TÉCNICO LISBOA

Utilização de Modelos SIG-3D na Determinação da Radiação Solar Incidente nos Edifícios

Influência do Contexto Urbano

Rita Freire Machete

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Arquitectura

Orientadores:
Profª Ana Paula Martins Falcão Flor
Profª Maria da Glória de Almeida Gomes

Júri

Presidente: Prof. Manuel de Arriaga Brito Correia Guedes
Orientador: Profª Ana Paula Martins Falcão Flor
Vogal: Prof. Miguel José das Neves Pires Amado

Maio de 2016

Agradecimentos

Agradeço à professora Ana Paula Falcão, por todo o apoio prestado na correcção, no debate de ideias e por toda a dedicação ao longo do desenvolvimento deste trabalho. À professora Maria da Glória Gomes pelas sugestões e críticas que foram fundamentais para terminar esta etapa. À Sónia Ildefonso por me ter ajudado a dominar parte do software usado nesta dissertação. E à professora Helena Rua por me ter dado a oportunidade de fazer este trabalho.

Quero também agradecer à minha família e aos meus amigos por todo o apoio.

Resumo

Os edifícios, por serem responsáveis por consumos de energia na ordem dos 40% na União Europeia, têm sido sujeitos a legislação que visa a redução dos consumos, por via da procura da maior eficiência energética e da utilização de energias renováveis. Para esse fim têm sido procuradas soluções diversas, destacando-se a instalação de painéis fotovoltaicos e colectores solares. Tradicionalmente estes painéis têm sido colocados nas coberturas, muito embora já existam exemplos de colocação em fachadas.

No desempenho destes sistemas a radiação solar incidente é uma das variáveis com maior expressão, pelo que o estudo dos parâmetros que a condicionam é da máxima importância. Assim, por forma a avaliar de um modo mais detalhado a radiação solar incidente foi analisado o impacto da envolvente geográfica e do contexto urbano, nas coberturas e fachadas de uma secção da Baixa de Lisboa. Esta área, com um tipo de morfologia replicável, é muito adequada à modelação procedimental que permite gerar o modelo tridimensional e testar diferentes configuração da envolvente geográfica e do edifício, com base nos seus atributos.

Para este fim foram aplicados quatro modelos de radiação (*Area Solar Radiation*, *Incident Solar Radiation*, *Solar Exposure Graph* e o modelo de Kumar *et al.* (1997)), comparados os seus resultados para o solstício de Inverno e Verão e identificadas as suas limitações. A influência do contexto urbano e da área geográfica foi avaliada em cinco cenários distintos: área geográfica com aproximadamente 1,3 km² e 0,03 km², com e sem envolvente construída, e o edifício descontextualizado. Foram ainda considerados diferentes materiais no revestimento das fachadas dos edifícios envolventes.

Da comparação dos resultados é possível concluir que existe uma relação de dependência entre os resultados da simulação e a dimensão da área geográfica, aumentando no entanto o tempo computacional. Deste compromisso resulta que a consideração de uma menor área (0,03 km²) que inclua todos os elementos de maior obstrução à radiação é a solução mais indicada para estudos de simulação, dado que os resultados são bastante similares (5%) aos obtidos com uma maior área geográfica (1,3 km²) e com um tempo de simulação bastante menor. Da comparação entre os resultados da simulação desta área e do quarteirão isolado verificou-se uma diferença na ordem dos 400% o que demonstra a importância da inclusão da envolvente geográfica e do contexto urbano na simulação da radiação incidente nos edifícios.

Estes resultados são importantes não só para estudos de desempenho térmico, visual e energético dos edifícios como também em estudos de durabilidade e patologias em revestimentos de fachadas.

Palavras-chave:

SIG 3D, Modelação Procedimental, Radiação Solar, Edifícios 3D

Abstract

Buildings, being responsible for 40% of energy consumption in the European Union, have been subjected to legislation in order to reduce consumption, achieved through the search of greater energy efficiency and the use of renewable energy. To this end several solutions have been sought out, especially the installation of photovoltaic panels and solar collectors. Traditionally these panels have been placed on the roofs, although there are already examples of placement on facades.

In the performance of these systems the incident solar radiation is one of the variables with greater expression; as such the study of the parameters that condition said radiation is of the utmost importance. Thus, in order to assess in more detail the incident solar radiation it was analyzed the impact of the geographical environment and the urban context, on the roofs and facades of a section of downtown Lisbon. This area, with a replicable type of morphology, is very suitable for procedural modelling allowing the generation of a three-dimensional model and the test of different geographical and building environment configuration, based on their attributes.

For this purpose four radiation models were applied (*Area Solar Radiation*, *Incident Solar Radiation*, *Solar Exposure Graph* and the model of Kumar *et al.* (1997)), their results compared, for the winter and summer solstice, and identified their limitations. The influence of the urban context and the geographical area were evaluated in five different scenarios: geographic area of approximately 1,3 km² and 0,03 km², with and without built environment, and the building decontextualized. Different surface materials for the facades of the surrounding buildings were also considered.

From comparing the results it can be concluded that there is a dependency relationship between the simulation results and the size of the geographical area, increasing however the computational time. From this compromise results that the consideration of a smaller area (0,03 km²) that includes all the obstructions to the radiation is the most suitable solution for simulation studies, since the results are very similar (5%) to those obtained from a larger geographical area (1,3 km²) with a clearly smaller simulation time. Comparing the simulation results in this area and isolated block there was a difference in the order of 400% which demonstrates the importance of the inclusion of the geographical environment and the urban environment in the simulation of the incident radiation in buildings.

These results are important not only for studies of thermal, visual and energy performance of buildings as well as in durability and pathologies studies in facade coatings.

Keywords:

3D GIS, Procedural Modelling, Solar Radiation, 3D Buildings

Índice

Agradecimentos ... **iii**
Resumo ... **v**
Abstract ... **vii**
Índice ... **ix**
Lista de Figuras ... **xi**
Lista de Quadros ... **xiv**
Lista de Quadros no Anexo ... **xv**
Siglas, Acrónimos e Simbologia ... **xvii**
1. Introdução ... **3**
1.1 Enquadramento geral ... 3
1.2 Objectivo da dissertação ... 7
1.3 Organização do trabalho ... 7
2. Potencial Solar ... **11**
2.1 Modelos Digitais de Superfície ... 13
2.2 Modelos de Radiação Solar ... 16
2.2.1 Modelos de Radiação Solar: Abordagem 2.5D ... 16
2.2.2 Modelos de Radiação Solar: Abordagem 3D ... 19
2.3 Modelos Seleccionados ... 24
3. Metodologia do trabalho ... **27**
3.1 Detalhe e Contexto dos Modelos ... 27
4. Caso de Estudo ... **35**
4.1 Área de Estudo ... 35
4.2 Construção do modelo tridimensional de cidade ... 37
4.3 Cálculo de Radiação Solar incidente no edifício ... 42
4.3.1 Aplicação do modelo *Area Solar Radiation* ... 42
4.3.2 Cálculo de Radiação Solar em *Ecotect* ... 45
4.3.2.1 Aplicação do modelo *Incident Solar Radiation* ... 45
4.3.2.2 Aplicação do modelo *Solar Exposure Graph* ... 53
4.3.3 Aplicação do modelo de Radiação de Kumar *et al.* (1997) ... 59
5. Análise e Discussão de Resultados ... **69**
5.1 Análise Comparativa dos Modelos de Radiação ... 69
5.2 Análise dos Cenários ... 76
6. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros ... **93**
6.1 Conclusões ... 93
6.2 Desenvolvimentos Futuros ... 95
Bibliografia ... **99**
Anexos ... **107**

Anexo I – Código CGA do Modelo CIM 107
Anexo II – Numeração dos Painéis do Quarteirão no *Ecotect* 119
Anexo III – Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) 121

Lista de Figuras

Figura 1.1 – *Nul-Energihus* (Wünsch, 2013) ... 3
Figura 1.2 – *Solar House Freiburg* (Passipedia, 2015) ... 3
Figura 1.3 – *Passivhaus* (Passipedia, 2015) ... 3
Figura 1.4 – *Home for Life* (Musall, 2012) ... 5
Figura 1.5 – *Kleehäuser* (Musall, 2012) ... 5
Figura 1.6 – *Solarsiedlung* (Hagemann, 2007) ... 5
Figura 1.7 – Célula solar transparente (Sarmiento, 2014) ... 5
Figura 1.8 – Cobertura envidraçada com células solares transparentes (Sarmiento, 2014) ... 5
Figura 1.9 – Sistema de sombreamento com células solares (Frank, 2012) ... 5
Figura 1.10 – *ECN Building 42* (BP Solar, 2001) ... 6
Figura 1.11 – SOLAR XXI (LNEG, 2010) ... 6
Figura 1.12 – Centro Operacional da Brisa (Carrilho da Graça Arquitectos, 2004) ... 6
Figura 2.1 – Trajectória, distâncias da Terra em torno do Sol (no hemisfério norte) (adaptado de Moita (1987)) ... 11
Figura 2.2 – Ilustração do o ângulo de azimute, altura solar e distância zenital (adaptado de Kumar et al. (1997)) ... 12
Figura 2.3 – MDS obtido por LIDAR (Facultado pela empresa CGI) ... 13
Figura 2.4 – MDS obtido em *CityEngine* por modelação procedimental ... 13
Figura 2.5 – Fachada em *CityEngine* através de fotografia (ESRI, 2015c) ... 15
Figura 2.6 – Fachada em *CityEngine* através da divisão em parcelas (ESRI, 2015c) ... 15
Figura 2.7 – Exemplo de céu visível (faixa superior); mapa de posição solar e mapa do céu (faixa intermédia); combinação dos mapas (faixa inferior) (ESRI, 2014c) ... 18
Figura 2.8 – Diferentes abordagens para a divisão do céu (Marsh, 2011) ... 20
Figura 3.1 – Código CGA: Tipologia das diferentes zonas presentes na malha urbana ... 28
Figura 3.2 – Fluxograma para a criação de um modelo CIM em *CityEngine* ... 28
Figura 3.3 – Fluxograma para o modelo de radiação de abordagem *raster* 2.5D em *ArcGIS* ... 29
Figura 3.4 – Fluxograma para o modelo de radiação de abordagem 3D em *Ecotect* ... 30
Figura 3.5 – Fluxograma para o modelo de radiação de Kumar (Kumar et al., 1997) de abordagem 3D em *ArcGIS* ... 31
Figura 4.1 – Área de Estudo (ortofotomapa) ... 35
Figura 4.2 – Fotografia da fachada tipo presente na Baixa de Lisboa (Miranda, 2011) ... 35
Figura 4.3 – Trajectória solar para o solstício de inverno (esquerda) e solstício de verão (direita), Sol posicionado ao meio-dia em ambos ... 36
Figura 4.4 – Vista geral da área de estudo ... 36
Figura 4.5 – Diferentes modelos com o quarteirão analisado a vermelho ... 37
Figura 4.6 – Níveis de detalhe para o modelo de cidade ... 37
Figura 4.7 – Diversidade de materiais de fachada estudas (azulejo: amarelo, azul, branco, castanho, cinza, verde e vermelho; reboco: amarelo, azul, branco, castanho, cinza, ocre, rosa e salmão; pedra: branco e cinza) ... 38
Figura 4.8 – Exemplos da diversidade de fachadas ... 39
Figura 4.9 – Divisão por piso da fachada tipo ... 39
Figura 4.10 – Código CGA: Estrutura da fachada tipo ... 40
Figura 4.11 – Divisão por mosaico da fachada tipo ... 41
Figura 4.12 – Código CGA: Estrutura dos vãos ... 41
Figura 4.13 – Conversão em *ArcGis* de modelo 3D para *raster* (*cell size* 0,5) ... 42
Figura 4.14 – Valor diário acumulado de radiação global (Wh/m²) com *Area Solar Radiation* para os dias 21 de Junho e 21 de Dezembro ... 43
Figura 4.15 – Valor horário acumulado de radiação global (Wh/m²) com *Area Solar Radiation* para o dia 21 de Dezembro ... 43
Figura 4.16 – Valor horário acumulado de radiação global (Wh/m²) com *Area Solar Radiation* para o dia 21 de Junho ... 44
Figura 4.17 – Radiação global (Wh/m²) do modelo M1a para 21 de Dezembro ... 46
Figura 4.18 – Radiação global (Wh/m²) do modelo M1a para 21 de Junho ... 46
Figura 4.19 – Radiação global (Wh/m²) do modelo M1b para 21 de Dezembro ... 47
Figura 4.20 – Radiação global (Wh/m²) do modelo M1b para 21 de Junho ... 47
Figura 4.21 – Radiação global (Wh/m²) do modelo M2a para 21 de Dezembro ... 48
Figura 4.22 – Radiação global (Wh/m²) do modelo M2a para 21 de Junho ... 48
Figura 4.23 – Radiação global (Wh/m²) do modelo M2b para 21 de Dezembro ... 49

Figura 4.24 – Radiação global (Wh/m²) do modelo M2b para 21 de Junho 49
Figura 4.25 – Radiação global (Wh/m²) do modelo M3 para 21 de Dezembro 50
Figura 4.26 – Radiação global (Wh/m²) do modelo M3 para 21 de Junho 50
Figura 4.27 – Gráfico com os máximos de radiação global (Wh/m²) para 21 Dezembro com *Incident Solar Radiation* 51
Figura 4.28 – Gráfico com os mínimos de radiação global (Wh/m²) para 21 Dezembro com *Incident Solar Radiation* 51
Figura 4.29 – Gráfico com os máximos de radiação global (Wh/m²) para 21 Junho com *Incident Solar Radiation*..... 51
Figura 4.30 – Gráfico com os mínimos de radiação global (Wh/m²) para 21 Junho com *Incident Solar Radiation*..... 52
Figura 4.31 – Plano de fachada analisado e elementos circundantes 53
Figura 4.32 – Exposição Solar Horária no dia 21 de Junho (amarelo: reflexão; cinza: sombras)..... 53
Figura 4.33 – Exposição Solar Horária no dia 21 de Dezembro (amarelo: reflexão; cinza: sombras). 54
Figura 4.34 – Exposição Solar Horária no dia 21 de Dezembro, medida na fachada em estudo orientada a Oeste (Área de superfície: 286,421 m²; Azimute: -106,70 °; Altitude: 0,00 °) com materiais correntes e próximos dos reais nos elementos em redor 54
Figura 4.35 – Exposição Solar Horária no dia 21 de Junho, medida na fachada em estudo orientada a Oeste (Área de superfície: 286,421 m²; Azimute: -106,70 °; Altitude: 0,00 °) com materiais correntes e próximos dos reais nos elementos em redor 55
Figura 4.36 – Exposição Solar Horária no dia 21 de Dezembro, medida na fachada em estudo orientada a Oeste (Área de superfície: 286,421 m²; Azimute: -106,70 °; Altitude: 0,00 °) com materiais cerâmicos e vidros reflectivos nos elementos em redor 56
Figura 4.37 – Exposição Solar Horária no dia 21 de Junho, medida na fachada em estudo orientada a Oeste (Área de superfície: 286,421 m²; Azimute: -106,70 °; Altitude: 0,00 °) com materiais cerâmicos e vidros reflectivos nos elementos em redor..... 56
Figura 4.38 – Exposição Solar Horária no dia 21 de Dezembro, medida na fachada em estudo orientada a Oeste (Área de superfície: 286,421 m²; Azimute: -106,70 °; Altitude: 0,00 °) com materiais metálicos e vidros reflectivos nos elementos em redor 57
Figura 4.39 – Exposição Solar Horária no dia 21 de Junho, medida na fachada em estudo orientada a Oeste (Área de superfície: 286,421 m²; Azimute: -106,70 °; Altitude: 0,00 °) com materiais metálicos e vidros reflectivos nos elementos em redor..... 58
Figura 4.40 – Elementos importados do modelo de *CityEngine* para o software o *ArcGIS* 60
Figura 4.41 – Volumes de Sombra Solar Horária no dia 21 de Junho das 6h às 20h..... 61
Figura 4.42 – Volumes de Sombra Solar Horária no dia 21 de Dezembro das 8h às 17h..... 62
Figura 4.43 – Radiação solar global (Wh/m²) para o dia 21 de Junho 64
Figura 4.44 – Radiação solar global (Wh/m²) para o dia 21 de Dezembro..... 64
Figura 4.45 – Radiação solar directa (Wh/m²) incidente na fachada Oeste detalhada para o dia 21 de Dezembro 65
Figura 5.1 – Radiação solar global incidente (Wh/m²) calculada para o cenário M2a com os diferentes modelos de radiação 70
Figura 5.2 – Numeração identificadora dos painéis em *ArcGIS* e em *Ecotect* 71
Figura 5.3 – Modelos em análise para cada situação..... 77
Figura 5.4 – Situação 1: Diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1a e M2a para 21 Dezembro 78
Figura 5.5 – Situação 1: Diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1a e M2a para 21 Junho 78
Figura 5.6 – Situação 2: Diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1b e M2b para 21 Dezembro 79
Figura 5.7 – Situação 2: Diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1b e M2b para 21 Junho 79
Figura 5.8 – Situação 3: Diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1a e M1b para 21 Dezembro 80
Figura 5.9 – Situação 3: Diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1a e M1b para 21 Junho 81
Figura 5.10 – Situação 4: Diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M2a e M2b para 21 Dezembro 82
Figura 5.11 – Situação 4: Diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M2a e M2b para 21 Junho 82

Figura 5.12 – Situação 5: Diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1b e M3 para 21 Dezembro 83
Figura 5.13 – Situação 5: Diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1b e M3 para 21 Junho 83
Figura 5.14 – Situação 6: Diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M2b e M3 para 21 Dezembro 84
Figura 5.15 – Situação 6: Diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M2b e M3 para 21 Junho 85
Figura 5.16 – Representação gráfica dos painéis presentes nos quadros de maior diferença 86
Figura 5.17 – Representação dos painéis enterrados a serem parcialmente irradiados pelo sol às 9h30 no dia 21 de Dezembro 87
Figura 5.18 – Modelos em análise para as situações extras (7 e 8) 90
Figura 6.1 – Piranómetros: Kipp & Zonen CMP 3; Delta-T Devices Sunshine Sensor type BF5; LI-COR Sensor LI-200 95

Lista de Quadros

Quadro 4.1 – Exposição Solar Horária no dia 21 de Dezembro, medida na fachada em estudo orientada a Oeste (Área de superfície: 286,421 m²; Azimute: -106,70 °; Altitude: 0,00 °) com materiais correntes e próximos dos reais nos elementos em redor 55
Quadro 4.2 – Exposição Solar Horária no dia 21 de Junho, medida na fachada em estudo orientada a Oeste (Área de superfície: 286,421 m²; Azimute: -106,70 °; Altitude: 0,00 °) com materiais correntes e próximos dos reais nos elementos em redor 55
Quadro 4.3 – Exposição Solar Horária no dia 21 de Dezembro, medida na fachada em estudo orientada a Oeste (Área de superfície: 286,421 m²; Azimute: -106,70 °; Altitude: 0,00 °) com materiais cerâmicos e vidros reflectivos nos elementos em redor 56
Quadro 4.4 – Exposição Solar Horária no dia 21 de Junho, medida na fachada em estudo orientada a Oeste (Área de superfície: 286,421 m²; Azimute: -106,70 °; Altitude: 0,00 °) com materiais cerâmicos e vidros reflectivos nos elementos em redor..... 57
Quadro 4.5 – Exposição Solar Horária no dia 21 de Dezembro, medida na fachada em estudo orientada a Oeste (Área de superfície: 286,421 m²; Azimute: -106,70 °; Altitude: 0,00 °) com materiais metálicos e vidros reflectivos nos elementos em redor 57
Quadro 4.6 – Exposição Solar Horária no dia 21 de Junho, medida na fachada em estudo orientada a Oeste (Área de superfície: 286,421 m²; Azimute: -106,70 °; Altitude: 0,00 °) com materiais metálicos e vidros reflectivos nos elementos em redor..... 58
Quadro 4.7 – Classificação das variáveis das fórmulas de Kumar *et al*. (1997) 63
Quadro 5.1 – Valores de radiação solar (Wh/m²) para o dia 21 de Dezembro recorrendo ao Modelo de Kumar *et al.* (1997) (esquerda) e *Incident Solar Radiation* (direita) 72
Quadro 5.2 – Valores de radiação solar (Wh/m²) para o dia 21 de Junho recorrendo ao Modelo de Kumar *et al.* (1997) (esquerda) e *Incident Solar Radiation* (direita) 73
Quadro 5.3 – Valores de radiação solar directa (Wh/m²) por hora para o modelo de radiação de Kumar *et al.* (1997)..... 74
Quadro 5.4 – Valores de radiação solar difusa (Wh/m²) por hora para o modelo de radiação de Kumar *et al*. (1997) 74
Quadro 5.5 – Índice entre inclinação da superfície em análise (β) e ângulo de altitude solar (α) da fórmula da radiação solar difusa (Id = Io τd cos² β / 2 sin α)..... 75
Quadro 5.6 – Situação 1: Diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1a e M2a 77
Quadro 5.7 – Situação 2: Diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1b e M2b 79
Quadro 5.8 – Situação 3: Diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1a e M1b 80
Quadro 5.9 – Situação 4: Diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M2a e M2b 81
Quadro 5.10 – Situação 5: Diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1b e M3 83
Quadro 5.11 – Situação 6: Diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M2b e M3 84
Quadro 5.12 – Taxa Máxima de Variação (%) dos painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) em cada situação, excluindo os painéis enterrados 88
Quadro 5.13 – Quadro resumo dos valores médios da radiação global (Wh/m²) e duração de cálculo dos modelos (minuto: segundo), em cima; e das diferenças verificadas entre os cenários, em baixo 89
Quadro 5.14 – Taxa Máxima de Variação (%) dos painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) nas situações extra (7 e 8), excluindo os painéis enterrados 90

Lista de Quadros no Anexo

Anexo III. 1 – Situação 1: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1a e M2a na Cobertura 121
Anexo III. 2 – Situação 1: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1a e M2a na fachada Sul (painéis enterrados a vermelho) 121
Anexo III. 3 – Situação 1: Painéis não enterrados com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1a e M2a na fachada Sul 121
Anexo III. 4 – Situação 1: Painéis não enterrados com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1a e M2a na fachada Oeste 122
Anexo III. 5 – Situação 1: Painéis não enterrados com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1a e M2a na fachada Norte 122
Anexo III. 6 – Situação 1: Painéis não enterrados com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1a e M2a na fachada Este (painéis enterrados a vermelho) 122
Anexo III. 7 – Situação 1: Painéis não enterrados com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1a e M2a na fachada Este 122
Anexo III. 8 – Situação 2: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1b e M2b na Cobertura 123
Anexo III. 9 – Situação 2: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1b e M2b na fachada Sul (painéis enterrados a vermelho) 123
Anexo III. 10 – Situação 2: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1b e M2b na fachada Sul 123
Anexo III. 11 – Situação 2: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1b e M2b na fachada Oeste 123
Anexo III. 12 – Situação 2: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1b e M2b na fachada Norte 124
Anexo III. 13 – Situação 2: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1b e M2b na fachada Este (painéis enterrados a vermelho) 124
Anexo III. 14 – Situação 2: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1b e M2b na fachada Este 124
Anexo III. 15 – Situação 3: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1a e M1b na Cobertura 124
Anexo III. 16 – Situação 3: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1a e M1b na fachada Sul 125
Anexo III. 17 – Situação 3: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1a e M1b na fachada Oeste 125
Anexo III. 18 – Situação 3: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1a e M1b na fachada Norte 125
Anexo III. 19 – Situação 3: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1a e M1b na fachada Este 125
Anexo III. 20 – Situação 4: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M2a e M2b na Cobertura 126
Anexo III. 21 – Situação 4: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M2a e M2b na fachada Sul 126
Anexo III. 22 – Situação 4: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M2a e M2b na fachada Oeste 126
Anexo III. 23 – Situação 4: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M2a e M2b na fachada Norte 126
Anexo III. 24 – Situação 4: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M2a e M2b na fachada Este 127
Anexo III. 25 – Situação 5: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1b e M3 na Cobertura 127
Anexo III. 26 – Situação 5: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1b e M3 na fachada Sul (painéis enterrados a vermelho) 127
Anexo III. 27 – Situação 5: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1b e M3 na fachada Sul 127
Anexo III. 28 – Situação 5: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1b e M3 na fachada Oeste (painéis enterrados a vermelho) 128

Anexo III. 29 – Situação 5: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1b e M3 na fachada Norte 128
Anexo III. 30 – Situação 5: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1b e M3 na fachada Este (painéis enterrados a vermelho) 128
Anexo III. 31 – Situação 5: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1b e M3 na fachada Este..... 128
Anexo III. 32 – Situação 6: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M2b e M3 na Cobertura..... 129
Anexo III. 33 – Situação 6: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M2b e M3 na fachada Sul (painéis enterrados a vermelho) 129
Anexo III. 34 – Situação 6: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M2b e M3 na fachada Sul..... 129
Anexo III. 35 – Situação 6: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M2b e M3 na fachada Oeste (painéis enterrados a vermelho)..... 129
Anexo III. 36 – Situação 6: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M2b e M3 na fachada Norte 130
Anexo III. 37 – Situação 6: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M2b e M3 na fachada Este (painéis enterrados a vermelho) 130
Anexo III. 38 – Situação 6: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M2b e M3 na fachada Este..... 130

Siglas, Acrónimos e Simbologia

2D: Bidimensional
2.5D: Duas dimensões e meia
3D: Tridimensional
ASCII: American Standard Code for Information Interchange
BIM: Building Information Model
CAD: Computer Aided Design
CGA: Computer Generated Architecture
CIM: City Information Model
CTO: Casa Laboratório Termicamente Optimizada
FEUP: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
INETI: Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação
LIDAR: Light Detection And Ranging
MDS: Modelo Digital de Superfície
MDT: Modelo Digital do Terreno
nZEB: Nearly Zero Energy Buildings
SEBE: Solar Energy on Building Envelopes
SIG: Sistemas de Informação Geográfica
UAV: Unmanned aerial vehicle
EU: União Europeia
UNEP: United Nations Environment Programme

A: ângulo de incidência da radiação
$AngIn_{\Theta,\alpha}$: ângulo de incidência entre a superfície e o sector do céu
a_s: ângulo de azimute solar
a_w: ângulo de azimute da superfície
B_h: radiação solar que alcança uma superfície horizontal (banco de dados)
C: cor
$Dif_{\Theta,\alpha}$: radiação difusa com mapa do céu
$Dir_{\Theta,\alpha}$: radiação directa do mapa solar
Div_{azi}: número de divisões de azimutes
Dur: intervalo de tempo de análise
E_{beam}: componente de radiação solar directa que alcança uma superfície direccionada para o Sol, onde a direcção do raio solar é uma normal ao elemento exposto (banco de dados)
$E_{diffuse}$: componente de radiação solar difusa que alcança uma superfície horizontal (banco de dados)
$E_{incident}$: radiação solar incidente
ExposedArea: área de superfície exposta à radiação solar
F_{shad}: porção em sombra da superfície
F_{sky}: fracção do céu visível a partir da superfície

G_z: ângulo de distância zenital da superfície

H: altitude da superfície

h_s: ângulo horário

i: ângulo entre a normal da superfície e o ângulo de incidência da radiação

I_d: radiação solar difusa

I_o: fluxo de radiação solar

I_p: radiação solar directa numa superfície inclinada

I_s: radiação solar de onda curta que incide numa superfície normal aos raios solares

L: latitude do local

$m(\Theta)$: comprimento óptico relativo, determinado pelo ângulo zenital e altitude da superfície

M: massa de ar óptica

N: número do dia em análise

P_{dif}: proporção do fluxo da radiação difusa

RE: reflexão especular

R_{glb}: radiação global normal

$SDur_{\Theta,\alpha}$: tempo de cálculo representado pelo sector do céu

$SGap_{\Theta,\alpha}$: fracção do intervalo do sector do mapa solar

$SkyGap_{\Theta,\alpha}$: fracção do intervalo do sector do mapa do céu

S_o: constante solar

T: transparência

$Weight_{\Theta,\alpha}$: proporção de radiação difusa que origina num sector do céu

α: ângulo de altura solar

β: ângulo de inclinação da superfície

δ_s: declinação solar

Θ: ângulo de distância zenital solar

τ: transmitância atmosférica para o percurso mais curto

τ_b: transmitância atmosférica para a radiação directa

τ_d: coeficiente de radiação difusa

Capítulo 1

Introdução

1. Introdução

1.1 Enquadramento geral

A construção de edifícios com necessidades energéticas reduzidas assumiu a maior relevância a partir da década de 70, após a primeira crise energética decorrente do impacto da crise petrolífera. O renovado interesse no aproveitamento das energias renováveis (Moita, 1987) gerou manifestações em áreas muito diversas, entre as quais a Arquitectura, promovendo o desenvolvimento de projectos piloto de habitação que fossem ao encontro deste objectivo. Um desses exemplos, construído em 1974, é o edifício *Nul-Energihus*, em Lyngby na Denmark por Vagn Korsgaard (Figura 1.1), conjugando um sistema activo de captação solar para aquecimento com o isolamento térmico do edifício tornando-se uma referência internacional (Wünsch, 2013).

Efectivamente a Arquitectura acompanhou esta tendência e já na década de 90 a Europa ocupava a liderança no projecto de edifícios de baixo consumo energético (Hastings e Wall, 2006). Em 1992 a *Solar House Freiburg* (Figura 1.2), projecto do *Fraunhofer Institut fur Solare Energiesysteme* e Wilhelm Stahl, na Alemanha, alcançou uma total autonomia energética unicamente por energia solar através da combinação de isolamento transparente, com painéis solares térmicos e fotovoltaicos, e com a produção de hidrogénio para armazenamento de energia (Voss *et al.*, 1996). Refira-se que embora estas soluções tenham sido pioneiras no domínio do baixo consumo energético não eram financeiramente acessíveis.

Uma abordagem mais plausível foi concebida por Wolfgang Feist e Bo Adamson, físico Alemão e engenheiro Sueco, no seguimento do *Passive House Preparatory Research Project*. Os protótipos de habitação em linha *Passivhaus*, em Darmstadt Kranichstein, foram construídos em 1991, financiados pelo estado de Hesse na Alemanha (Figura 1.3). *Passivhaus* tornou-se uma corrente com adeptos por toda a Europa, contando actualmente com cerca 32000 edifícios (enGENIUM, 2013). Com componentes de alto desempenho disponíveis no mercado, como ventiladores com permutadores de calor, janelas termicamente isoladas e sistemas térmicos solares optimizados, o conceito base é, um excelente isolamento térmico que mantém o calor desejado no interior e o indesejado no exterior, com um sistema de ventilação que fornece ar novo constante ao interior e um sistema de recuperador de calor que permite extrair o calor existente no ar e reutiliza-lo. Resultando num edifício com baixo consumo de energia que mantém condições de conforto térmico no espaço interior.

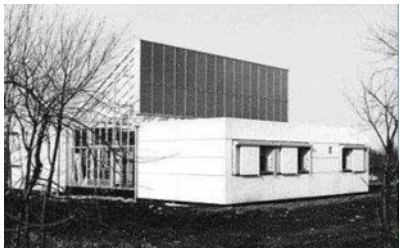


Figura 1.1 – *Nul-Energihus*
(Wünsch, 2013)

Figura 1.2 – *Solar House Freiburg*
(Passipedia, 2015)

Figura 1.3 – *Passivhaus*
(Passipedia, 2015)

Em Portugal, seguindo as mesmas tendências, foi construída em 1984, a Casa Laboratório Termicamente Optimizada (CTO) por iniciativa conjunta do Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação (INETI) e da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). A CTO foi projectada de forma a assegurar as condições de conforto térmico com um baixo consumo energético, consumindo o mínimo de energia para o aquecimento utilizando ao máximo os recursos energéticos do ambiente (sol, temperatura do ar, protecção do terreno). Tendo assim aplicado materiais que garantem a inércia térmica, e também, instalado na cobertura colectores solares, que asseguram um apoio no aquecimento da água sanitária (AdEPorto, 2013).

Com o início da crise financeira que assola a Europa e o mundo nos últimos anos, a Comissão Europeia tomou um conjunto de iniciativas com a intenção de prevenir crises semelhantes e preservar a estabilidade financeira da União (Paulo, 2011), nomeadamente através do programa Estratégia Europa 2020. Este programa lançado em 2010 visa definir a estratégia da União Europeia (UE) que proporcionará o crescimento sustentável e emprego, tendo sido definidos cinco objectivos principais que a UE deverá atingir até ao final de 2020: Emprego, Clima/Energia, Educação, Inclusão Social e Redução da Pobreza (Comissão Europeia, 2015). Para garantir um crescimento sustentável foi definido a necessidade de aumentar para 20% a energia de origem de fontes renováveis e aumentar em 20% a eficiência energética (Comissão Europeia, 2012).

De acordo com o estudo apresentado no Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (*United Nations Environment Programme*) (UNEP, 2007), os edifícios são responsáveis por 40% do consumo de energia total de cada país, pelo que a União Europeia criou legislação relativa à redução de consumo de energia dos edifícios, de forma a garantir a sua eficiência energética: a Directiva Desempenho Energético dos Edifícios de 2010 (Parlamento Europeu, 2010) e a Directiva Eficiência Energética de 2012 (Parlamento Europeu, 2012). A primeira directiva preconiza que todos os novos edifícios devem ter necessidades quase nulas de energia (*Nearly Zero Energy Buildings* - nZEB) até ao final de 2020, e todos os edifícios públicos até 2018 e a segunda exige que os países da UE elaborarem estratégias a longo prazo para a renovação de edifícios de forma a aumentar a sua eficiência energética (Comissão Europeia, 2016).

Os edifícios com necessidades energéticas quase nulas (nZEB) são edifícios com um desempenho energético optimizado, resultando em necessidades energéticas quase nulas ou muito reduzida. A energia em falta deve ser obtida em grande parte por energias renováveis ou no local, ou nas proximidades (Hermelink et al., 2013). Neste estudo de 2013, apresentado aos países da UE, é disponibilizada uma base de dados com vários exemplos, dos quais, a habitação unifamiliar, *Home for Life* em Aarhus, Dinamarca, construído em 2008 (Figura 1.4); o bloco de apartamentos, *Kleehäuser* em Freiburg, Alemanha, construído em 2006 (Figura 1.5); e o quarteirão habitacional, *Solarsiedlung* em Freiburg, Alemanha, construído em 2008 (Figura 1.6). Entre os principais conceitos energéticos aplicados nestes projectos, encontram-se as normas *Passivhaus* de isolamento, a instalação de painéis fotovoltaicos para produção de energia, e no caso dos dois primeiros projectos (Figura 1.4 e 1.5), a instalação de painéis solares térmicos para aquecimento.

Figura 1.4 – *Home for Life* (Musall, 2012)

Figura 1.5 – *Kleehäuser* (Musall, 2012)

Figura 1.6 – *Solarsiedlung* (Hagemann, 2007)

De forma a alcançar os requisitos energéticos almejados nos edifícios nZEB a procura de soluções energéticas alternativas leva cada vez mais à instalação de painéis solares. De forma a captar energia solar, energia abundante e disponível em todo o mundo com diferentes graus de intensidade, esta tecnologia permite o aquecimento de água com os painéis solares térmicos (colectores solares), não sendo necessário despender energia nesta tarefa, ou produzir electricidade utilizando painéis fotovoltaicos.

Com a evolução da tecnologia e redução de custos de produção esta opção ganhou viabilidade e tornou premente a análise dos factores que promovem a sua optimização. Os estudos anteriores de radiação solar consideravam apenas cenários não urbanos, numa escala macro com ferramentas de análise espacial em ambiente SIG (Sistemas de Informação Geográfica) (Hofierka and Suri, 2002), ou apenas sobre a medição da radiação solar nas coberturas, local mais benéfico para a instalação de painéis solares (Brito *et al*., 2012 e Santos *et al.*, 2011). Contudo, com a evolução das células fotovoltaicas, as fachadas tornam-se cada vez mais uma possibilidade para a sua instalação recorrendo a células solares transparentes (Figura 1.7), possíveis de ser colocadas em fachadas envidraçadas (Figura 1.8) ou na aplicação de células fotovoltaicas em sistemas de sombreamento de fachadas (Figura 1.9).

Figura 1.7 – Célula solar transparente (Sarmiento, 2014)

Figura 1.8 – Cobertura envidraçada com células solares transparentes (Sarmiento, 2014)

Figura 1.9 – Sistema de sombreamento com células solares (Frank, 2012)

Estas soluções já se encontram aplicadas em alguns projectos arquitectónicos, entre eles, encontra-se o caso dos edifícios ECN 31 e 42 (Figura 1.10), renovado e construído em 2000, na Holanda, de forma a tornar estes sustentável, onde, para maximizar os ganhos solares foram instaladas células fotovoltaicas nos sistemas de sombreamento da fachada Sul e na cobertura curva envidraçada, impedindo também o sobreaquecimento no verão (BP Solar, 2001). Em Portugal, existem já alguns exemplos, o edifício Solar XXI (Figura 1.11), construído em 2004, em Lisboa, onde, para garantir que as condições de conforto térmico sejam satisfeitas durante todo o ano, em conjunto com outros sistemas, foram instalados painéis fotovoltaicos na fachada Sul e colectores solares na cobertura, que optimizam também o consumo energético (LNEG, 2010). Em Carcavelos, existe também, o Centro Operacional da Brisa (Figura 1.12), de Carrilho da Graça, construído em 2004, onde foram instalados colectores solares nas fachadas Este, Sul e Oeste e na cobertura, com uma inclinação de 7º a Sul, como um meio de optimizar as necessidades de energia do edifício, sendo estes totalmente responsáveis pelo condicionamento das instalações (Carrilho da Graça Arquitectos, 2004).

Figura 1.10 – Edifícios ECN 31 & 42 (BP Solar, 2001)

Figura 1.11 – Edifício Solar XXI (LNEG, 2010)

Figura 1.12 – Centro Operacional da Brisa (Carrilho da Graça Arquitectos, 2004)

Neste contexto, o estudo da localização das células fotovoltaicas ou colectores solares, reveste-se da maior importância. A evolução das ferramentas de cálculo, nomeadamente de análise da radiação solar incidente, permite abordar o problema em modelos com maior detalhe e inseridos no seu espaço geográfico, evitando a simplificação das abordagens tridimensionais cuja análise se restringe ao edifício encarado como entidade única e isolada, ignorando a morfologia do terreno e a presença de elementos contíguos (Freitas *et al.*, 2014). Para além disso, a determinação mais rigorosa da exposição solar é também crucial para a determinação dos ganhos solares pelos edifícios e o seu desempenho energético, como para estudos de desempenho e estratégias de controlo de dispositivos de sombreamento e estudos de durabilidade e patologias de revestimentos de fachadas.

1.2 Objectivo da dissertação

O objectivo desta dissertação é avaliar a influência do contexto geográfico na determinação da exposição solar em meio urbano, nomeadamente no cálculo da radiação solar incidente ao nível das coberturas e fachadas dos edifícios. Além das variáveis geográficas (relevo e orientação geográfica) é analisada a influência da geometria dos edifícios em análise e dos edifícios envolventes e as propriedades dos seus materiais de revestimento.

A concretização deste objectivo dependerá da realização dos seguintes objectivos secundários:

- Identificação dos principais modelos de radiação solar disponíveis no mercado e suas características;
- Construção de um modelo tridimensional da área em estudo, com base em modelação procedimental, com diversos níveis de detalhe arquitectónico, várias dimensões de área e morfologias do terreno;
- Aplicação dos modelos de radiação solar seleccionados aos casos de estudo acima descritos;
- Identificação de vantagens e desvantagens dos vários modelos de radiação solar incidente nos edifícios;
- Análise da influência da morfologia do terreno e das características geométricas da envolvente do edifício no cálculo.

1.3 Organização do trabalho

A estrutura da dissertação assenta em seis capítulos.

O primeiro capítulo identifica a importância e o enquadramento da temática em estudo, seguido pelos objectivos a alcançar com o trabalho desenvolvido.

No capítulo 2 desenvolve-se a revisão bibliográfica dos modelos de potencial solar, identificando os diferentes métodos de aquisição dos modelos digitais de superfície e das diferenças tipológicas entre os modelos de radiação.

O capítulo 3 foca a metodologia de trabalho adoptada no presente estudo para o cumprimento dos objectivos definidos.

No capítulo 4 descreve-se o caso de estudo escolhido, começando pela sua caracterização espacial, seguido da criação do modelo digital e consequente aplicação dos modelos de radiação.

No capítulo 5 comparam-se os modelos de radiação, e de seguida, a morfologia do terreno e das características geométricas da envolvente.

Por último, no capítulo 6, tece-se um conjunto de conclusões relativas ao trabalho desenvolvido, assim como, a identificação de possíveis desenvolvimentos futuros.

Capítulo 2

Potencial Solar

2. Potencial Solar

O Sol é a principal fonte de energia do planeta terra. O centro do Sol fabrica energia através de uma reacção termonuclear, produzindo núcleos de átomos de hidrogénio que ao fundirem-se geram núcleos de hélio, resultando numa onda de calor que permite a sua superfície alcançar uma temperatura perto dos 5500ºC. A energia irradiada pelo Sol é emitida com uma intensidade de 6600 W/cm² à velocidade de 300 000 km/s, sob a forma de ondas electromagnéticas, atingindo os limites da atmosfera terrestre 8,27 minutos mais tarde, com uma intensidade de cerca de 1370 W/m², valor ao qual se dá o nome de constante solar (Moita, 1987).

A constante solar (1370 W/m²) varia ±3,5%, consoante a distância entre o Sol e a Terra, com valores de cerca 1320 W/m² no verão e 1410 W/m² no inverno (Moita, 1987). De facto, o movimento terrestre em torno do Sol, que descreve uma elíptica, faz com que a distância varie ao longo do ano, atingindo uma distância intermédia nos equinócios e uma distância máxima e mínima no solstício de verão do hemisfério norte e no solstício de inverno do hemisfério norte (Figura 2.1). O eixo terrestre que liga os pólos mantém um ângulo constante de 23º27' com o plano da elíptica, o que permite e existência de estações e diferentes períodos anuais de insolação.

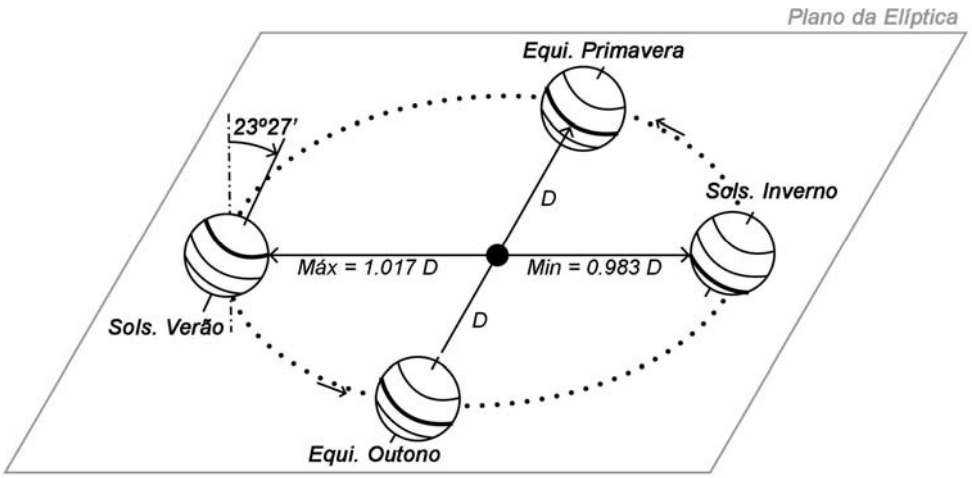


Figura 2.1 – Trajectória, distâncias da Terra em torno do Sol (no hemisfério norte) (adaptado de Moita (1987))

Antes que a radiação solar possa atingir a superfície terrestre esta atravessa a atmosfera, que aumenta de densidade com proximidade com a superfície. Este fenómeno diminui a intensidade da radiação solar que alcança a superfície terrestre em relação aos valores observados no topo da atmosfera, resultado de processos de absorção e difusão da radiação solar pela atmosfera. Quanto mais espessa for a camada de atmosfera atravessada pelos raios solares, menor será a potência energética da radiação à superfície da Terra.

O ângulo de incidência de radiação solar com a superfície também condiciona a potência energética, pelo que, quanto mais perpendicular for a radiação mais elevada será a sua energia. Deste modo, para quantificar a energia solar é necessário localizar a posição do Sol no céu,

localização definida pelo ângulo de azimute, medido em plano horizontal, e a altura solar ou distância zenital, medido em plano vertical, para um determinado local (Figura 2.2).

O azimute é o ângulo formado pelo plano vertical do Sol com o sul, ou norte dependendo no modelo de radiação, do meridiano do lugar. A altura solar é a elevação angular em relação ao horizonte medido do horizonte até ao centro do Sol, sendo 0º ao nascer e por do Sol. Tendo como ângulo complementar a distância zenital, relação entre o zénite e o Sol, que pode definir igualmente a posição do Sol no plano vertical (distância zenital + altura do Sol = 90º).

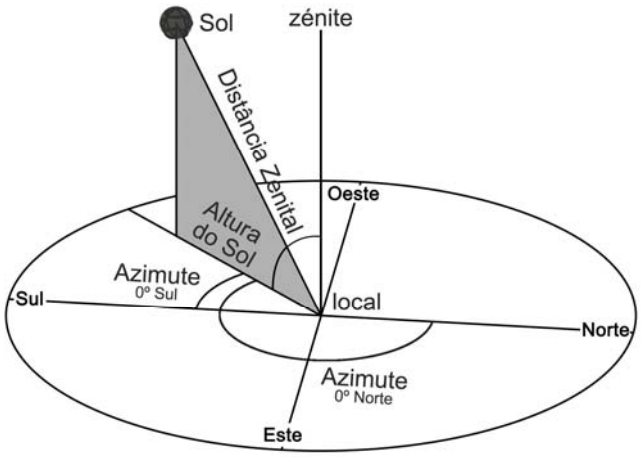


Figura 2.2 – Ilustração do o ângulo de azimute, altura solar e distância zenital (adaptado de Kumar et al. (1997))

Com a variação da declinação solar, ângulo que o Sol faz com o equador celeste, variam igualmente as durações dos dias e, consequentemente a intensidade de radiação solar (Myers, 2013). Desta forma, a intensidade da radiação solar encontra-se em variação constante, dependendo da época do ano, da altura do dia, das condições atmosféricas, da latitude do lugar e do ângulo de radiação com a superfície de incidência.

