorrência de brisas do Tejo, será um fator fundamental tanto na melhoria da ventilação, como nas condições de conforto térmico (Lopes, Lopes, Matzarakis, & Alcoforado, 2011). No cenário futuro o modelo confirma um aumento das temperaturas do ar e o agravamento do desconforto térmico no centro da cidade, apesar de a esta hora existir uma IF (a Baixa não está tão aquecida como a periferia do modelo, Figura 15).

#### 4.2 Área crítica 1: Baixa de Lisboa às 19h (cenários: atual e futuro, figura 9)

Os resultados dos modelos confirmam um aumento das temperaturas do ar ao fim da tarde, quando ocorre a maior intensidade da ICU em Lisboa (Figura 7 - Anomalia entre as estações dos Restauradores e Saldanha e o Aeroporto de Lisboa, registadas pela rede de observação do IGOT). No entanto, as diferenças entre os valores máximos estimados para a situação atual e o futuro (+6 °C) parecem indicar um agravamento térmico na Baixa de Lisboa, maior do que os cenários estimados para a Península de Lisboa, publicados no PMAAC-AML e que foram tidos como referência neste estudo (+ 3,8°C). Sugere-se assim que o stress térmico no centro da cidade poderá ser agravado ainda mais com as projeções que decorrem dos modelos regionais. Não será alheio a este facto a fraca ventilação de norte devido ao aumento da rugosidade aerodinâmica em áreas de média e elevada densidade do edificado. No final da tarde, esta situação meteorológica, comum no verão (que atualmente configura um conforto termofisiológico sem stress térmico), pode no futuro tornar-se numa situação de stress moderado a forte, característica que se extremará mesmo quando todos os espaços exteriores se encontram à sombra (a temperatura radiativa média não excede 25,5 °C).

#### 4.3 Área crítica 1: Alta de Lisboa às 12h (cenários: atual e futuro, figura 10)

A Alta de Lisboa (Figura 13) tem condições muito diferentes da Baixa: compreende um conjunto edificado no norte da cidade mais disperso e heterogéneo, com núcleos maioritariamente de média e baixa densidade (Correia, 2019), com amplos espaços verdes e boas condições de ventilação (Lopes, 2011).

Devido ao sombreamento dos edifícios, os amplos espaços verdes e a boa capacidade de ventilação (apesar do ar mais seco – HR ≈ 50-60%), as temperaturas a meio do dia nos espaços



## IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 2

edificados são mais baixas (anomalia de  $\approx -1,5^{\circ}$  C), do que fora da influência dos edifícios. A temperatura radiativa média é intensa (balanço radiativo positivo sobre o corpo humano mais forte), exceto nas áreas de sombra. Por este motivo, o UTCI apresenta valores de stresse térmico forte no verão, podendo ser extremo no final do século ( $> 40^{\circ}$  C). Nas zonas de sombra dos edifícios o stresse térmico poderá ser apenas moderado, sendo por isso um elemento amenizador desde que sejam áreas bem ventiladas. Os espaços verdes deverão ser densificados para obter um efeito positivo no conforto térmico, desde que não impeçam a ventilação de efetuar o seu efeito refrescante da ambiência térmica.



Figura 13 – Perspetiva da Alta de Lisboa vista de sudeste. Fonte: Google Earth©

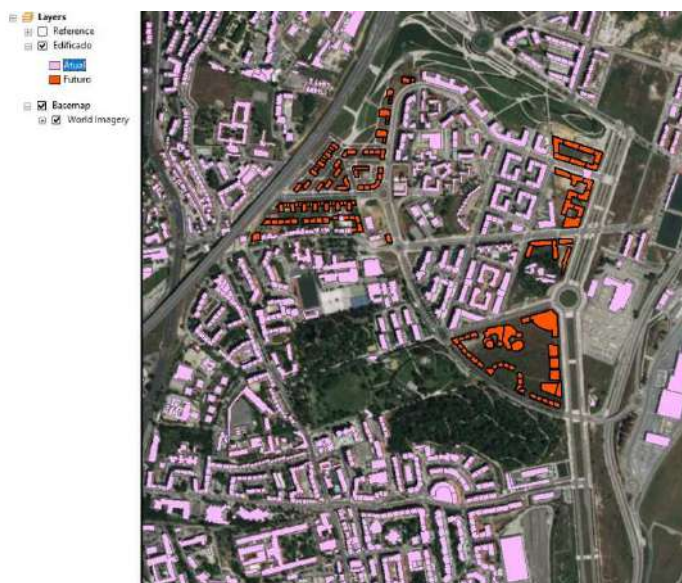


Figura 14 - Área de pormenor usada no modelo reduzido com indicação (a laranja) dos edifícios projetados no futuro.