A energia solar recebida por qualquer superfície pode ser dividida em três variáveis: radiação directa, tipo de radiação mais intensa, que alcança a superfície terrestre sem obstáculos; radiação difusa, que é a radiação disseminada em todas as direcções pelas moléculas de ar e por partículas que compõem a atmosfera; radiação reflectida proveniente da reflexão no chão e dos objectos envolventes. A quantidade e partição entre os componentes da radiação global são influenciadas pelo estado do tempo e a nebulosidade local, havendo um claro declínio na radiação global com o aparecimento de nuvens no céu. Segundo Moita (1987), a radiação global, com o céu muito limpo sem nuvens é 90% radiação directa e 10% radiação difusa. Com o aumento da nebulosidade a proporção inverte. Assim, com céu coberto com algumas nuvens mas com boas abertas é 60% radiação directa e 40% radiação difusa, sendo que, com o céu muito encoberto, em que não se vê o Sol, a radiação difusa pode ser inteiramente responsável pela radiação global incidente.

Assim, os modelos de potencial solar estimam a radiação solar que atinge um determinado local na superfície terrestre, seja de forma directa ou indirecta, sendo necessário ter em conta factores

geográficos, meteorológicos e temporais. Cada modelo implementa uma metodologia distinta para o cálculo de radiação incidente, utilizando diferentes variáveis, de forma a simular a realidade, para obter os mesmos resultados. Cálculos mais detalhados exigem o conhecimento dos elementos geográficos contíguos recorrendo ao Modelo Digital de Superfície (MDS) através da combinação entre os elementos existentes com a informação orográfica do Modelo Digital do Terreno (MDT) (Freitas *et al.*, 2014).

2.1 Modelos Digitais de Superfície

Existem duas formas de se obter um MDS para o meio urbano: i) através da aquisição de uma nuvem de pontos 3D que permite a reconstrução geométrica dos elementos (com base em levantamentos com fotografia aérea, sistemas não tripulados de recolha de dados (UAV) ou sistemas LIDAR (*Light Detection And Ranging*) (Figura 2.3); ii) através de modelação procedimental e paramétrica, onde os elementos são modelados com base nos valores dos seus atributos, geralmente organizados em bases de dados, e combinados com a informação relativa ao MDT (Figura 2.4).

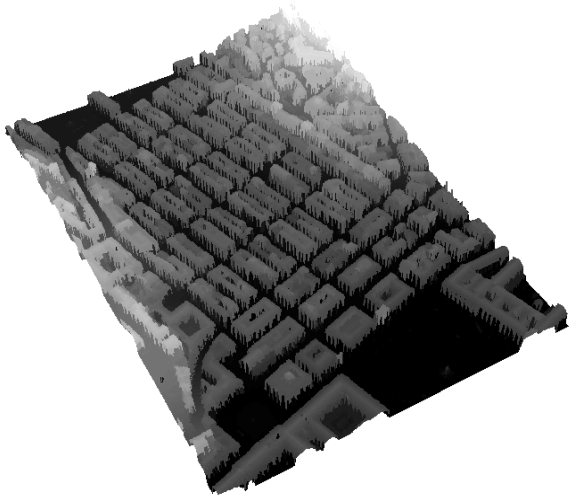


Figura 2.3 – MDS obtido por LIDAR
(Facultado pela empresa CGI)

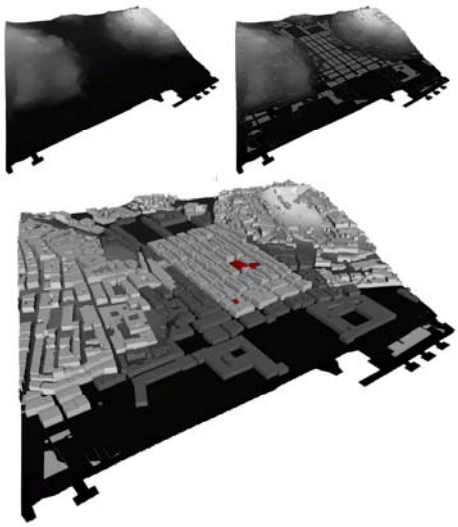


Figura 2.4 – MDS obtido em *CityEngine* por modelação procedimental

No contexto da primeira alternativa, o sistema LIDAR é uma técnica de detecção remota que recolhe grandezas (ângulos e distâncias) e determina coordenadas tridimensionais (x,y,z). Dada a rapidez na aquisição da informação são geralmente adquiridos pontos com pouco espaçamento entre eles, produzindo nuvens densas de pontos que retratam *per si* a geometria tridimensional dos objectos (ESRI, 2013). Embora hoje em dia estes dados já existam para diversas áreas geográficas, são necessários cuidados no processamento de modo a reduzir eventuais erros que possam ocorrem durante a aquisição (Carneiro *et al.*, 2008). Existem diversas estratégias sendo a mais frequente a combinação com outros elementos geográficos: por exemplo utilizando os polígonos de implantação dos edifícios é possível excluir pontos adquiridos com LIDAR, tomando como base o cálculo das diferenças altimétricas entre os pontos contidos no interior do polígono de implantação. Especial

atenção merecem também os pontos relativos a elementos temporários como veículos, pássaros e pessoas que devem ser igualmente eliminados.

Na segunda alternativa a informação geográfica é associada a regras de modelação procedimental, resultando num modelo tridimensional que em ambiente urbano é geralmente designado por CIM (*City Information Model*) (Gil *et al.*, 2011). Este não tem o rigor de forma que se obtém do LIDAR, a sua qualidade está estreitamente relacionada pela informação que o define, contudo, esta metodologia permite a criação de modelos de forma expedita com volumetrias facilmente manipuláveis. Os modelos CIM agregam informação geométrica dos elementos urbanos, com as suas características/atributos numa base geográfica, resultando numa base de dados de gestão de informação da cidade (Galego, 2014). Em ambiente urbano, onde se observe uma quantidade significativa de simetria e repetição, a modelação procedimental é especialmente útil e capaz de captar a identidade local (Aliaga, 2012). O modelo CIM em ambiente urbano tem um comportamento similar ao modelo BIM (*Building Information Model*) para um edifício/infra-estrutura singular. Dependendo do objectivo e da existência de informação atribuída aos elementos é possível formar diversos níveis de detalhe no mesmo modelo: elementos volumétricos simples, elementos volumétricos texturizados através da projecção de fotografias/elementos gráficos (Figura 2.5), ou os elementos volumétricos parametrizados com regras, resultantes da divisão em parcelas elementares correspondentes às partes constituintes das fachadas, sendo possível associar um modelo exterior correspondente a elementos arquitectónicos com uma complexidade acentuada (Figura 2.6). Igualmente possível é a importação dos modelos BIM no caso de edifícios isolados. Exemplos de aplicação da geração paramétrica, são os trabalhos desenvolvidos para a cidade de Roma (Saldana, 2015 e Saldana, *et al.* 2013) onde, a par da compilação dos dados geográficos, houve o desenvolvimento de jogos interactivos que permite a recriação da paisagem para vários períodos temporais. As características de modelação processual foram igualmente aplicadas na construção digital de três modelos da Ala Este do Louvre, de forma a possibilitar a comparação das propostas de Louis Le Vau's e de Gian Lorenzo Bernini com o design actual (Calogero *et al.*,2013).

O software *CityEngine*, da ESRI, permite a criação dos modelos CIM através de modelação procedimental utilizando a linguagem de programação CGA (*Computer Generated Architecture*). Na sua génese está a ligação de um conjunto de informação geográfica e respectivos atributos a um conjunto hierárquico de regras, facilitando operações de análise espacial que podem ajudar na construção destes modelos: por exemplo ao nível do edificado, é possível identificar as fachadas dos vários polígonos de implantação se esta informação for combinada com a informação da rede viária, ou ainda obter informação relativa à orientação do modelo. Fachadas detalhadas podem ser criadas através de uma subdivisão dos volumes, que resultam da extrusão das planimetrias de implantação de edifícios, que dependendo do nível de detalhe procurado estas podem ser de novo divididas para criar módulos repetíveis (Shirmer e Kawagishi, 2011). É ainda possível gerar relatórios baseados nas diversas regras de modelação e obter valores de grandezas associadas aos elementos analisados, como diversos tipos de áreas, áreas brutas de construção, áreas de pavimento ou áreas de

envidraçado, ou as orientações dos elementos, entre outras características geométricas. Esta informação pode ser visionada em tabela no próprio software, e dependendo no tipo de exportação efectuada, ficar associada aos elementos que as evocam.

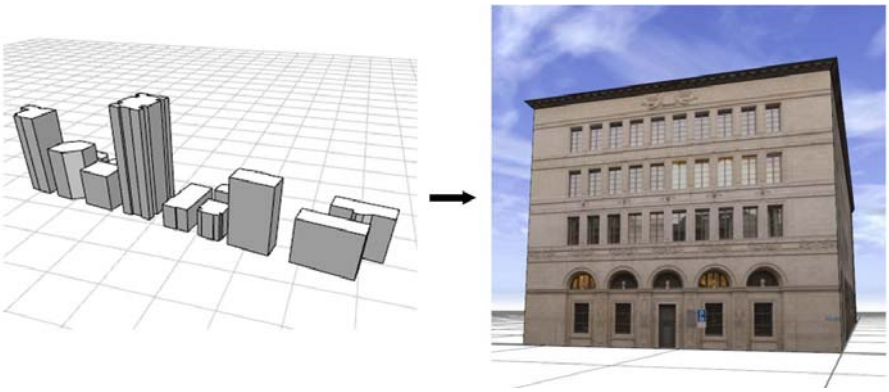


Figura 2.5 – Fachada em *CityEngine* através de fotografia (ESRI, 2015c)

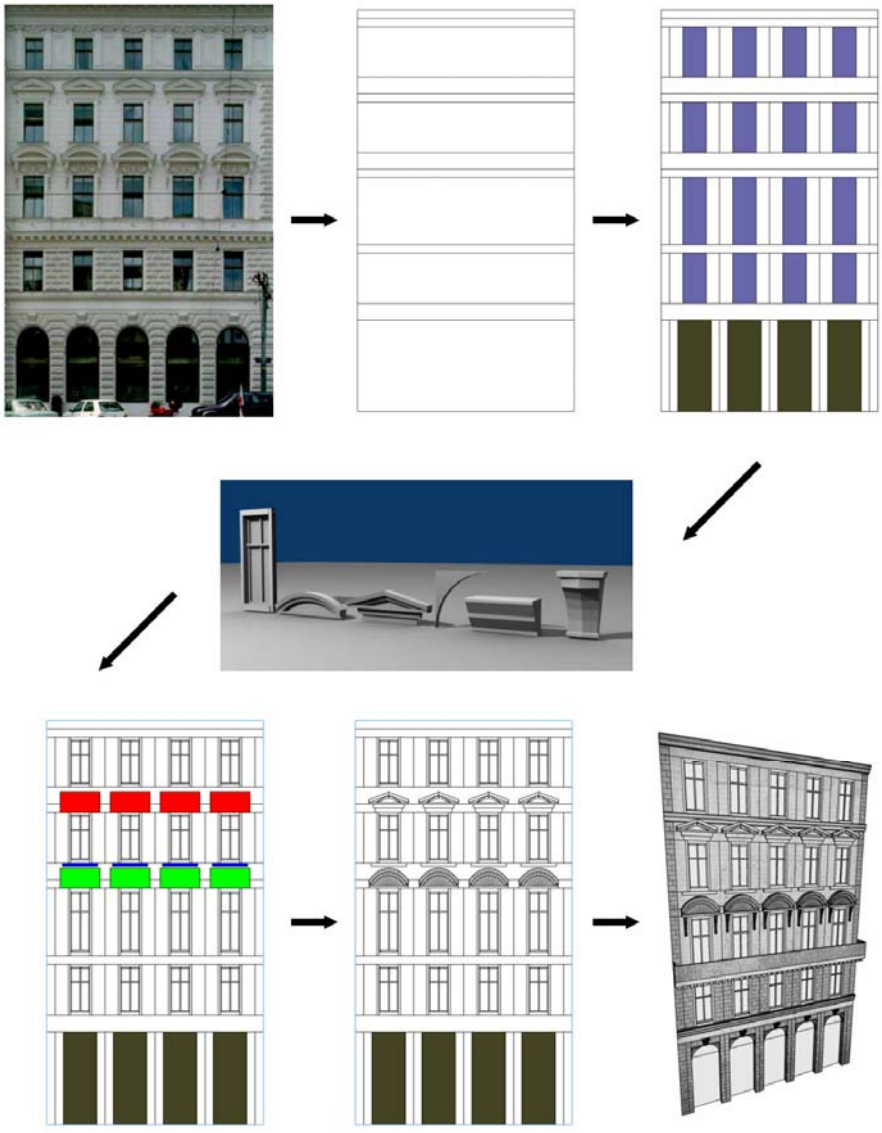


Figura 2.6 – Fachada em *CityEngine* através da divisão em parcelas (ESRI, 2015c)

2.2 Modelos de Radiação Solar

Tradicionalmente os estudos de radiação solar consideram apenas cenários não urbanos, conjuntos de coberturas ou edifícios isolados, pela dificuldade de obter modelos de superfície de áreas urbanas e porque em áreas não urbanas o modelo de superfície é equivalente ao modelo de terreno, que existe praticamente para qualquer área embora com níveis de detalhe muito diversos. Numa área não urbana este cálculo está bastante simplificado face às áreas urbanas onde a complexidade do ambiente urbano resulta num mapa de sombras mais complexo. Qualquer elemento presente no ambiente urbano, como vegetação ou mobiliário urbano, influencia o mapa de sombras mas de forma a não complicar em demasia o modelo estes são por vezes ignorados.

Na prática a aplicação destes modelos surge essencialmente para promover o uso da energia solar, através da instalação de painéis fotovoltaicos ou de captação de energia solar térmica, de forma a melhorar os modelos energéticos e a promover a configuração de cidades sustentáveis (Santos *et al.*, 2011; Chow *et al.*, 2014).

Disponíveis no mercado existem diversos modelos de análise de radiação solar que variam em abrangência geográfica e na consideração da volumetria: de abordagem 2.5D ou abordagem 3D.

2.2.1 Modelos de Radiação Solar: Abordagem 2.5D

No caso dos modelos de abordagem 2.5D a cada posição planimétrica (x,y) corresponde um único valor de altitude (H), pelo que não é possível diferenciar elementos dentro dos diversos planos que compõem o objecto. Não sendo possível distinguir valores a diferentes níveis, esta abordagem tem um único valor de radiação solar para cada posição (x,y).

Em Santos *et al.* (2011) é apresentada uma metodologia de cálculo da exposição solar em ambiente SIG, recorrendo previamente à integração num modelo único da informação obtida por LIDAR do modelo digital de superfície e informação relativa à implantação do edificado. O objectivo do trabalho consistia na identificação das localizações mais favoráveis para a instalação de painéis fotovoltaicos. O algoritmo utilizado, *Area Solar Radiation* do *ArcGIS*, permite a avaliação das mudanças na orientação, elevação e ângulos solar, tal como as sombras da envolvente durante o intervalo de tempo de cálculo. Com esta solução é possível obter, de uma forma expedita, dados para uma área de cidade alargada.

O algoritmo *Area Solar Radiation* considera que a radiação solar é alterada ao atravessar a atmosfera e novamente modificada pela topografia. Usualmente a radiação directa é a mais significante seguido pela difusa, sendo a radiação reflectida a componente mais pequena, excepto em situações especiais, como a presença de elementos muito reflectivos como neve. Por este motivo esta componente não é considerada no modelo de *Area Solar Radiation* (ESRI, 2014c). Os resultados são apresentados em formato matricial onde cada célula representa o total da radiação global incidente nesta coordenada, radiação directa mais radiação difusa, utilizando como unidade Watt-hora por metro quadrado (Wh/m²) (ESRI, 2014a). Contabilizando com efeitos atmosféricos, latitude e altitude, declive (*slope*) e orientação (*aspect*) do território, como variações diárias e sazonais de ângulo solar e projecção de sombras na topografia circundante (ESRI, 2014d).

A influência da envolvente (topografia e edificado) é avaliada construindo uma visão única, para cada ponto, do espaço ocupado "de baixo para cima do território (MDS)" de forma a determinar a quantidade de céu visível num determinado ponto. Este é combinado com um mapa de posição solar (designado por *sunmap*) de forma a obter a radiação directa e, posteriormente, combinado com um mapa do céu (*skymap*) para obter a radiação difusa. O mapa de posição solar é uma representação sob a forma matricial, dividida em sectores, que rastreia a aparente posição do Sol. Cada um destes sectores tem um valor associado, em conjunto com o ângulo do azimute e zénite do centróide. O mapa do céu representa o hemisfério do céu dividido por sectores, definidos pelo ângulo do azimute e zénite, para o qual é calculado um valor de radiação difusa (Figura 2.7). O parâmetro dimensão do céu (*sky size*) determina a resolução das grelhas dos mapas de posição solar e de céu que, por motivos de optimização do algoritmo, corresponde a uma imagem matricial com 200 células (ESRI, 2014a). Aumentar a dimensão mapeada do céu torna o resultado mais rigoroso mas aumenta igualmente o tempo de cálculo. Dependendo da localização da área de estudo é importante identificar como se caracteriza a presença de nuvens. Para céu tipicamente limpo, no caso da radiação directa a transmissão (*transmittivity*) da atmosfera é de 0,5, e no caso da radiação difusa a proporção do fluxo da radiação que é difusa (*diffuse proportion*) é de 0,3 (ESRI, 2014b).

A metodologia desta ferramenta foi desenvolvida por Rich *et al.* (Rich 1990, Rich *et al.* 1994) e Fu and Rich (2000, 2002), citado em ESRI (2014b), onde a radiação global é dada pelo somatório das radiações directa e indirecta. Estes seguem as seguintes equações:

$$Dir_{\Theta,\alpha} = S_o * \tau^{m(\Theta)} * SDur_{\Theta,\alpha} * SGap_{\Theta,\alpha} * \cos(AngIn_{\Theta,\alpha}) \quad (2.1)$$

$$m(\Theta) = \exp\left(-0{,}000118 * H - 1{,}638*10^{-9} * H^2 \right) / \cos(\Theta) \quad (2.2)$$

$$AngIn_{\Theta,\alpha} = \operatorname{acos}\left(\cos(\Theta) * \cos(G_z) + \sin(\Theta) * \sin(G_z) * \cos(\alpha - a_w) \right) \quad (2.3)$$

Para a radiação directa do mapa solar ($Dir_{\Theta,\alpha}$) (equação 2.1, 2.2 e 2.3), com ângulo zenital (Θ) e azimute (α) do centróide, a constante solar (S_o) é 1367 W/m², sendo τ a transmitância atmosférica para o percurso mais curto, $m(\Theta)$ o comprimento óptico relativo determinado pelo ângulo zenital e altitude da superfície, $SDur_{\Theta,\alpha}$ tempo de cálculo representado pelo sector do céu, $SGap_{\Theta,\alpha}$ fracção do intervalo do sector do mapa solar, $AngIn_{\Theta,\alpha}$ ângulo de incidência entre a superfície e o sector do céu, H a altitude da superfície, G_z o ângulo zenital da superfície e a_w o azimute da superfície.

$$Dif_{\Theta,\alpha} = R_{glb} * P_{dif} * Dur * SkyGap_{\Theta,\alpha} * Weight_{\Theta,\alpha} * \cos(AngIn_{\Theta,\alpha}) \quad (2.4)$$

$$R_{glb} = \left(S_o \, \Sigma(\tau^{m(\Theta)}) \right) / \left(1 - P_{dif} \right) \quad (2.5)$$

$$Weight_{\Theta,\alpha} = \left(\cos\Theta_2 - \cos\Theta_1 \right) / Div_{azi} \quad (2.6)$$

Para a radiação difusa com mapa do céu ($Dif_{\Theta,\alpha}$) (equação 2.4, 2.5 e 2.6), R_{glb} é a radiação global normal, P_{dif} proporção do fluxo da radiação que é difusa, Dur é intervalo de tempo de análise, $SkyGap_{\Theta,\alpha}$ fracção do intervalo do sector do mapa do céu, $Weight_{\Theta,\alpha}$ proporção de radiação difusa que origina num sector do céu, Θ_2 e Θ_1 ângulos zenitais que limitam o sector do céu e Div_{azi} número de divisões de azimutes.

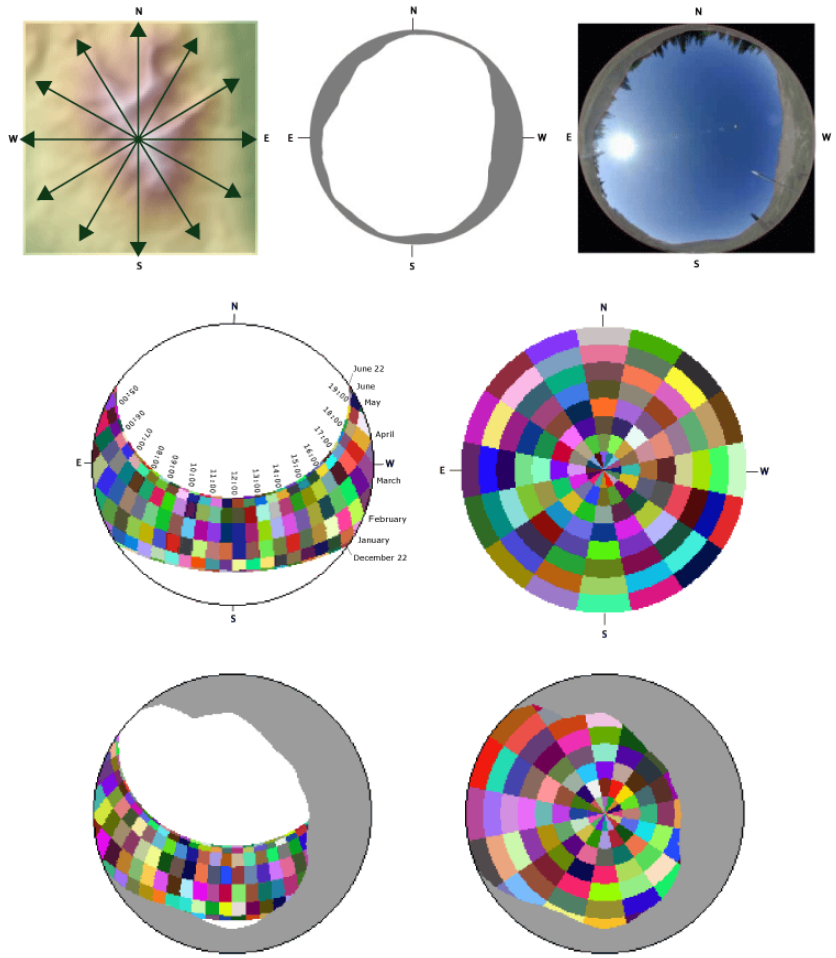


Figura 2.7 – Exemplo de céu visível (faixa superior); mapa de posição solar e mapa do céu (faixa intermédia); combinação dos mapas (faixa inferior) (ESRI, 2014c)

O mesmo tipo de cálculos pode igualmente ser efectuado com *software SIG open source*, como o *software Grass GIS*, que não segue a mesma metodologia mas obtém resultados equivalentes. O algoritmo *r.sun*, com metodologia desenvolvida por Hofierka e Suri, é um modelo exclusivo para céu limpo, tendo em conta a radiação directa, radiação difusa e a radiação reflectida do solo, com potencial para evolução devido ao seu carácter *open source* (Hofierka and Suri, 2002).

Independentemente do algoritmo verifica-se que o tempo de cálculo aumenta com o nível de detalhe e com a complexidade dos elementos modelados e, por esse motivo, são exploradas metodologias que simplifiquem o problema, simplificando o nível de detalhe. Chow *et al.* (2014) utiliza o mesmo algoritmo que Santos *et al.* (2011), *(Area Solar Radiation*), contudo este cria um modelo tridimensional em *SketchUp* que converte para um MDS 2.5D. A apresentação dos resultados bidimensionais dos cálculos da radiação solar e a informação são posteriormente extrapolados para um modelo visual 3D através da extrusão do volume dos edifícios, criando um modelo aproximado de radiação para as fachadas. Lindberg *et al.* (2015) adopta uma abordagem 2.5D *Solar Energy on Building Envelopes* (SEBE) complementada com informação 3D de vegetação, devidamente

calibrada para o ambiente 2D. A grande vantagem deste tipo de abordagem encontra-se na redução do nível de complexidade do modelo e consequente tempo de cálculo.

2.2.2 Modelos de Radiação Solar: Abordagem 3D

Nos modelos de abordagem 3D o "objecto" é descrito por um conjunto de pontos com coordenadas tridimensionais (x,y,H), onde a cada par (x,y) pode corresponder valores diferentes de H. As superfícies resultam do conjunto dos pontos, tendo associados vectores normais que orientam as superfícies e indicam a sua inclinação. Esta abordagem avalia a radiação solar incidente em cada superfície, utilizando os vectores normais para determinar o seu ângulo de incidência da radiação, permitindo a criação e análise de várias superfícies ao longo dos diferentes valores de altitude H (para a mesma posição x,y).

Existe uma diversidade de softwares disponíveis no mercado, geralmente orientados para a análise climática e energética, tendo nestes *softwares* disponíveis ferramentas direccionadas para o estudo do impacto solar dos modelos. Entre os mais reconhecidos destacam-se o *software open source EnergyPlus*, que não tendo um visualizador próprio pode ser usado em conjunto com o software *SketchUp* para facilitar a sua utilização (EnergyPlus, 2010) e o *software comercial Ecotect* (Autodesk, 2010d).

No caso do *software Ecotect* (Marsh, 2004) é utilizado um modelo 3D, onde se identificam os elementos planares que constituem o modelo. Existem duas alternativas de cálculo e visualização dos resultados: i) no módulo *Incident Solar Radiation* é calculada e apresentada a radiação incidente global, e os seus componentes radiação directa e radiação difusa, para cada elemento seleccionado, num período de tempo especifico, podendo estes valores ser visionados ou numa tabela com identificação do elemento, informação de área e consequente irradiação em Wh/m^2, ou no próprio modelo com informação iconográfica com os valores traduzidos numa escala de cor; ii) no módulo *Solar Exposure Graph*, é possível calcular para um ou vários elementos planares a informação de radiação em gráfico, apresentando apenas os valores totais para os elementos seleccionados, contudo neste módulo é possível contabilizar a radiação reflectida dos elementos em redor pretendidos.

Os módulos incluem os componentes de radiação directa (*sunshine*) e difusa proveniente do céu visível (*skylight*), calculados directamente a partir da geometria do modelo assim como dos valores horários de radiação solar directa e difusa, presentes no ficheiro climático. Neste caso é necessário indicar as coordenadas geográficas do centro da área. A componente directa, de radiação solar (E_{beam}) (W/m^2), presente no ficheiro climático é medida numa superfície direccionada para o Sol, sendo a direcção do raio solar uma normal ao elemento exposto. A componente de radiação difusa ($E_{diffuse}$) (W/m^2) é medida numa superfície horizontal. Este valor de base é modificado de acordo com o ângulo da superfície em análise, que influência a porção de céu visível. A quantidade de radiação difusa que alcança uma superfície está directamente relacionada com a porção de céu visível e logo, pelo factor de forma associado a cada superfície. Sem obstruções um plano horizontal tem um factor de forma unitário sendo influenciado pela totalidade do céu, enquanto que uma superfície vertical é

influenciada por apenas metade da cúpula celeste. Estes dois valores são combinados para se obter a radiação incidente, necessitando de informação específica do modelo, ver equação (2.7).

$$E_{incident} = [(E_{beam} \times \cos (A) \times F_{shad}) + (E_{diffuse} \times F_{sky})] \times \text{ExposedArea} \quad (2.7)$$

Irradiância ($E_{incident}$) (W/m^2) é definida pelo ângulo de incidência da radiação (A), a quantidade da superfície em sombra (F_{shad}), a fracção do céu visível a partir da superfície (F_{sky}) e a área de superfície exposta à radiação solar (ExposedArea), que caso a superfície não esteja em contacto com outra é equivalente a área total (Autodesk, 2010b).

As sombras do modelo são obtidas através de máscaras de sombra, que podem ser calculadas e guardadas para uso posterior, removendo assim tempo de cálculo (Marsh, 2004). As máscaras armazenam a fracção de sombra de uma superfície, sendo que um ponto encontra-se ou totalmente em sombra ou totalmente exposta à radiação solar. De forma a gerar as máscaras de sombra é necessário seccionar o céu numa grelha de segmentos angulares. A divisão pode ser obtida de diversos modos, como se exemplifica na Figura 2.8, no *Ecotect* esta grelha é definida pelos ângulos de azimute e altitude definidos pelo utilizador, existindo uma maior precisão em direcção ao zénite. Cada célula da grelha possui a percentagem de sombra presente nas superfícies do modelo. Para obter o valor de raio solar calcula-se primeiro a posição do Sol, azimute e altitude, para a hora e data desejada e, posteriormente, localiza-se a célula de céu com valores de ângulo equivalente, para se obter os valores de fracção em sombra adequados para o momento em estudo.

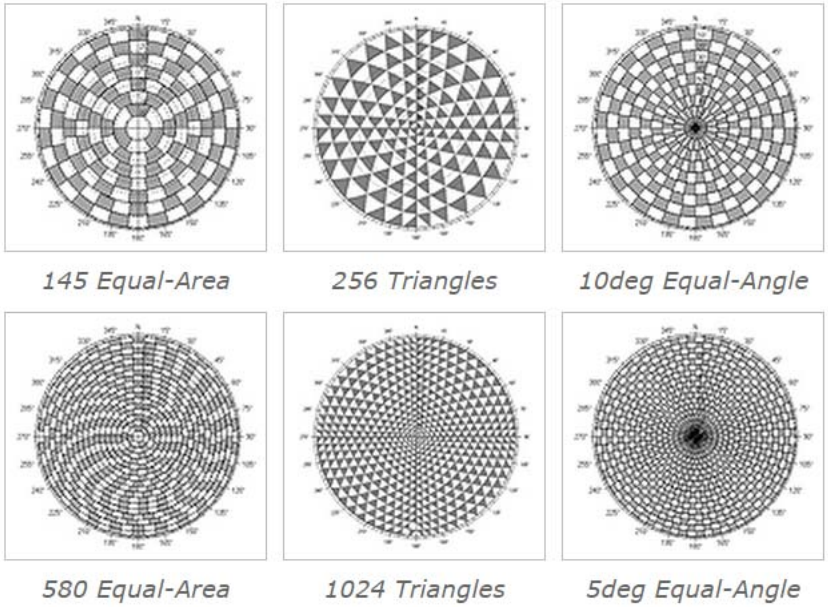


Figura 2.8 – Diferentes abordagens para a divisão do céu (Marsh, 2011)

O módulo *Incident Solar Radiation* e *Solar Exposure Graph* calculam a radiação incidente do mesmo modo, variando contudo no formato de exibição: o primeiro apresenta valores individuais para cada elemento seleccionado, enquanto o segundo expõe apenas o valor total combinado dos vários elementos escolhidos, contudo o segundo módulo exibe informação extra como a radiação reflectida.

Existem duas alternativas para a apresentação dos resultados do *Solar Exposure Graph*, em forma de gráfico ou em forma de tabela, onde são apresentados os valores da radiação incidente horária, a radiação reflectida recebida dos objectos rotulados em cada hora, como a percentagem da superfície que se encontra em sombra em cada hora (Autodesk, 2010c). Após o cálculo da radiação incidente, radiação que incide sobre uma superfície específica, é possível quantificar a quantidade que é absorvida ou transmitida para o interior, valores que dependem do material e das suas características. A quantidade de radiação absorvida é a parte restante da radiação incidente excluindo a radiação reflectida e a radiação transmitida.

A intensidade da reflexão provém da reflexão especular (RE) e transparência (T) do material. A reflexão especular mede o reflexo espelhado da luz, onde 1.0 representa um espelho perfeito e 0.5 significa que apenas metade da luz é reflectida de forma especular enquanto o resto é reflectida de forma difusa. Um objecto completamente transparente não projecta reflexão mesmo se rotulado. Contudo, é de assinalar que esta versão do *Ecotect* não contabiliza as reflexões dos objectos em redor como obstáculos, podendo o valor da radiação ser menos preciso pelo facto do valor da radiação reflectida ser acentuado (Autodesk, 2010a). Para materiais opacos a sua reflectividade encontra-se relacionada com a sua cor (C). Ou seja, o modelo considera simplificadamente que uma superfície brilhante reflecte tanta radiação solar como uma mate, se forem ambas da mesma cor, sendo que uma superfície mate reflecte difusamente em todas as direcções (Autodesk, 2010b). De forma a melhor definir a capacidade de absorção de radiação solar do material é possível atribuir ao parâmetro de *Solar Absortion* valores entre 0 e 1. Caso não se saiba este valor, o programa consegue calcular o valor através da informação de cor, sendo esta opção menos precisa (Autodesk, 2010b).

Existem outras abordagens menos genéricas que recorrem a programação orientada para o caso em estudo. Redweik *et al.* (2011 e 2013), Catita *et al.* (2014) e Hofierka e Zlocha (2012), trabalham com modelos 3D, respectivamente, com modelos derivados de informação LIDAR e com um modelo derivado de informação fotogramétrica. Dado que uma área em sombra não recebe radiação directa, é necessário criar um mapa de sombras para cada instante, produzindo um atributo binário, associado com o local e o instante temporal em estudo. Este cálculo pode ser efectuado para cada pixel (Redweik *et al.*, 2011) ou para uma grelha (Hofierka e Zlocha, 2012). No caso da grelha é possível regular o nível de detalhe do modelo e consequentemente a velocidade de cálculo. Quando uma parede ou cobertura se encontra parcialmente sombreada, o polígono 3D é segmentado, para criar elementos mais pequenos, sendo aplicado uma tesselação. O algoritmo de radiação solar é depois aplicado sobre este mapa.

Hofierka e Zlocha (2012) desenvolveram um modelo de radiação, *v.sun,* não se encontrando disponível para consulta. Este modelo foi implementado em *Grass GIS*, tendo como base a função *r.sun* presente no programa, com a capacidade de processar informação vectorial 3D, utilizando uma aproximação 3D *vector-voxel* para representar as superfícies. Este modelo estima os componentes da radiação para céu limpo, directa, difusa e reflectida do pavimento.

Redweik *et al.* (2011) utiliza o modelo de origem LIDAR e analisa cada pixel do modelo. Este determina o mapa de sombras, seccionando um modelo urbano 3D, analisando o percurso solar e os elementos que o obstruem. A qualquer altura do dia, em que o Sol se encontra acima do horizonte, todos os pixéis projectam uma sombra segundo a direcção dos raios solares. Utilizando esse raio é possível determinar quais os pixéis iluminados ou em sombra, criando um mapa de sombras com um atributo binário para cada pixel. A este mapa é aplicado o modelo de radiação desenvolvido por Kumar (Kumar *et al.*, 1997) adequado para céu limpo, onde as informações de coordenadas solares foram retiradas do Almanaque Astrológico de 2011.

O modelo de radiação solar de Kumar *et al.* (1997) considera o fluxo de radiação solar fora da atmosfera, a massa de ar, e a influência do vapor de água e aerossóis presentes na atmosfera na quantidade de irradiação solar recebida num determinado local para céu limpo. Devido ao facto das equações não terem em conta a informação meteorológica do local em análise, é de esperar que os resultados se encontrem subestimados. A intensidade da radiação solar está directamente relacionada com a posição solar relativa ao plano no local em análise na superfície terrestre num determinado momento. A posição solar, neste modelo, é descrita pelo ângulo de altura solar e o ângulo de azimute solar, formado pelo plano vertical do Sol com a orientação sul (Figura 2.2).

O ângulo de azimute solar (a_s) e o ângulo de altura solar (α) variam continuamente durante o dia, sendo necessário um valor para cada momento de cálculo. Estes ângulos estão relacionados com a latitude do local (L), a declinação solar (δ_s) e o ângulo horário (h_s) através das equações (2.8) e (2.9). O ângulo horário descreve a distância do Sol desde o meridiano local em relação a este e oeste, sendo zero no meridiano e por convenção os valores de manhã são positivos e de tarde negativos. A declinação solar é o ângulo entre a direcção do Sol e um plano do equador terrestre, equação (2.10), sendo considerado constante para cada dia, onde N é número do dia, onde 1 de Janeiro é o dia 1 e 31 de Dezembro é o dia 365.

$$\sin \alpha = \sin L \sin \delta s + \cos L \cos \delta_s \cos h_s \tag{2.8}$$

$$\sin a_s = \cos \delta_s \sin h_s / \cos \alpha \tag{2.9}$$

$$\delta_s = 23{,}45 \sin (360^o (284 + N) / 365) \tag{2.10}$$

O fluxo de radiação solar (I_o), fora da atmosfera, em W/m², é dada pela equação (2.11) que contabiliza a variação da irradiação solar no topo da atmosfera durante o ano. A constante solar (S_o) corresponde à irradiação de uma área perpendicular aos raios solares fora da atmosfera a meio da distância entre o Sol e a Terra, tendo sido adoptado o valor do *World Radiation Centre* de 1367 W/m².

$$I_o = S_o (1 + 0{,}0344 \cos (360^o N / 365)) \tag{2.11}$$

A radiação solar é atenuada à medida que passa pela atmosfera através da absorção e dispersão de diferentes comprimentos de onda. Para calcular o valor da massa de ar óptica (M) utilizou-se a equação (2.12), esta é a massa de ar relativa que a radiação solar necessita de atravessar para alcançar a superfície terrestre para uma altitude solar α. A transmitância atmosférica para a radiação directa (τ_b) é calculada a partir da equação (2.13), que se encontra empiricamente relacionada com a

massa de ar, permitindo o cálculo da radiação solar de onda curta que incide numa superfície normal aos raios solares (I_s), através da equação (2.14).

$$M = [1229 + (614 \sin \alpha)^2] \, ½ - 614 \sin \alpha \quad (2.12)$$

$$\tau_b = 0{,}56 \, (e^{-0{,}65M} + e^{-0{,}095M}) \quad (2.13)$$

$$I_s = I_o \, \tau_b \quad (2.14)$$

De forma a obter a radiação solar directa numa superfície inclinada (I_p) utiliza-se a equação (2.15). A componente *i* é o ângulo entre a normal da superfície e a direcção do Sol, que pode ser obtido recorrendo ao cosseno de *i* pela equação 2.16, em função do ângulo de inclinação da superfície (β) e o ângulo de azimute da superfície (a_w).

$$I_p = I_s \cos i \quad (2.15)$$

$$\cos i = \sin \delta_s (\sin L \cos \beta - \cos L \sin \beta \cos a_w)$$

$$+ \cos \delta_s \cos h_s (\cos L \cos \beta + \sin L \sin \beta \cos a_w)$$

$$+ \cos \delta_s \sin \beta \sin a_w \sin h_s \quad (2.16)$$

A radiação solar difusa (I_d) é influenciada pela inclinação da superfície β e a altitude solar α, equação (2.17), com um coeficiente de radiação difusa (τ_d) que se encontra correlacionado com a transmitância atmosférica para a radiação directa (τ_b) através da equação (2.18) para céu limpo.

$$I_d = I_o \, \tau_d \cos^2 \beta / 2 \sin \alpha \quad (2.17)$$

$$\tau_d = 0{,}271 - 0{,}294 \, \tau_b \quad (2.18)$$

Redweik *et al.* (2013), por seu turno, utiliza um modelo de superfície obtido por LIDAR e um algoritmo de cálculo de radiação solar designado por SOL. A informação meteorológica foi obtida recorrendo à base de dados SOLTERM. O modelo SOL, estima a radiação solar directa e difusa para superfícies inclinadas. A componente directa é influenciada pelo mapa de sombras enquanto a componente indirecta varia consoante a percentagem de céu visível pela superfície. A radiação directa I_p numa superfície com inclinação β e azimute a_w é dada pela equação 2.19, onde B_h é a radiação solar que alcança uma superfície horizontal. Com o ângulo de altura solar (α) e o ângulo de azimute solar (a_s) dados pelas equações 2.20 e 2.21, com a latitude do local (*L*), ângulo horário (h_s) e declinação solar (δ_s). Catita *et al.* (2014) retoma a utilização do modelo SOL, combinando a informação de radiação solar obtida com os elementos arquitectónicos do modelo dos edifícios em análise.

$$I_p = B_h (\cos \beta \sin \alpha - \sin \beta \cos \alpha \cos(a_s - a_w)) / \sin \alpha \quad (2.19)$$

$$\alpha = \arcsin (\sin \delta_s \sin L + \cos \delta_s \cos h_s \cos L) \quad (2.20)$$

$$a_s = \arccos((\sin \delta_s \cos L - \cos \delta_s \cos h_s \sin L) / \cos \alpha) \quad (2.21)$$

2.3 Modelos Seleccionados

Para a construção do modelo de cidade optou-se pela a abordagem de modelação procedimental, que permite a modelação e edição dos elementos constituintes. Com o modelo desenvolvido em *CityEngine* é natural iniciar o estudo de radiação solar no programa da mesma empresa com capacidades de análise. Neste caso a empresa é *ESRI* e o software o *ArcGIS*, mais concretamente *ArcScene 10.2*, o que possui ferramentas de analise. Porém o software encontra-se mais focado na análise de informação 2D, já possuindo ferramentas 3D contudo não a desejada, não possuindo ferramentas de análise indicadas para o cálculo de radiações solares em elementos 3D. Porém é possível fazer uma análise geral de território com ferramentas de *Solar Radiation*, que analisam os efeitos do Sol sobre uma área geográfica específica para diferentes períodos temporais. É possível exportar o modelo do *CityEngine* em formato *Esri FileGDB (Geodatabase)*, formato passível de ser aberto em *ArcGIS*. Este formato mantém informação vectorial e raster, retendo a informação de forma e ignorando as regras de CGA (ESRI, 2015a). Perde, contudo, informação para as fachadas na conversão do modelo 3D para o modelo 2.5D necessário. Porém a apresentação dos cálculos da radiação solar, que se obtém em formato bidimensional, é extrapolada para ambiente tridimensionais, através da extrusão do volume dos edifícios, criando um modelo aproximado de radiação para as fachadas que é retirado da informação *raster*. Esta metodologia todavia apresenta uma característica omitida nos outros modelos: permite a visualização da informação, para o período escolhido, ou segmentado, por intervalo de tempo.

De forma a analisar a radiação solar em superfícies 3D, maximizando as potencialidades do modelo de cidade, foi necessário fazer uma selecção de um outro *software* de análise. A escolha do programa *Ecotect* considerou-se adequada, não só por possuir ferramentas de cálculo de radiação para elementos 3D já desenvolvidas e passíveis de aplicar aos modelos realizados, como, por ser compatível com um dos formatos de exportação presentes no *CityEngine*, o que por exemplo não acontece com o *software EnergyPlus*. Assim, para abrir o modelo em *Ecotect* é necessário exportar do *CityEngine* em formato *Wavefront OBJ*, este formato baseado em *ASCII* simples representa a geometria 3D através da posição de cada vértice, informação de textura associada a esse vértice, as normais de cada vértice e as faces que formam um polígono (ESRI, 2015b). Na importação para *Ecotect* as faces apresentam-se trianguladas, sendo necessário unir os triângulos coincidentes, se o objectivo for ler a superfície como um todo, tal como foi modelada. Este é igualmente o único modelo estudado que permite a estimativa da radiação reflectida dos elementos circundantes.

Como alternativa, a radiação solar pode ser estimada através da aplicação de modelos de radiação como a de Kumar *et al.* (1997). Ao contrário do *Ecotect* e do modelo SOL que utilizam as componentes directa e difusa medidas ou geradas para o local no local de análise para calcular radiação incidente, este requer informação sobre a posição do Sol na cúpula celeste, resultando num modelo que não conta com as características meteorológicas locais. Deste modo, em conjunto com o facto do modelo ser apenas adequado para situações de céu limpo, torna este modelo menos rigoroso, no entanto, e como tem sido referido na literatura (Kumar *et al.*, 1997) este é indubitavelmente aplicável após a determinação do mapa de sombras.

Capítulo 3

Metodologia do trabalho

3. Metodologia do trabalho

3.1 Detalhe e Contexto dos Modelos

Dada a natureza do trabalho, que pretende analisar a influência do contexto urbano no cálculo da radiação solar das coberturas e alçados, é necessário definir diversos níveis de detalhe dos elementos urbanos e a dimensão do contexto urbano.

Relativamente aos níveis de detalhe podem ser definidas várias alternativas, sendo o 'nível de detalhe' uma variável que condiciona o tempo de computação (simulação) e o rigor dos resultados. Na definição metodológica do trabalho foram considerados pertinentes as seguintes situações: i) apenas a representação volumétrica dos edifícios, obtida através da extrusão do polígono de implantação, tendo por base o valor da altura do piso e o número de pisos; ii) a partição das superfícies (fachadas e cobertura) em painéis – grelha; e iii) a parametrização das fachadas, considerando as variações de pé direito entre pisos e as suas características próprias, nomeadamente os detalhes arquitectónicos e os materiais de revestimento. O 'nível de detalhe' seleccionado nos modelos analisados varia principalmente com o tipo de ferramenta utilizada: no caso de análise 2.5D, a definição de forma das fachadas são ignoradas, sendo a forma volumétrica a mais adequada; em análises 3D de radiação directa e difusa, o material de revestimento das fachadas não é contabilizado, sucedendo na escolha de um modelo seccionado em grelha de forma a perceber a variação em altura; e na análise 3D de radiação reflectida dos elementos em redor, o modelo necessita de informação detalhada das características das fachadas dos edifícios circundantes.

No que diz respeito à influência do contexto urbano importa considerar as diferentes alternativas: i) dimensão de contexto, e ii) relevância da envolvente construída. De forma a tecer comparações devem ser definidos duas dimensões de contexto: uma área mais extensa (área 1), que deve incluir os elementos marcantes do território; e uma área delimitada pelos elementos circundantes do objecto em análise (área 2). Da combinação destas alternativas para as duas variáveis consideradas, detalhe e dimensão contexto geográfico, resultam os seguintes cenários: i) M1a: área de contexto 1 considerando a envolvente edificada; ii) M1b: área de contexto 1 desprezando a envolvente edificada; iii) M2a: área de contexto 2 considerando a envolvente edificada; iv) M2b: área de contexto 2 desprezando a envolvente edificada; e v) M3: secção sem contexto, apenas o quarteirão isolado. (Figura 4.5 apresenta os cenários aplicados à área de estudo).

A informação geográfica necessária à aplicação da metodologia compreende a informação relativa ao relevo, recorrendo à informação das curvas de nível e pontos cotados, a informação relativa aos polígonos de implantação dos edifícios e respectivos atributos (zona, posição no quarteirão, classificação, número de pisos, altura do piso, cor e revestimento) e informação relativa à estrutura viária. A construção automática dos diferentes níveis de detalhe é feita através da aplicação de regras de gramática de formas, de acordo com a Figura 3.1 os detalhes variam com os atributos, neste caso a zona e classificação determinam se as fachadas tipo podem ser aplicadas aos volumes. Na

construção dos modelos tridimensionais urbanos, para os diferentes cenários, foi utilizado o software *CityEngine* disponibilizado pela ESRI- Portugal (Figura 3.2).

```
Fachadas --> case SUBZONA == "1B" : FAC_ZONA1B
             case SUBZONA == "1A" : FAC_ZONA1A
             else : extrude (N_PISOS_AC*ALTURA_PISO) Volume
FAC_ZONA1B --> extrude (Max_altura_act) Volume
FAC_ZONA1A --> case CLASSIFICA == "Religioso": extrude (Max_altura_act) IgrejaVolume
               case CLASSIFICA == "Outro" : NIL
               else : extrude (Max_altura_act) ALCADOS
```

Figura 3.1 – Código CGA: Tipologia das diferentes zonas presentes na malha urbana

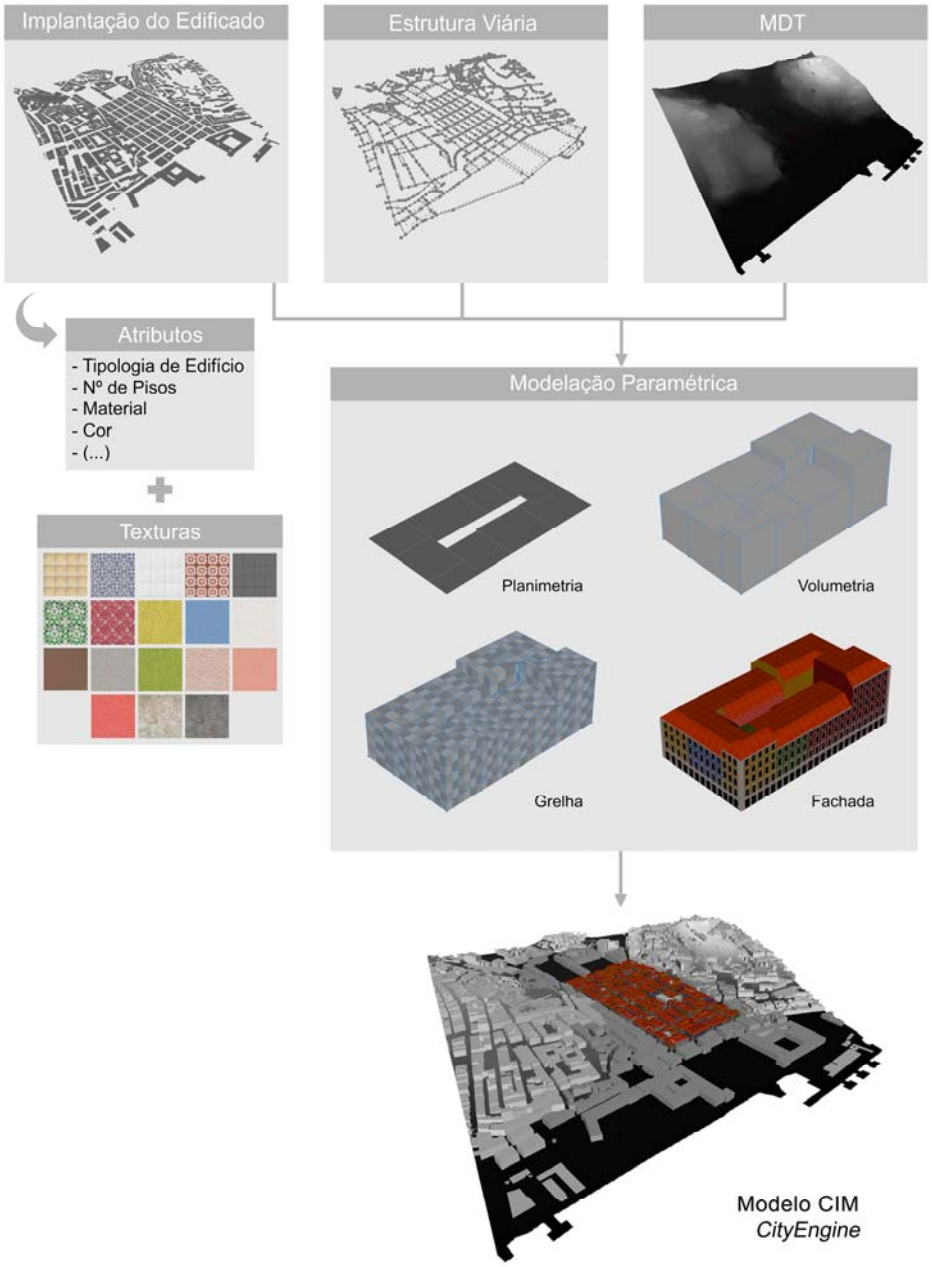


Figura 3.2 – Fluxograma para a criação de um modelo CIM em *CityEngine*

Relativamente aos modelos de radiação solar são consideradas diferentes abordagens, de acordo com o tempo necessário de cálculo, nível de definição dos resultados e os modelos considerados: o modelo *Area Solar Radiation* do *ArcGIS* da ESRI (Figura 3.3), o modelo *Incident Solar Radiation* e o modelo *Solar Exposure Graph* do software *Ecotect* (Figura 3.4) e finalmente o modelo de radiação solar de Kumar *et al.* (1997) (Figura 3.5).

Para o modelo *Area Solar Radiation* (Figura 3.3) o modelo de superfície 3D necessita de ser convertido para um modelo de superfície 2.5D com formato matricial (*raster*), ao qual se aplica o modelo de radiação. Utilizando o resultado do modelo de radiação e o modelo de superfície a radiação pode ser visualizada em ambiente 3D.

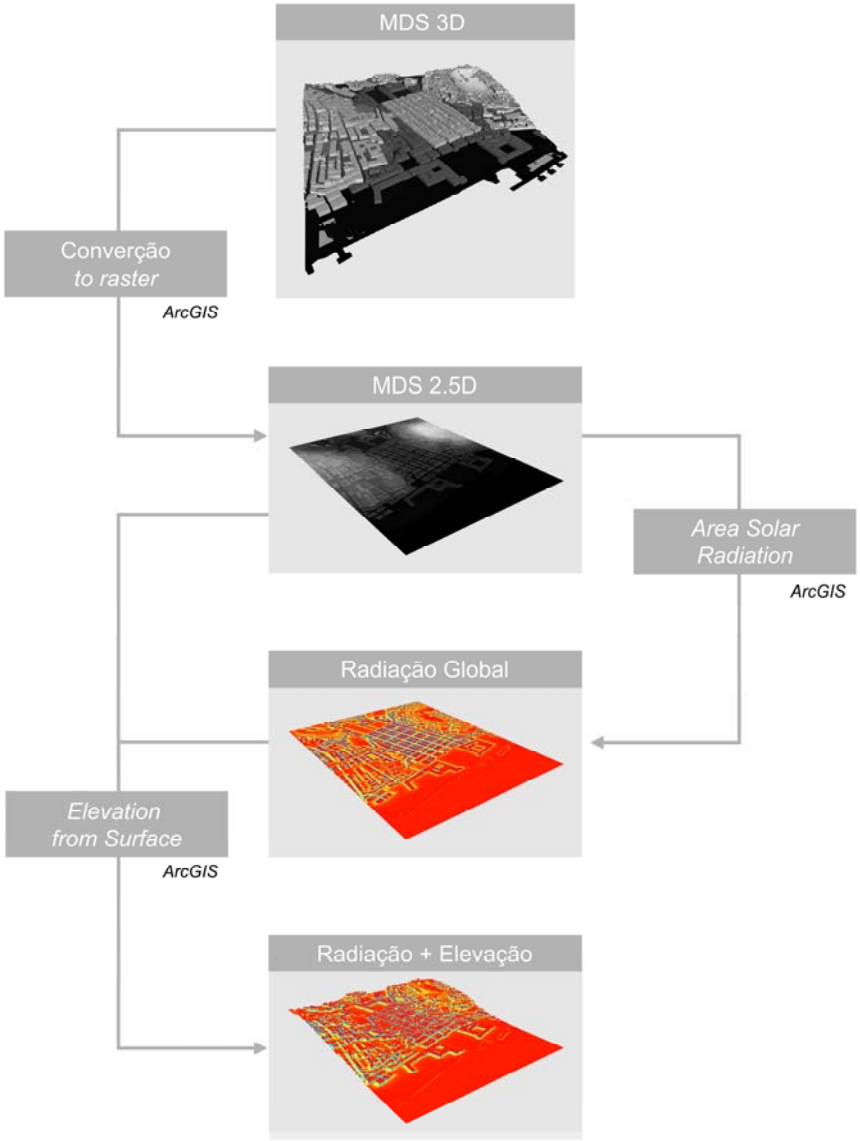


Figura 3.3 – Fluxograma para o modelo de radiação de abordagem *raster* 2.5D em *ArcGIS*

O modelo *Incident Solar Radiation* (Figura 3.4) analisa a radiação directa e difusa, sendo o objecto de análise seccionado em grelha, para se observar a variação em altura, e a envolvente volumétrica, de forma a diminuir o tempo da simulação.

O modelo *Solar Exposure Graph* (Figura 3.4) é utilizado para determinar a radiação reflectida sendo necessário determinar informação sobre os materiais que constituem a envolvente construída. Sendo o detalhe de forma da fachada detalhada. Como este modelo de radiação apenas apresenta os resultados totais dos elementos seleccionados, utiliza-se para análise uma única superfície que representa a fachada completa.

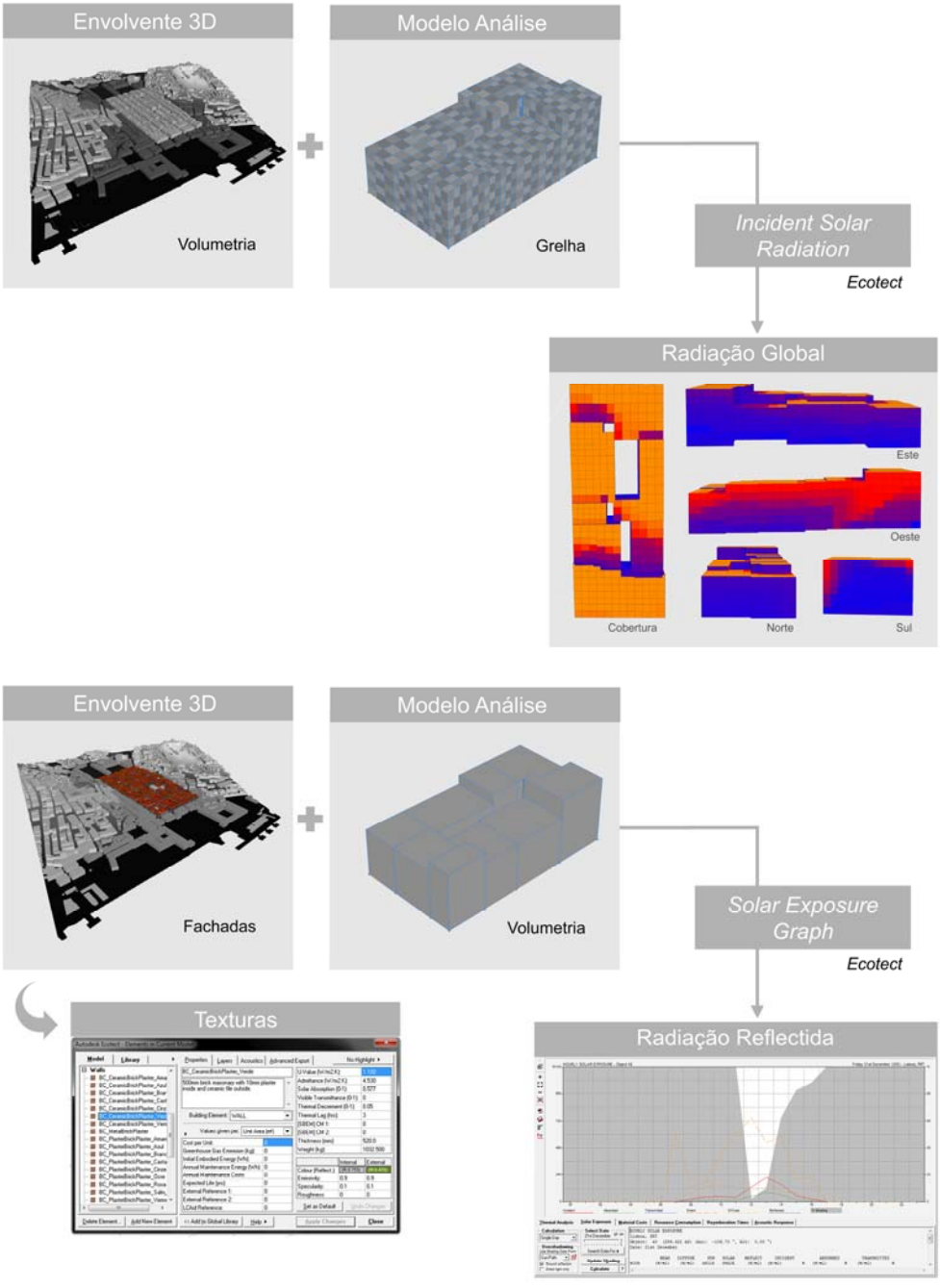


Figura 3.4 – Fluxograma para o modelo de radiação de abordagem 3D em *Ecotect*

O modelo de radiação solar de Kumar *et al.* (1997) (Figura 3.5) requer o trabalho adicional de determinação do mapa de sombras. Utilizando ferramentas do *ArcGIS* para a criação do mapa de sombras, obtém-se um novo atributo binário, que determina se cada ponto se encontra em sombra num momento temporal específico, em conjunto com as coordenadas do sol desse instante. A informação pertinente é então exportada para o *Excel* onde se implementou as equações parra o cálculo da radiação incidente, retornando ao *ArcGIS* para a visualização dos resultados.

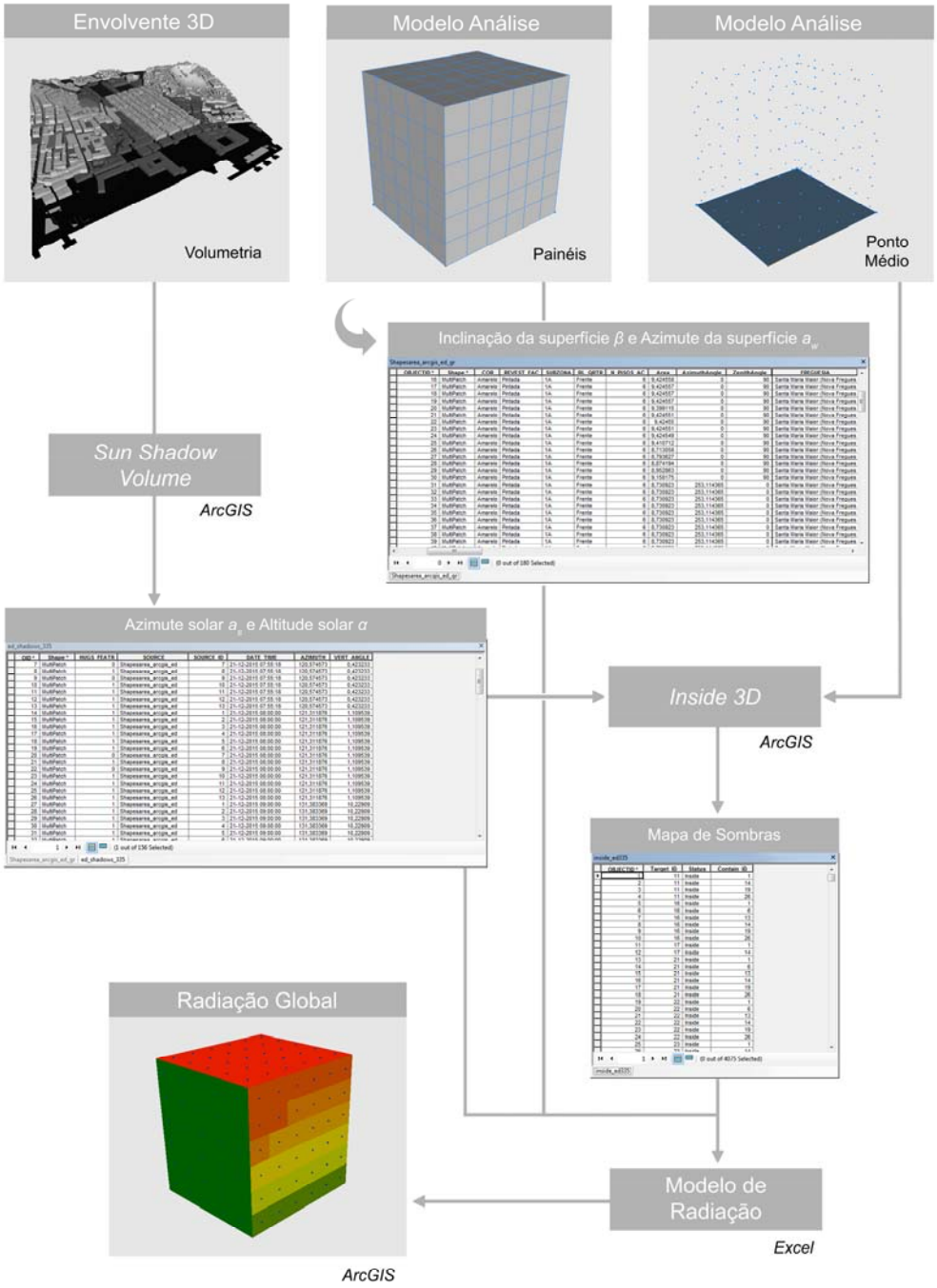


Figura 3.5 – Fluxograma para o modelo de radiação de Kumar (Kumar et al., 1997) de abordagem 3D em *ArcGIS*

Capítulo 4

Caso de Estudo

4. Caso de Estudo

4.1 Área de Estudo

A área seleccionada para a realização do estudo corresponde a uma secção da Baixa de Lisboa, área que segue uma morfologia tipo replicável, situação ideal para a aplicação de regras CGA, sendo deste modo passível de criar um modelo de cidade com informação padrão de fachadas para estudo (Figura 4.1 e 4.2).

Figura 4.1 – Área de Estudo (ortofotomapa)

Figura 4.2 – Fotografia da fachada tipo presente na Baixa de Lisboa (Miranda, 2011)

A informação geográfica utilizada na construção dos modelos tridimensionais foi cedida pela Câmara Municipal de Lisboa, composto por duas camadas de informação relativas à rede viária e à implantação dos edifícios. Foram ainda utilizados ortofotomapas na escala 1/10 000, usados para aumentar a veracidade do modelo. Associado a cada edifício existe um conjunto de atributos dos quais a tipologia de ocupação, revestimento de fachada e número de pisos. Foi ainda construído um modelo digital do terreno com base em curvas de nível e pontos cotados e recorrendo ao interpolador linear rede de triângulos irregulares (TIN), com equidistância natural de 10 metros. Toda a informação é referente ao sistema Hayford-Gauss datum 73.

Os cálculos de radiação foram efectuados para o solstício de verão (21 de Junho) e inverno (21 de Dezembro), pois representam os momentos mais díspares correspondendo ao instante em que o Sol atinge a sua declinação máxima e mínima, possibilitando uma compreensão geral da realidade com um número reduzido de observações (Figura 4.3).

De forma a determinar a influência do contexto urbano a secção do tecido urbano modelado foi posteriormente alargada e reduzida para a criação das áreas 1 e 2 de análise (Figura 4.4), em torno de um quarteirão, localizado no extremo nordeste do núcleo central da Baixa, eleito para análise. A

primeira área estende-se até incluir parte do lado Este da colina de São Roque e do lado Oeste da colina do castelo, para que os mapas de sombra possam ser influenciados por estas. A área 2, mais contida ao quarteirão, tendo ainda presente a variável topográfica a Este mas a principal variável é o edificado circunstante. Tendo por base esse quarteirão, combinando as duas variáveis consideradas, 'dimensão do contexto' e 'relevância da envolvente construída', resultaram cinco cenários (Figura 4.5):

– M1a: secção com aproximadamente 1000 m x 1300 m, incluindo parte do lado Este da colina de São Roque e do lado Oeste da colina do castelo, considerando a envolvente edificada existente;

– M1b: secção com aproximadamente 1000 m x 1300 m, incluindo parte do lado Este da colina de São Roque e do lado Oeste da colina do castelo, desprezando a envolvente edificada existente;

– M2a: secção com aproximadamente 160 m x 190 m, considerando a envolvente edificada existente;

– M2b: secção com aproximadamente 160 m x 190 m, desprezando a envolvente edificada existente;

– M3: secção sem contexto, apenas o quarteirão isolado.

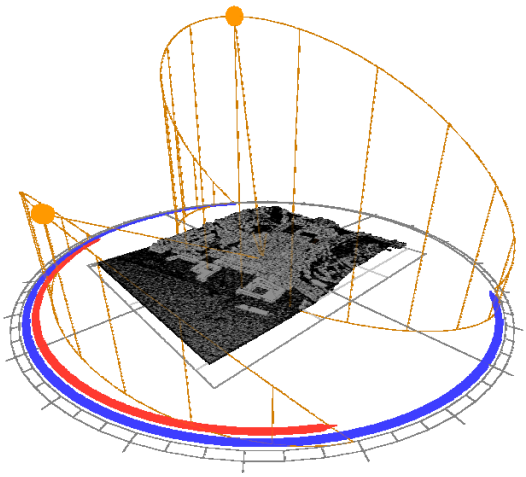


Figura 4.3 – Trajectória solar para o solstício de inverno (esquerda) e solstício de verão (direita), Sol posicionado ao meio-dia em ambos

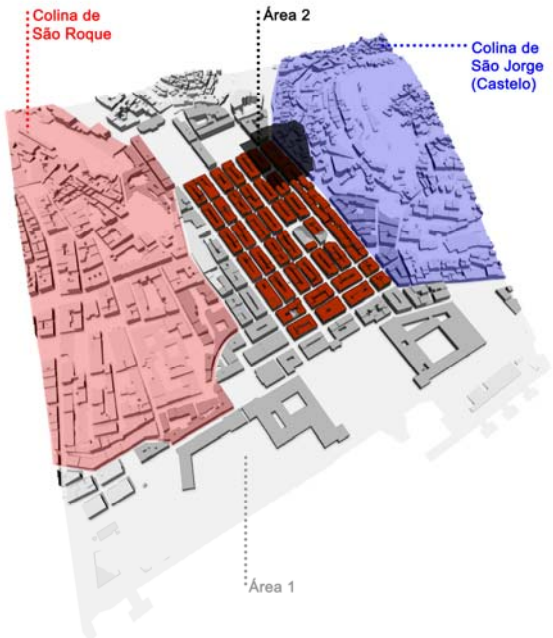


Figura 4.4 – Vista geral da área de estudo

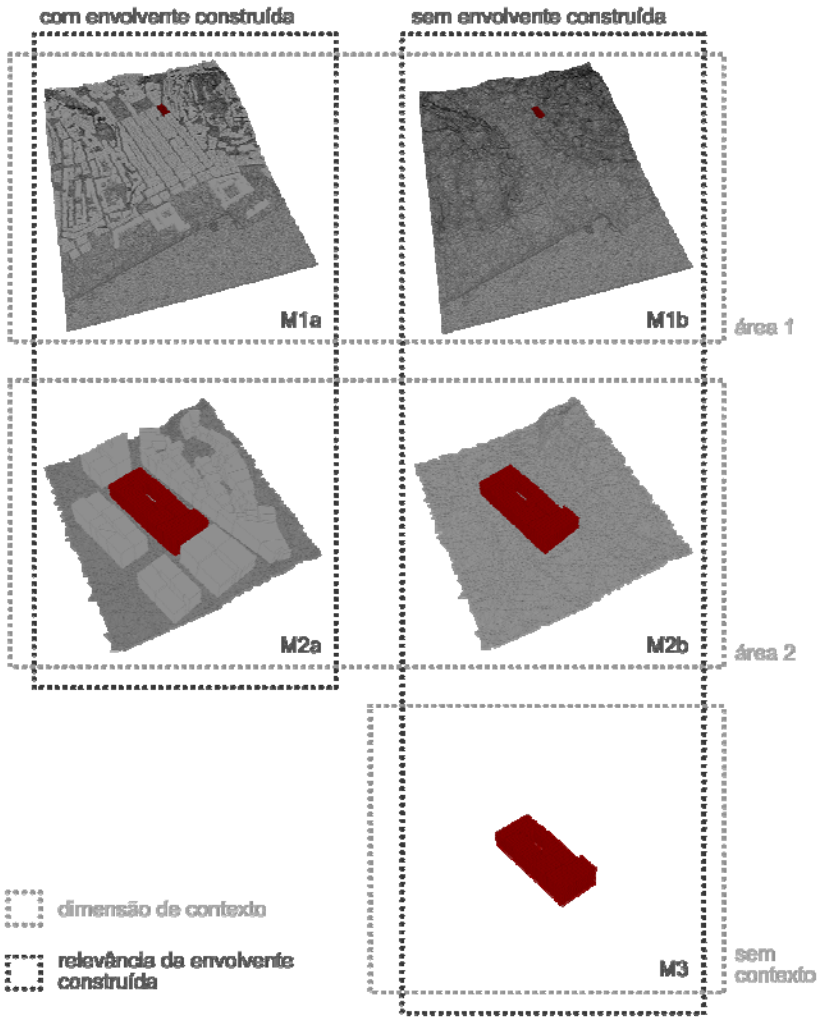


Figura 4.5 – Diferentes modelos com o quarteirão analisado a vermelho

4.2 Construção do modelo tridimensional de cidade

Na construção do modelo de cidade foram desenvolvidos três níveis de detalhe (Figura 4.6). As bases dos edifícios foram alinhadas com o terreno através de uma translação para o ponto mínimo em altura, para que o edificado fique conectado com o terreno e para todos os cenários, foi utilizado o mesmo modelo digital do terreno. O código completo pode ser lido no Anexo I.

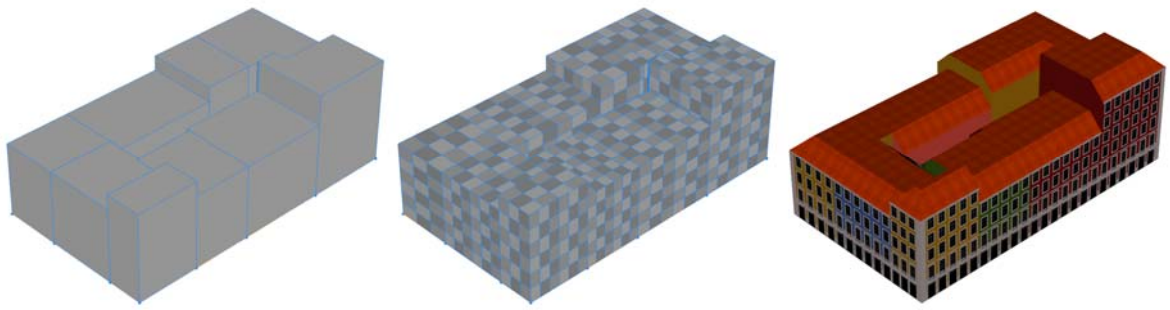


Figura 4.6 – Níveis de detalhe para o modelo de cidade

O primeiro nível de detalhe resulta da extrusão em altura conforme o número de pisos por uma altura de piso tipo de 3 metros do polígono de implantação, criando um modelo simplificado da volumetria, onde se analisam as fachadas como um único plano vertical. Posteriormente utilizando o mesmo volume são seccionadas as faces do volume, criando o segundo nível de detalhe, no qual as fachadas são divididas numa grelha quadrangular de 3 metros por 3 metros. O terceiro nível cria um modelo de fachada tipo, tendo em consideração as variações de pé direito por piso e os elementos relativos a cada piso, oferecendo assim uma análise de acordo com os elementos arquitectónicos e relativos materiais. Enquanto os outros níveis de detalhe podem ser aplicados a todo o edificado este só pode ser aplicado a uma subzona específica (1A) e a edifícios de carácter não religioso (Figura 3.1). Estas especificações são evocadas através dos atributos em conjunto com as características das fachadas como cor e material (Figura 4.7).

Figura 4.7 – Diversidade de materiais de fachada estudas
(azulejo: amarelo, azul, branco, castanho, cinza, verde e vermelho;
reboco: amarelo, azul, branco, castanho, cinza, ocre, rosa e salmão; pedra: branco e cinza)

Embora os detalhes arquitectónicos das fachadas não constem nos ficheiros de base, a informação relativa aos materiais de revestimento existe sob a forma de atributo para cada um dos polígonos. Analisando a área de estudo verifica-se a existência de uma hierarquia distinta entre ruas (Miranda, 2011), com pequenas variações nos elementos decorativos. Contudo optou-se por desenvolver apenas uma das tipologias de fachadas e aplica-la a toda a área, proporcionando resultados para a radiação reflectida aceitáveis e simplificando o código. Começando por determinar a posição do edifício em relação ao quarteirão é possível posicionar o cunhal de forma a este só existir nos edifícios de gaveto, resultando numa fachada sem quebras em todo o quarteirão, apenas com variação de material e número de pisos (Figura 4.8). Definidos pelos elementos arquitectónicos e pés direitos distintos, os vários pisos manifestam uma hierarquia (Figura 4.9).

Figura 4.8 – Exemplos da diversidade de fachadas

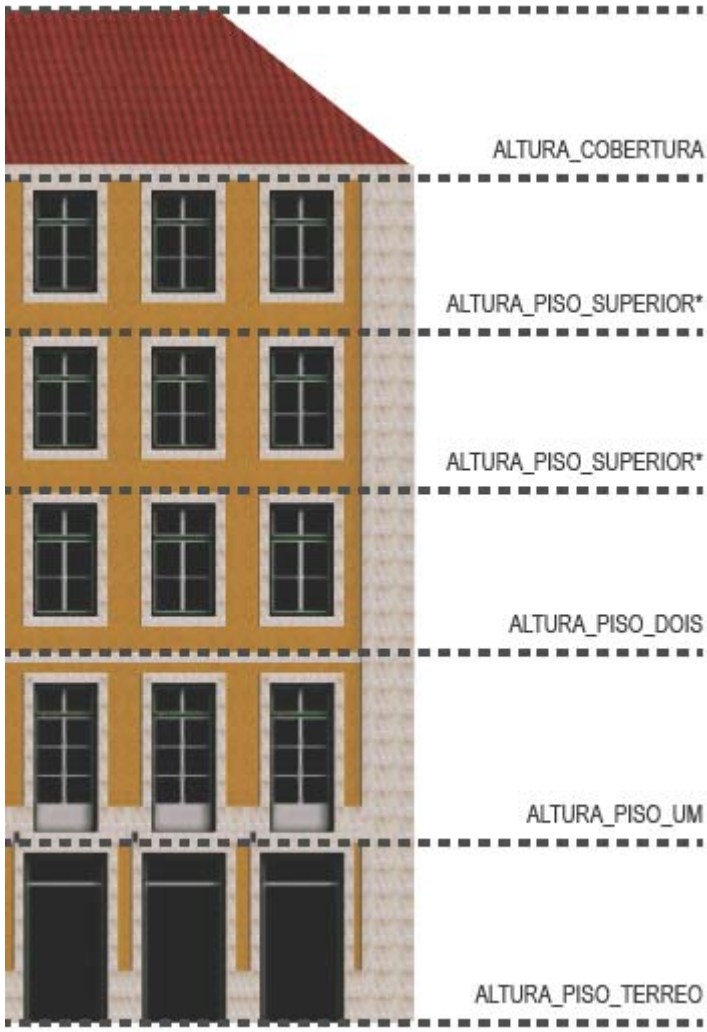


Figura 4.9 – Divisão por piso da fachada tipo

A fachada divide-se então em: piso térreo (3,50 m), onde se instalam as áreas comerciais com vãos próprios para este efeito; primeiro piso (3,70 m), piso nobre com um pé direito superior ao dos restantes andares habitacionais, apresentando varandas individuais (janelas de sacada); segundo piso (3,10 m), com janelas de peito; piso superior (3,10 m), igualmente com janelas de peito mas com menor dimensão que as do segundo piso; cobertura (3,00 m) com estatura para suportar mansardas mas sem aberturas de luz modeladas. Quando o edifício possui mais do que cinco pisos é a forma do

piso superior que se repete, para esse fim é utilizado o asterisco "*", chave de repetição que repete a operação quantas vezes conseguir, em código CGA (Figura 4.10).

Entre o piso térreo e o primeiro piso e entre o primeiro piso e o segundo encontra-se presente um friso que percorre toda a fachada principal do edifício, todos os restantes elementos repetem-se através de um mosaico, ao longo do piso correspondente. Cada piso tem um mosaico diferente de 2,50 m de largura que se repete. Para que o último mosaico não tenha uma dimensão díspar, quando a largura da fachada não é divisível por 2,50 m, tornou-se este valor flutuante com prefixo "~" que adapta o valor para o melhor resultado. O mesmo prefixo foi aplicado dentro dos mosaicos de cada piso de forma a restringir as dimensões dos frisos e vãos, sendo a área de parede que varia de forma a se adaptar (Figura 4.11). Como é necessário delimitar a área envidraçada para a atribuição de materiais em vez de se atribuir uma textura com a janela e moldura de pedra dividiu-se a área do vão para criar uma moldura de 20 cm (Figura 4.12).

```
FachadaPrincipal --> split(y) { ALTURA_PISO_TERREO : Piso(split.index)
                              | ALTURA_PISO_UM : Piso(split.index)
                              | ALTURA_PISO_DOIS : Piso(split.index)
                              | {~ALTURA_PISO_SUPERIOR : Piso(split.index)}* }

Piso(floorindex) -->
        case floorindex == 0 : Parede(floorindex)
        case floorindex == 1 :
        split(y) {0.20 : FrisoInferior(floorindex) | ~3.30 : Parede(floorindex) | 0.20 : FrisoSuperior}
        else :      Parede(floorindex)

Parede(floorindex) --> split(x) {~largura_mosaico : Mosaico(floorindex)}*

FrisoInferior(floorindex) --> split(x) {~largura_mosaicoFrisoInferior : MosaicoFrisoInferior}*

Mosaico(floorindex) -->
        case floorindex == 0 :
                split(x) {~0.20 : split(y) {1 : Friso | ~2.50 : EdificioCOR}
                        | 2.10 : VaoPorta | ~0.20 : split(y) {1 : Friso | ~2.50 : EdificioCOR}}
        case floorindex == 1 :
                split(x) {~0.40 : split(y) {0.5 : Friso | ~2.60 : EdificioCOR}
                        | 1.70 : split(y) {3.10 : VaoSacada | ~0.20 : EdificioCOR}
                        | ~0.40 : split(y) {0.5 : Friso | ~2.60 : EdificioCOR}}
        case floorindex == 2 :
                split(x) {~0.40 : EdificioCOR
                        | 1.70 : split(y) {~0.60 : EdificioCOR | 2.60 : VaoJanela1 }
                        | ~0.40 : EdificioCOR}
        else : split(x) {~0.40 : EdificioCOR | 1.70 : split(y) {~0.80 : EdificioCOR | 2.40 : VaoJanela2 }
                        | ~0.40 : EdificioCOR}

MosaicoFrisoInferior -->
        split(x) {~0.20 : Friso | 2.10 : Sacada | ~0.20 : Friso}
```

Figura 4.10 – Código CGA: Estrutura da fachada tipo

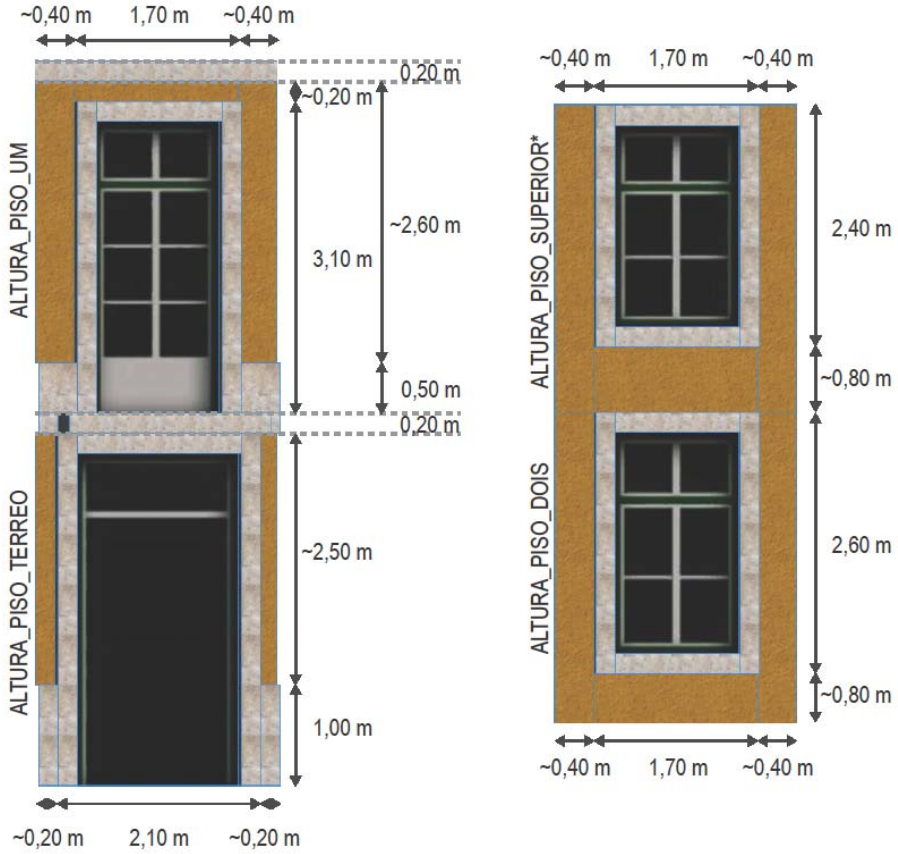


Figura 4.11 – Divisão por mosaico da fachada tipo

```
VaoPorta -->
        split(x) {0.20 : Friso | ~2.70 : split(y) {~3.30 : VaoPorta_2 | 0.20 : Friso} | 0.20 : Friso}

VaoSacada -->
        split(x) {0.20 : Friso | ~1.70 : split(y) {~3.10 : VaoSacada_2 | 0.20 : Friso} | 0.20 : Friso}

VaoJanela1 -->
        split(x) {0.20 : FrisoSuperior | ~1.70 : split(y)
         {0.20 : FrisoSuperior | ~2.60 : VaoJanela1_2 | 0.20 : FrisoSuperior} | 0.20 : FrisoSuperior}

VaoJanela2 -->
        split(x) {0.20 : FrisoSuperior | ~1.70 : split(y)
         {0.20 : FrisoSuperior | ~2.40 : VaoJanela2_2 | 0.20 : FrisoSuperior} | 0.20 : FrisoSuperior}
```

Figura 4.12 – Código CGA: Estrutura dos vãos

4.3 Cálculo de Radiação Solar incidente no edifício

4.3.1 Aplicação do modelo *Area Solar Radiation*

O estudo da radiação solar iniciou-se com a aplicação do modelo *Area Solar Radiation*. Este modelo requer o território em formato matricial (*raster*), ao qual se aplica o modelo de radiação. Com a conversão a definição de forma das fachadas é perdida, assim, o modelo 3D deve ser volumétrico, o primeiro nível de 'detalhe' programado. Os elementos que influenciam a projecção de sombras, terreno e edificado, são unidos num único componente (*Geoprocessing* → *Merge*), posteriormente convertendo-se em uma *raster* (*Conversion Tools* → *To Raster* → *Multipatch to Raster*). Neste passo é possível determinar quão detalhado se quer o MDS em *raster* por intermédio do tamanho de célula (*cell size*), quanto maior for a célula menor detalhe e consequentemente menor o tempo de cálculo. No presente estudo, optou-se por uma célula de 0,5 metros (Figura 4.13).

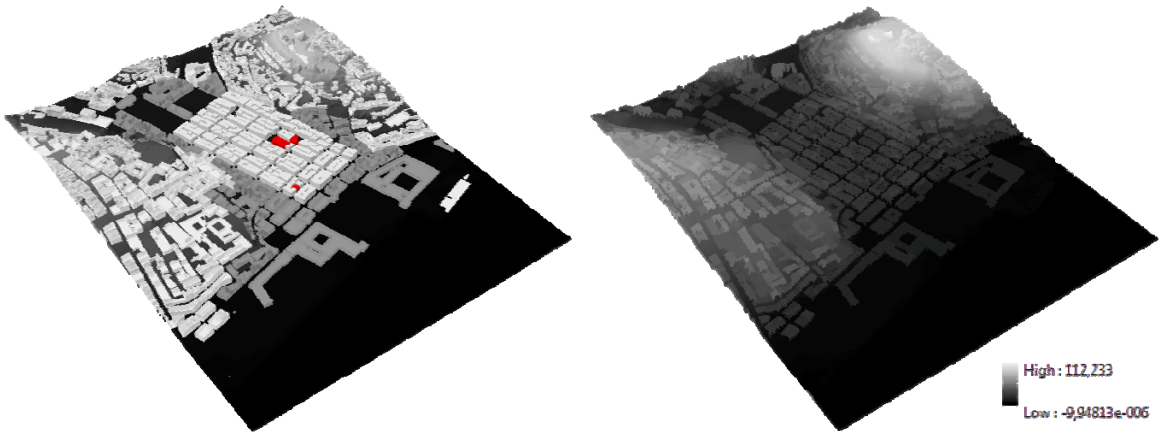


Figura 4.13 – Conversão em *ArcGis* de modelo 3D para *raster* (*cell size* 0,5)

Devido à localização da área de estudo ser Lisboa é importante não esquecer que o céu é predominantemente não encoberto, sem grande presença de nuvens. Para este efeito, no caso da radiação directa a transmissão (*transmittivity*) da atmosfera foi considerada de 0,5, e no caso da radiação difusa a proporção do fluxo da radiação que é difusa (*diffuse proportion*) foi considerada 0,3 (ESRI, 2014b). Utilizando os valores por defeito do modelo para o tamanho do céu e os valores relativos ao céu limpo, executou-se o modelo de forma a efectuar análises horárias e diária (Figura 4.14, 4.15 e 4.16). Para não haver possibilidade de não se considerar na análise horas com radiação solar, na configuração de tempo (*time configuration*) escolheu-se o intervalo de tempo das 0 horas até as 24 horas (*TimeWithinDay[{day},{startTime},{endTime}]*) com o intervalo horário (*hour interval*) de 1. Na análise horária cada resultado encontra-se numerado mas não identificado, informando a ordem dos resultados mas não declarando qual a hora do dia que representam.

Dado que os valores obtidos resultam da utilização de modelos de abordagem 2.5D os cálculos são unicamente referentes às coberturas, não sendo possível fazer qualquer inferência ao nível dos alçados.