#### 4.4 Área crítica 1: Alta de Lisboa às 19h (cenários: atual e futuro, figura 11)

Às 19:00h a situação é mais atenuada em relação ao meio dia, dado que a temperatura radiativa média é muito inferior (máximo de  $\approx 23$  °C na situação atual e 29 °C no futuro), devido ao balanço radiativo entrar na fase de equilíbrio entre a radiação solar mais fraca e as perdas no infravermelho térmico. Se as boas condições de ventilação se mantiverem, não deverá ocorrer stress térmico, embora este possa ser agravado no final do século por causa do aquecimento da atmosfera urbana projetada pelos cenários climáticos. Neste caso os habitantes do bairro deverão sentir stress moderado (UTCI entre 22 °C e 28 °C).

#### 4.5 Comparação dos ritmos térmicos diários entre as áreas críticas e os cenários

A escolha destas duas áreas críticas permitiu comparar o regime diário de um dia típico de verão, tendo como referência uma situação de Ilha de Calor Urbano (ICU) no centro da cidade de Lisboa. A Figura 15 mostra as anomalias em cada modelo (Baixa e Alta de Lisboa) e os respetivos cenários (atual e futuro). Estes estão em linha com as observações feitas através da rede de monitorização urbana mantida pelo IGOT (Figura 7), que funcionou entre 2004 e 2012 (Lopes, Alves, Alcoforado, e Machete, 2013).

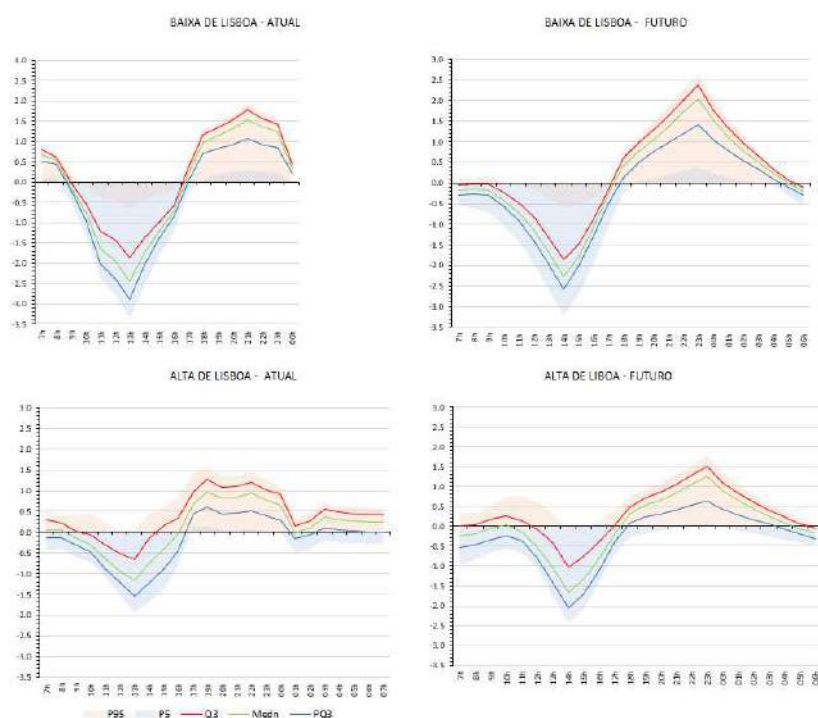


Figura 15 – Anomalias térmicas dos modelos atuais e projeções futuras em relação a uma célula estável no canto superior esquerdo do modelo.

## IDENTIFICAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANO E SIMULAÇÃO PARA AS ÁREAS CRÍTICAS DA CIDADE DE LISBOA | Fase 2

---

Nessa figura são visíveis duas fases: a meio do dia, uma fase de anomalia negativa que corresponde a IF, quando os espaços urbanos estão mais frescos do que o exterior da cidade, muito provavelmente devido ao sombreamento dos edifícios. Os modelos atuais mostram um maior desvio negativo na baixa de Lisboa (mais área de sombra), com um pico a ocorrer aproximadamente às 13:00h. Atualmente a anomalia positiva (ICU) ocorre no final da tarde e princípio da noite, quando o arrefecimento fora da cidade é mais intenso e rápido. A ICU na Baixa de Lisboa tem uma intensidade  $0,5^{\circ}\text{C}$  superior à Alta, local este bem ventilado, com mais vegetação e com o edificado menos denso.

No futuro parece haver uma tendência para o pico negativo (IF) ocorrer um pouco mais tarde (cerca das 14:00h), mas a ICU parece ter tendência para se intensificar mais na Alta de Lisboa, com desvios positivos que poderão chegar a  $1,5^{\circ}\text{C}$ . Em Lisboa esses são já os valores que se verificam nas observações feitas no centro da cidade (Lopes et al, 2013), pelo que o sobreaquecimento não parece ter aumentos significativos com as alterações climáticas. Se não forem tomadas medidas de mitigação para o calor intenso - como a criação de novos e abundantes espaços verdes (Reis e Lopes, 2019), a utilização de materiais com fraca admitância térmica e capacidade de reterem calor, privilegiando-se os materiais albedo elevado (Matias & Lopes, 2020), podem surgir novos núcleos de ICU.