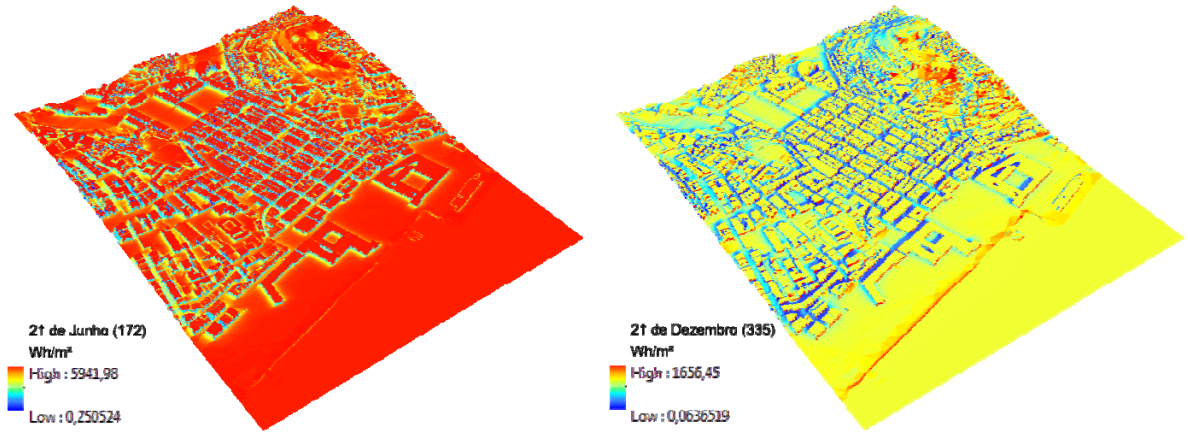


Figura 4.14 – Valor diário acumulado de radiação global (Wh/m²) com *Area Solar Radiation* para os dias 21 de Junho e 21 de Dezembro

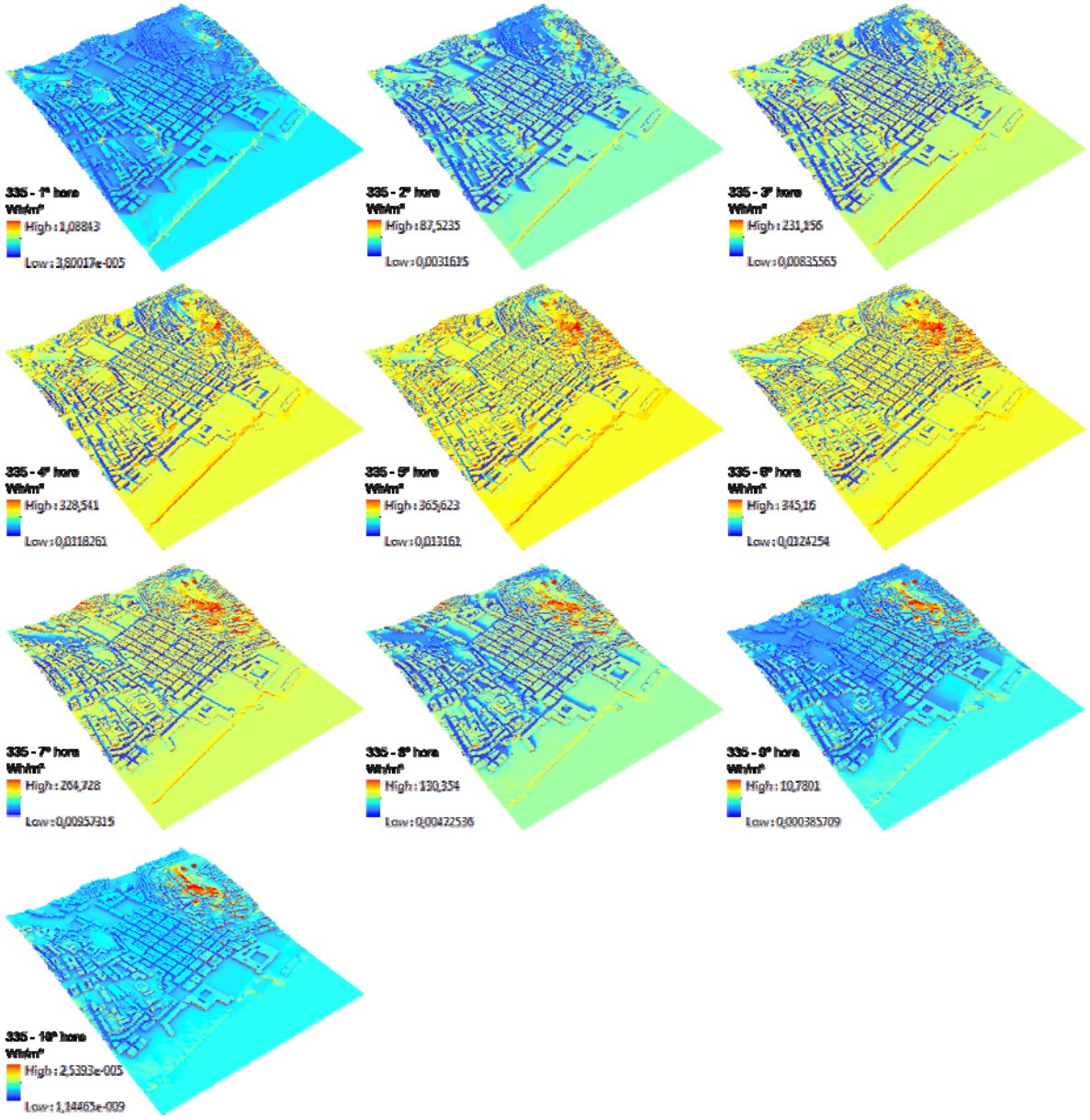


Figura 4.15 – Valor horário acumulado de radiação global (Wh/m²) com *Area Solar Radiation* para o dia 21 de Dezembro

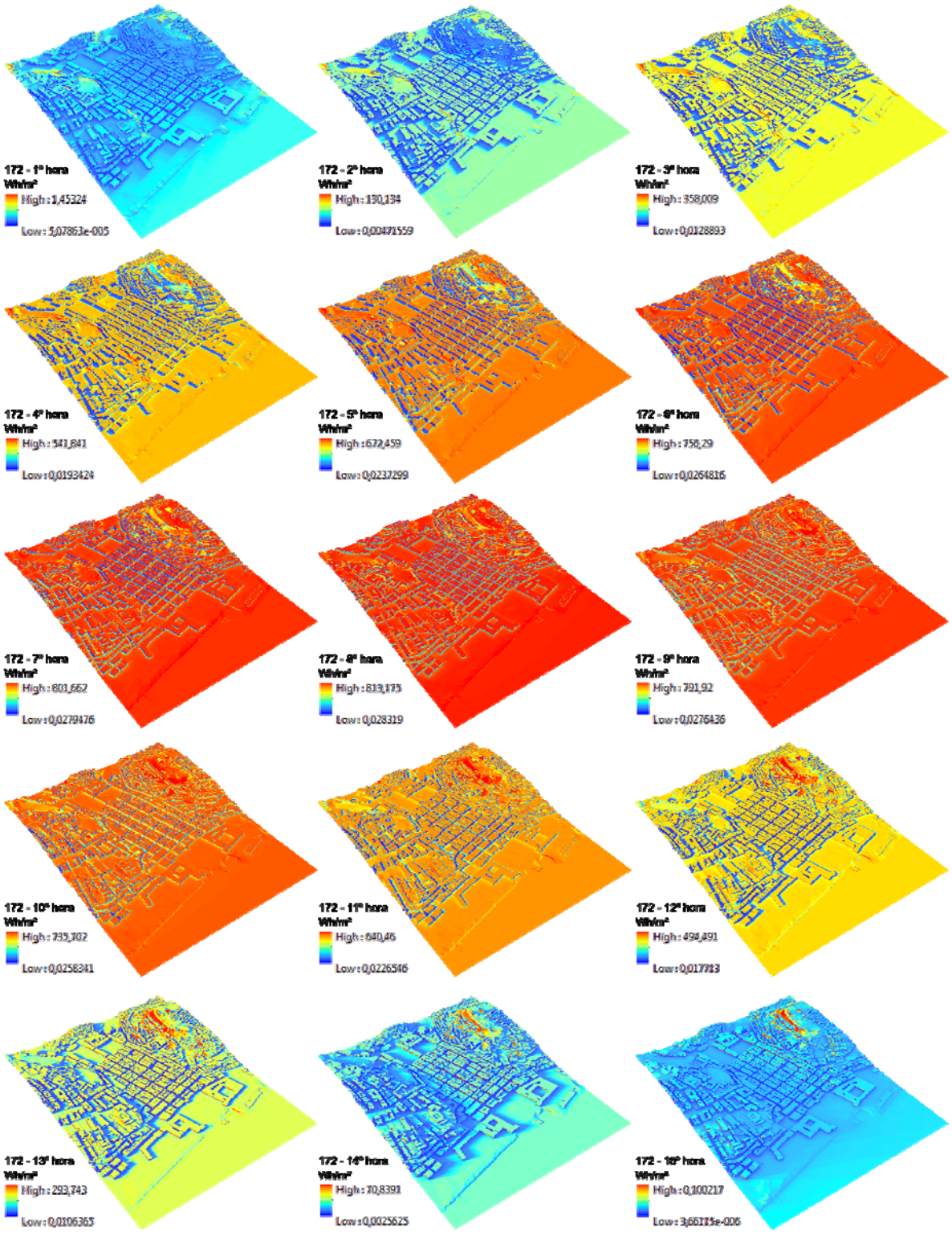


Figura 4.16 – Valor horário acumulado de radiação global (Wh/m²) com *Area Solar Radiation* para o dia 21 de Junho

4.3.2 Cálculo de Radiação Solar em *Ecotect*

As análises estão divididas em dois grupos tipológicos: o modelo *Incident Solar Radiation*, onde são calculados os valores da radiação solar incidente para cada elemento seleccionado, e o modelo *Solar Exposure Graph*, onde são calculados os valores da radiação reflectida dos elementos dos edifícios adjacentes que influenciam a superfície em análise.

4.3.2.1 Aplicação do modelo *Incident Solar Radiation*

O objectivo é identificar a importância da envolvente no cálculo da radiação, por esse motivo o modelo exportado foi o de grelha para o quarteirão em estudo e de volume para a envolvente. Desta forma, a envolvente, cuja função é a de influenciar as máscaras de sombra, é menos pesada por ser composta por menos elementos, enquanto o quarteirão permite observar as diferenças na extensão da fachada.

Como se tratam de modelos bastante pesados devido a intensidade de elementos presentes e por já existir uma divisão em grelha presente (modelo do quarteirão com grelha de 3 metros por 3 metros) optou-se por se analisar apenas o ponto central de cada superfície. Para a divisão do céu em incrementos angulares foi escolhido uma divisão de detalhe médio de 5ºx5º.

Assim, os seguintes modelos, definidos na Figura 4.5, foram examinados:

- M1a: área de contexto 1 considerando a envolvente edificada (Figuras 4.17 e 4.18);
- M1b: área de contexto 1 desprezando a envolvente edificada (Figuras 4.19 e 4.20);
- M2a: área de contexto 2 considerando a envolvente edificada (Figuras 4.21 e 4.22);
- M2b: área de contexto 2 desprezando a envolvente edificada (Figuras 4.23 e 4.24);
- M3: secção sem contexto, apenas o quarteirão isolado (Figuras 4.25 e 4.26).

O valor de radiação solar incidente representada é o valor cumulativo, isto é, apresenta o somatório de valores para todo o período de cálculo escolhido, ou seja, desde das 0h às 24h para se contabilizar todas as horas de Sol em ambas as ocasiões.

No *software* estas análises podem ser visualizada ou numa tabela ou no próprio modelo com informação iconográfica com os valores traduzidos numa escala de cor. A informação fica então associada à identificação numérica do objecto, tendo como atributos o tipo de objecto, a orientação em graus, a inclinação em graus, a área em metros quadrados, a radiação total em Watt-hora por metro quadrado, a radiação directa em Watt-hora por metro quadrado e a radiação difusa em Watt-hora por metro quadrado.

As Figuras 4.25 – 4.26 exibem os resultados das análises de radiação solar de cada elemento seleccionado, apresentando-se a informação iconográfica no modelo, em conjunto, com um gráfico representativo da informação presente nas tabelas, com um valor de radiação global solar incidente para cada painel analisado, organizados segundo o azimute de cada superfície (0º a Norte). Enquanto as Figuras 4.27 – 4.30 resumem os cenários, apresentando os valores máximos e mínimos de radiação global solar incidente (Wh/m²).

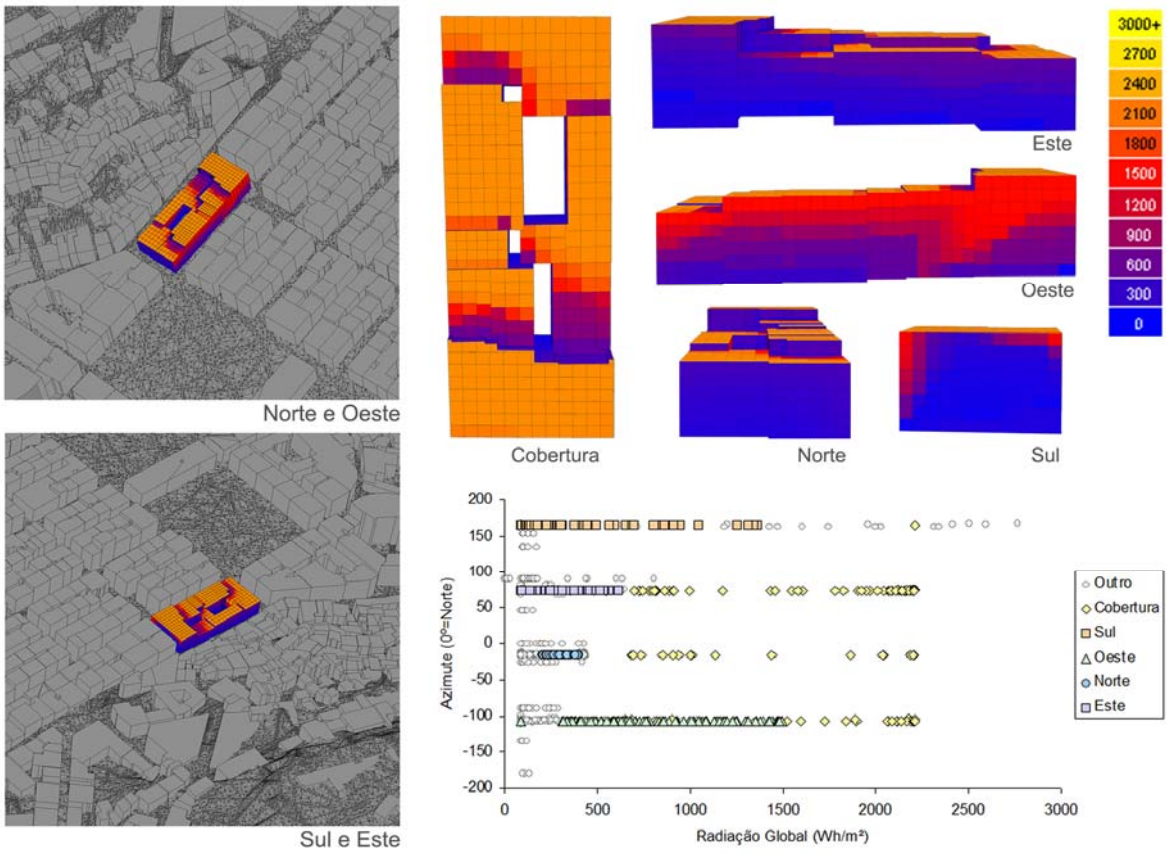


Figura 4.17 – Radiação global (Wh/m²) do modelo M1a para 21 de Dezembro

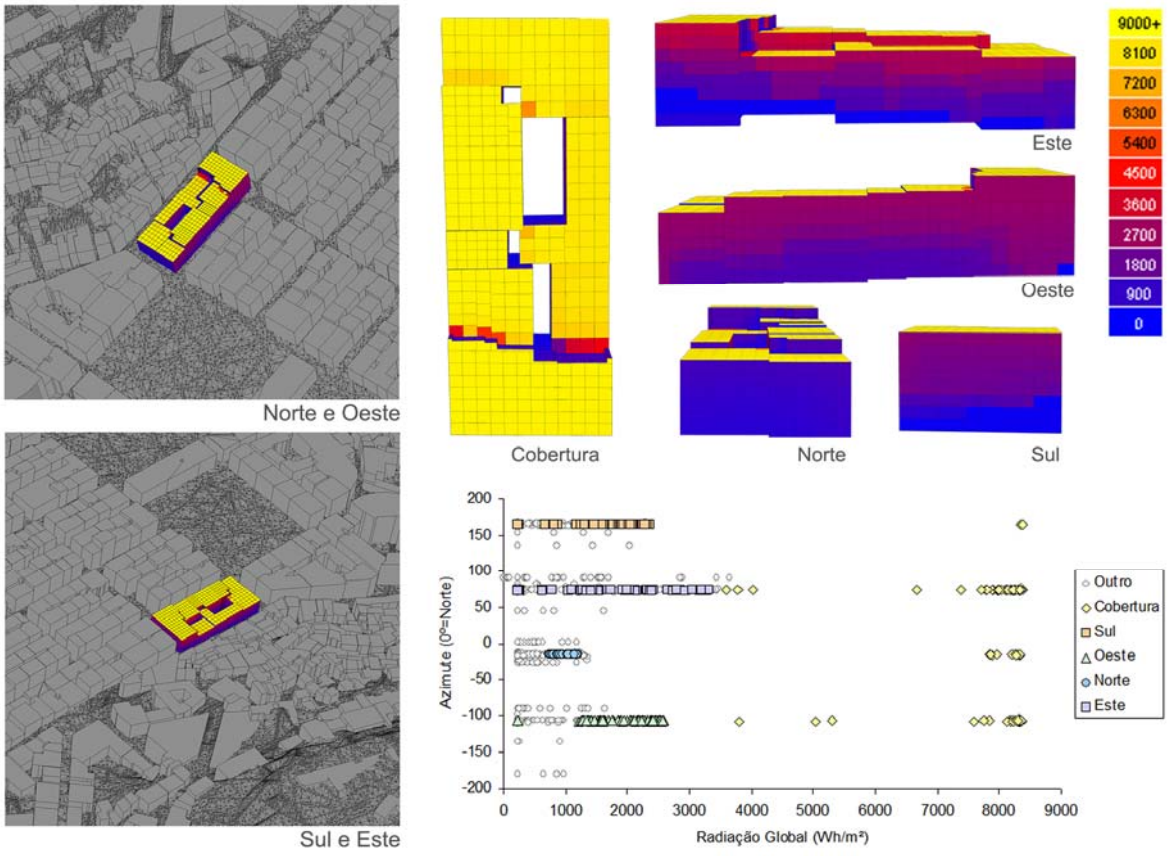


Figura 4.18 – Radiação global (Wh/m²) do modelo M1a para 21 de Junho

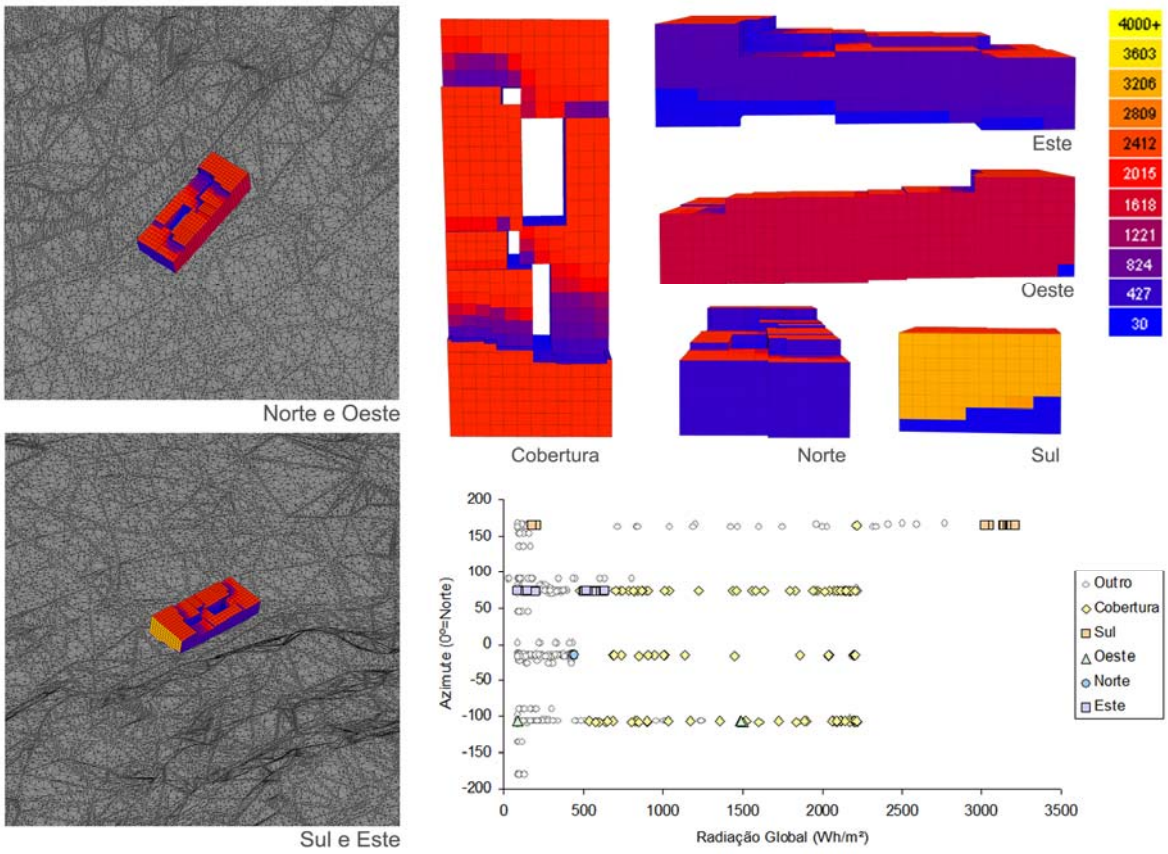


Figura 4.19 – Radiação global (Wh/m²) do modelo M1b para 21 de Dezembro

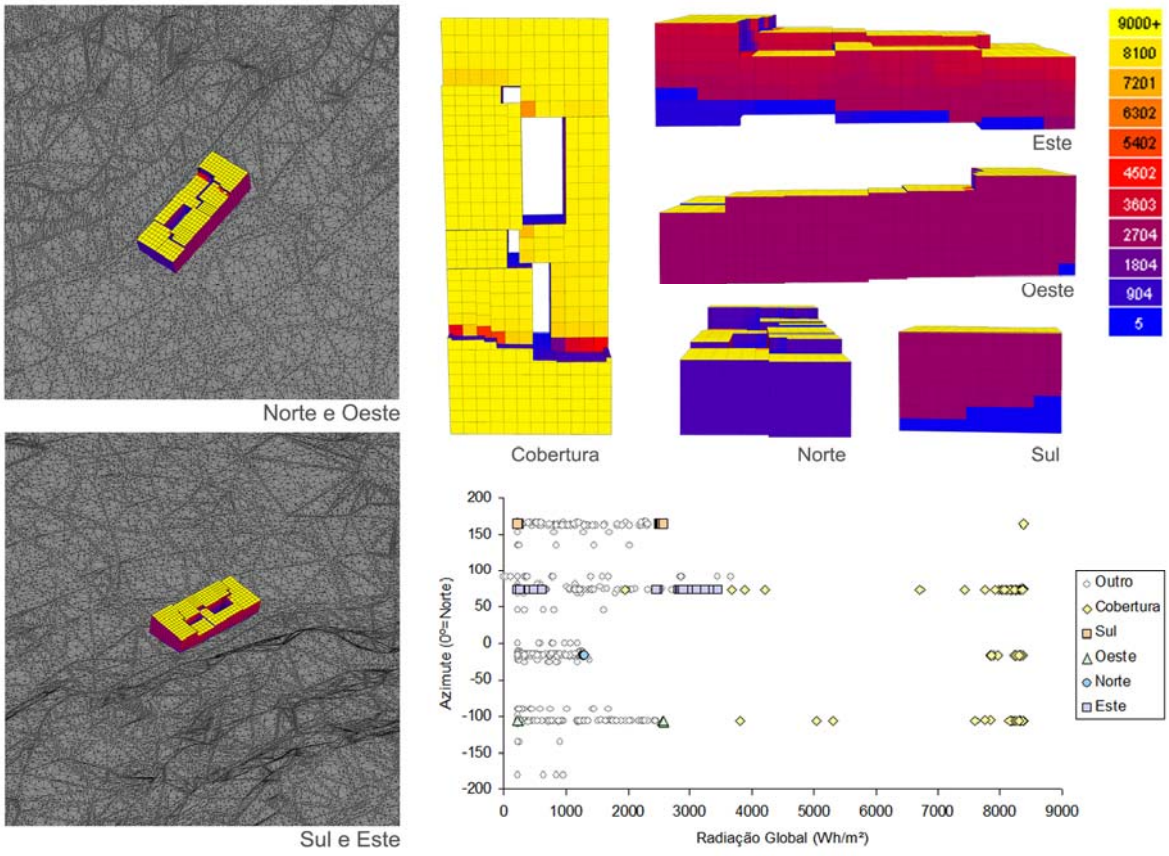


Figura 4.20 – Radiação global (Wh/m²) do modelo M1b para 21 de Junho

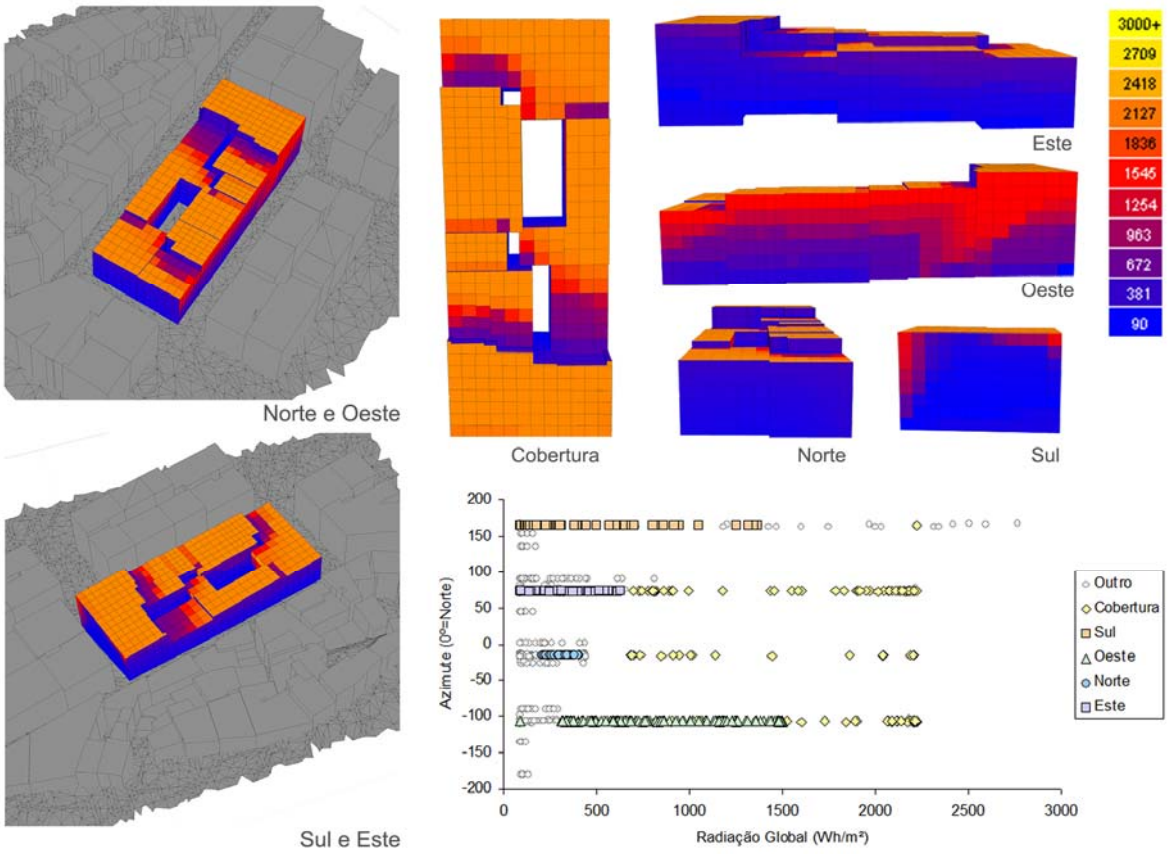


Figura 4.21 – Radiação global (Wh/m²) do modelo M2a para 21 de Dezembro

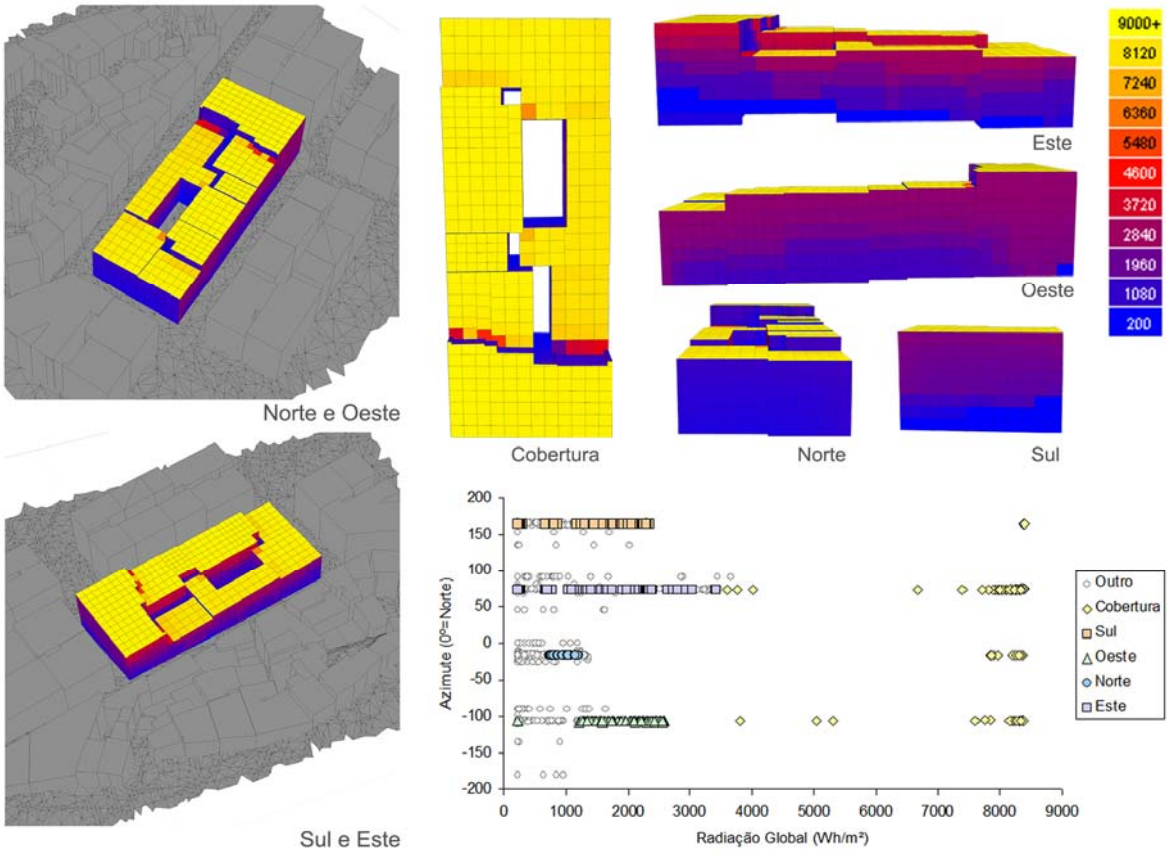


Figura 4.22 – Radiação global (Wh/m²) do modelo M2a para 21 de Junho

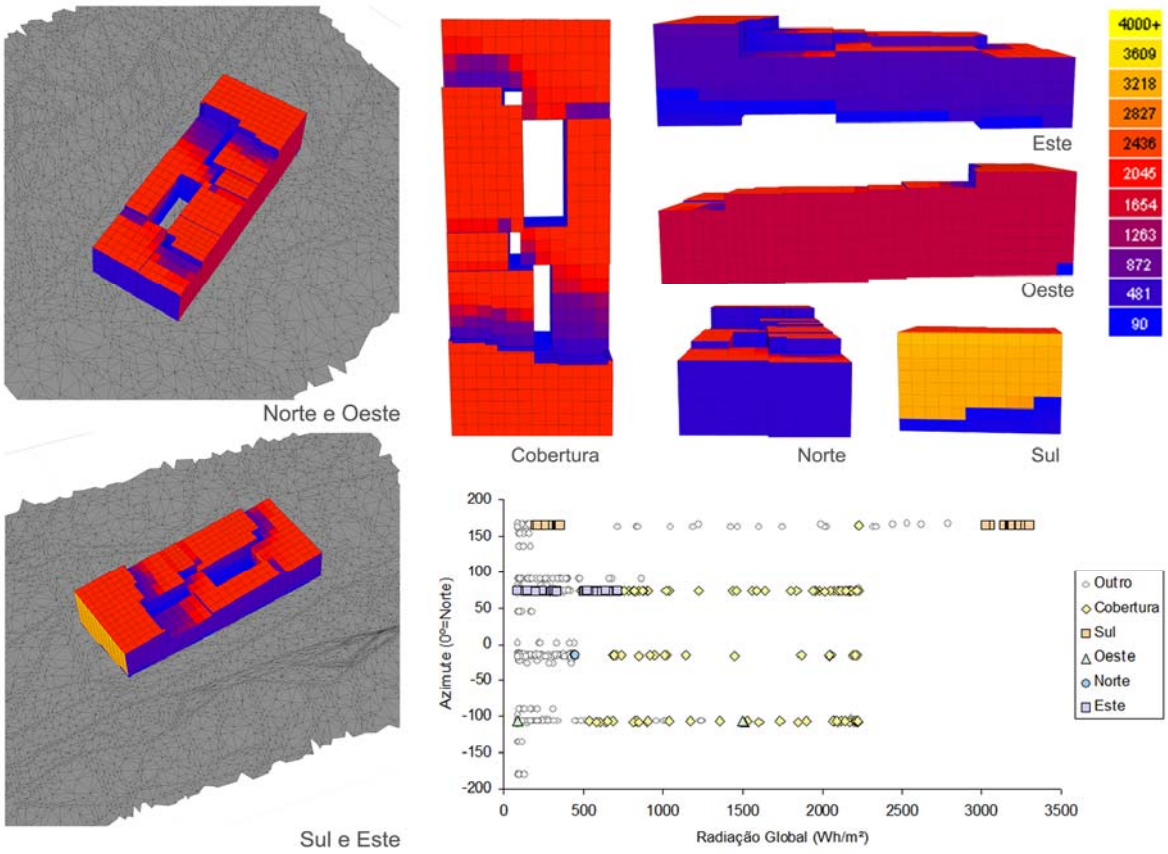


Figura 4.23 – Radiação global (Wh/m²) do modelo M2b para 21 de Dezembro

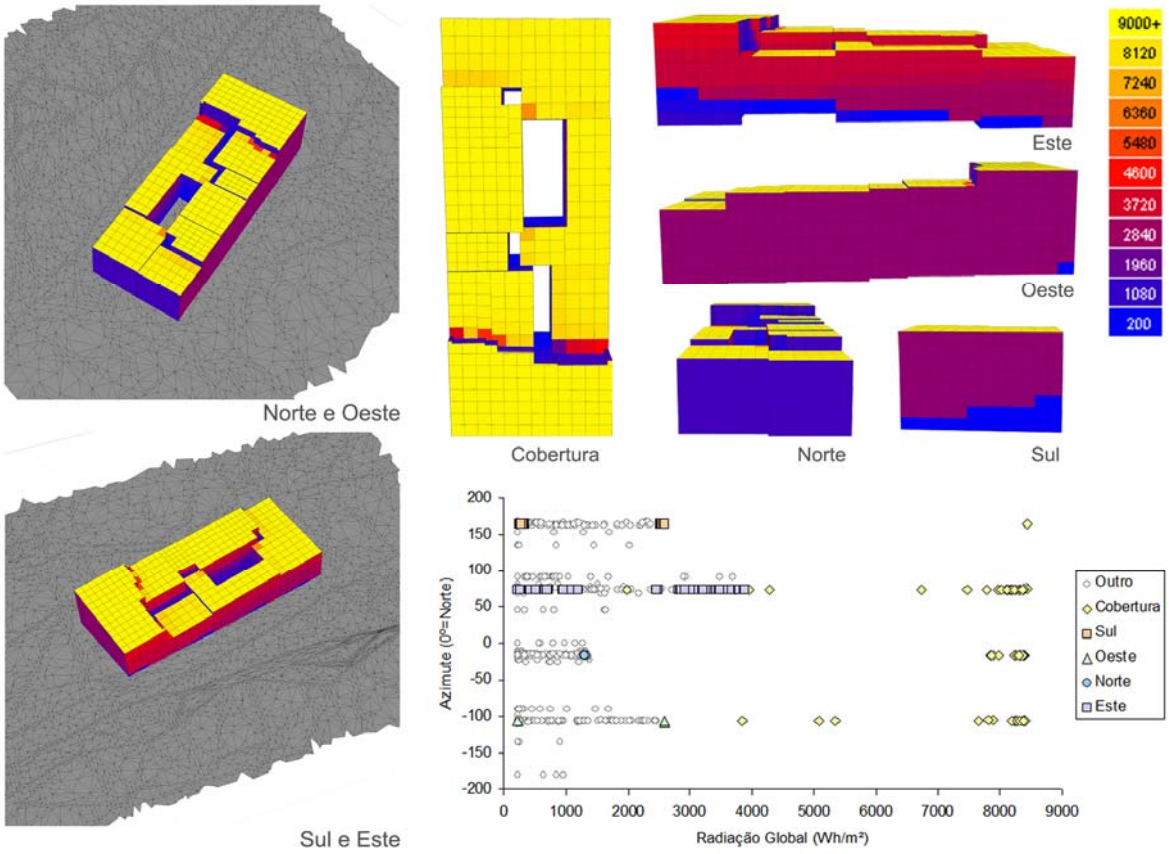


Figura 4.24 – Radiação global (Wh/m²) do modelo M2b para 21 de Junho

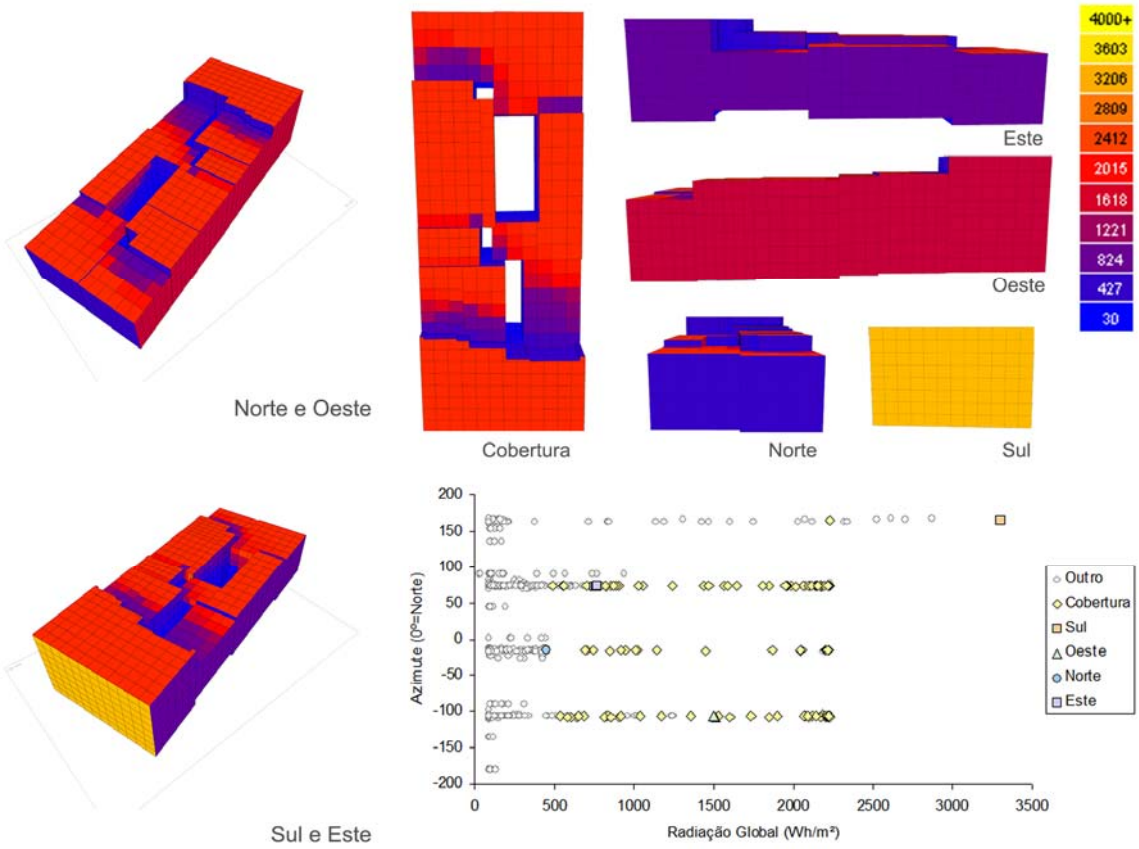


Figura 4.25 – Radiação global (Wh/m²) do modelo M3 para 21 de Dezembro

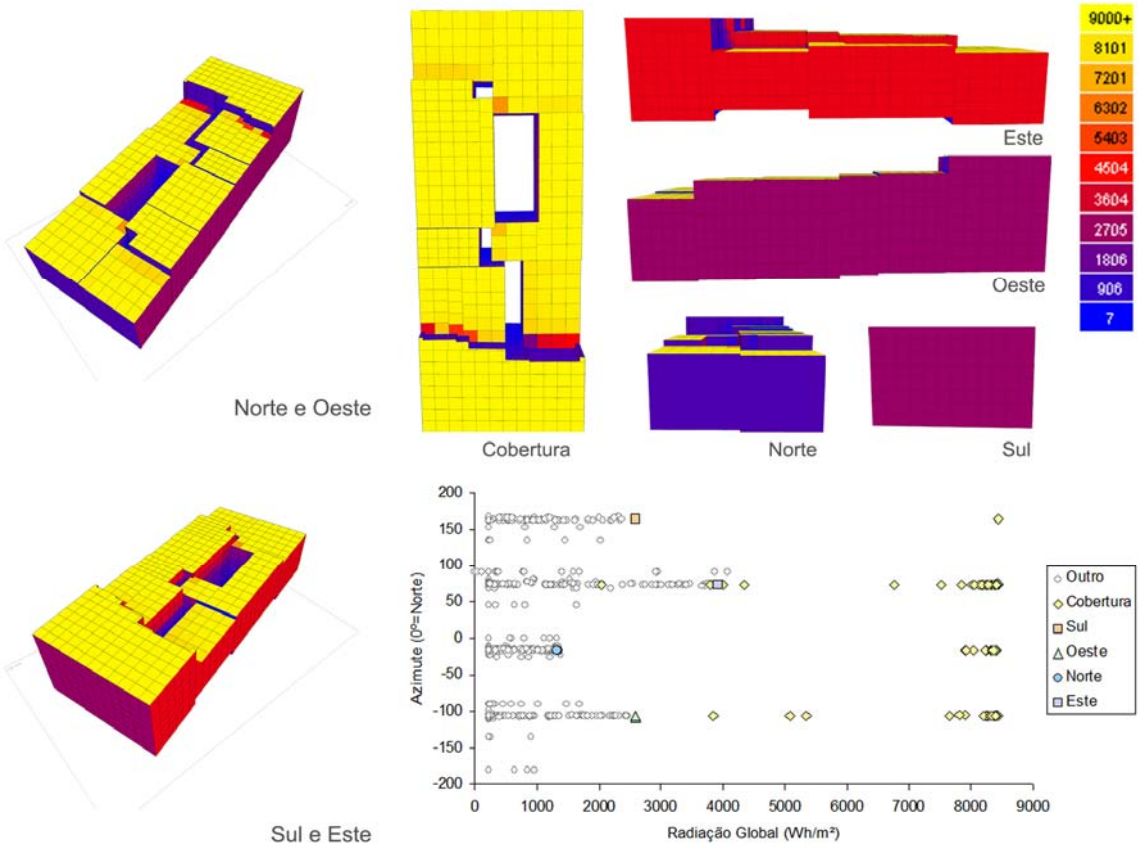


Figura 4.26 – Radiação global (Wh/m²) do modelo M3 para 21 de Junho

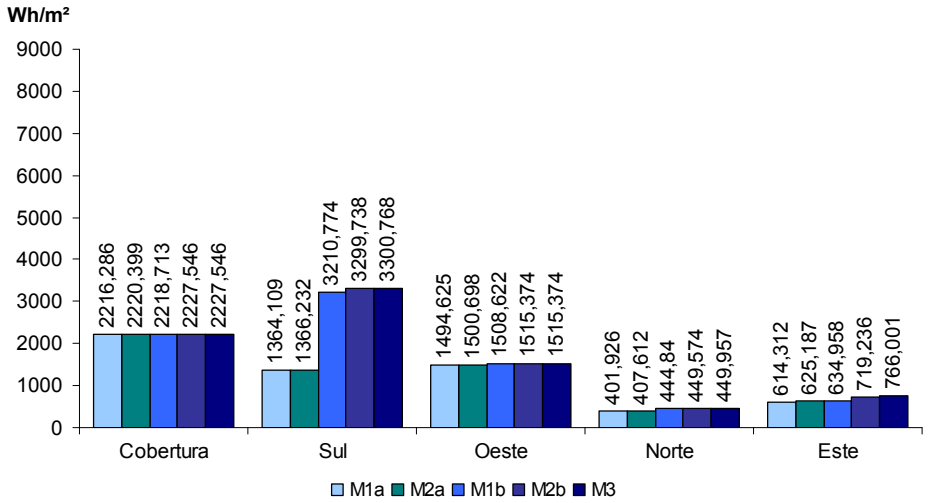


Figura 4.27 – Gráfico com os máximos de radiação global (Wh/m²) para 21 Dezembro com *Incident Solar Radiation*

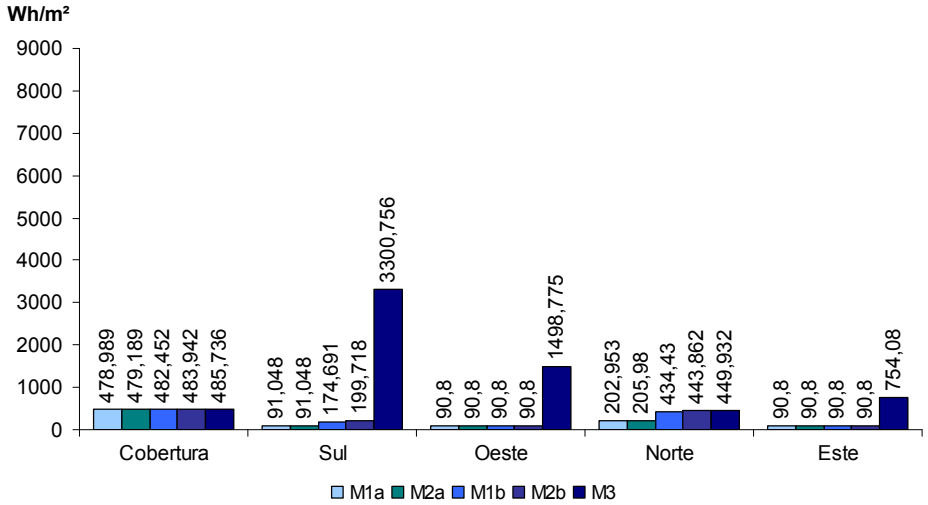


Figura 4.28 – Gráfico com os mínimos de radiação global (Wh/m²) para 21 Dezembro com *Incident Solar Radiation*

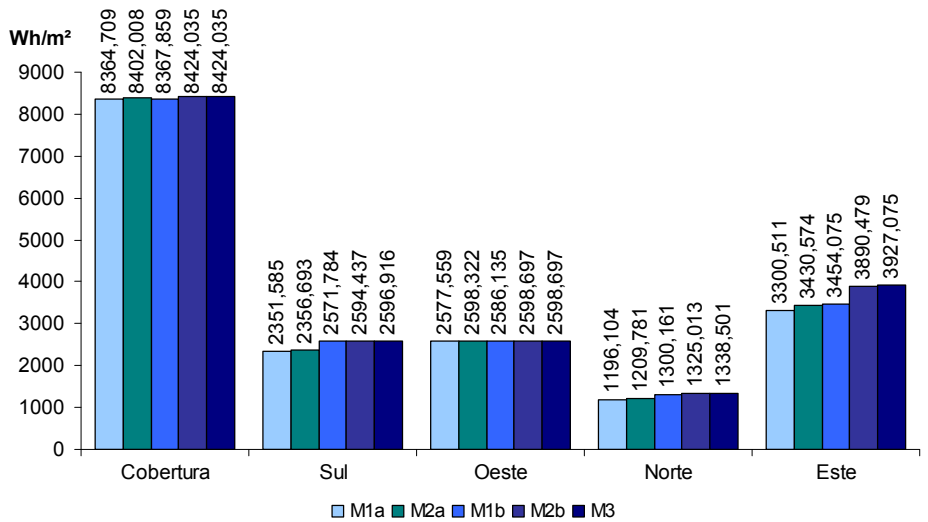


Figura 4.29 – Gráfico com os máximos de radiação global (Wh/m²) para 21 Junho com *Incident Solar Radiation*

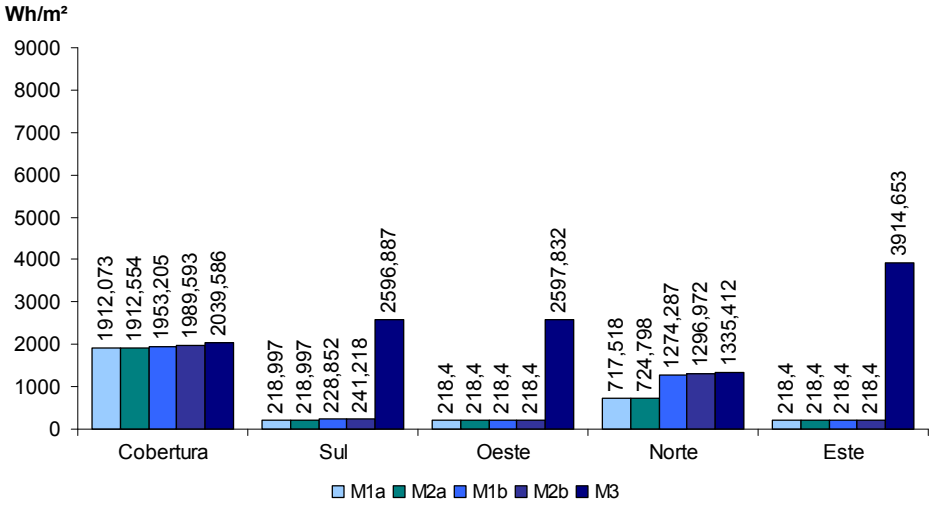


Figura 4.30 – Gráfico com os mínimos de radiação global (Wh/m²) para 21 Junho com *Incident Solar Radiation*

Com a diminuição da dimensão de contexto e com a remoção dos elementos urbanos circundantes a radiação solar alcança as superfícies sem impedimentos, deste modo, os cenários analisados apresentam valores exponencialmente acrescidos, alcançando o expoente máximo com o cenário M3. Sem obstáculos a amplitude de resultados é também restringida, especialmente para o caso M3 que não tem quaisquer elementos adjacentes, resultando na apresentação de valores de radiação solar incidente da mesma grandeza para cada orientação.

Verifica-se também que os modelos que ignoram a componente edificada apresentam uma amplitude de valores similares com os seus modelos complementares, modelos com a mesma dimensão contabilizando com os edifícios adjacentes, contudo, a dispersão dos valores é significativamente distinta. Assim, no caso dos modelos M1b e M2b, os valores de radiação solar incidente de cada superfície concentram-se principalmente em redor dos valores máximos e mínimos registados, enquanto que para os modelos M1a e M2a os valores estão distribuídos dentro da amplitude de resultados.

O volume de radiação solar incidente é também condicionado com as estações devido ao ângulo de incidência da radiação, apresentado maior variância entre modelos, nos valores em superfícies orientadas a Sul, na estação de inverno quando ângulo de altura do sol é menor, e logo a influência dos edifícios vizinhos é maior.

4.3.2.2 Aplicação do modelo *Solar Exposure Graph*

Para o estudo específico do impacto da componente da radiação reflectida utilizou-se a ferramenta *Solar Exposure Graph*. Nesta análise, para além de um plano de fachada orientado a Oeste foram considerados os edifícios circundantes. Na presente situação foi considerado o detalhe máximo do edificado, resultado da associação automática ao modelo dos respectivos materiais de revestimento. De forma a reduzir o tempo de computação da simulação, eliminaram-se todos os elementos do modelo, excepto aqueles que potencialmente provocariam algum efeito de reflexão (edifícios adjacentes e fronteiros e superfície de pavimento) (Figura 4.31). Rotularam-se estes elementos como reflectores solares, caso contrário a ferramenta não contabilizaria a radiação reflectida. As reflexões dos objectos reflectores são então projectadas no modelo de acordo com a posição solar e a normal das superfícies (Figuras 4.32 e 4.33).

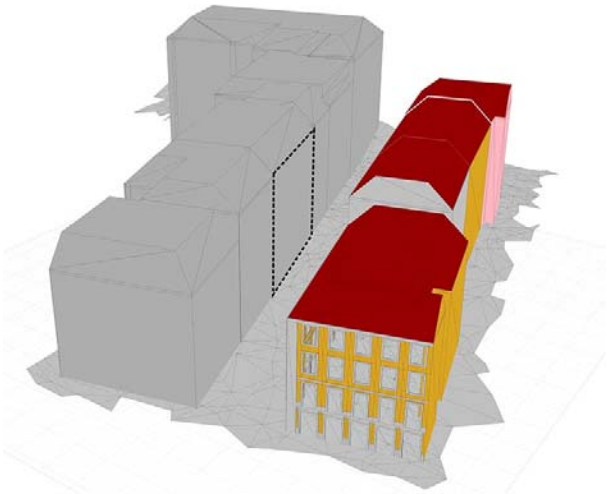


Figura 4.31 – Plano de fachada analisado e elementos circundantes

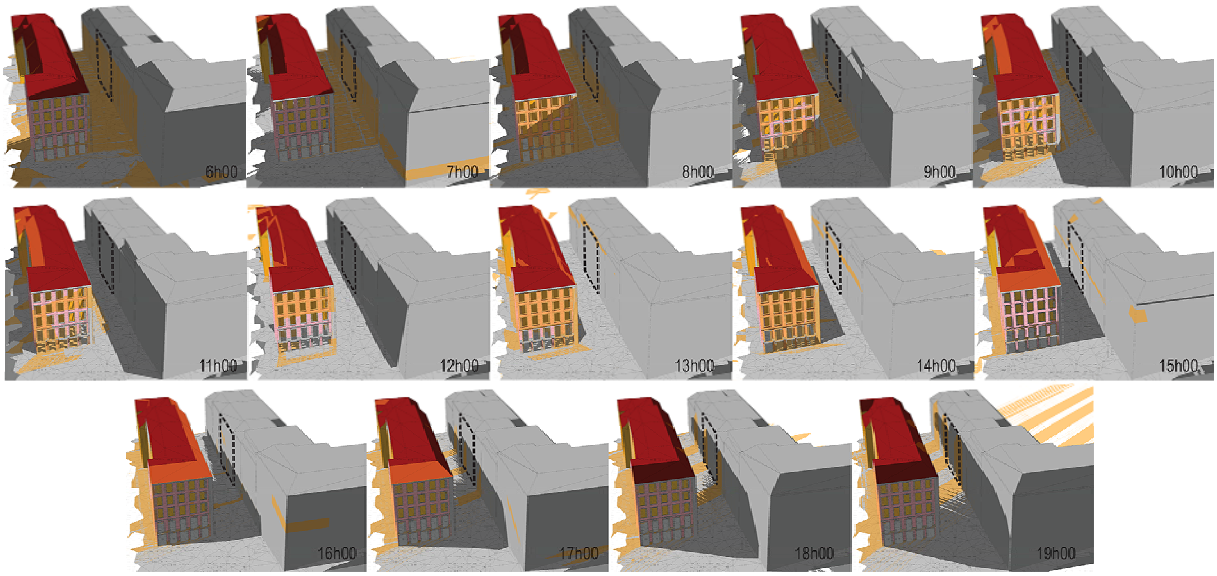


Figura 4.32 – Exposição Solar Horária no dia 21 de Junho (amarelo: reflexão; cinza: sombras)

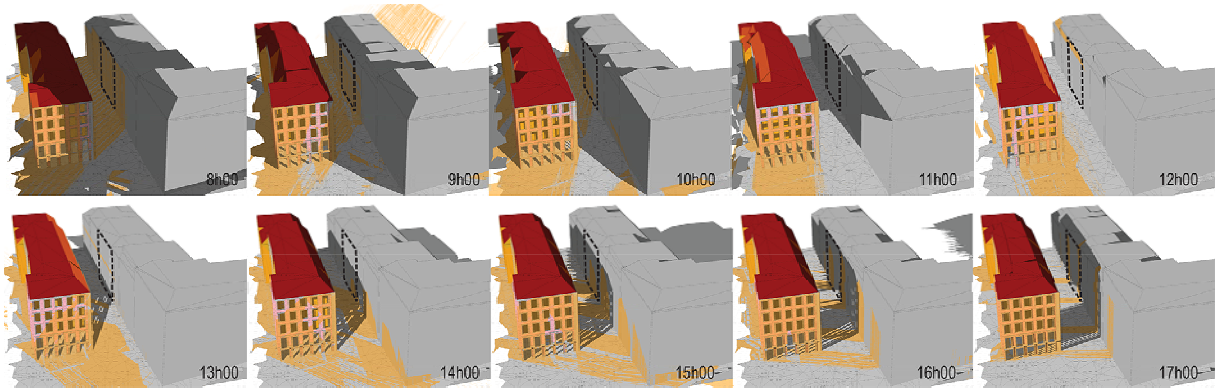


Figura 4.33 – Exposição Solar Horária no dia 21 de Dezembro (amarelo: reflexão; cinza: sombras)

De forma a contabilizar a importância dos materiais no cálculo da radiação reflectida foram executados gráficos para três modelos com diferentes categorias de materiais para os elementos reflectores em redor, mantendo a estrutura do edificado previamente programada no terceiro nível de detalhe do modelo. Os valores atribuídos aos materiais provêm da biblioteca de materiais já existente no programa e conjunto com valores padrão presentes no menu de ajuda.

O primeiro i) utiliza materiais de revestimento correntes e próximos dos reais, aplicados no caso de estudo: reboco pintado de amarelo (RE:0.04; T:0; C:0.652), branco (RE:0.04; T:0; C:0.753) e rosa (RE:0.04; T:0; C:0.804) nas fachadas; vidros incolores (RE:0.13; T:0.92; C:0.909) nas janelas; pedra (RE:0.06; T:0; C:0.753) nos cunhais, nos frisos e nas molduras das janelas; e telhas (RE:0.07; T:0; C:0.178) nas coberturas (Figuras 4.34 e 4.35 e Quadros 4.1 e 4.2).

O segundo ii) de forma a aumentar a reflectividade dos elementos em redor utiliza materiais cerâmicos, mais especificamente azulejos brancos (RE:0.1; T:0; C:0.753) nas fachadas; vidros reflectivos (RE:0.25; T:0.56; C:0.909) nas janelas; pedra (RE:0.06; T:0; C:0.753) nos cunhais, nos frisos e nas molduras das janelas; e telhas (RE:0.07; T:0; C:0.178) nas coberturas (Figuras 4.36 e 4.37 e Quadros 4.3 e 4.4).

O terceiro e último modelo iii) utiliza materiais metálicos (RE:0.6; T:0; C:0.753) nas coberturas, nas fachadas, nos cunhais, nos frisos e nas molduras das janelas; e vidros reflectivos (RE:0.25; T:0.56; C:0.909) nas janelas (Figuras 4.38 e 4.39 e Quadros 4.5 e 4.6).

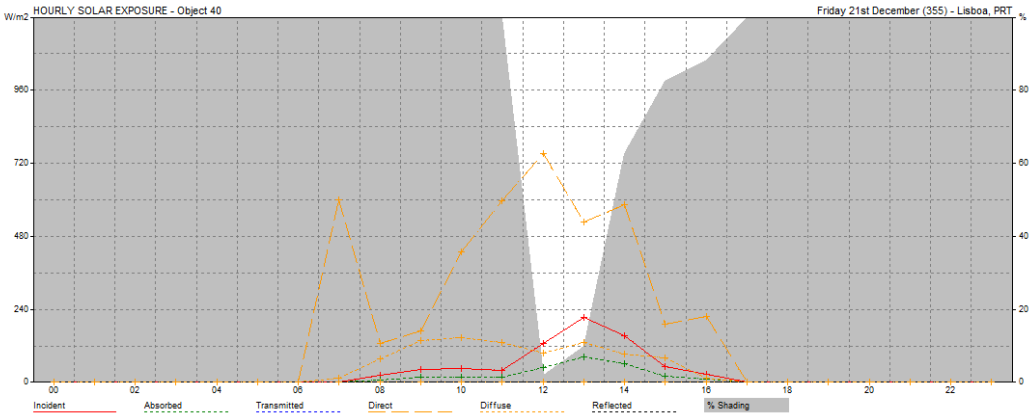


Figura 4.34 – Exposição Solar Horária no dia 21 de Dezembro, medida na fachada em estudo orientada a Oeste (Área de superfície: 286,421 m²; Azimute: -106,70 °; Altitude: 0,00 °) com materiais correntes e próximos dos reais nos elementos em redor

Quadro 4.1 – Exposição Solar Horária no dia 21 de Dezembro, medida na fachada em estudo orientada a Oeste (Área de superfície: 286,421 m²; Azimute: -106,70 °; Altitude: 0,00 °) com materiais correntes e próximos dos reais nos elementos em redor

Hora	Radiação Directa Normal	Radiação Difusa em Plano Horizontal	Ângulo de Incidência	Percentagem de Área Sombreada	Radiação Reflectida	Radiação Incidente		Radiação Absorvida	
H:M	W/m²	W/m²	°	%	W/m²	W/m²	W	W/m²	W
8:00	128	76	>90,00	100%	0	24	6761	9	2633
9:00	169	137	>90,00	100%	0	43	12188	17	4746
10:00	429	148	>90,00	100%	0	46	13167	18	5127
11:00	597	131	>90,00	100%	0	41	11655	16	4538
12:00	751	97	82,31	2%	0,1	129	36841	50	14355
13:00	526	131	68,76	10%	0,1	213	60875	83	23717
14:00	583	93	54,74	63%	0,3	154	44191	60	17246
15:00	193	81	39,49	82%	0,8	51	14735	20	5829
16:00	216	14	28,22	88%	1,1	27	7659	11	3100
Totais					2	726	208073	284	81293

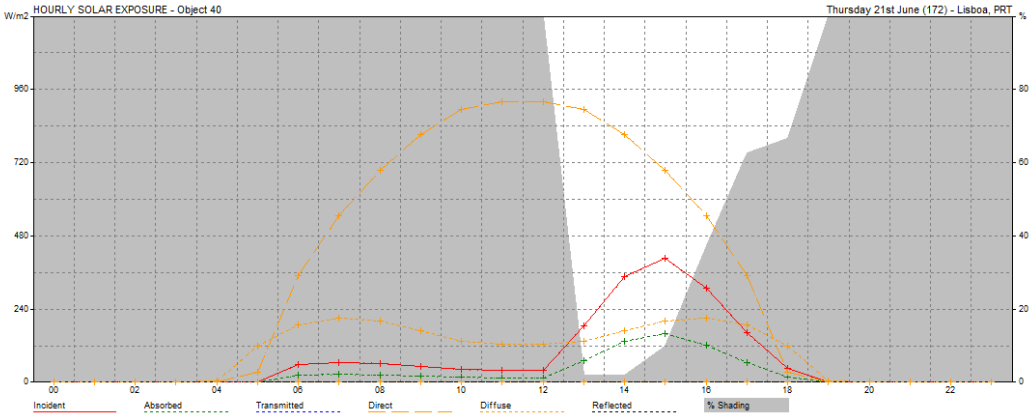


Figura 4.35 – Exposição Solar Horária no dia 21 de Junho, medida na fachada em estudo orientada a Oeste (Área de superfície: 286,421 m²; Azimute: -106,70 °; Altitude: 0,00 °) com materiais correntes e próximos dos reais nos elementos em redor

Quadro 4.2 – Exposição Solar Horária no dia 21 de Junho, medida na fachada em estudo orientada a Oeste (Área de superfície: 286,421 m²; Azimute: -106,70 °; Altitude: 0,00 °) com materiais correntes e próximos dos reais nos elementos em redor

Hora	Radiação Directa Normal	Radiação Difusa em Plano Horizontal	Ângulo de Incidência	Percentagem de Área Sombreada	Radiação Reflectida	Radiação Incidente		Radiação Absorvida	
H:M	W/m²	W/m²	°	%	W/m²	W/m²	W	W/m²	W
6:00	351	187	>90,00	100%	0	58	16637	23	6479
7:00	545	212	>90,00	100%	0	66	18861	26	7345
8:00	695	202	>90,00	100%	0	63	17971	24	6998
9:00	813	169	>90,00	100%	0	52	15035	20	5855
10:00	895	133	>90,00	100%	0	41	11833	16	4608
11:00	920	126	>90,00	100%	0	39	11210	15	4365
12:00	920	126	>90,00	100%	0	39	11210	15	4365
13:00	895	133	80,62	2%	0,2	184	52790	72	20582
14:00	813	169	68,45	2%	0,9	345	98875	135	38604
15:00	695	202	56,88	10%	1,4	405	116087	158	45358
16:00	545	212	44,54	37%	0,2	310	88676	121	34556
17:00	351	187	36,86	63%	0,5	163	46605	64	18201
18:00	32	120	37,74	67%	0,1	46	13092	18	5104
Totais					3	1812	518882	707	202420

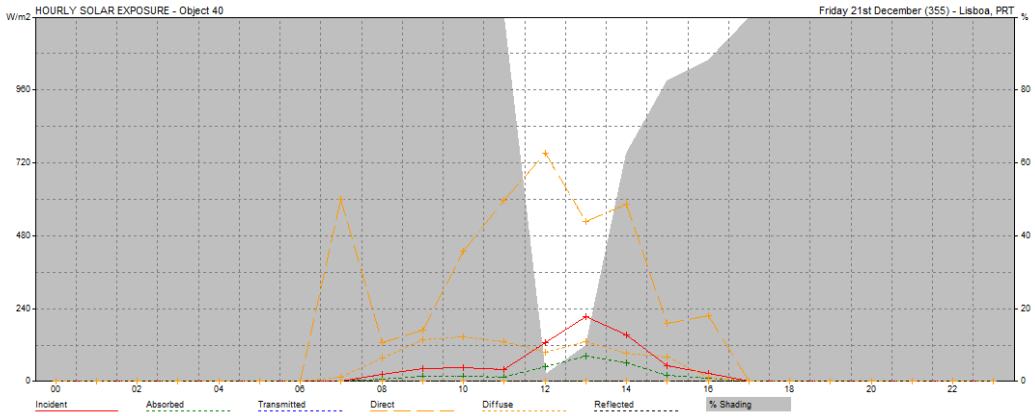


Figura 4.36 – Exposição Solar Horária no dia 21 de Dezembro, medida na fachada em estudo orientada a Oeste (Área de superfície: 286,421 m²; Azimute: -106,70 °; Altitude: 0,00 °) com materiais cerâmicos e vidros reflectivos nos elementos em redor

Quadro 4.3 – Exposição Solar Horária no dia 21 de Dezembro, medida na fachada em estudo orientada a Oeste (Área de superfície: 286,421 m²; Azimute: -106,70 °; Altitude: 0,00 °) com materiais cerâmicos e vidros reflectivos nos elementos em redor

Hora	Radiação Directa Normal	Radiação Difusa em Plano Horizontal	Ângulo de Incidência	Percentagem de Área Sombreada	Radiação Reflectida	Radiação Incidente		Radiação Absorvida	
H:M	W/m²	W/m²	°	%	W/m²	W/m²	W	W/m²	W
8:00	128	76	>90,00	100%	0	24	6753	9	2630
9:00	169	137	>90,00	100%	0	43	12173	17	4740
10:00	429	148	>90,00	100%	0	46	13151	18	5121
11:00	597	131	>90,00	100%	0	41	11640	16	4533
12:00	751	97	82,31	2%	0,1	129	36840	50	14351
13:00	526	131	68,76	10%	0,1	212	60861	83	23711
14:00	583	93	54,74	63%	0,5	154	44181	60	17256
15:00	193	81	39,49	82%	1,3	51	14726	21	5883
16:00	216	14	28,22	88%	2,0	27	7657	11	3210
Totais					4	726	207972	284	81436

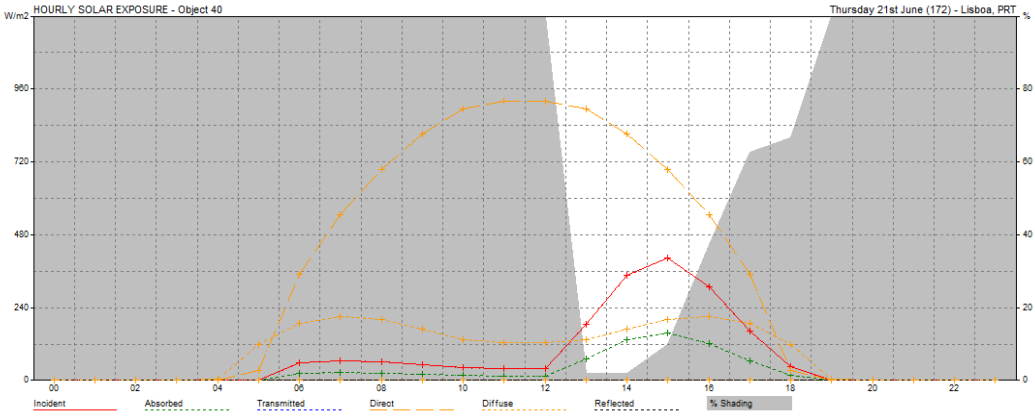


Figura 4.37 – Exposição Solar Horária no dia 21 de Junho, medida na fachada em estudo orientada a Oeste (Área de superfície: 286,421 m²; Azimute: -106,70 °; Altitude: 0,00 °) com materiais cerâmicos e vidros reflectivos nos elementos em redor

Quadro 4.4 – Exposição Solar Horária no dia 21 de Junho, medida na fachada em estudo orientada a Oeste (Área de superfície: 286,421 m²; Azimute: -106,70 °; Altitude: 0,00 °) com materiais cerâmicos e vidros reflectivos nos elementos em redor

Hora	Radiação Directa Normal	Radiação Difusa em Plano Horizontal	Ângulo de Incidência	Percentagem de Área Sombreada	Radiação Reflectida	Radiação Incidente		Radiação Absorvida	
H:M	W/m²	W/m²	°	%	W/m²	W/m²	W	W/m²	W
6:00	351	187	>90,00	100%	0	58	16616	23	6479
7:00	545	212	>90,00	100%	0	66	18837	26	7335
8:00	695	202	>90,00	100%	0	63	17949	24	6989
9:00	813	169	>90,00	100%	0	52	15017	20	5848
10:00	895	133	>90,00	100%	0	41	11818	16	4602
11:00	920	126	>90,00	100%	0	39	11196	15	4360
12:00	920	126	>90,00	100%	0	39	11196	15	4360
13:00	895	133	80,62	2%	0,2	184	52775	72	20576
14:00	813	169	68,45	2%	0,8	345	98856	135	38589
15:00	695	202	56,88	10%	1,2	405	116065	158	45335
16:00	545	212	44,54	37%	0,2	310	88653	121	34547
17:00	351	187	36,86	63%	0,8	163	46584	64	18231
18:00	32	120	37,74	67%	0,1	46	13079	18	5104
Totais					3	1811	518639	706	202346

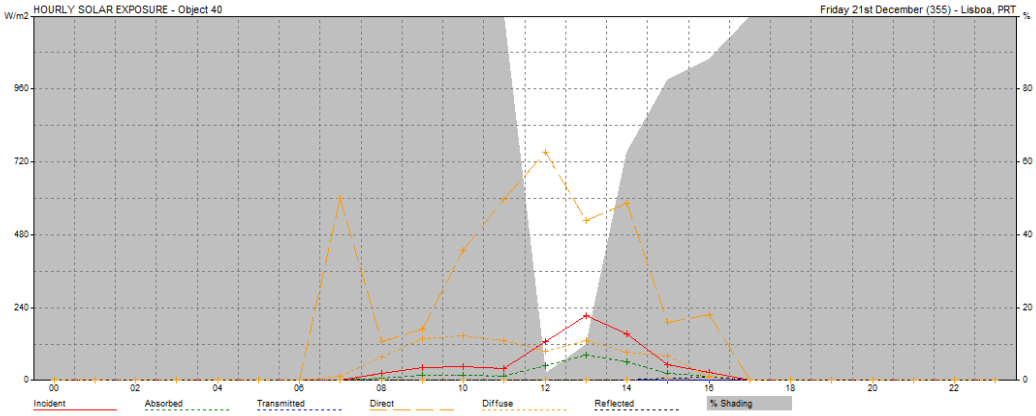


Figura 4.38 – Exposição Solar Horária no dia 21 de Dezembro, medida na fachada em estudo orientada a Oeste (Área de superfície: 286,421 m²; Azimute: -106,70 °; Altitude: 0,00 °) com materiais metálicos e vidros reflectivos nos elementos em redor

Quadro 4.5 – Exposição Solar Horária no dia 21 de Dezembro, medida na fachada em estudo orientada a Oeste (Área de superfície: 286,421 m²; Azimute: -106,70 °; Altitude: 0,00 °) com materiais metálicos e vidros reflectivos nos elementos em redor

Hora	Radiação Directa Normal	Radiação Difusa em Plano Horizontal	Ângulo de Incidência	Percentagem de Área Sombreada	Radiação Reflectida	Radiação Incidente		Radiação Absorvida	
H:M	W/m²	W/m²	°	%	W/m²	W/m²	W	W/m²	W
8:00	128	76	>90,00	100%	0	24	6753	9	2630
9:00	169	137	>90,00	100%	0	43	12173	17	4740
10:00	429	148	>90,00	100%	0	46	13151	18	5121
11:00	597	131	>90,00	100%	0	41	11640	16	4533
12:00	751	97	82,31	2%	1,1	129	36861	51	14464
13:00	526	131	68,76	10%	0,1	212	60861	83	23711
14:00	583	93	54,74	63%	1,9	154	44181	61	17419
15:00	193	81	39,49	82%	7,9	51	14726	23	6612
16:00	216	14	28,22	88%	11,5	27	7657	15	4260
Totais					22	726	207972	291	83489

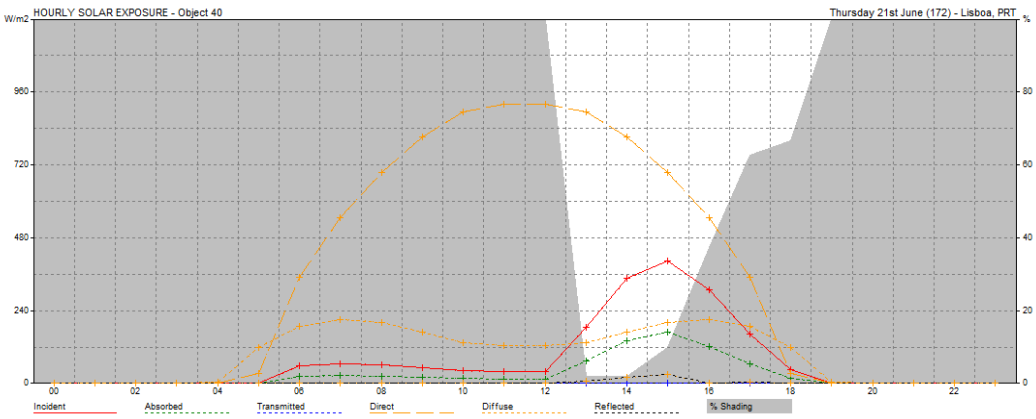


Figura 4.39 – Exposição Solar Horária no dia 21 de Junho, medida na fachada em estudo orientada a Oeste (Área de superfície: 286,421 m²; Azimute: -106,70 °; Altitude: 0,00 °) com materiais metálicos e vidros reflectivos nos elementos em redor

Quadro 4.6 – Exposição Solar Horária no dia 21 de Junho, medida na fachada em estudo orientada a Oeste (Área de superfície: 286,421 m²; Azimute: -106,70 °; Altitude: 0,00 °) com materiais metálicos e vidros reflectivos nos elementos em redor

Hora	Radiação Directa Normal	Radiação Difusa em Plano Horizontal	Ângulo de Incidência	Percentagem de Área Sombreada	Radiação Reflectida	Radiação Incidente		Radiação Absorvida	
H:M	W/m²	W/m²	°	%	W/m²	W/m²	W	W/m²	W
6:00	351	187	>90,00	100%	0	58	16616	23	6470
7:00	545	212	>90,00	100%	0	66	18837	26	7335
8:00	695	202	>90,00	100%	0	63	17949	24	6989
9:00	813	169	>90,00	100%	0	52	15017	20	5848
10:00	895	133	>90,00	100%	0	41	11818	16	4602
11:00	920	126	>90,00	100%	0	39	11196	15	4360
12:00	920	126	>90,00	100%	0	39	11196	15	4360
13:00	895	133	80,62	2%	6,6	184	52775	72	21284
14:00	813	169	68,45	2%	19,2	345	98856	142	40636
15:00	695	202	56,88	10%	30,1	405	116065	170	48556
16:00	545	212	44,54	37%	0,2	310	88653	121	34547
17:00	351	187	36,86	63%	3,9	163	46584	65	18581
18:00	32	120	37,74	67%	0,5	46	13079	18	5146
Totais					61	1811	518639	729	208715

Observa-se que, em ambas as datas para os três modelos, a radiação reflectida medida é nula até o Sol atingir o meio-dia. A orientação dos edifícios e a largura da rua parecem justificar a condição de sombreamento total da fachada analisada, durante esse período. Nas restantes horas de Sol, a fachada está claramente exposta à radiação directa. Com o aumento de reflectividade dos materiais verifica-se um acréscimo na radiação reflectida que a superfície em análise recebe. Contudo, nos dois primeiros casos, com fachadas rebocadas e com azulejo, a quantidade de radiação reflectida é desprezável, não acrescentando muito para o aumento da radiação solar global. No terceiro caso, com superfícies metálicas, já se verifica uma contribuição da radiação reflectida mais significativa.

Tendo estes factores em conta, devido ao tempo e trabalho acrescido que este cálculo requer, só se verifica uma necessidade para o uso do modelo de cálculo *Solar Exposure Graph* quando os materiais de revestimento dos edifícios envolventes têm características reflectivas extremas, com características espaciais urbanas equivalentes ao do caso de estudo. Considerando o comportamento da luz em superfícies especulares, em que o ângulo de incidência é igual ao ângulo

de reflexão em relação a normal à superfície, também se justifica este cálculo mesmo quando as superfícies reflectoras não se encontrem de frente para a superfície em análise, mas por outro lado, num ângulo mais favorável para a reflexão da radiação.

4.3.3 Aplicação do modelo de Radiação de Kumar *et al.* (1997)

Como alternativa, caso não se tenha disponível software específico, é possível calcular a radiação solar pelo modelo de radiação de Kumar *et al.* (1997), desprezando a componente de radiação reflectida que se origina nos elementos envolventes, que tal como se observou em 4.3.2 pode ser considerada reduzida em relação ao contexto de radiação solar global.

Através da aplicação do modelo de radiação de Kumar *et al.* (1997) a painéis 3D é possível obter a radiação directa e difusa que o afecta, utilizando informação que identifica a sua posição espacial e a posição do Sol para o instante temporal em causa. Em conjunto com a posição do Sol é necessário determinar um mapa de sombras para cada instante para o qual se quer obter valores de radiação, produzindo um atributo binário associado a cada elemento. Isto é necessário porque uma área em sombra não recebe radiação directa, logo nestes casos, a componente directa deve ser nula. De notar que um atributo binário é igualmente necessário para determinar se um elemento não recebe qualquer tipo de radiação, como é o caso dos elementos circunscritos pelo terreno ou pelos edifícios.

Para testar a metodologia analisou-se apenas um edifício do quarteirão, sendo este o mesmo edifício com a fachada principal orientada a Oeste que se utilizou para testar o efeito da radiação solar reflectida dos edifícios adjacentes, tendo como envolvente apenas os elementos mais próximos influenciadores para o mapa de sombras.

Os elementos necessários são importados do modelo de *CityEngine* para o software o *ArcGIS*, mais concretamente *ArcScene* 10.2 (Figura 4.40). Sendo estes:

- o terreno, que mantém a forma de MDT *raster* com informação altimétrica;
- os edifícios circundantes, com o primeiro nível de detalhe programado de elementos volumétricos;
- o edifício a analisar, com o segundo nível de detalhe programado de elementos seccionados em grelha aproximadamente quadrangular com 3 metros;
- e o edifício a analisar descrito numa nuvem de pontos, em que cada ponto está associado ao centróide de cada painel.

Cada painel da grelha e cada ponto correspondente tem associado a informação do ângulo de azimute do painel em graus variando entre 0º e 360º medido na direcção horária onde Norte é 0º, Este é 90º, Sul é 180º e Oeste 270º e do ângulo de inclinação do painel em graus variando entre 0º e 90º.

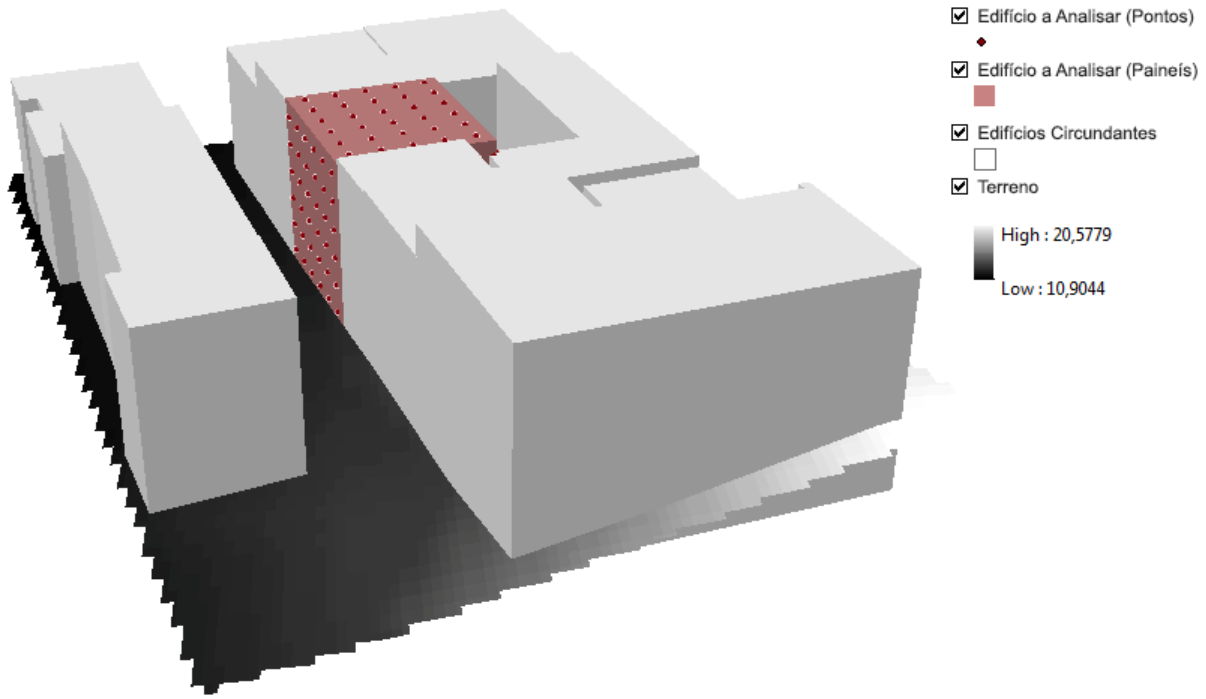


Figura 4.40 – Elementos importados do modelo de *CityEngine* para o software o *ArcGIS*

Para a obtenção do mapa de sombras é necessário determinar quais os painéis que se encontram em sombra em cada momento para o qual se quer obter o valor de radiação incidente. Para este efeito, começa-se por aplicar a ferramenta *Sun Shadow Volume* aos elementos constituintes da malha urbana, isto é, os edifícios circundantes e terreno.

Esta ferramenta cria volumes de sombra projectados pelo modelo usando como base a posição solar para uma determinada data e hora. *Sun Shadow Volume* permite o cálculo dos volumes de sombra para um intervalo temporal específico a definir, determinando a data e hora de início e fim de análise, bem como o número incrementos temporais, podendo estes ser dias, horas ou minutos.

Os cálculos foram efectuados para o solstício de verão e inverno, seguindo as metodologias anteriores, desde as 0h às 24h para se contabilizar todas as horas de Sol em ambas as ocasiões (Figuras 4.41 e 4.42). Os volumes resultantes são armazenados numa única *multipatch feature class*, onde cada volume tem a informação associada de data e tempo, azimute (ângulo em graus entre norte e a projecção perpendicular da posição relativa do Sol até ao horizonte terrestre variando entre 0º e 360º) e altura do Sol (ângulo em graus entre o horizonte terrestre e a posição relativa do Sol tomando o valor de 0º no horizonte e 90º quando atinge o zénite) (ESRI, 2014e).

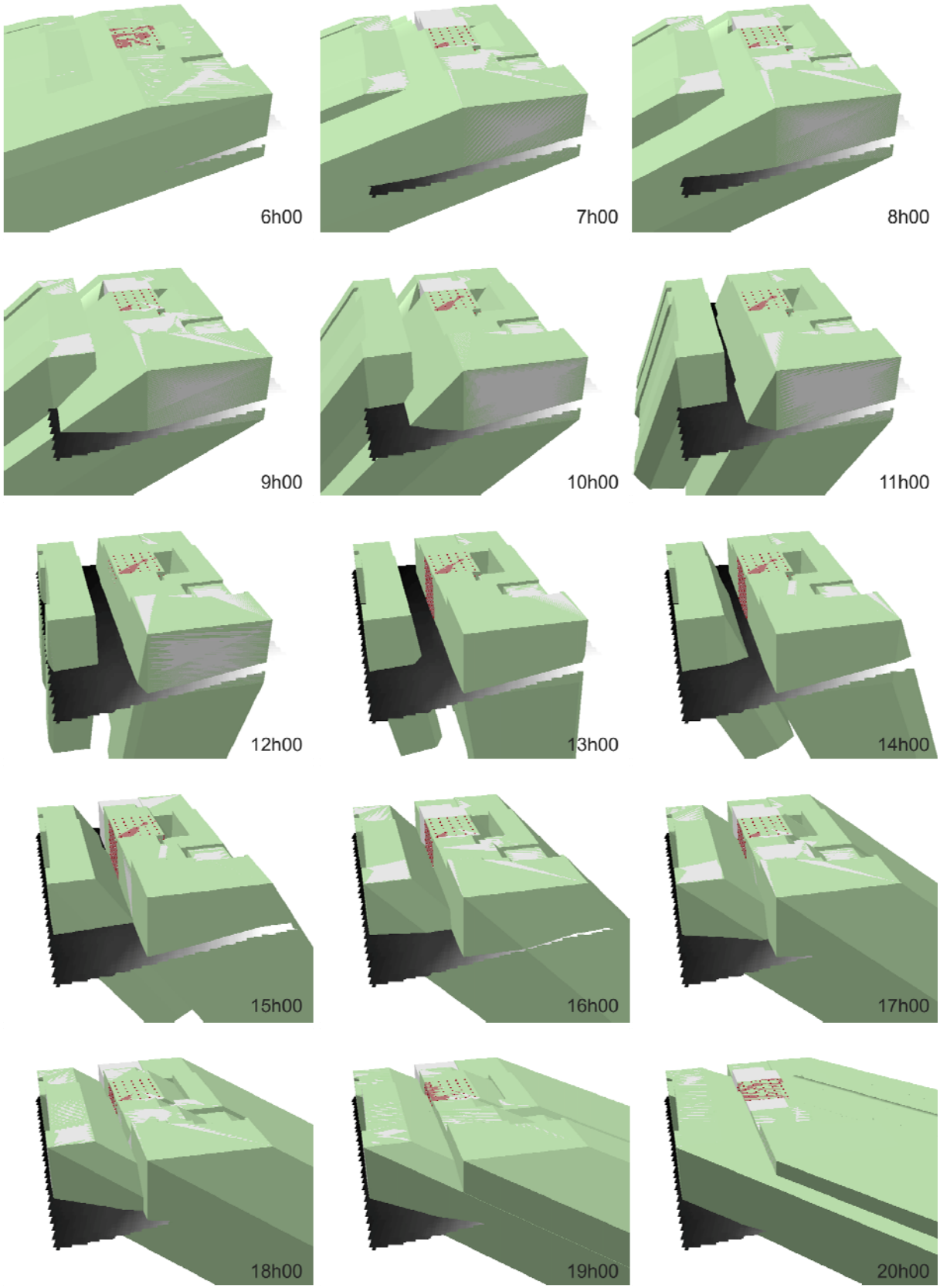


Figura 4.41 – Volumes de Sombra Solar Horária no dia 21 de Junho das 6h às 20h

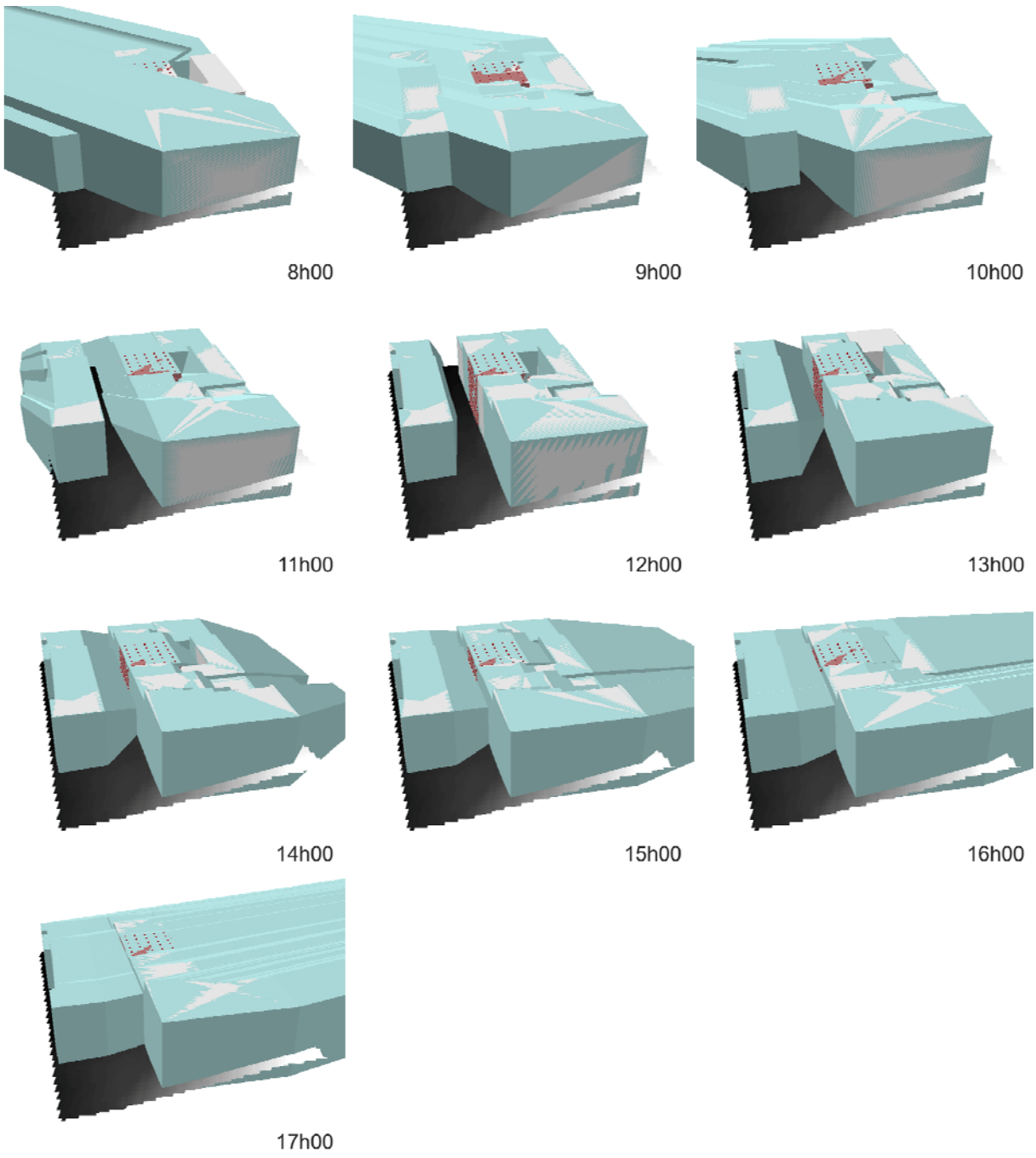


Figura 4.42 – Volumes de Sombra Solar Horária no dia 21 de Dezembro das 8h às 17h

Com os volumes de sombras é agora possível determinar quais os painéis afectados em cada hora dos dias analisados. Isto é conseguido com a ferramenta *Inside 3D*, que determina quais os painéis que se encontram circunscritos pelos volumes de sombra.