## 5. CONCLUSÕES

Os cenários apresentados não devem ser vistos como retratos fiéis da realidade, mas ainda assim permitem avaliar um conjunto de dados climáticos que podem estar na explicação dos fatores com maior peso no sobreaquecimento urbano. O fácil manuseamento dos modelos numéricos micro-meteorológicos permite construir cenários e observar as mudanças que a introdução de cada elemento físico e biofísico pode proporcionar na melhoria do ambiente e do conforto térmico humano dos espaços exteriores (Lopes, Correia, Nascimento, & Canário, 2014). No entanto, chama-se a atenção para a necessidade de validar os modelos com observações no terreno, de modo a tornar mais fiáveis as decisões a tomar em cada caso.

Este trabalho permitiu identificar os seguintes aspetos fundamentais:

- Atualmente a Baixa de Lisboa é um dos locais da cidade onde os padrões térmicos dos tipos ICU e IF são mais evidentes;
- A Alta de Lisboa já possui um ritmo compatível com estes padrões embora mais atenuados;
- Comprova-se que o sombreamento e sobretudo a vegetação conseguem atenuar as temperaturas extremas e por isso são fatores determinantes para combater o efeito das alterações climáticas urbanas;
- A ventilação natural é outro dos fatores que favorece a cidade, atuando não só no desagramento do desconforto termofisiológico, mas também como dispersor de poluentes atmosféricos, beneficiando a qualidade do ar;
- Apesar das anomalias das temperaturas não sofrerem grandes alterações no futuro, já que o aquecimento é global e atinge todo o território, parece haver uma ligeira tendência para o agravamento das ICU no centro da cidade;
- As novas urbanizações que irão surgir no norte da cidade, desde que sejam planeadas de acordo com as regras de planeamento bioclimático (bom arejamento, ruas largas, com elementos sombreadores, e espaços verdes que não constituam espaços bloqueadores do vento), não parecem criar áreas de stresse térmico extremo, para além do previsto com as alterações climáticas que já se fazem sentir.

Termina-se com uma nota muito importante: para monitorizar convenientemente os efeitos do calor extremo na saúde e em setores económicos relacionados com a eficiência energética, é absolutamente crucial instalar uma rede de observação meteorológica densa, que permita não só fazer o acompanhamento das situações, mas também a criação um sistema de alerta de calor extremo e intervenção nos bairros de Lisboa.

## Bibliografia

- Bruse, M. (2004). ENVI-met 3.0: Updated Model Overview.
- Bruse, M., & Fler, H. (1998). Simulating surface–plant–air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental Modelling & Software*, 13(3–4), 373–384.
- Correia, E. (2019). *Mapas Climáticos Urbanos - Geometria e densidade urbana atual. Relatório*. In, “Cartografia de Vulnerabilidade Térmica – Mapeamento dos efeitos das Ondas de Calor em Lisboa, face às projeções climáticas”, Câmara Municipal de Lisboa.
- Glossary of Terms for Thermal Physiology (2003). *Journal of Thermal Biology* 28, 75-106
- IPCC (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]*. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Lopes, A., Alves, E., Alcoforado, M. J., & Machete, R. (2013). Lisbon Urban Heat Island Updated: New Highlights about the Relationships between Thermal Patterns and Wind Regimes. *Advances in Meteorology*, 2013, 11. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1155/2013/487695>
- Lopes, A., Correia, E., Nascimento, J., & Canário, P. (2014). Urban bioclimate and comfort assessment in the African city of Praia (Cape Verde). *Finisterra - Revista Portuguesa de Geografia*, XLIX(98), 33–48.
- Lopes, A., Lopes, S., Matzarakis, A., & Alcoforado, M. J. (2011). The influence of the summer sea breeze on thermal comfort in Funchal (Madeira). A contribution to tourism and urban planning. *Meteorologische Zeitschrift*, 20(5), 553–564. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2011/0248>
- Lopes, A., Saraiva, J., Alcoforado, M. J., Lopes, A., & Saraiva, J. (2011). Urban boundary layer wind speed reduction in summer due to urban growth and environmental consequences in Lisbon. *Environmental Modelling & Software*, 26(2), 241–243. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.05.015>
- Matias, M., & Lopes, A. (2020). Surface Radiation Balance of Urban Materials and Their Impact on Air Temperature of an Urban Canyon in Lisbon, Portugal. *Applied Sciences*, 10(6). <https://doi.org/10.3390/app10062193>
- PMACC-AML (2019). *Plano Metropolitano de Adaptação às Alterações Climáticas. Volume I Definição do cenário base de adaptação para a AML, Lisboa.*
- Reis, C., & Lopes, A. (2019). Evaluating the Cooling Potential of Urban Green Spaces to Tackle Urban Climate Change in Lisbon. *Sustainability*, 11(9)(2480), 1–17. <https://doi.org/10.3390/su11092480>
- Santos, F.D. e Miranda, P (ed.) (2006). *Alterações climáticas em Portugal. Cenários, impactos e medidas de adaptação. Projecto SIAM II - 1ª edição.* Gradiva Publicações, 506 pág., ISBN 989-616-081-3.