Tendo como *target* a nuvem de pontos e os volumes de sombra como *container*, que têm de ser uma *multipatch* fechada, a ferramenta compila uma tabela onde descrimina quais os pontos que se encontram inseridos em cada volume de sombra.

A tabela encontra-se dividida em três colunas: coluna *Target_ID* com o número identificador, neste caso dos pontos; coluna *Status* que informa se os elementos descritos no *Target_ID* se encontram dentro ou parcialmente dentro da *multipatch*, neste caso como o *input* são uma nuvem de pontos o

parâmetro parcialmente dentro nunca se verifica; e coluna *Contain_ID* que identifica qual o elemento da *multipatch* que intersecta (ESRI, 2014f).

O mesmo processo foi efectuado para definir quais os painéis que não recebem qualquer radiação, isto é, aqueles que se encontram inseridos nos elementos circundantes ou no terreno. Neste caso o *container* são os edifícios circundantes mais o volume de terreno.

Após a utilização desta ferramenta obtiveram-se quatro tabelas, duas que determinam quais os painéis que não recebem radiação directa por cada hora para as duas datas analisadas e as outras duas com os painéis que não recebem qualquer radiação, uma devido ao terreno e outra devido ao edificado. De forma a facilitar a utilização da informação obtida, e posteriormente aplicar as expressões de Kumar *et al.* (1997), as tabelas foram exportadas para o formato *Excel*.

Após identificar as fórmulas necessárias para o cálculo da radiação solar directa (I_p) e da radiação solar difusa (I_d), presente no capítulo 2.2.2 nas equações 2.8 a 2.18, as variáveis foram classificadas de acordo com o número de iterações necessárias para o cálculo de radiação total de cada painel, para um dia, com valores por cada hora.

Quadro 4.7 – Classificação das variáveis das fórmulas de Kumar *et al*. (1997)

Valor por Dia	Valor por Hora	Valor por Superfície	Valor por Superfície e por Hora
L	a_s	β	i
N	α	a_w	I_p
δ_s	h_s		I_d
I_o	M		
S_o	τ_b		
	I_s		
	τ_d		

A latitude (L) é inserida manualmente no ficheiro *Excel* enquanto os outros valores são retirados dos quadros que originam do *ArcGIS* ou *CityEngine*. A informação do número do dia (N) e os valores do ângulo de azimute solar (a_s) e do ângulo de altitude solar (α) são retirados da ferramenta *Sun Shadow Volume* do *ArcScene 10.2*, enquanto o ângulo de inclinação da superfície (β) e o ângulo de azimute da superfície (a_w) provêm dos *reports* de informação geométrica do *CityEngine*. É de notar que o azimute em *ArcGIS* e *CityEngine* são medidos a partir do Norte enquanto as fórmulas de Kumar *et al.* (1997) prevêem o Sul como ponto de partida, sendo necessário corrigir os valores de azimute de acordo com esta informação.

Com estes dados é calculada a radiação solar directa e difusa incidente em cada painel para cada hora do dia, conjugando nesta fase os valores de radiação obtidos com o mapa de sombras. De forma a obter o valor acumulado da radiação solar durante um dia, são somados os valores de radiação directa e difusa horários.

Com a radiação calculada para todos os painéis, para os dois dias em causa, resta apenas transportar a informação *Excel* de volta para o *ArcGIS* de forma a visualizar a informação. Utilizando a ferramenta de conversão *Excel to Table* transporta-se a folha com a informação de radiação para cada painel, procedendo-se a uma função de união das tabelas para que a informação se encontre

na *shapefile* dos painéis. Usando as propriedades da *layer*, em particular a *symbology*, é possível atribuir-se informação cromática aos painéis de acordo com os valores de radiação importados, como se pode observar nas Figuras 4.43 e 4.44.

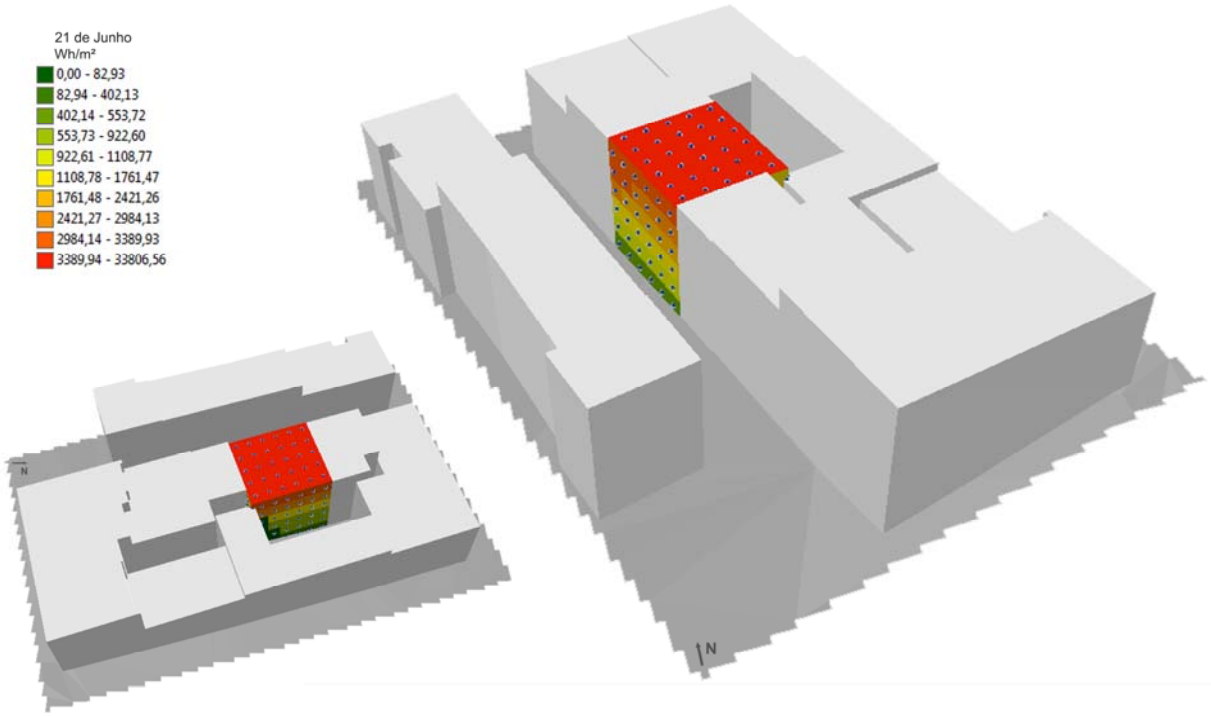


Figura 4.43 – Radiação solar global (Wh/m²) para o dia 21 de Junho

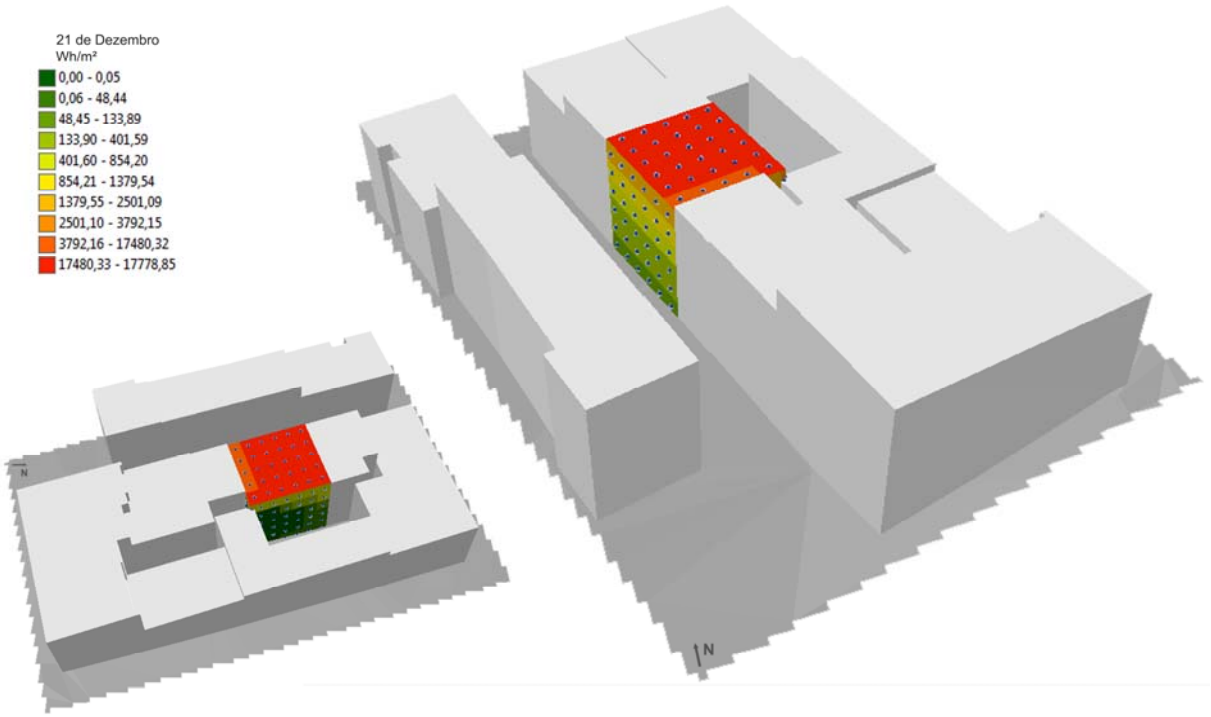


Figura 4.44 – Radiação solar global (Wh/m²) para o dia 21 de Dezembro

Utilizando a metodologia anteriormente descrita é possível obter valores de radiação solares mais realistas se os elementos analisados forem detalhados em maior pormenor. Deste modo se for aplicado o terceiro nível de detalhe programado em *CityEngine* aos elementos do modelo, o mapa de sombras consequente será exponencialmente mais rigoroso e o cálculo de radiação será aplicado aos elementos constituintes da fachada, em vez da grelha anteriormente descrita. Neste caso, a informação de materiais deve ser desprezada pois não é relevante quando não se contabiliza a radiação reflectida. Para testar o modelo efectuou-se o cálculo da radiação incidente apenas para o solstício de inverno (Figura 4.45) e como é de esperar em conjunto com o rigor acrescido do modelo o tempo de cálculo é proporcionalmente afectado.

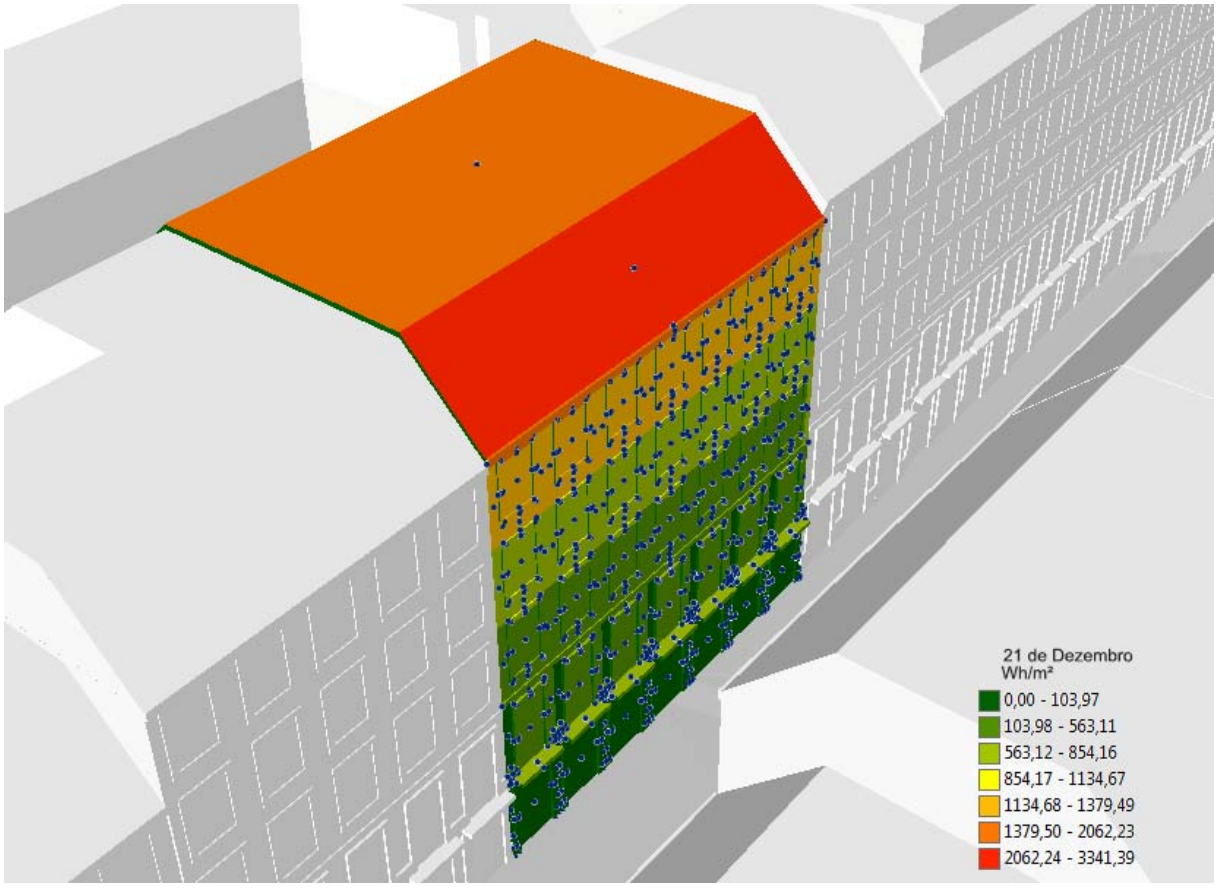


Figura 4.45 – Radiação solar directa (Wh/m²) incidente na fachada Oeste detalhada para o dia 21 de Dezembro

Capítulo 5

Análise e Discussão de Resultados

5. Análise e Discussão de Resultados

5.1 Análise Comparativa dos Modelos de Radiação

Uma vez que os três modelos de cálculo de radiação solar utilizados (*Area Solar Radiation*, *Incident Solar Radiation* e Modelo de Radiação de Kumar *et al.* (1997)) têm especificações distintas, é importante identificar o potencial de cada ferramenta e quais as condições mais adequados para cada modelo. Na Figura 5.1 encontram-se alguns resultados de radiação global incidente num edifício (assinalado com contorno a tracejado) obtidos com os diferentes modelos de radiação, contabilizando uma área de contexto reduzida e considerando a envolvente edificada (M2a).

Pela observação da Figura 5.1 torna-se claro que o modelo *Area Solar Radiation* não é adequado para esta escala e, em particular, para análise de fachada. De facto, esta ferramenta cria uma *raster* com informação de radiação, sendo as coberturas estudadas em detalhe e as fachadas obtidas através de uma extrapolação do mapa de radiação em 2D, tornando-se mais adequado em situações onde o principal interesse são as coberturas, principalmente, para grandes superfícies devido à velocidade grande de cálculo.

Ambos os Modelos de Radiação de Kumar *et al.* (1997) e o modelo *Incident Solar Radiation* do *Ecotect* examinam os elementos 3D que constituem as fachadas sendo assim possível comparar os resultados de radiação solar incidente em cada painel, e é de esperar que existam algumas discrepâncias entre os resultados, pois o Modelo de Radiação de Kumar *et al.* (1997) não possui um ficheiro climático com dados do local, ao contrário do *Ecotect*. Em vez deste ficheiro, o modelo de radiação de Kumar *et al.* (1997) calcula a radiação solar incidente contabilizando com a ângulo de azimute solar (a_s) e o ângulo de altura solar (α), que variam continuamente durante o dia, para qualquer dia do ano (definido por N), para qualquer latitude (que determina o local em análise, dado por L). Contudo, o modelo de radiação de Kumar *et al.* (1997) assume que o céu é sempre limpo independentemente do que se observa no local na realidade.

Este factor não é preponderante nesta análise devido à localização dos elementos ser em Lisboa, onde o céu é predominantemente não encoberto, ainda assim, por não contabilizar quaisquer nuvens, é de esperar que os valores de radiação que originam do modelo de radiação de Kumar *et al.* (1997) sejam mais acentuados do que aqueles que provêm do modelo *Incident Solar Radiation*.

De forma a melhor compreender as diferenças entre os dois modelos, os valores de radiação solar incidente registados em cada painel para ambos os dias (21 de Dezembro e 21 de Junho) foram comparados. Reduziu-se a amostra apenas para conter os painéis mais representativos, tendo sido isolados os painéis da fachada principal localizada a Oeste e a primeira faixa de painéis da cobertura que faz fronteira com a fachada Oeste. Na Figura 5.2 os painéis seleccionados estão identificados (com o número em cada software) e nos quadros 5.1 e 5.2 os valores de cada painel encontram-se na mesma linha.

O *Ecotect*, por seu turno, é capaz de obter análises mais detalhada por aferir a radiação reflectida pelos elementos em redor, que os outros modelos não contabilizam, com *Solar Exposure Graph*, contudo, para esta análise comparativa os valores de radiação reflectida não foram contabilizados.

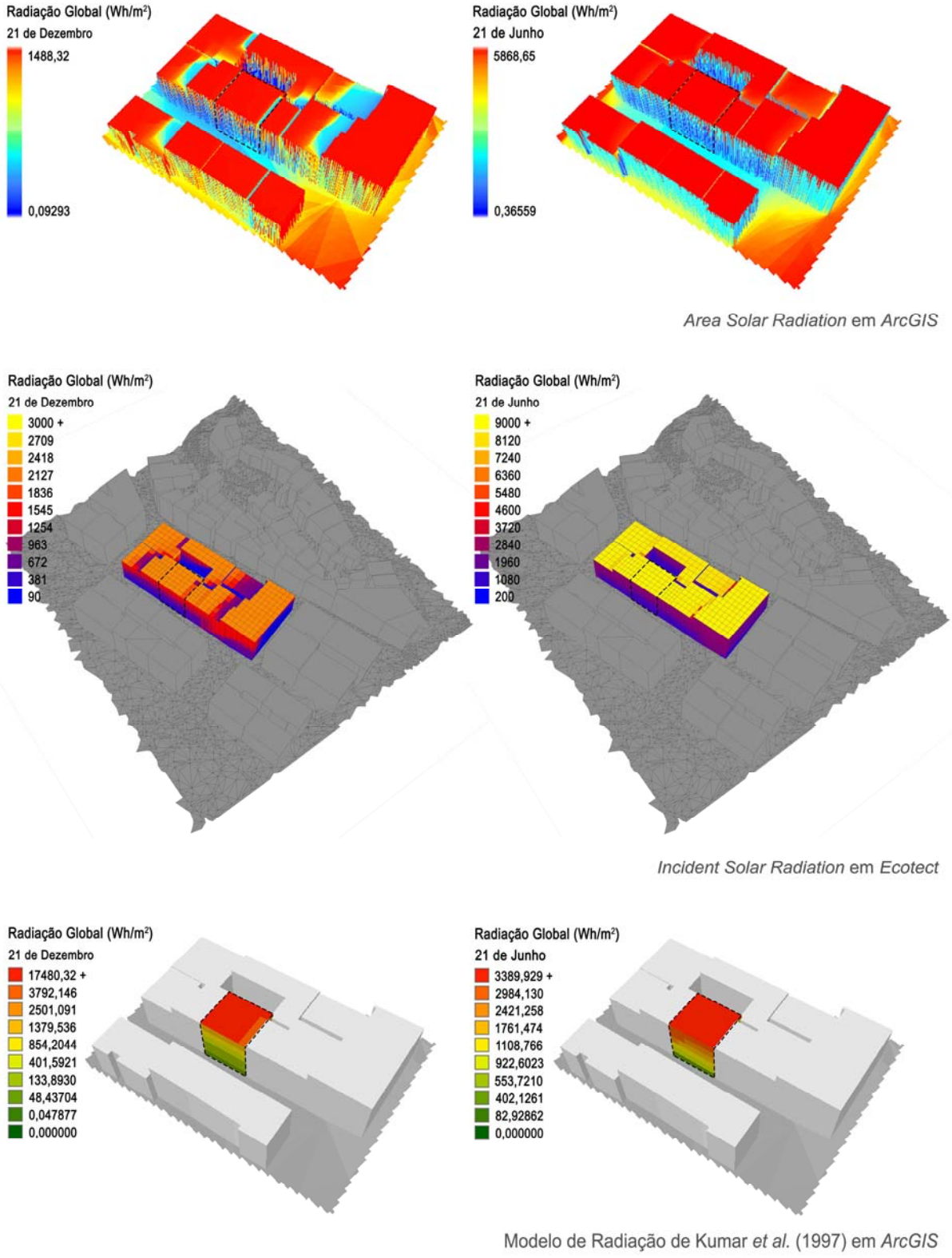


Figura 5.1 – Radiação solar global incidente (Wh/m²) calculada para o cenário M2a com os diferentes modelos de radiação

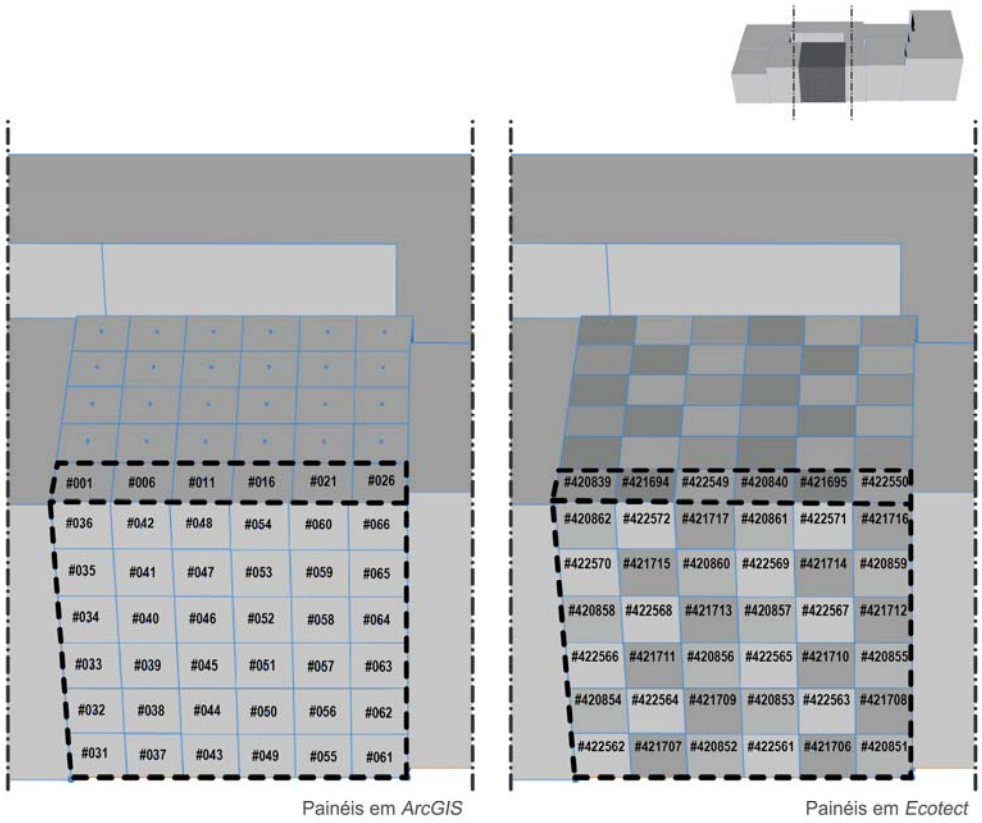


Figura 5.2 – Numeração identificadora dos painéis em *ArcGIS* e em *Ecotect*

Analisando a informação cromática dos dois modelos é observável uma correlação entre o mapa de sombras obtido entre os *softwares*, contudo os valores de radiação global entre os modelos não são equivalentes. De facto, pelos quadros 5.1 e 5.2 verifica-se que a radiação calculada segundo o modelo de radiação de Kumar *et al.* (1997) oscila significativamente entre os painéis, resultando em valores bastante superiores nos painéis horizontais da cobertura, quando comparados com os resultados do modelo *Incident Solar Radiation*. No caso dos painéis verticais que compõe a fachada, a diferença de radiação solar global não apresentam exactamente a mesma amplitude de valores em ambos os modelos, mas não exibem o mesmo nível de diferença apresentado nos painéis horizontais. Constata-se, contudo, que as faixas de painéis na proximidade do pavimento apresentam valores mais reduzidos com o modelo de radiação de Kumar *et al.* (1997) do que com o modelo *Incident Solar Radiation*, ao passo que as faixas superiores mais perto do coroamento da fachada exibem valores mais elevados com o modelo de radiação de Kumar *et al.* (1997).

Relativamente à amplitude de valores de radiação global registada, para os diferentes painéis da fachada verificou-se que: no dia 21 de Dezembro para o modelo de radiação de Kumar *et al.* (1997) os valores oscilam entre 104,02 Wh/m² e 1844,91 Wh/m², enquanto que para o modelo *Incident Solar Radiation* os valores oscilam entre 310,22 Wh/m² e 1480,38 Wh/m²; no dia 21 de Junho para o modelo de radiação de Kumar *et al.* (1997) os valores oscilam entre 553,72 Wh/m² e 3358,28 Wh/m², enquanto que para o modelo *Incident Solar Radiation* os valores oscilam entre 1254,90 Wh/m² e 2538,08 Wh/m².

Quadro 5.1 – Valores de radiação solar (Wh/m²) para o dia 21 de Dezembro recorrendo ao Modelo de Kumar *et al.* (1997) (esquerda) e *Incident Solar Radiation* (direita)

Nº do Painel ArcGIS	Radiação Directa	Radiação Difusa	Radiação Global	Nº do Painel Ecotect	Radiação Directa	Radiação Difusa	Radiação Global
001	2062,23	15716,62	17778,85	**420839**	1315,07	904,36	2219,43
006	2062,23	15716,62	17778,85	**421694**	1315,07	904,15	2219,22
011	2061,40	15716,62	17778,02	**422549**	1315,07	903,93	2219,00
016	2061,40	15716,62	17778,02	**420840**	1313,96	903,56	2217,52
021	2061,40	15716,62	17778,02	**421695**	1313,96	903,05	2217,01
026	1763,70	15716,62	17480,32	**422550**	1009,76	887,31	1897,07
031	103,97	0,05	104,02	**422562**	133,54	184,33	317,87
032	401,54	0,05	401,59	**420854**	342,26	212,61	554,87
033	401,54	0,05	401,59	**422566**	342,26	254,81	597,07
034	854,16	0,05	854,20	**420858**	558,06	308,70	866,75
035	1379,49	0,05	1379,54	**422570**	824,75	377,42	1202,17
036	1844,86	0,05	1844,91	**420862**	1049,11	431,27	1480,38
037	103,97	0,05	104,02	**421707**	133,54	181,68	315,22
038	401,54	0,05	401,59	**422564**	258,77	207,98	466,75
039	401,54	0,05	401,59	**421711**	342,26	247,60	589,86
040	854,16	0,05	854,20	**422568**	558,06	299,59	857,65
041	1379,49	0,05	1379,54	**421715**	824,75	369,41	1194,16
042	1844,86	0,05	1844,91	**422572**	1049,11	429,07	1478,17
043	103,97	0,05	104,02	**420852**	133,54	178,65	312,19
044	401,54	0,05	401,59	**421709**	258,77	205,25	464,03
045	401,54	0,05	401,59	**420856**	342,26	243,90	586,17
046	854,16	0,05	854,20	**421713**	558,06	296,11	854,17
047	1379,49	0,05	1379,54	**420860**	824,75	365,75	1190,50
048	1844,86	0,05	1844,91	**421717**	1049,11	427,24	1476,34
049	103,97	0,05	104,02	**422561**	133,54	178,22	311,76
050	401,54	0,05	401,59	**420853**	258,77	203,87	462,64
051	401,54	0,05	401,59	**422565**	342,26	242,41	584,67
052	854,16	0,05	854,20	**420857**	558,06	293,91	851,97
053	1379,49	0,05	1379,54	**422569**	824,75	363,30	1188,05
054	1844,86	0,05	1844,91	**420861**	1049,11	425,72	1474,82
055	103,97	0,05	104,02	**421706**	133,54	176,68	310,22
056	401,54	0,05	401,59	**422563**	258,77	203,04	461,81
057	401,54	0,05	401,59	**421710**	342,26	240,75	583,02
058	854,16	0,05	854,20	**422567**	558,06	292,58	850,63
059	1379,49	0,05	1379,54	**421714**	824,75	362,26	1187,01
060	1844,86	0,05	1844,91	**422571**	1049,11	425,03	1474,14
061	103,97	0,05	104,02	**420851**	175,28	176,09	351,37
062	401,54	0,05	401,59	**421708**	258,77	202,61	461,38
063	401,54	0,05	401,59	**420855**	342,26	240,41	582,67
064	854,16	0,05	854,20	**421712**	486,13	292,38	778,50
065	1379,49	0,05	1379,54	**420859**	824,75	361,82	1186,57
066	1844,86	0,05	1844,91	**421716**	1049,11	424,83	1473,93

Quadro 5.2 – Valores de radiação solar (Wh/m²) para o dia 21 de Junho recorrendo ao Modelo de Kumar *et al.* (1997) (esquerda) e *Incident Solar Radiation* (direita)

Nº do Painel ArcGIS	Radiação Directa	Radiação Difusa	Radiação Global	Nº do Painel Ecotect	Radiação Directa	Radiação Difusa	Radiação Global
001	8408,01	25398,55	33806,56	**420839**	6194,36	2175,23	8369,59
006	8408,01	25398,55	33806,56	**421694**	6194,36	2174,73	8369,08
011	8408,01	25398,55	33806,56	**422549**	6194,36	2174,21	8368,57
016	8408,01	25398,55	33806,56	**420840**	6194,36	2173,33	8367,69
021	8408,01	25398,55	33806,56	**421695**	6194,36	2172,10	8366,46
026	8408,01	25398,55	33806,56	**422550**	6194,36	2134,23	8328,59
031	553,64	0,08	553,72	**422562**	831,36	443,36	1274,72
032	1108,69	0,08	1108,77	**420854**	831,36	511,38	1342,74
033	1761,40	0,08	1761,47	**422566**	985,19	612,89	1598,07
034	2984,05	0,08	2984,13	**420858**	1406,16	742,50	2148,66
035	3358,21	0,08	3358,28	**422570**	1516,25	907,81	2424,05
036	3389,85	0,08	3389,93	**420862**	1516,25	1037,33	2553,58
037	553,64	0,08	553,72	**421707**	831,36	436,99	1268,35
038	1108,69	0,08	1108,77	**422564**	831,36	500,24	1331,60
039	1761,40	0,08	1761,47	**421711**	985,19	595,55	1580,74
040	2421,18	0,08	2421,26	**422568**	1381,06	720,60	2101,65
041	3358,21	0,08	3358,28	**421715**	1516,25	888,54	2404,79
042	3389,85	0,08	3389,93	**422572**	1516,25	1032,04	2548,28
043	553,64	0,08	553,72	**420852**	831,36	429,71	1261,07
044	1108,69	0,08	1108,77	**421709**	831,36	493,69	1325,05
045	1761,40	0,08	1761,47	**420856**	985,19	586,66	1571,85
046	2421,18	0,08	2421,26	**421713**	1381,06	712,22	2093,28
047	2984,05	0,08	2984,13	**420860**	1516,25	879,74	2395,99
048	3389,85	0,08	3389,93	**421717**	1516,25	1027,63	2543,88
049	553,64	0,08	553,72	**422561**	831,36	428,67	1260,03
050	1108,69	0,08	1108,77	**420853**	831,36	490,37	1321,73
051	1761,40	0,08	1761,47	**422565**	985,19	583,07	1568,25
052	2421,18	0,08	2421,26	**420857**	1381,06	706,94	2088,00
053	2984,05	0,08	2984,13	**422569**	1516,25	873,84	2390,09
054	3358,21	0,08	3358,28	**420861**	1516,25	1023,97	2540,21
055	553,64	0,08	553,72	**421706**	831,36	424,98	1256,34
056	1108,69	0,08	1108,77	**422563**	831,36	488,37	1319,73
057	1761,40	0,08	1761,47	**421710**	985,19	579,08	1564,27
058	2421,18	0,08	2421,26	**422567**	1381,06	703,73	2084,78
059	2984,05	0,08	2984,13	**421714**	1516,25	871,34	2387,59
060	3358,21	0,08	3358,28	**422571**	1516,25	1022,33	2538,57
061	553,64	0,08	553,72	**420851**	831,36	423,54	1254,90
062	1108,69	0,08	1108,77	**421708**	831,36	487,33	1318,69
063	1761,40	0,08	1761,47	**420855**	985,19	578,25	1563,43
064	2421,18	0,08	2421,26	**421712**	1381,06	703,25	2084,31
065	2984,05	0,08	2984,13	**420859**	1516,25	870,28	2386,53
066	3358,21	0,08	3358,28	**421716**	1516,25	1021,83	2538,08

Quadro 5.3 – Valores de radiação solar directa (Wh/m²) por hora para o modelo de radiação de Kumar *et al.* (1997)

		6h00	7h00	8h00	9h00	10h00	11h00	12h00	13h00	14h00	15h00	16h00	17h00	18h00	19h00	20h00	Soma
21-Jun	#021	139,19	205,78	406,22	610,47	788,96	921,88	996,32	1005,52	948,67	830,87	663,30	463,71	258,46	148,72	19,93	8408,01
	#060	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	167,83	385,82	555,05	652,71	659,78	562,87	374,15	0,00	3358,21
	#059	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	167,83	385,82	555,05	652,71	659,78	562,87	0,00	0,00	2984,05
	#058	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	167,83	385,82	555,05	652,71	659,78	0,00	0,00	0,00	2421,18
	#057	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	167,83	385,82	555,05	652,71	0,00	0,00	0,00	0,00	1761,40
	#056	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	167,83	385,82	555,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1108,69
	#055	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	167,83	385,82	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	553,64
21-Dez	#021	0,00	0,00	0,00	85,99	211,71	320,23	383,01	387,55	333,01	230,01	104,23	5,66	0,00	0,00	0,00	2061,40
	#060	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	103,97	297,57	452,61	525,33	465,37	0,00	0,00	0,00	0,00	1844,86
	#059	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	103,97	297,57	452,61	525,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1379,49
	#058	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	103,97	297,57	452,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	854,16
	#057	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	103,97	297,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	401,54
	#056	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	103,97	297,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	401,54
	#055	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	103,97	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	103,97

Quadro 5.4 – Valores de radiação solar difusa (Wh/m²) por hora para o modelo de radiação de Kumar *et al*. (1997)

		6h00	7h00	8h00	9h00	10h00	11h00	12h00	13h00	14h00	15h00	16h00	17h00	18h00	19h00	20h00	Soma
21-Jun	#021	936,24	264,48	118,95	65,99	42,58	31,47	26,70	26,17	29,65	38,64	57,66	99,37	206,27	603,58	22850,79	25398,55
	#060	2,9E-03	8,1E-04	3,6E-04	2,0E-04	1,3E-04	9,6E-05	8,1E-05	8,0E-05	9,0E-05	1,2E-04	1,8E-04	3,0E-04	6,3E-04	1,8E-03	7,0E-02	0,08
	#059	2,9E-03	8,1E-04	3,6E-04	2,0E-04	1,3E-04	9,6E-05	8,1E-05	8,0E-05	9,0E-05	1,2E-04	1,8E-04	3,0E-04	6,3E-04	1,8E-03	7,0E-02	0,08
	#058	2,9E-03	8,1E-04	3,6E-04	2,0E-04	1,3E-04	9,6E-05	8,1E-05	8,0E-05	9,0E-05	1,2E-04	1,8E-04	3,0E-04	6,3E-04	1,8E-03	7,0E-02	0,08
	#057	2,9E-03	8,1E-04	3,6E-04	2,0E-04	1,3E-04	9,6E-05	8,1E-05	8,0E-05	9,0E-05	1,2E-04	1,8E-04	3,0E-04	6,3E-04	1,8E-03	7,0E-02	0,08
	#056	2,9E-03	8,1E-04	3,6E-04	2,0E-04	1,3E-04	9,6E-05	8,1E-05	8,0E-05	9,0E-05	1,2E-04	1,8E-04	3,0E-04	6,3E-04	1,8E-03	7,0E-02	0,08
	#055	2,9E-03	8,1E-04	3,6E-04	2,0E-04	1,3E-04	9,6E-05	8,1E-05	8,0E-05	9,0E-05	1,2E-04	1,8E-04	3,0E-04	6,3E-04	1,8E-03	7,0E-02	0,08
21-Dez	#021	0,00	0,00	9337,76	671,37	291,70	185,02	148,86	146,67	176,64	267,52	569,81	3921,28	0,00	0,00	0,00	15716,62
	#060	0,00	0,00	2,8E-02	2,0E-03	8,9E-04	5,6E-04	4,5E-04	4,5E-04	5,4E-04	8,1E-04	1,7E-03	1,2E-02	0,00	0,00	0,00	0,05
	#059	0,00	0,00	2,8E-02	2,0E-03	8,9E-04	5,6E-04	4,5E-04	4,5E-04	5,4E-04	8,1E-04	1,7E-03	1,2E-02	0,00	0,00	0,00	0,05
	#058	0,00	0,00	2,8E-02	2,0E-03	8,9E-04	5,6E-04	4,5E-04	4,5E-04	5,4E-04	8,1E-04	1,7E-03	1,2E-02	0,00	0,00	0,00	0,05
	#057	0,00	0,00	2,8E-02	2,0E-03	8,9E-04	5,6E-04	4,5E-04	4,5E-04	5,4E-04	8,1E-04	1,7E-03	1,2E-02	0,00	0,00	0,00	0,05
	#056	0,00	0,00	2,8E-02	2,0E-03	8,9E-04	5,6E-04	4,5E-04	4,5E-04	5,4E-04	8,1E-04	1,7E-03	1,2E-02	0,00	0,00	0,00	0,05
	#055	0,00	0,00	2,8E-02	2,0E-03	8,9E-04	5,6E-04	4,5E-04	4,5E-04	5,4E-04	8,1E-04	1,7E-03	1,2E-02	0,00	0,00	0,00	0,05

Para se entender melhor a origem das diferenças constatadas, os valores de radiação solar directa e radiação solar difusa foram também examinados de forma isolada. Como era expectável, os valores da radiação solar directa nos painéis com o modelo de radiação de Kumar *et al.* (1997) são superiores aos registados com o modelo *Incident Solar Radiation*, pois o modelo de Kumar *et al.* (1997) admite apenas a situação de céu limpo, e logo uma transmitância atmosférica (τ_b) maior permitindo a incidência de mais radiação ($I_s = I_o \tau_b$, equação 2.14). Verifica-se como excepção os painéis em contacto com o pavimento que registam uma radiação directa inferior no caso do modelo de radiação de Kumar *et al.* (1997).

De seguida analisou-se a radiação solar difusa. De imediato torna-se claro que a componente de radiação difusa não se encontra bem calibrada para a realidade local, com valores quase desprezáveis para os elementos verticais de fachada e valores elevados para os painéis horizontais que compõe a cobertura. Ao consultar o quadro 5.4, que representa a radiação solar difusa (Wh/m²) por hora para o modelo de radiação de Kumar et al. (1997), observa-se também que os valores de radiação difusa no início e final do dia são bastante elevados.

Este facto pode ser explicado pela equação 2.17 de radiação solar difusa do modelo de radiação de Kumar *et al.* (1997) ($I_d = I_o \tau_d \cos^2 \beta / 2 \sin \alpha$) onde se constata que para o ângulo solar (α) reduzido, a radiação solar difusa que alcança a superfície aumenta significativamente. Por outro lado, se a superfície em análise se encontra vertical, quando a inclinação da superfície (β) tende para os 90º, a radiação solar difusa é reduzida significativamente. Este fenómeno verifica-se facilmente no quadro 5.5, onde a componente da equação 2.17 da radiação solar difusa que utiliza a inclinação da superfície em análise (β) e ângulo de altitude solar (α) foram isolados num índice ($\cos^2 \beta / 2 \sin \alpha$) variando $0<\beta\leq90º$ e $0<\alpha\leq90º$.

Quadro 5.5 – Índice entre inclinação da superfície em análise (β) e ângulo de altitude solar (α) da fórmula da radiação solar difusa (Id = Io τd **cos² β / 2 sin α**)

β / α	0,1º	10,0º	20,0º	30,0º	40,0º	50,0º	60,0º	70,0º	80,0º	90,0º
0,1º	286,48	277,84	252,97	214,86	168,11	118,37	71,62	33,51	8,64	0,00
10,0º	2,88	2,79	2,54	2,16	1,69	1,19	0,72	0,34	0,09	0,00
20,0º	1,46	1,42	1,29	1,10	0,86	0,60	0,37	0,17	0,04	0,00
30,0º	1,00	0,97	0,88	0,75	0,59	0,41	0,25	0,12	0,03	0,00
40,0º	0,78	0,75	0,69	0,58	0,46	0,32	0,19	0,09	0,02	0,00
50,0º	0,65	0,63	0,58	0,49	0,38	0,27	0,16	0,08	0,02	0,00
60,0º	0,58	0,56	0,51	0,43	0,34	0,24	0,14	0,07	0,02	0,00
70,0º	0,53	0,52	0,47	0,40	0,31	0,22	0,13	0,06	0,02	0,00
80,0º	0,51	0,49	0,45	0,38	0,30	0,21	0,13	0,06	0,02	0,00
90,0º	0,50	0,48	0,44	0,38	0,29	0,21	0,13	0,06	0,02	0,00

Deste modo é evidente que o modelo de radiação de Kumar *et al.* (1997) necessita de ser calibrado para a realidade local, todavia, este modelo permite uma análise informativa, principalmente relativamente à componente de radiação solar directa, em particular para dias de céu limpo.

Uma forma de comparar de uma forma mais rigorosa o modelo de radiação de Kumar *et al.* (1997) e o modelo *Incident Solar Radiation* (*Ecotect*) é tentar utilizar os dados do ficheiro climático do

Ecotect no modelo de Kumar *et al.* (1997). De facto, no *Ecotect*, é utilizado um ficheiro climático para cada local com a componente de radiação solar directa normal ao Sol (E_{beam}), ou seja, incidente numa superfície normal aos raios solares. Este valor é equivalente ao I_s que se calcula com o modelo de radiação de Kumar *et al.* (1997). Deste modo, e de forma a se poder comparar de forma mais rigorosa os dois modelos o valor de radiação solar de onda curta que incide numa superfície normal aos raios solares (I_s) do modelo de radiação de Kumar *et al.* (1997) ($I_s = I_o \tau_b$, equação 2.14) é substituído pelo valor registado no ficheiro climático de Lisboa do *Ecotect*. Assim, a radiação solar directa numa superfície inclinada (I_p) ($I_p = I_s \cos i$, equação 2.15) passa a ser determinada à custa do E_{beam} ($I_p = E_{beam} \cos i$).

A radiação solar difusa do modelo de radiação de Kumar *et al.* (1997) não é facilmente comparável com o modelo *Incident Solar Radiation* (*Ecotect*), uma vez que o ficheiro climático tem os valores de radiação difusa ($E_{diffuse}$) medidos numa superfície horizontal, não existindo porém, um elemento equivalente presente no modelo de radiação de Kumar *et al.* (1997) pelo que torna mais difícil a comparação entre os modelos, do que acontece com a radiação directa.

Sugere-se como desenvolvimento futuro um estudo mais aprofundado sobre este tema.

5.2 Análise dos Cenários

Para avaliar a influência do contexto urbano, foi utilizado apenas o modelo *Incident Solar Radiation* (*Ecotect*), devido às insuficiências dos outros modelos testados.

De forma a obter conclusões mais detalhadas foram isolados os painéis das fachadas Norte, Este, Sul, Oeste e de Cobertura dos diversos edifícios que compõem o quarteirão. Foram calculadas as diferenças de radiação global dos elementos de modo a se averiguar a influência dos níveis de detalhe. Assim, as comparações foram agrupadas nas seguintes situações (Figura 5.3):

- Situação 1: Diferença entre radiação global (Wh/m²) calculada para os painéis do quarteirão dos modelos com edifícios e terreno das áreas 1 e 2 [M1a – M2a] (Quadro 5.6 e Figuras 5.4 e 5.5);
- Situação 2: Diferença entre radiação global (Wh/m²) calculada para os painéis do quarteirão dos modelos com apenas terreno das áreas 1 e 2 [M1b – M2b] (Quadro 5.7 e Figuras 5.6 e 5.7);
- Situação 3: Diferença entre radiação global (Wh/m²) calculada para os painéis do quarteirão dos modelos da área 1 com edifícios e terreno e com apenas terreno [M1a – M1b] (Quadro 5.8 e Figuras 5.8 e 5.9);
- Situação 4: Diferença entre radiação global (Wh/m²) calculada para os painéis do quarteirão dos modelos da área 2 com edifícios e terreno e com apenas terreno [M2a – M2b] (Quadro 5.9 e Figuras 5.10 e 5.11);
- Situação 5: Diferença entre radiação global (Wh/m²) calculada para os painéis do quarteirão dos modelos da área 1 com apenas terreno e com o quarteirão isolado [M1b – M3] (Quadro 5.10 e Figuras 5.12 e 5.13);
- Situação 6: Diferença entre radiação global (Wh/m²) calculada para os painéis do quarteirão dos modelos da área 2 com apenas terreno e com o quarteirão isolado [M2b – M3] (Quadro 5.13 e Figuras 5.14 e 5.15).

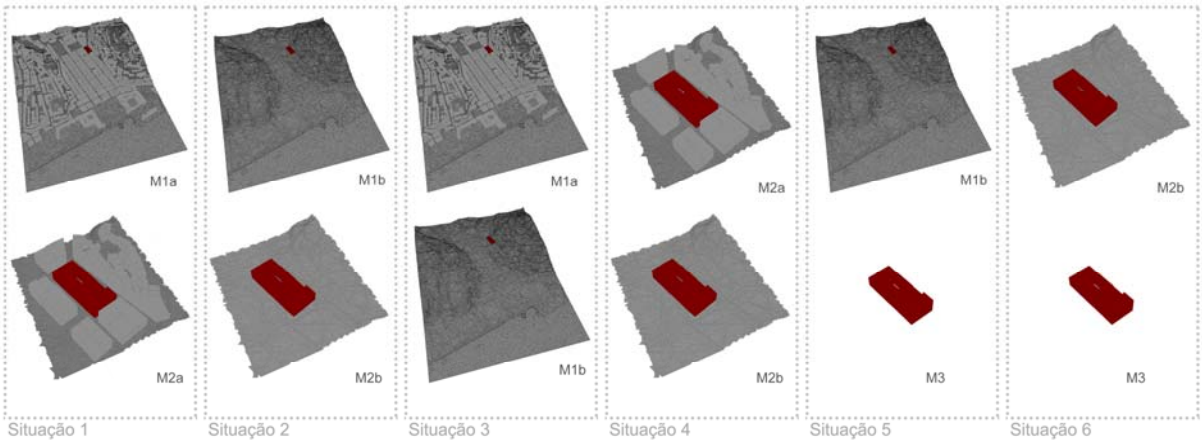


Figura 5.3 – Modelos em análise para cada situação

Como já foi constatado anteriormente, no capítulo 4.3.2.1, a diminuição da dimensão de contexto e a remoção dos elementos urbanos circundantes influência a quantidade radiação solar incidente. Resultando, no caso de modelos com menor definição na representação da envolvente, em valores de radiação incidente acrescidos, em comparação com os modelos com a envolvente representada em maior detalhe. Deste modo, em cada situação, a diferença entre os valores de radiação incidente representam o acréscimo de radiação incidente que advém da diminuição da dimensão de contexto e a remoção dos elementos urbanos circundantes.

Este cálculo foi resumido em quadros onde se apresentam: o valor máximo e mínimo de diferença de radiação, a média ($\bar{x}$), a mediana, o desvio padrão (σ) e o coeficiente de variação ($\sigma/\bar{x}$). Estas últimas variáveis demonstram quanto de variação ou dispersão existe em relação à média, sendo o coeficiente de variação comparável entre intervalos diferentes permitindo comparar dois conjuntos de dados de ordem de grandezas diferentes. Foram igualmente efectuados gráficos com a diferença entre radiação global, onde se encontram valores para os painéis das fachadas Norte, Este, Sul, Oeste e de Cobertura (o Nº dos Painéis é o identificador de cada superfície em análise, que pode ser consultado no Anexo II).

Quadro 5.6 – Situação 1: Diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1a e M2a

	21-Dez					21-Jun				
	Cobertura	Sul	Oeste	Norte	Este	Cobertura	Sul	Oeste	Norte	Este
Nº de painéis	327	96	210	72	162	327	96	210	72	162
Máximo	5,11	45,73	133,24	14,63	48,70	45,18	62,17	42,95	35,18	236,74
Mínimo	0,00	0,00	0,00	1,64	0,00	0,00	0,00	0,00	3,95	0,00
Média ($\bar{x}$)	2,40	4,48	4,85	4,05	2,83	8,90	5,29	8,13	9,75	10,89
Mediana	2,56	0,36	1,24	3,07	0,49	6,19	0,86	2,98	7,39	1,15
Desvio padrão (σ)	1,54	10,39	13,94	2,48	7,47	10,56	10,81	9,72	5,96	39,77
Coeficiente de Variação ($\sigma/\bar{x}$)	64,0%	232,0%	287,3%	61,1%	264,3%	118,6%	204,1%	119,6%	61,1%	365,3%

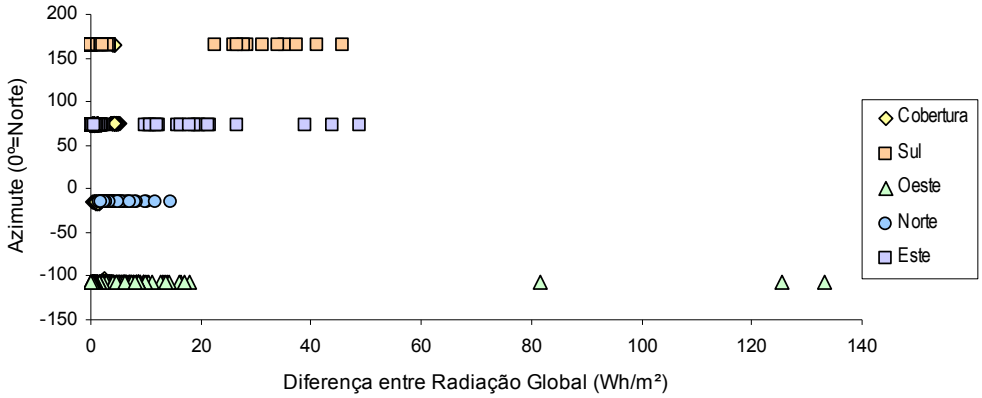


Figura 5.4 – Situação 1: Diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1a e M2a para 21 Dezembro

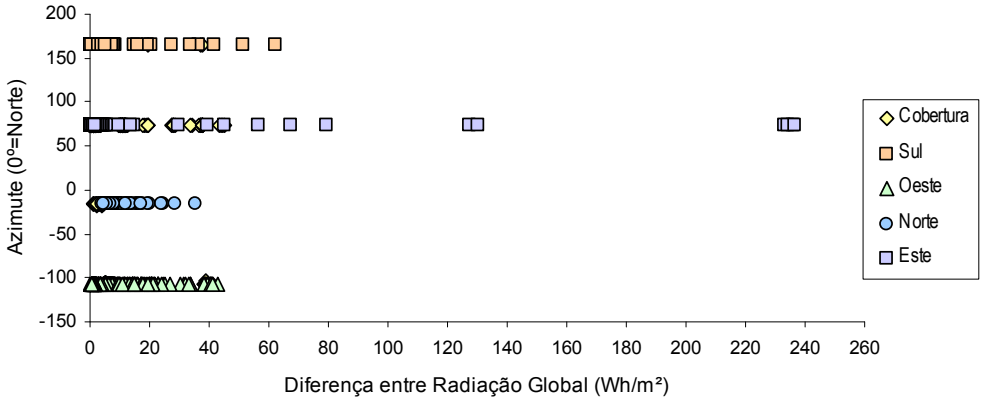


Figura 5.5 – Situação 1: Diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1a e M2a para 21 Junho

Começando pela Situação 1: diferença entre radiação solar global incidente (Wh/m²) entre os modelos M1a e M2a. Analisando o Quadro 5.6 e as Figuras 5.4 e 5.5, observa-se que os dois modelos geram valores similares, existindo apenas um pequeno conjunto de painéis que exibem uma diferença acima de 50 Wh/m². No caso de 21 de Dezembro estes painéis pertencem a fachada Oeste e no caso de 21 de Junho estes painéis pertencem a fachada Este.

Em geral, entre os modelos, é observável uma diminuição de radiação incidente média no modelo M1a (com maior dimensão de contexto), de cerca de 3,7 Wh/m² em Dezembro e de cerca de 8,6 Wh/m² em Junho.

A fachada com maior coeficiente de variação para 21 de Dezembro verifica-se a Oeste com 287,3%, com as fachadas Este e Sul a apresentarem valores também acima dos 200%, e para 21 de Junho é a Este com 365,3% com mais nenhuma fachada a registar uma variação semelhante. Estes valores demonstram, com apoio nos gráficos nas Figuras 5.4 e 5.5, como o conjunto de valores de diferença entre radiação incidente, de Oeste para Dezembro, e de Este para Junho, têm apenas um número reduzido de painéis onde se verificam uma diferença acentuada, enquanto o resto dos painéis do conjunto apresentam valores de diferença mais perto da média e da mediana.

Nesta situação, para Dezembro, o factor mais marcante para a diferença entre radiação incidente foi o intervalo presente na envolvente edificada a Oeste, no modelo M2a, que devido à altura solar no

final do dia, permite que os raios incidam directamente sobre o quarteirão. Enquanto que, para Junho, como a altura solar é maior, e os raios atingem um ângulo mais vertical, deste modo, a quantidade de terreno a Este, com inclinação acentuada, é que influenciou mais significativamente a diferença entre radiação incidente.

Quadro 5.7 – Situação 2: Diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1b e M2b

	21-Dez					21-Jun				
	Cobertura	Sul	Oeste	Norte	Este	Cobertura	Sul	Oeste	Norte	Este
Nº de painéis	327	96	210	72	162	327	96	210	72	162
Máximo	13,05	156,93	13,77	10,98	135,69	113,16	101,63	33,11	26,41	644,15
Mínimo	0,38	3,65	0,00	4,42	0,00	0,90	10,10	0,00	10,64	0,00
Média ($\bar{x}$)	6,63	33,71	9,31	7,66	20,01	46,73	27,65	22,40	18,88	187,00
Mediana	5,82	9,55	9,33	7,73	11,74	48,20	21,79	22,45	19,50	118,58
Desvio padrão (σ)	2,80	37,01	2,22	2,05	27,80	21,52	18,41	5,35	4,75	196,38
Coeficiente de Variação ($\sigma/\bar{x}$)	42,2%	109,8%	23,9%	26,8%	138,9%	46,1%	66,6%	23,9%	25,1%	105,0%

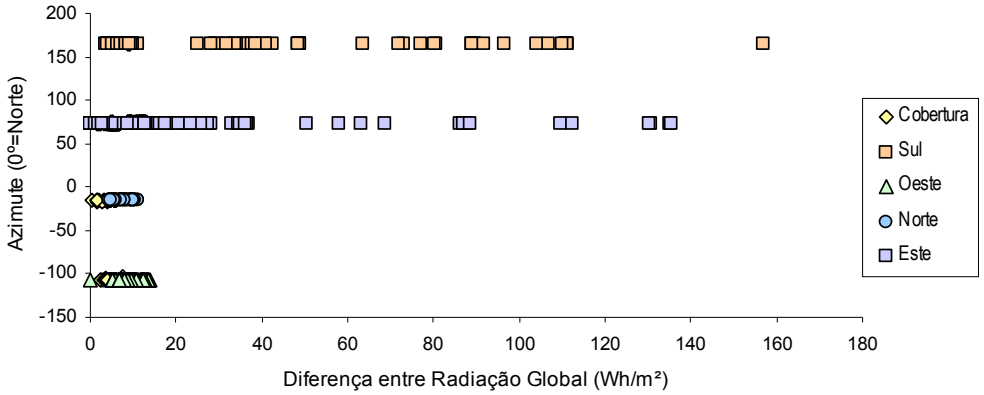


Figura 5.6 – Situação 2: Diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1b e M2b para 21 Dezembro

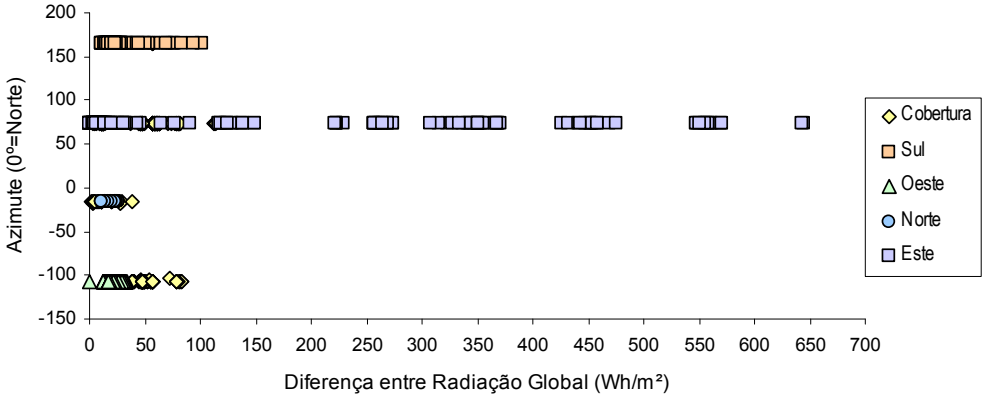


Figura 5.7 – Situação 2: Diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1b e M2b para 21 Junho

Seguindo para Situação 2: diferença entre radiação solar global incidente (Wh/m²) entre os modelos M1b e M2b. Analisando o quadro 5.7 e as Figuras 5.6 e 5.7, os valores de diferença mais marcantes pertencem às fachadas orientadas a Sul e a Este para Dezembro, e à fachada orientada a Este para Junho. Estes resultados são coerentes com a inclinação do terreno, que é marcadamente plano na proximidade do quarteirão em análise com a excepção do lado Este, onde se encontra a colina do castelo. Neste caso, observa-se uma diminuição de radiação média no modelo M1b (com maior dimensão de contexto) de cerca de 15,6 Wh/m² em Dezembro e de cerca de 60,5 Wh/m² em Junho, onde mais uma vez o principal factor é o lado Este.

A orientação com maior valor de coeficiente de variação é Este para Dezembro, com 138,9%, com o valor da orientação Sul a ser também superior a 100%, e é Este para Junho, com 105,0%, com mais nenhuma orientação a registar uma variação semelhante. O valor de coeficiente de variação, em conjunto com o valor de mediana, demonstram que a média não é o resultado de uma pequena amostra de painéis com valores muito acentuados, como foi o caso na Situação 1, mas que os valores de diferença de radiação se encontram dispersos pela amplitude de resultados (como se pode ver também nas Figuras 5.6 e 5.7).

Quadro 5.8 – Situação 3: Diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1a e M1b

	21-Dez					21-Jun				
	Cobertura	Sul	Oeste	Norte	Este	Cobertura	Sul	Oeste	Norte	Este
Nº de painéis	327	96	210	72	162	327	96	210	72	162
Máximo	101,89	3052,48	1176,11	233,20	373,31	193,39	1855,81	1357,45	560,90	1773,54
Mínimo	0,76	0,56	0,00	42,85	0,00	1,82	0,79	0,00	103,07	0,00
Média ($\bar{x}$)	7,27	2202,18	563,45	145,93	202,55	33,36	566,29	516,84	352,86	838,51
Mediana	3,06	2891,92	628,18	150,05	217,81	6,67	551,47	331,69	360,91	892,70
Desvio padrão (σ)	15,41	1190,86	409,98	54,49	121,19	50,85	456,72	466,42	132,99	565,54
Coeficiente de Variação (σ/$\bar{x}$)	211,9%	54,1%	72,8%	37,3%	59,8%	152,4%	80,7%	90,2%	37,7%	67,4%

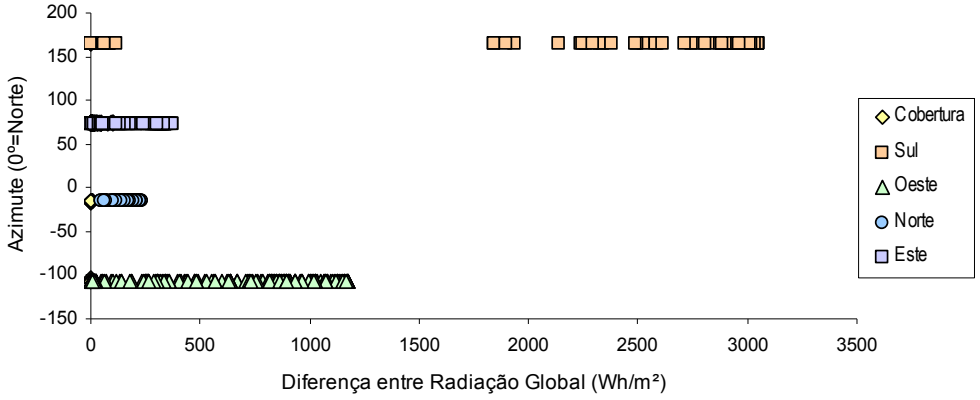


Figura 5.8 – Situação 3: Diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1a e M1b para 21 Dezembro

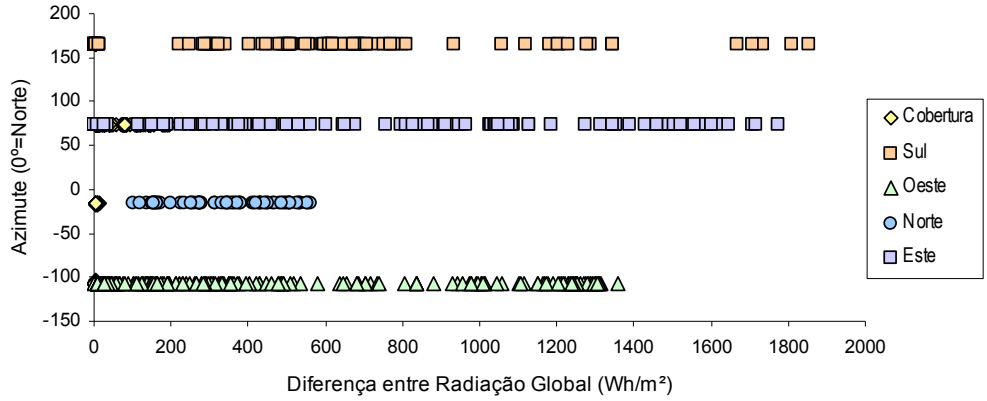


Figura 5.9 – Situação 3: Diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1a e M1b para 21 Junho

Avançando para a Situação 3: diferença entre radiação solar global incidente (Wh/m²) entre os modelos M1a e M1b. Analisando o Quadro 5.8 e as Figuras 5.8 e 5.9, observa-se que a diferença entre radiação solar incidente entre os modelos é mais acentuada nesta situação, quando comparado com as situações analisadas anteriormente. Aumento verificado devido a um dos modelos em análise ignorar por completo a envolvente construída, observando-se, uma diminuição de radiação média no modelo M1a (com envolvente edificada) de cerca de 624,3 Wh/m² em Dezembro e de cerca de 461,6 Wh/m² em Junho.

O pico de diferença entre radiação incidente verifica-se na orientação Sul, em Dezembro e em Junho. Em Dezembro, a fachada Sul é a mais afectada pelo edificado, com nenhuma outra orientação a registar valores semelhantes, facto corroborado com o percurso solar de Dezembro, de altura solar baixa e amplitude de azimutes mais restrita, resultando numa maior incidência nesta fachada. Em Junho, contudo, as orientações Este e Oeste apresentam valores similares à orientação Sul, e exibem uma presença contínua em toda a gama de valores, não havendo claramente uma fachada mais prejudicada que outra, mas demonstrando que a maioria dos painéis apresentam uma diferença de radiação solar incidente consistente entre modelos.

O maior valor de coeficiente de variação, para ambas as datas, verifica-se na Cobertura, com 211,9% para Dezembro e 152,4% para Junho, demonstrando, que o número de painéis influenciados pela envolvente, na Cobertura, é reduzido.

Quadro 5.9 – Situação 4: Diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M2a e M2b

	21-Dez					21-Jun				
	Cobertura	Sul	Oeste	Norte	Este	Cobertura	Sul	Oeste	Norte	Este
Nº de painéis	327	96	210	72	162	327	96	210	72	162
Máximo	107,56	3058,91	1188,73	240,63	376,18	261,89	1866,27	1385,97	578,77	2096,79
Mínimo	1,77	15,64	0,00	41,96	0,00	5,40	22,22	0,00	115,23	0,00
Média ($\bar{x}$)	11,50	2231,45	567,91	149,53	219,73	71,19	588,73	531,12	361,99	1014,62
Mediana	7,35	2929,70	634,98	154,74	242,90	51,26	571,07	348,12	372,19	1080,18
Desvio padrão (σ)	16,16	1180,98	410,31	56,13	113,50	54,77	450,36	472,32	136,10	568,36
Coeficiente de Variação (σ/$\bar{x}$)	140,5%	52,9%	72,2%	37,5%	51,7%	76,9%	76,5%	88,9%	37,6%	56,0%

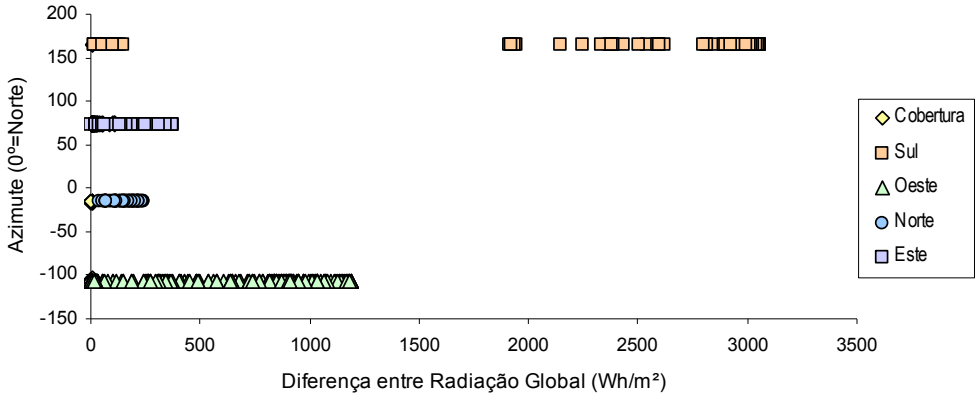


Figura 5.10 – Situação 4: Diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M2a e M2b para 21 Dezembro

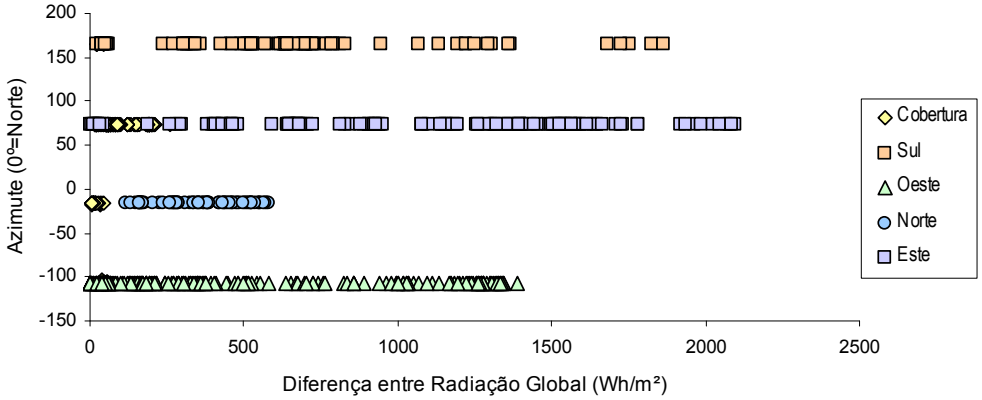


Figura 5.11 – Situação 4: Diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M2a e M2b para 21 Junho

Continuando para a Situação 4: diferença entre radiação solar global incidente (Wh/m²) entre os modelos M2a e M2b. Analisando o Quadro 5.9 e Figuras 5.10 e 5.11, é possível criar um paralelo imediato com a Situação 3, o que é expectável tendo em consideração que se trata de uma análise similar mas numa escala mais reduzida. Observando-se nesta situação, uma diminuição de radiação média no modelo M2a (com envolvente edificada) de cerca de 636,0 Wh/m² em Dezembro e de cerca de 513,5 Wh/m² em Junho.

Verifica-se novamente que a fachada Sul é a mais afectada pelo edificado, em Dezembro. Em Junho, no entanto, o valor mais alto está na orientação Este. Isto sucede-se porque, na situação anterior como obstáculo para os raios solares, a envolvente edificada é compensada pela pendente do terreno, nesta situação no entanto, o mesmo não se acontece, devido à diminuição da dimensão de contexto. Contudo, as orientações Sul e Oeste apresentam valores similares e exibem uma presença contínua em toda a amplitude de valores de diferença de radiação incidente, como se observou na situação 3.

O maior valor de coeficiente de variação verifica-se na Cobertura com 140,5%, para Dezembro, e a Oeste com 88,9%, para Junho, tornando esta a situação com menor a variação em relação à média registada, entre as situações em estudo.

Comparando as Situações 3 e 4, verifica-se a importância da envolvente edificada como obstáculo para a radiação incidente, contudo, é possível averiguar que a dimensão de terreno com inclinação acentuada é capaz de compensar, em parte, a perda dos edifícios (como se observou na orientação Este), principalmente quando os raios solares têm uma inclinação reduzida, como se sucede em Dezembro.

Quadro 5.10 – Situação 5: Diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1b e M3

	21-Dez					21-Jun				
	Cobertura	Sul	Oeste	Norte	Este	Cobertura	Sul	Oeste	Norte	Este
Nº de painéis	327	96	210	72	162	327	96	210	72	162
Máximo	16,26	3126,07	1408,19	15,51	675,14	166,21	2368,05	2379,94	61,15	3708,54
Mínimo	0,38	89,98	5,10	5,11	130,76	0,90	25,10	12,26	36,13	472,87
Média ($\bar{x}$)	9,37	778,87	16,03	9,29	242,87	68,68	555,30	33,75	46,19	1391,34
Mediana	9,83	122,78	9,35	9,11	154,81	59,61	56,15	22,50	45,76	1032,71
Desvio padrão (σ)	3,57	1244,83	96,55	2,94	171,57	23,67	960,26	162,76	7,07	1072,10
Coeficiente de Variação ($\sigma/\bar{x}$)	38,1%	159,8%	602,4%	31,6%	70,6%	34,5%	172,9%	482,2%	15,3%	77,1%

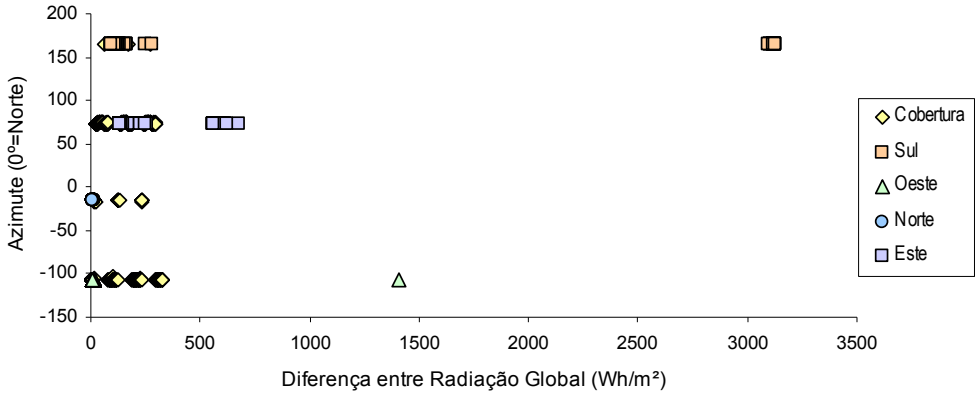


Figura 5.12 – Situação 5: Diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1b e M3 para 21 Dezembro

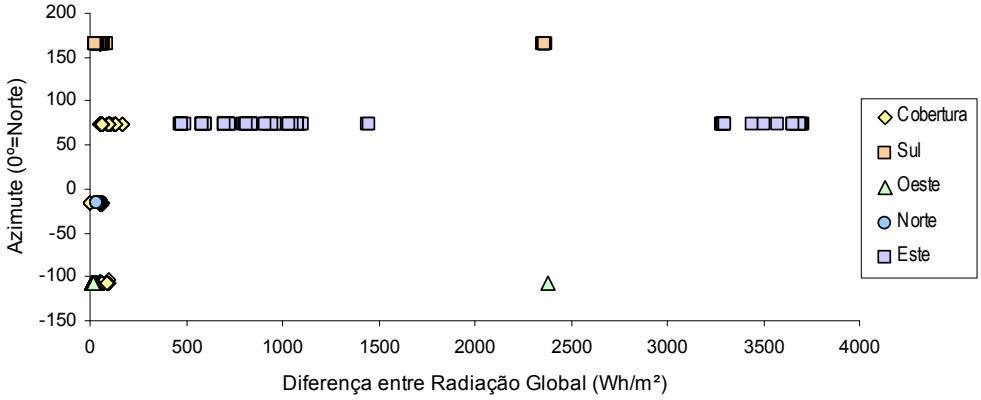


Figura 5.13 – Situação 5: Diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1b e M3 para 21 Junho

Prosseguindo para a situação 5: diferença entre radiação solar global incidente (Wh/m²) entre os modelos M1b e M3, é importante denotar que devido a inexistência de obstáculos na análise do quarteirão isolado, M3, este regista uma radiação solar incidente com valores similares em toda a fachada com a mesma orientação. Analisando o Quadro 5.10 e Figuras 5.12 e 5.13, é possível verificar de imediato a relevância do terreno, sendo observável, que as fachadas com os valores mais acentuados pertencem à orientação Sul, para Dezembro, e Este, para Junho, tendo as fachadas Oeste e Sul valores igualmente significativos.

Comparando os dois dias em análise, verifica-se que a diferença entre radiação solar incidente, para a orientação Este, no caso de Dezembro, é significativamente inferior quando comparada com a mesma orientação em Junho, este fenómeno deve-se ao percurso solar para ambas as datas em análise (Figura 4.3). Usando os valores do Astronomical Applications Department USNO (2015), onde Este tem um azimute de 90º e Oeste 270º, em Junho o Sol nasce com um azimute de 46,3º e põe-se com 313,4º enquanto que para Dezembro o Sol nasce com um azimute de 112,3º e põe-se com 248,5º. Deste modo é claro que a fachada Este recebe bastante menos radiação solar em Dezembro, resultando em diferenças menos acentuadas.

Nesta situação, observa-se uma diminuição de radiação média no modelo M1b (com terreno) de cerca de 211,3 Wh/m² em Dezembro e de cerca de 419,0 Wh/m² em Junho. O maior valor de coeficiente de variação verifica-se a Oeste, em ambas as datas, com 602,4 % em Dezembro e 482,2% em Junho, com mais nenhuma fachada a registar uma variação semelhante.

Quadro 5.11 – Situação 6: Diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M2b e M3

	21-Dez					21-Jun				
	Cobertura	Sul	Oeste	Norte	Este	Cobertura	Sul	Oeste	Norte	Este
Nº de painéis	327	96	210	72	162	327	96	210	72	162
Máximo	9,57	3101,05	1408,19	6,08	675,14	55,27	2355,69	2379,94	38,46	3708,54
Mínimo	0,00	1,02	0,00	0,38	46,74	0,00	2,45	0,00	10,44	36,53
Média ($\bar{x}$)	2,74	745,15	6,71	1,63	222,86	21,95	527,65	11,35	27,30	1204,34
Mediana	1,16	115,15	0,00	1,33	142,11	11,05	37,81	0,00	27,02	726,54
Desvio padrão (σ)	3,13	1231,36	97,17	1,13	168,03	22,06	945,95	164,23	3,83	1141,56
Coeficiente de Variação (σ/$\bar{x}$)	114,1%	165,2%	1447,6%	69,2%	75,4%	100,5%	179,3%	1447,0%	14,0%	94,8%

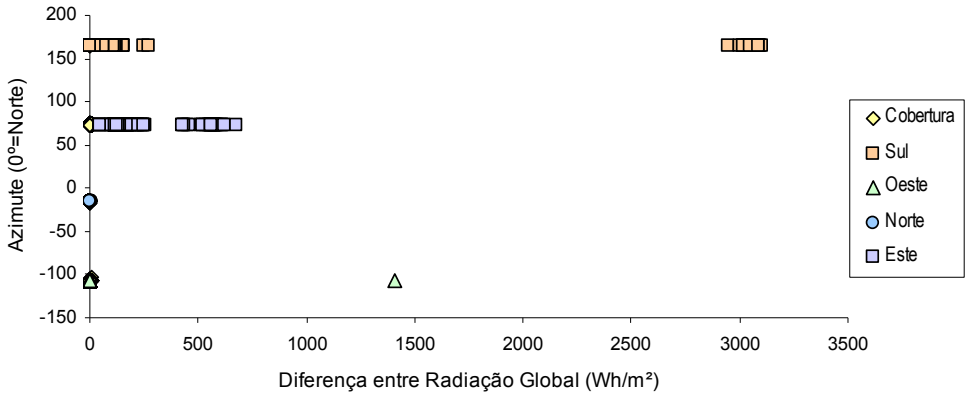


Figura 5.14 – Situação 6: Diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M2b e M3 para 21 Dezembro

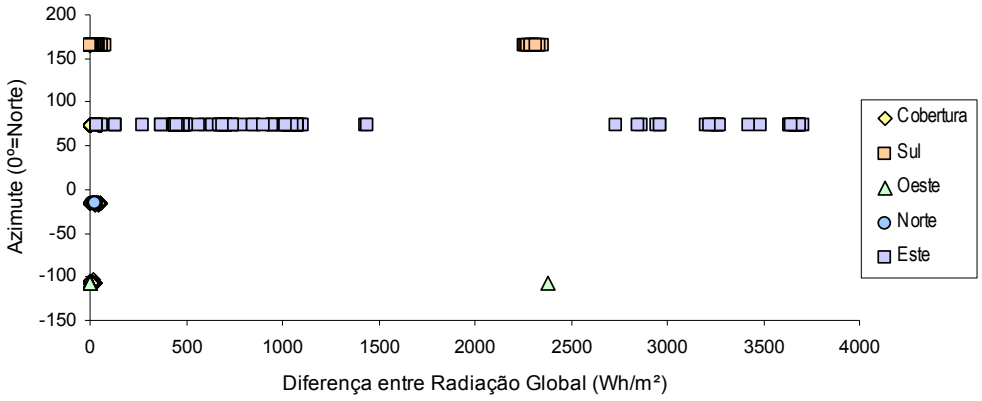


Figura 5.15 – Situação 6: Diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M2b e M3 para 21 Junho

Terminando com a situação 6: diferença entre radiação solar global incidente (Wh/m²) entre os modelos M2b e M3. Analisando o Quadro 5.11 e Figuras 5.14 e 5.15, é perceptível o paralelo existente entre a Situação 5 e 6, resultando em conclusões similares.

Observa-se, contudo, uma diminuição de radiação média no modelo M2b (com terreno) de cerca de 195,8 Wh/m² em Dezembro e de cerca de 358,5 Wh/m² em Junho, mantendo os mesmos picos que a situação anterior mas resultando numa média inferior. O maior valor de coeficiente de variação verifica-se novamente a Oeste, para ambas as datas, com 1447,6 % em Dezembro e 1447,0% em Junho, com mais nenhuma fachada a registar uma variação semelhante. Estes valores, como acontece na Situação 5, são atingidos devido a um único painel, o painel enterrado na fachada Oeste. Os valores são francamente mais acentuados, em relação à situação anterior, devido à média reduzida.

Para se perceber quais e onde se localizam os painéis mais expressivos, de cada situação, e como os componentes da radiação solar global (radiação directa e radiação indirecta) são influenciados, foram localizados os três painéis com a discrepância mais acentuada para cada uma das orientações e das situações anteriormente analisadas.

A Figura 5.16 exibe no modelo a sua localização destes painéis, enquanto os Quadros no Anexo III apresentam os valores de radiação global, directa e difusa, assim como o valor de diferença entre os dois modelos em análise para cada situação. Uma vez que os painéis enterrados não deveriam registar radiação, quando os painéis com diferença mais acentuada se encontram enterrados foram identificados também os painéis não enterrados com maior diferença. Não esquecendo que, nas Situações 5 e 6, como contabilizam com o modelo M3 (quarteirão isolado), a maior variação é espectável ser verificada entre os painéis enterrados.

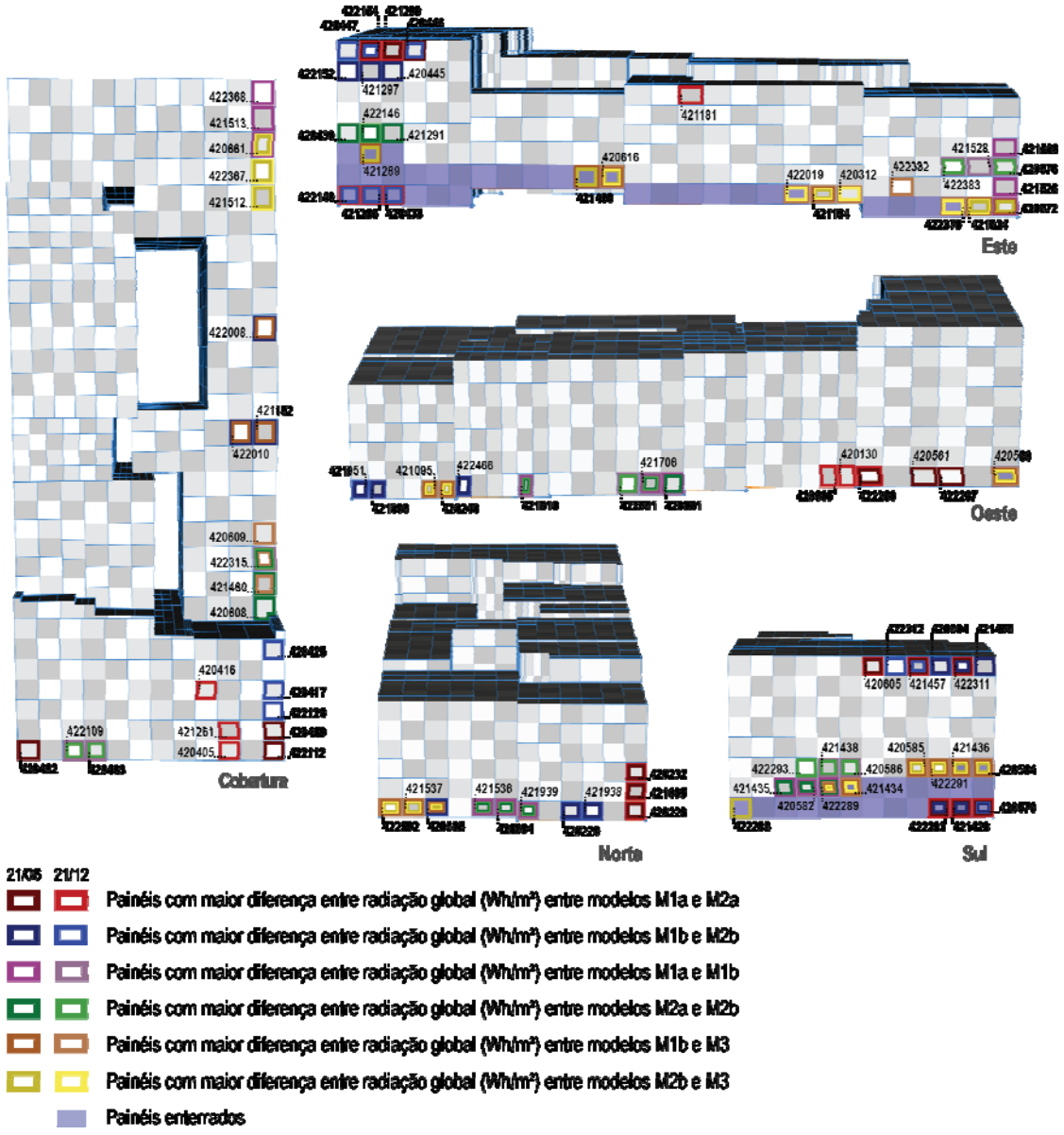


Figura 5.16 – Representação gráfica dos painéis presentes nos quadros de maior diferença

No modelo *Incident Solar Radiation* (*Ecotect*) o valor de radiação directa é definido pelo mapa de sombras enquanto que o valor de radiação difusa é definido pela fracção de céu que é visível pela superfície. Contudo, durante a análise dos valores de radiação solar directa e difusa incidente, verificou-se uma discrepância em certos elementos que resultam de insuficiências entre a interoperabilidade dos softwares *CityEngine* e *Ecotect*.

No caso das superfícies que se encontram nas paredes meeiras, e consequentemente não visionam o céu, estes elementos deviam registar radiação nula, contudo estes apresentam radiação difusa, não exibindo porém radiação directa como é expectável.

Os elementos que se encontram abaixo do terreno são outros componentes que apresentam algumas incoerências. Uma vez, que estando enterrados, não deveriam registar qualquer tipo de radiação incidente, mas todavia verifica-se na simulação radiação directa e difusa. Este facto deve-se ao terreno ser representado como uma superfície no *software CityEngine* e, consequentemente, no

modelo exportado para o *software Ecotect*. Deste modo, devido à altura solar reduzida nas primeiras e últimas horas do dia, em terrenos com pendentes, os painéis enterrados são parcialmente irradiados pelo sol, influenciando o valor de radiação directa incidente (Figura 5.17).

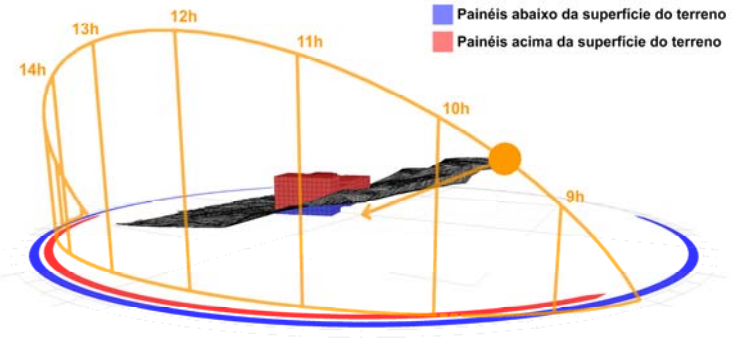


Figura 5.17 – Representação dos painéis enterrados a serem parcialmente irradiados pelo sol às 9h30 no dia 21 de Dezembro

No caso do modelo em estudo, as colinas presentes no terreno são modeladas apenas até aos respectivos cumes no caso da área 1 de dimensão de contexto, e no caso da área 2 de dimensão de contexto a modelação é interrompida a meio da colina a Este e eliminada a colina a Oeste, expondo os painéis em questão aos raios solares em horas especificas. Ainda assim foi observado, que quanto maior for a superfície do terreno menor é o valor de radiação que alcança estes painéis.

A localização dos painéis com maior diferença entre radiação global incidente em cada situação informam também quais os elementos mais marcantes presente nos modelos, dividindo pelas orientações, os painéis informam que:

– na Cobertura, painéis localizam-se principalmente na fronteira com a fachada Este, com uma pequena porção na fronteira com a fachada Sul. A radiação incidente na cobertura do quarteirão é sobretudo influenciada pelos edifícios que compõem o quarteirão, a não ser se houver uma pendente acentuada no terreno. Os painéis na extremidade Este resultam da influência da pendente, por outro lado, os painéis na extremidade Sul resultam da comparação entre os modelos com e sem envolvente edificada, sendo que, o edificado só influência a cobertura em Dezembro, devido à altura solar reduzida.

– na fachada Sul, quando ambos os modelos em análise mantêm a componente edificada a variação entre os modelos é quase inexistente. Contudo, se forem comparados os modelos com e sem envolvente edificada a diferença é mais marcada na proximidade do terreno, pois os raios solar têm mais dificuldade a alcançar este ponto.

– na fachada Este, a morfologia da pendente é a principal condicionante para a diferença de radiação global incidente entre modelos.

– na fachada Oeste, para a primeira situação em Dezembro o factor mais marcante é o intervalo na envolvente edificada, sendo que nas restantes situações, se se variar a dimensão de contexto, e não se variar entre a presença da envolvente edificada, é a radiação difusa o componente que altera mais significativamente a diferença de radiação global incidente.

– na fachada Norte, devido ao percurso solar a radiação directa é não existente em Dezembro e reduzida em Junho, deste modo, a radiação difusa, e consequentemente a porção de céu visível, é a componente mais marcante para esta orientação.

De forma a determinar a percentagem máxima de radiação solar incidente que é contabilizada em excesso, entre o par de modelos em análise para cada situação, calculou-se também a Taxa Máxima de Variação no Quadro 5.12, ignorando todos os painéis enterrados e tendo como base o modelo mais completo, portanto, o modelo com menor radiação incidente. As situações que comparam dimensão de contexto (Situações 1 e 2) apresentam a menor percentagem de variação entre modelos, e as que comparam a envolvente edificada (Situações 3 e 4) apresentam a maior percentagem de variação entre modelos, reforçando, mais uma vez, a importância da envolvente edificada no cálculo da radiação solar incidente no ambiente urbano, podendo ser utilizado uma dimensão mais reduzida para contexto.

Quadro 5.12 – Taxa Máxima de Variação (%) dos painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) em cada situação, excluindo os painéis enterrados

		21-Dez					21-Jun				
		Cobertura	Sul	Oeste	Norte	Este	Cobertura	Sul	Oeste	Norte	Este
S1	Nº P.	**420405**	**421457**	**422268**	**420228**	**421299**	**420402**	**421457**	**420561**	**420228**	**422154**
	Dif.	5,113	3,515	133,236	14,627	26,547	45,178	8,453	42,950	35,181	236,744
	M1a	2183,010	860,004	472,779	292,323	542,323	8348,551	2271,004	1883,159	932,478	3187,896
	M2a	2188,123	863,519	606,015	306,950	568,870	8393,729	2279,457	1926,109	967,659	3424,640
	Taxa	0,23	0,41	28,18	5,00	4,90	0,54	0,37	2,28	3,77	7,43
S2	Nº P.	**420417**	**420604**	**420240**	**421938**	**422154**	**422010**	**421456**	**420240**	**421938**	**421297**
	Dif.	13,048	111,452	13,766	10,981	88,678	113,155	29,389	33,113	26,413	644,146
	M1b	2214,498	3187,053	1485,009	436,854	630,558	8246,764	2559,729	2564,719	1280,116	3224,232
	M2b	2227,546	3298,505	1498,775	447,835	719,236	8359,919	2589,118	2597,832	1306,529	3868,378
	Taxa	0,59	3,50	0,93	2,51	14,06	1,37	1,15	1,29	2,06	19,98
S3	Nº P.	**420403**	**420582**	**421706**	**421536**	**420676**	**422368**	**422289**	**421610**	**421536**	**421526**
	Dif.	101,892	3052,475	1176,111	233,195	373,306	193,386	1855,808	1357,453	560,899	1773,538
	M1a	2116,365	116,456	309,745	202,953	244,580	8164,446	658,363	1210,123	717,518	1092,446
	M1b	2218,257	3168,931	1485,856	436,148	617,886	8357,832	2514,171	2567,576	1278,417	2865,984
	Taxa	4,81	2621,14	379,70	114,90	152,63	2,37	281,88	112,17	78,17	162,35
S4	Nº P.	**422315**	**420586**	**421706**	**421536**	**420676**	**420608**	**422289**	**421610**	**421536**	**420439**
	Dif.	107,562	3058,910	1188,727	240,625	376,176	261,887	1866,266	1385,971	578,772	2096,791
	M2a	910,257	120,200	310,224	205,980	246,337	4018,428	658,363	1212,668	724,798	1316,430
	M2b	1017,819	3179,110	1498,951	446,605	622,513	4280,315	2524,629	2598,639	1303,570	3413,221
	Taxa	11,82	2544,85	383,18	116,82	152,71	6,52	283,47	114,29	79,85	159,28
S5	Nº P.	**422315**	**422291**	**420240**	**422392**	**421164**	**421152**	**422291**	**420240**	**422392**	**421524**
	Dif.	16,258	278,951	13,766	15,512	256,549	166,209	86,689	33,113	61,147	1449,773
	M1b	1010,913	3021,807	1485,009	434,430	509,437	8249,279	2510,200	2564,719	1274,287	2467,831
	M3	1027,171	3300,758	1498,775	449,942	765,986	8415,488	2596,889	2597,832	1335,434	3917,604
	Taxa	1,61	9,23	0,93	3,57	50,36	2,01	3,45	1,29	4,80	58,75
S6	Nº P.	**422367**	**422291**	**421412**	**422392**	**421164**	**422367**	**422291**	**421412**	**422392**	**421524**
	Dif.	9,575	275,059	0,657	6,080	256,365	55,274	75,997	1,580	38,462	1445,566
	M2b	2215,440	3025,699	1498,307	443,862	509,621	8362,682	2520,892	2596,707	1296,972	2472,038
	M3	2225,015	3300,758	1498,964	449,942	765,986	8417,956	2596,889	2598,287	1335,434	3917,604
	Taxa	0,43	9,09	0,04	1,37	50,31	0,66	3,01	0,06	2,97	58,48

Concluindo, os valores de radiação diminuem, quando se aumenta a dimensão do contexto (modelo mais abrangente, menos localizado) e se inclui na análise a envolvente edificada. Quanto mais detalhado e completo for o modelo, maior é o nível de obstrução à radiação incidente sentido nas fachadas em análise. Igualmente quanto mais abrangente o modelo maior é a duração de cálculo necessário. De modo a optimizar a análise é preciso encontrar um equilíbrio entre o tempo que se está disposto a conferir para cálculo e o nível de detalhe da envolvente. No Quadro 5.13 encontram-se sumarizadas todas as situações estudadas, apresentando os valores médios da radiação global, a duração de cálculo dos modelos, a diferença entre os valores médios de radiação global e a diferença entre as durações de cálculo. No quadro de resumo, a duração de cálculo é o tempo que foi necessário para a obtenção de resultados para cada modelo no *Ecotect*, sendo que este valor varia de acordo com a capacidade do computador onde se efectua a análise.

Claramente, a envolvente desempenha um papel importante na obtenção de radiação solar incidente, com isto em mente, e contabilizando os tempos de cálculo, o modelo mais vantajoso é o M2a, área mais reduzida contabilizando com a envolvente edificada. Devido à redução da dimensão de contexto envolvente o tempo de cálculo reduz bastante, e comparando com o modelo mais complexo M1a, área mais extensa contabilizando com a envolvente edificada, a diferença média é bastante reduzida. Devido à particularidade do intervalo na envolvente edificada a radiação apresenta um acréscimo mais significativo em Dezembro (de 28%) para a fachada Oeste, sugerindo que para análises em situações similares pode ser pertinente contabilizar mais uma fileira de edifícios de forma a reduzir este acréscimo, não invalidando contudo as vantagens do modelo M2a.

Quadro 5.13 – Quadro resumo dos valores médios da radiação global (Wh/m²)
e duração de cálculo dos modelos (minuto: segundo), em cima;
e das diferenças verificadas entre os cenários, em baixo

	21-Dez						21-Jun					
	Cobertura	Sul	Oeste	Norte	Este	Duração	Cobertura	Sul	Oeste	Norte	Este	Duração
	Wh/m²	Wh/m²	Wh/m²	Wh/m²	Wh/m²	M:S	Wh/m²	Wh/m²	Wh/m²	Wh/m²	Wh/m²	M:S
M1a	1973,48	319,72	920,30	294,72	315,52	1146:34	8175,49	1475,29	2047,69	936,43	1691,94	1238:06
M1b	1980,76	2521,89	1483,75	440,65	518,07	1095:02	8208,90	2041,59	2564,53	1289,29	2530,45	1008:10
M2a	1975,88	324,16	925,16	298,77	318,35	51:17	8184,35	1480,51	2055,81	946,18	1702,83	51:10
M2b	1987,38	2555,61	1493,07	448,31	538,08	47:11	8255,57	2069,24	2586,93	1308,17	2717,45	45:56
M3	1990,13	3300,76	1499,78	449,94	760,94	17:16	8277,59	2596,89	2598,28	1335,48	3921,79	34:02
S1	2,4	4,4	4,9	4,1	2,8	1095:17	8,9	5,2	8,1	9,7	10,9	1186:56
S2	6,6	33,7	9,3	7,7	20,0	1047:51	46,7	27,7	22,4	18,9	187,0	962:14
S3	7,3	2202,2	563,5	145,9	202,5	51:32	33,4	566,3	516,8	352,9	838,5	229:56
S4	11,5	2231,4	567,9	149,5	219,7	4:06	71,2	588,7	531,1	362,0	1014,6	5:14
S5	9,4	778,9	16,0	9,3	242,9	1077:46	68,7	555,3	33,8	46,2	1391,3	974:08
S6	2,7	745,2	6,7	1,6	222,9	29:55	22,0	527,7	11,3	27,3	1204,3	11:54
S7	16,6	2981,0	579,5	155,2	445,4	1129:18	102,1	1121,6	550,6	399,0	2229,9	1204:04
S8	14,2	2976,6	574,6	151,2	442,6	34:01	93,2	1116,4	542,5	389,3	2219,0	17:08

Tendo-se verificado que os modelos M1a e M2a são as soluções mais indicadas para estudos de simulação (com o M1a contudo a exigir muito tempo de computação) adicionou-se mais duas comparações ao estudo, entre estes modelos e M3 (quarteirão isolado). Estas comparações, denominadas Situação 7 e Situação 8 (Figura 5.18), demonstram a importância da inclusão da envolvente geográfica e do contexto urbano na simulação da radiação incidente nos edifícios.

Em comparações que incluem o modelo M3 a maior variação verifica-se entre os painéis enterrados, mas como estes podem ser identificados previamente, de forma, a verificar a ordem de diferença entre os painéis realmente afectados por radiação solar incidente estes foram excluídos.

Calculou-se então a Taxa Máxima de Variação, no quadro 5.14, demonstrando a percentagem máxima de radiação que é medida em excesso quando se ignora o contexto. Comprovando que, para ambas as datas estudadas, a envolvente afecta claramente a radiação incidente em fachadas, principalmente em Dezembro quando a altura solar é reduzida. Sendo que, com a Situação 8, testemunha-se que com um acrescento reduzido no tempo de cálculo é possível obter uma simulação bastante mais ajustada.

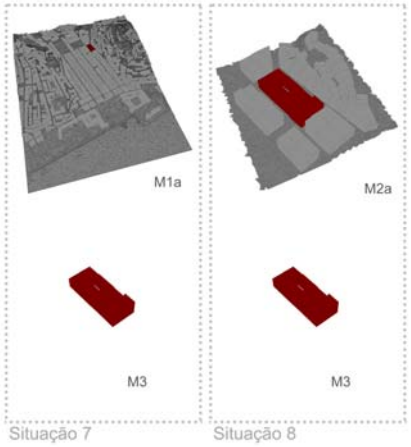


Figura 5.18 – Modelos em análise para as situações extras (7 e 8)

Quadro 5.14 – Taxa Máxima de Variação (%) dos painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) nas situações extra (7 e 8), excluindo os painéis enterrados

		21-Dez					21-Jun				
		Cobertura	Sul	Oeste	Norte	Este	Cobertura	Sul	Oeste	Norte	Este
S7	Nº P.	**422315**	**422289**	**421706**	**421536**	**420672**	**420608**	**422289**	**421610**	**421536**	**420672**
	Dif.	116,940	3186,093	1189,219	246,989	561,146	314,444	1938,526	1388,558	617,916	3152,181
	M1a	910,231	114,665	309,745	202,953	204,809	4018,278	658,363	1210,123	717,518	774,784
	M3	1027,171	3300,758	1498,964	449,942	765,955	4332,722	2596,889	2598,681	1335,434	3926,965
	Taxa	12,85	2778,61	383,93	121,70	273,99	7,83	294,45	114,75	86,12	406,85
S8	Nº P.	**422315**	**422289**	**421706**	**421536**	**420672**	**420608**	**422289**	**421610**	**421536**	**420672**
	Dif.	116,914	3186,093	1188,740	243,962	558,789	314,294	1938,526	1386,013	610,636	3146,513
	M2a	910,257	114,665	310,224	205,980	207,166	4018,428	658,363	1212,668	724,798	780,452
	M3	1027,171	3300,758	1498,964	449,942	765,955	4332,722	2596,889	2598,681	1335,434	3926,965
	Taxa	12,84	2778,61	383,19	118,44	269,73	7,82	294,45	114,29	84,25	403,17

Capítulo 6

Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

6. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

6.1 Conclusões

A sustentabilidade energética é um dos pontos principais na agenda da União Europeia. Muito tem sido feito ao nível da legislação relativa ao consumo de energia por parte dos edifícios, apontando como directriz valores de consumo de energia quase nulos (*Nearly Zero Energy Buildings* - nZEB) ou suficientemente pequenos para serem colmatados com energias renováveis. É neste contexto, de exploração e maximização do potencial solar, que esta dissertação se enquadra, analisando ao nível de detalhe do edifício (alçados e coberturas) a influência do contexto urbano.

Foram considerados vários cenários, conjugando diferentes escalas de áreas geográficas com a inclusão da respectiva volumetria envolvente, e avaliados os seus impactos na determinação do potencial ao nível das fachadas e coberturas. Com este objectivo e para ultrapassar as limitações dos algoritmos mais frequentes, foram considerados três modelos distintos no cálculo de radiação solar, implementados em plataformas comerciais distintas e um modelo mais geral: *Area Solar Radiation* (*ArcGIS*), *Incident Solar Radiation (Ecotect), Solar Exposure Graph* (*Ecotect),* e o modelo de radiação de Kumar *et al.* (1997) (programação individual, com apoio em, *ArcGIS* e *Excel*). O modelo tridimensional do edificado da área em estudo foi construído com recurso a modelação procedimental, utilizando o *software* disponibilizado pela ESRI-Portugal, *CityEngine*.

Assim, do presente estudo destacam-se as seguintes conclusões:

1. Existe uma relação directa entre a qualidade dos resultados e as características do modelo tridimensional utilizado: os resultados são mais rigorosos quanto mais realista é a representação do tecido urbano (morfologia do terreno e do edificado) e quanto maior a extensão, porém com custos elevados em tempo computacional. Em alternativa a consideração de um modelo contextual reduzido, onde todos os potenciais elementos de sombreamento da envolvente próxima estão incluídos, especialmente os edifícios de grande altura e as vertentes com declive muito acentuado, pode revelar-se vantajosa.

2. No estudo das características dos materiais e da radiação solar reflectida destes elementos verifica-se que este valor de radiação é apenas preponderante quando os materiais de revestimento, dos edifícios envolventes, têm características reflectivas extremas, como por exemplo materiais metálicos. Deste modo, em análise com características espaciais urbanas equivalentes ao do caso de estudo, quando as fachadas são rebocadas ou com azulejo, não se justifica este cálculo devido ao tempo e trabalho acrescido requerido.

3. Da comparação dos diversos algoritmos por análise dos resultados, conclui-se que o algoritmo *Area Solar Radiation* (de abordagem 2.5D) não é indicado para estudos de natureza muito detalhada uma vez que não considera os alçados e tão-somente as coberturas. Relativamente aos algoritmos de abordagem 3D, o mais insuficiente é modelo de radiação de Kumar *et al.* (1997) por não utilizar informação climática local e considerar apenas as condições de céu limpo. Não obstante, este modelo é de fácil programação e constitui uma alternativa em situações de análise preliminar.

Relativamente aos algoritmos implementados em *Ecotect*, estes revelaram-se os mais adequados para o estudo da influência do contexto urbano e da influência das características dos materiais de revestimento, muito embora de momento a empresa detentora do *software* tenha optado pela sua descontinuidade.

4. Embora a articulação entre os algoritmos de análise da exposição solar e os algoritmos de geração tridimensional do contexto urbano seja fundamental na obtenção dos resultados, verifica-se a existência de alguns problemas de interoperabilidade entre estes softwares, entre eles a representação do terreno como uma superfície demonstrou-se particularmente problemática para as primeiras e últimas horas do dia, quando a altura solar é reduzida, em terrenos com pendentes os painéis enterrados são parcialmente irradiados pelo sol. Outro problema advém dos formatos de ficheiro, específico e não universais, que cada *software* utiliza, requerendo sempre a exportação dos modelos para um formato simplificado, resultando na perda de informação com a conversão, e tornando difícil o retorno da informação obtida para o *software* de origem.

Estes resultados são importantes não só para estudos de desempenho térmico, visual e energético dos edifícios, relacionados com a localização e optimização de soluções de painéis fotovoltaicos, colectores solares, sistemas envidraçados e dispositivos de sombreamento, como também em estudos de durabilidade e patologias em revestimentos de fachadas.

6.2 Desenvolvimentos Futuros

Relativamente aos trabalhos futuros existem alguns pontos importantes a desenvolver, nomeadamente:

– A inclusão de parâmetros específicos relativos a ambientes com vegetação, onde a transmitância não é nula, devendo ser consideradas as espécies florestais mais comuns e os seus respectivos ciclos;

– A comparação dos resultados obtidos por simulação com valores registados in-situ, por piranómetros (Figura 6.1);

– A identificação de estratégias que solucionem problemas decorrentes da falta de interoperabilidade entre os softwares de análise da exposição solar e de construção tridimensional do contexto urbano;

– A comparação dos resultados dos vários modelos de simulação utilizando os mesmos dados climáticos;

– A identificação de softwares *open source* para cálculo da exposição solar interoperáveis com softwares de modelação procedimental para ambiente urbano.

Figura 6.1 – Piranómetros: Kipp & Zonen CMP 3; Delta-T Devices Sunshine Sensor type BF5; LI-COR Sensor LI-200

Bibliografia

Bibliografia

AdEPorto (2013) CASA-LABORATÓRIO TERMICAMENTE OPTIMIZADA - CTO (Casa Solar) 1984. Agência de energia do Porto. Disponível em: <http://www.adeporto.eu/cto.php> Acesso em 23 de Junho de 2016

Aliaga, D. G. (2012). 3D design and modeling of smart cities from a computer graphics perspective. International Scholarly Research Notices, 2012

Astronomical Applications Department USNO (The United States Naval Observatory) (2015) Sun or Moon Altitude/Azimuth Table Disponível em: <http://aa.usno.navy.mil/data/docs/AltAz.php> Acesso em 29 de Setembro de 2015

Autodesk (2010a) Autodesk® Ecotect® HELP! DISPLAYING REFLECTIONS. Autodesk® Ecotect® Analysis 2011

Autodesk (2010b) Autodesk® Ecotect® HELP! INCIDENT SOLAR RADIATION. Autodesk® Ecotect® Analysis 2011

Autodesk (2010c) Autodesk® Ecotect® HELP! SOLAR EXPOSURE GRAPH. Autodesk® Ecotect® Analysis 2011

Autodesk (2010d) Autodesk® Ecotect® HELP! Welcome to Autodesk® Ecotect® Analysis 2011. Autodesk® Ecotect® Analysis 2011

BP Solar (2001) ECN Building 42 - Application type: Building Integration. Disponível em: <http://www.managenergy.net/download/r40.pdf> Acesso em 23 de Junho de 2016

Brito, M. C., Gomes, N., Santos, T., & Tenedório, J. A. (2012). Photovoltaic potential in a Lisbon suburb using LiDAR data. *Solar Energy*, *86*(1), 283-288.

Calogero, E., Kaminski, J., Arnold, D. (2013). Using procedural modeling to explore alternative designs for the louvre. Journal on Computing and Cultural Heritage (JOCCH), 6(4), 19.

Carneiro, C., Morello, E., Ratti, C., Golay, F. (2008) Solar Radiation over the Urban Texture: Lidar Data and Image Processing Techniques for Environmental Analysis at City Scale. Proceedings of the 3D Geoinfo Conference, Seoul, 13-14 November 2008.

Carrilho da Graça Arquitectos (2004) OPERATION CO-ORDINATION CENTRE OF BRISA CARCAVELOS, PORTUGAL (2004). Disponível em: <http://jlcg.pt/additional_work/brisa> Acesso em 23 de Junho de 2016

Catita, C., Redweik, P., Pereira, J., & Brito, M. C. (2014). Extending solar potential analysis in buildings to vertical facades. Computers & Geosciences, 66, 1-12.

Chow, A.; Fung, A.S.; Li, S. (2014) GIS modeling of solar neighborhood potential at a fine spatiotemporal resolution. Buildings 2014, 4, 195–206

Comissão Europeia (2012) Crescimento sustentável: para uma economia eficiente na utilização dos recursos, mais ecológica e mais competitiva. Disponível em: <http://ec.europa.eu/europe2020/europe-2020-in-a-nutshell/priorities/sustainable-growth/index_pt.htm> Acesso em 17 de Janeiro de 2016

Comissão Europeia (2015) Europa 2020. Disponível em: <http://ec.europa.eu/europe2020/index_pt.htm> Acesso em 17 de Janeiro de 2016

Comissão Europeia (2016) Buildings. Disponível em: <http://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/buildings> Acesso em 17 de Janeiro de 2016

EnergyPlus (2010) The Most Powerful Predictor of a Building's Energy Efficiency. U.S. Department of Energy. Disponível em: <http://energy.gov/sites/prod/files/2013/12/f5/energyplus_fs.pdf> Acesso em 18 de Fevereiro de 2016

enGENIUM 2.0 (2013) Caso real: Edifício com necessidades quase nulas de energia Disponível em: <http://www.engenium.net/26337/edificios-com-necessidades-quase-nulas-de-energia.html> Acesso em 02 de Fevereiro de 2016

ESRI (2013) ArcGIS Help 10.2 What is lidar data?. Disponível em: <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#//015w00000041000000> Acesso em 4 de Abril de 2015

ESRI (2014a) ArcGIS Help 10.2 Area Solar Radiation (Spatial Analyst). Disponível em: <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.2/index.html#//009z000000t5000000> Acesso em 8 de Setembro de 2015

ESRI (2014b) ArcGIS Help 10.2 How solar radiation is calculated. Disponível em: <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.2/index.html#//009z000000tm000000> Acesso em 8 de Setembro de 2015

ESRI (2014c) ArcGIS Help 10.2 Modeling solar radiation. Disponível em: <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.2/index.html#//009z000000t9000000> Acesso em 8 de Setembro de 2015

ESRI (2014d) ArcGIS Help 10.2 Understanding solar radiation analysis. Disponível em: <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.2/index.html#//009z000000t8000000> Acesso em 8 de Setembro de 2015

ESRI (2014e) ArcGIS Help 10.2 Sun Shadow Volume (3D Analyst). Disponível em: <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.2/index.html#//00q9000000mv000000> Acesso em 1 de Dezembro de 2015

ESRI (2014f) ArcGIS Help 10.2 Inside 3D (3D Analyst). Disponível em: <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.2/index.html#//00q900000072000000> Acesso em 1 de Dezembro de 2015

ESRI (2015a) CityEngine Help Exporting to Esri File Geodatabase (FileGDB). Disponível em: <http://cehelp.esri.com/help/index.jsp?topic=/com.procedural.cityengine.help/html/manual/export/export_formats_fgdb.html> Acesso em 15 de Setembro de 2015

ESRI (2015b) CityEngine Help Wavefront OBJ Export. Disponível em: <http://cehelp.esri.com/help/index.jsp?topic=/com.procedural.cityengine.help/html/manual/export/export_formats_obj.html> Acesso em 15 de Setembro de 2015

ESRI (2015c) Esri CityEngine Tutorial 7: Facade modeling. Disponível em: <http://desktop.arcgis.com/en/cityengine/latest/tutorials/tutorial-7-facade-modeling.htm> Acesso em 17 de Fevereiro de 2016

Frank (2012) Levolux solar. Disponível em: <http://facadesign.us/blog/2012/01/27/levolux-solar/> Acesso em 03 de Fevereiro de 2016

Freitas, S., Catita, C., Redweik, P., & Brito, M. C. (2014). Modelling solar potential in the urban environment: State-of-the-art review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 41, 915-931.

Galego, A.I.C. (2014) Exploração do potencial dos City Information Models em Instrumentos de Gestão Territorial à escala Urbana. Tese de Mestrado em Arquitectura, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa. Lisboa.

Gil, J.; Almeida, J.; Duarte, J.P. (2011) The backbone of a City Information Model (CIM): Implementing a spatial data model for urban design. RESPECTING FRAGILE PLACES [29th eCAADe Conference Proceedings / ISBN 978-9-4912070-1-3], University of Ljubljana, Faculty of Architecture (Slovenia) 21-24 September 2011, pp.143-151

Hagemann, I. B. (2007) Solarsiedlung am Schlierberg, Freiburg (Breisgau), Germany. Disponível em: <http://www.pvupscale.org/IMG/pdf/Schlierberg.pdf> Acesso em 02 de Fevereiro de 2016

Hastings, R. S., and Wall, M. (2006). Sustainable Solar Housing: Two Volume Set. Earthscan.

Hermelink, A., Schimschar, S., Boermans, T., Pagliano, L., Zangheri, P., Armani, R., Voss, K. & Musall, E. (2013). Towards nearly zero-energy buildings: definition of common principles under the EPBD. Final Report. Disponível em:

<http://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/nzeb_full_report.pdf> Acesso em 17 de Janeiro de 2016

Hofierka, J., and Suri, M. (2002). The solar radiation model for Open source GIS: implementation and applications. In Proceedings of the Open source GIS-GRASS users conference (pp. 1-19).

Hofierka,J. and Zlocha, M. (2012) A new 3-D Solar radiation model for 3-D city models, Transactions in GIS, 16(5), pp. 681–680.

Kumar, L., Skidmore, A. K., & Knowles, E. (1997). Modelling topographic variation in solar radiation in a GIS environment. International Journal of Geographical Information Science, 11(5), 475-497.

Lindberg, F., Jonsson, P., Honjo, T., & Wästberg, D. (2015). Solar energy on building envelopes–3D modelling in a 2D environment. Solar Energy, 115, 369-378.

LNEG (2010) SOLAR XXI - Em direcção à energia zero. Disponível em: <http://www.lneg.pt/download/4079/BrochuraSolarXXI_Maio2010.pdf> Acesso em 23 de Junho de 2016

Marsh, A. (2004) Non-uniformity in incident solar radiation over the facades of high rise buildings. In Proc. PLEA. The 21th Conference on Passive and Low Energy Architecture. Eindhoven, The Netherlands

Marsh, A. (2011) Sky Subdivision. Disponível em: <http://naturalfrequency.com/wiki/sky-subdivision> Acesso em 16 de Setembro de 2015

Miranda, F. A. S. (2011). Caracterização dos edifícios pombalinos da baixa de Lisboa. Faculdade de Ciências e Tecnologia: Departamento de Engenharia Civil - Dissertações de Mestrado

Moita, F. (1987). Energia solar passiva. Direcção - Geral de Energia. Imprensa Nacional - Casa da Moeda.

Müller, P., Wonka, P., Haegler, S., Ulmer, A., & Van Gool, L. (2006). Procedural modeling of buildings. Acm Transactions On Graphics (Tog), 25(3), 614-623.

Musall, E. (2012) Net Zero Energy Buildings - Definition and building concepts. Disponível em: <http://www.lneg.pt/download/5662/Net%20Zero%20Energy%20Buildings%20-%20Definition%20and%20building%20concepts_Eike%20Musall.pdf> Acesso em 02 de Fevereiro de 2016

Myers, D. R. (2013) SOLAR RADIATION Practical Modeling for Renewable Energy Applications. CRC Press Taylor & Francis Group

Parlamento Europeu (2010) DIRECTIVA 2010/31/UE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO de 19 de Maio de 2010 relativa ao desempenho energético dos edifícios. Disponível em: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:0035:PT:PDF> Acesso em 2 de Fevereiro de 2016

Parlamento Europeu (2012) DIRETIVA 2012/27/UE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO de 25 de outubro de 2012 relativa à eficiência energética. Disponível em: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=celex%3A32012L0027> Acesso em 2 de Fevereiro de 2016

Passipedia (2015) The Passive House – historical review. Disponível em: <http://passipedia.passiv.de/ppediaen/basics/the_passive_house_-_historical_review> Acesso em 02 de Fevereiro de 2016

Paulo, S. (2011) A Europa e a Crise Financeira Mundial – Balanço da resposta política da UE. Fundação Robert Schuman.

Redweik, P., Catita, C. and Brito, M.C. (2011) 3D local scale solar radiation model based on urban LIDAR data, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVIII-4/W19.ISPRS Hannover 2011 Workshop, Germany.

Redweik, P.; Catita, C.; Brito, M. (2013) Solar energy potential on roofs and facades in an urban landscape, Solar Energy 97, 332-341.

Saldana, M., & Johanson, C. (2013). Procedural Modeling for Rapid-Prototyping of Multiple Building Phases. ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 1(1), 205-210.

Saldana, M. (2015). An Integrated Approach to the Procedural Modeling of Ancient Cities and Buildings. Digital Scholarship in the Humanities, fqv013.

Santos, T., Nuno, G., Brito, M., Freire, S., Fonseca, A., and Tenedório, A. (2011) Solar potential analysis in Lisbon Using LIDAR data, Remote Sensing and Geoinformation, pp. 13-19.

Sarmiento, E. (2014) STAGE 2 – Transparent solar panels. Disponível em: <http://electroluxdesignlab.com/2014/development-blog/edgar-sarmiento/uncategorized/2014/05/27/transparent-solar-panels/> Acesso em 03 de Fevereiro de 2016

Schirmer, P., Kawagishi, N. (2011) Using shape grammars as a rule based approach in urban planning - a report on practice. RESPECTING FRAGILE PLACES [29th eCAADe Conference Proceedings / ISBN 978-9-4912070-1-3], University of Ljubljana, Faculty of Architecture (Slovenia) 21-24 September 2011, pp.116-124

UNEP (2007) BUILDINGS AND CLIMATE CHANGE. Status, Challenges and Opportunities. Disponível em: <http://www.unep.org/sbci/pdfs/BuildingsandClimateChange.pdf> Acesso em 02 de Fevereiro de 2016

Voss, K., Goetzberger, A., Bopp, G., Häberle, A., Heinzel, A., & Lehmberg, H. (1996). The self-sufficient solar house in Freiburg—Results of 3 years of operation. Solar Energy, 58(1), 17-23.

Wünsch, B. (2013) Pioneer Award for 1970s Zero-Energy House in Denmark. Passive House Institute Press Release. 17th International Passive House Conference 2013. Disponível em: <http://www.passivehouse-international.org/upload/2013_04_04_Pioneer_Award_PR_english.pdf> Acesso em 02 de Fevereiro de 2016

Anexos

Anexos

Anexo I – Código CGA do Modelo CIM

```
version "2014.1"
//Atributos//////////////////////////////////////////////////////////////////////
///
@Group ("VISUALIZAÇÃO",0)
@Order (1)
@Range(Volumetria = "Volumetria", Grelha = "Grelha",
Fachadas = "Fachadas")
attr Tema = "Volumetria"

///
@Group ("EDIFICIO CAR",1)
@Order (1)
attr SUBZONA = ""

@Group ("EDIFICIO CAR")
@Order (2)
attr CLASSIFICA = ""

@Group ("EDIFICIO CAR")
@Order (3)
attr RL_QRTR = ""

@Group ("EDIFICIO CAR")
@Order (4)
attr REVEST_FAC = ""

@Group ("EDIFICIO CAR")
@Order (5)
attr COR = ""

///
@Group ("EDIFICIO",2)
@Order (1)
attr N_PISOS_AC = 3

@Group ("EDIFICIO")
@Order (2)
attr ALTURA_PISO = 3

@Group ("EDIFICIO")
@Order (3)
attr ALTURA_PISO_TERREO = 3.5

@Group ("EDIFICIO")
@Order (4)
attr ALTURA_PISO_UM = 3.7

@Group ("EDIFICIO")
@Order (5)
attr ALTURA_PISO_DOIS = 3.10

@Group ("EDIFICIO")
@Order (6)
attr ALTURA_PISO_SUPERIOR = 3.10

@Group ("EDIFICIO")
@Order (7)
attr ALTURA_COBERTURA = 3

@Group ("EDIFICIO")
@Order (8)
attr ANGULO_COBERTURA = 45

@Group ("EDIFICIO")
@Order (9)
attr Max_altura_orig = (ALTURA_PISO_TERREO +
ALTURA_PISO_UM + ALTURA_PISO_DOIS +
ALTURA_PISO_SUPERIOR + ALTURA_COBERTURA)

@Group ("EDIFICIO")
@Order (10)
attr Max_altura_act = (Max_altura_orig+(ALTURA_PISO
*(N_PISOS_AC-5)))

@Group ("EDIFICIO")
@Order (11)
attr largura_mosaico = 2.5

@Group ("EDIFICIO")
@Order (12)
attr largura_mosaicoFrisoInferior = 2.5

@Group ("EDIFICIO")
@Order (13)
attr profundidade_sacada = 0.5

///
@Group ("GRELHA_ESTUDO",3)
@Order (1)
attr DIM_GRELHA_X = 3

@Group ("GRELHA_ESTUDO")
@Order (2)
attr DIM_GRELHA_Y = 3
```

```
//Texturas////////////////////////////////////////////////////////////////////
//set (material.name, ) set (material.color.rgb, )

Tex_vao_terreo = "assets/Texturas/vao_terreo.jpg"
Tex_vao_sacada = "assets/Texturas/vao_sacada.jpg"
Tex_vao_p1 = "assets/Texturas/vao_p1.jpg"
Tex_vao_p2 = "assets/Texturas/vao_p2.jpg"
Tex_Cobertura_Telha = "assets/Texturas/tex_cob_telha.jpg"
Tex_Azulejo_Amarelo = "assets/Texturas/tex_fac_azu_amar.jpg"
Tex_Azulejo_Azul = "assets/Texturas/tex_fac_azu_azul.jpg"
Tex_Azulejo_Branco = "assets/Texturas/tex_fac_azu_bran.jpg"
Tex_Azulejo_Castanho = "assets/Texturas/tex_fac_azu_cast.jpg"
Tex_Azulejo_Cinza = "assets/Texturas/tex_fac_azu_cinz.jpg"
Tex_Azulejo_Verde = "assets/Texturas/tex_fac_azu_verd.jpg"
Tex_Azulejo_Vermelho = "assets/Texturas/tex_fac_azu_verm.jpg"
Tex_Pedra_Branco = "assets/Texturas/tex_fac_pedra.jpg"
Tex_Pedra_Cinza = "assets/Texturas/tex_fac_pedra_cinz.jpg"
Tex_Pintada_Amarelo = "assets/Texturas/tex_fac_reb_amar.jpg"
Tex_Pintada_Azul = "assets/Texturas/tex_fac_reb_azul.jpg"
Tex_Pintada_Branco = "assets/Texturas/tex_fac_reb_bran.jpg"
Tex_Pintada_Castanho = "assets/Texturas/tex_fac_reb_cast.jpg"
Tex_Pintada_Cinza = "assets/Texturas/tex_fac_reb_cinz.jpg"
Tex_Pintada_Ocre = "assets/Texturas/tex_fac_reb_ocre.jpg"
Tex_Pintada_Rosa = "assets/Texturas/tex_fac_reb_rosa.jpg"
Tex_Pintada_Salmao = "assets/Texturas/tex_fac_reb_salm.jpg"
Tex_Pintada_Vermelho = "assets/Texturas/tex_fac_reb_verm.jpg"

//Regras//////////////////////////////////////////////////////////////////////

Implantacao -->
        case Tema == "Volumetria": Volumetria
        case Tema == "Grelha": Grelha
        else : Fachadas

///
Volumetria --> case SUBZONA == "1B" : VOL_ZONA1B
               case SUBZONA == "1A" : VOL_ZONA1A
               else : extrude (N_PISOS_AC*ALTURA_PISO) color(1,1,1) Volume

VOL_ZONA1B --> extrude (N_PISOS_AC*ALTURA_PISO) color(0.5,0.5,0.5) Volume

VOL_ZONA1A --> case CLASSIFICA == "Religioso" : extrude (N_PISOS_AC*ALTURA_PISO) color(1,0,0) Volume
                    else : extrude (N_PISOS_AC*ALTURA_PISO) color(1,1,1) set(material.name, "Vol") Volume

Volume --> comp(f) {top:Cobertura. | side:Fachadas.}

///
Grelha --> case SUBZONA == "1B" : GR_ZONA1B
           case SUBZONA == "1A" : GR_ZONA1A
           else : extrude (N_PISOS_AC*ALTURA_PISO) color(1,1,1) Volume

GR_ZONA1B --> extrude (N_PISOS_AC*ALTURA_PISO) color(0.8,0.8,0.8) Volume
```

```
GR_ZONA1A --> case CLASSIFICA == "Religioso" : extrude (N_PISOS_AC*ALTURA_PISO) color(1,0,0) Volume
              else : extrude (N_PISOS_AC*ALTURA_PISO) color(1,1,1) PISO

PISO --> comp(f) {top: Grelha_Top | side: Grelha_Side}

Grelha_Top --> alignScopeToGeometry(zUp,0,world.lowest) Grelha1

Grelha_Side --> reverseNormals
                alignScopeToGeometry(zUp,0,world.lowest)
                Grelha1

Grelha1 --> split(y) {~DIM_GRELHA_Y:Grelha2 | ~DIM_GRELHA_Y:Grelha3}*
Grelha2 --> split(x) {~DIM_GRELHA_X:GrelhaMAT1 | ~DIM_GRELHA_X:GrelhaMAT2 | ~DIM_GRELHA_X:GrelhaMAT3}*
Grelha3 --> split(x) {~DIM_GRELHA_X:GrelhaMAT2 | ~DIM_GRELHA_X:GrelhaMAT3 | ~DIM_GRELHA_X:GrelhaMAT1}*

GrelhaMAT1 --> set(material.name, "GrelhaMAT1") color(0.9,0.9,0.9)
GrelhaMAT2 --> set(material.name, "GrelhaMAT2") color(0.8,0.8,0.8)
GrelhaMAT3 --> set(material.name, "GrelhaMAT3") color(1,1,1)

///
Fachadas --> case SUBZONA == "1B" : FAC_ZONA1B
             case SUBZONA == "1A" : FAC_ZONA1A
             else : extrude (N_PISOS_AC*ALTURA_PISO) color(1,1,1) Volume

FAC_ZONA1B --> extrude (Max_altura_act) color(0.8,0.8,0.8) Volume

FAC_ZONA1A --> case CLASSIFICA == "Religioso" : extrude (Max_altura_act) color(0.8,0.8,0.8) IgrejaVolume
               case CLASSIFICA == "Outro" : NIL
               else : extrude (Max_altura_act) ALCADOS

///
IgrejaVolume --> comp (f) {side : IgrejaFachadas | top : IgrejaCobertura}

IgrejaFachadas -->  IgrejaFachadas.

IgrejaCobertura --> roofGable (30)
                    IgrejaCobertura.

///
ALCADOS --> split(y){~(Max_altura_act-ALTURA_COBERTURA) : EdificioFachadas | ALTURA_COBERTURA :
CoberturaVolume}

///
CoberturaVolume --> comp(f) {top:CoberturaBase}

CoberturaBase -->  t(0,0,-ALTURA_COBERTURA)
                   extrude(0.30) AguasVolume

AguasVolume --> comp(f) {street.front:Beirado | side: EdificioCOR | top : Aguas}

Beirado --> Friso

Aguas --> cleanupGeometry(all, 0.5)
```

```
        envelope(normal, ALTURA_COBERTURA, 0, ANGULO_COBERTURA, 0, ANGULO_COBERTURA)
        Lados

Lados --> comp (f) { world.up : Telhas | world.side : EdificioCOR }

///
EdificioFachadas -->
        case RL_QRTR == "Frente" :
                comp(f) { street.front : FachadaRua(comp.index)
                                | right : EdificioCOR
                                | back : EdificioCOR
                                | left : EdificioCOR }
        case RL_QRTR == "Frentes" :
                comp(f) { street.front : FachadaRua(comp.index)
                                | street.side : EdificioCOR }
        case RL_QRTR == "Quarteirao" :
                comp(f) { street.front : FachadaRua(comp.index) }
        case RL_QRTR == "Gaveto_NO" :
                comp(f) { street.front : FachadaRua(comp.index)
                                | world.side : EdificioCOR }
        case RL_QRTR == "Gaveto_NE" :
                comp(f) { street.front : FachadaRua(comp.index)
                                | world.side : EdificioCOR }
        case RL_QRTR == "Gaveto_SO" :
                comp(f) { street.front : FachadaRua(comp.index)
                                | world.side : EdificioCOR}
        case RL_QRTR == "Gaveto_SE" :
                comp(f) { street.front : FachadaRua(comp.index)
                                | world.side : EdificioCOR}
        case RL_QRTR == "Topo_O" :
                comp(f) { street.front : FachadaRua(comp.index)
                                | world.side : EdificioCOR }
        case RL_QRTR == "Topo_S" :
                comp(f) { street.front : FachadaRua(comp.index)
                                | world.side : EdificioCOR }
        case RL_QRTR == "Topo_E" :
                comp(f) { street.front : FachadaRua(comp.index)
                                | world.side : EdificioCOR }
        case RL_QRTR == "Topo_N" :
                comp(f) { street.front : FachadaRua(comp.index)
                                | world.side : EdificioCOR }
        else : NIL

FachadaRua(facindex) -->
        case RL_QRTR == "Frente" || RL_QRTR == "Frentes" :
                FachadaRuaFrentes
        case RL_QRTR == "Quarteirao" :
                FachadaRuaQuarteirao(facindex)
                case RL_QRTR == "Gaveto_NO" :
                comp(f) { world.north : FachadaRuaFachadaCunhal
                                | world.west : FachadaRuaCunhalFachada}
        case RL_QRTR == "Gaveto_NE" :
                comp(f) { world.east : FachadaRuaFachadaCunhal
```

```
                                        | world.north : FachadaRuaCunhalFachada}
        case RL_QRTR == "Gaveto_SO" :
                comp(f) { world.west : FachadaRuaFachadaCunhal
                                        | world.south : FachadaRuaCunhalFachada}
        case RL_QRTR == "Gaveto_SE" :
                comp(f) { world.south : FachadaRuaFachadaCunhal
                                        | world.east : FachadaRuaCunhalFachada}
        case RL_QRTR == "Topo_O" :
                comp(f) { world.north : FachadaRuaFachadaCunhal
                                        | world.west : FachadaRuaCunhalFachadaCunhal
                                        | world.south : FachadaRuaCunhalFachada}
        case RL_QRTR == "Topo_S" :
                comp(f) { world.west : FachadaRuaFachadaCunhal
                                        | world.south : FachadaRuaCunhalFachadaCunhal
                                        | world.east : FachadaRuaCunhalFachada}
        case RL_QRTR == "Topo_E" :
                comp(f) { world.south : FachadaRuaFachadaCunhal
                                        | world.east : FachadaRuaCunhalFachadaCunhal
                                        | world.north : FachadaRuaCunhalFachada}
        case RL_QRTR == "Topo_N" :
                comp(f) { world.east : FachadaRuaFachadaCunhal
                                        | world.north : FachadaRuaCunhalFachadaCunhal
                                        | world.west : FachadaRuaCunhalFachada}
        else: NIL

FachadaRuaFrentes --> FachadaPrincipal

FachadaRuaQuarteirao(facindex)-->
        split(x){1 : Cunhal | ~1 : FachadaPrincipal |1 : Cunhal}

FachadaRuaCunhalFachada -->
        split(x){ 1 : Cunhal | ~1 : FachadaPrincipal}

FachadaRuaCunhalFachadaCunhal -->
        split(x){1 : Cunhal | ~1 : FachadaPrincipal |1 : Cunhal}

FachadaRuaFachadaCunhal -->
        split(x){ ~1 : FachadaPrincipal |1 : Cunhal }

///
FachadaPrincipal -->
        split(y) { ALTURA_PISO_TERREO : Piso(split.index)
                | ALTURA_PISO_UM : Piso(split.index)
                | ALTURA_PISO_DOIS : Piso(split.index)
                | {~ALTURA_PISO_SUPERIOR : Piso(split.index)}* }

Piso(floorindex) -->
        case floorindex == 0 :
                Parede(floorindex)
        case floorindex == 1 :
                split(y) {0.20 : FrisoInferior(floorindex)
                        | ~3.30 : Parede(floorindex)
                        | 0.20 : FrisoSuperior}
```

```
        else :
                Parede(floorindex)

Parede(floorindex) -->
        split(x) {~largura_mosaico : Mosaico(floorindex)}*

FrisoInferior(floorindex) -->
        split(x) {~largura_mosaicoFrisoInferior : MosaicoFrisoInferior}*

Mosaico(floorindex) -->
        case floorindex == 0 :
                split(x) {~0.20 : split(y) {1 : Friso | ~2.50 : EdificioCOR}
                                        | 2.10 : VaoPorta
                                        | ~0.20 : split(y) {1 : Friso | ~2.50 : EdificioCOR}}
        case floorindex == 1 :
                split(x) {~0.40 : split(y) {0.5 : Friso | ~2.60 : EdificioCOR}
                                        | 1.70 : split(y) {3.10 : VaoSacada | ~0.20 : EdificioCOR}
                                        | ~0.40 : split(y) {0.5 : Friso | ~2.60 : EdificioCOR}}
        case floorindex == 2 :
                split(x) {~0.40 : EdificioCOR
                                        | 1.70 : split(y) {~0.60 : EdificioCOR | 2.60 : VaoJanela1 }
                                        | ~0.40 : EdificioCOR}
        else :
                split(x) {~0.40 : EdificioCOR
                                        | 1.70 : split(y) {~0.80 : EdificioCOR | 2.40 : VaoJanela2 }
                                        | ~0.40 : EdificioCOR}

MosaicoFrisoInferior -->
        split(x) {~0.20 : Friso
                                | 2.10 : Sacada
                                | ~0.20 : Friso}

///
VaoPorta -->
        split(x) {0.20 : Friso |
                                ~2.70 : split(y) {~3.30 : VaoPorta_2 | 0.20 : Friso} |
                                 0.20 : Friso}

VaoPorta_2 -->
        reverseNormals
        alignScopeToGeometry(zUp,0,world.lowest)
        set (material.name, "VaoP")
        setupProjection(0, scope.xy, scope.sx, scope.sy)
        projectUV(0)
        texture (Tex_vao_terreo)

VaoSacada -->
        split(x) {0.20 : Friso | ~1.70 : split(y) {~3.10 : VaoSacada_2 | 0.20 : Friso} | 0.20 : Friso}

VaoSacada_2 -->
        reverseNormals
        alignScopeToGeometry(zUp,0,world.lowest)
        set (material.name, "VaoS")
```

```
        setupProjection(0, scope.xy, scope.sx, scope.sy)
        projectUV(0)
        texture (Tex_vao_sacada)

VaoJanela1 -->
        split(x) {0.20 : FrisoSuperior | ~1.70 : split(y) {0.20 : FrisoSuperior |
                ~2.60 : VaoJanela1_2 | 0.20 : FrisoSuperior} | 0.20 : FrisoSuperior}

VaoJanela1_2 -->
        reverseNormals
        alignScopeToGeometry(zUp,0,world.lowest)
        set (material.name, "Vao1")
        setupProjection(0, scope.xy, scope.sx, scope.sy)
        projectUV(0)
        texture (Tex_vao_p1)

VaoJanela2 -->
        split(x) {0.20 : FrisoSuperior |
                ~1.70 : split(y) {0.20 : FrisoSuperior | ~2.40 : VaoJanela2_2 | 0.20 : FrisoSuperior} |
                 0.20 : FrisoSuperior}

VaoJanela2_2 -->
        reverseNormals
        alignScopeToGeometry(zUp,0,world.lowest)
        set (material.name, "Vao2")
        setupProjection(0, scope.xy, scope.sx, scope.sy)
        projectUV(0)
        texture (Tex_vao_p2)

///
Sacada -->
        s('1,'1,-profundidade_sacada)
        t(0,0,profundidade_sacada)
        i("builtin:cube:notex")
        reverseNormals
        comp(f) {top: Saliencia_MAT
                | right:  saliencia_r | left: saliencia_r | back: saliencia_front
                | bottom: Saliencia_MATbottom }

Cunhal -->
        s('1,'1,0.10)
        i("builtin:cube:notex")
        alignScopeToGeometry(zUp,0,world.lowest)
        Saliencia

Friso -->
        s('1,'1,0.10)
        i("builtin:cube:notex")
        alignScopeToGeometry(zUp,0,world.lowest)
        Saliencia

FrisoSuperior -->
        s('1,'1,0.05)
```

```
        i("builtin:cube:notex")
        alignScopeToGeometry(zUp,0,world.lowest)
        Saliencia

///
Saliencia -->
        comp(f) { top: saliencia_front
                | front : Saliencia_MATbottom | back : saliencia_r
                | right : saliencia_r | left : saliencia_r}

saliencia_r -->
        reverseNormals
        Saliencia_MAT2

saliencia_n -->
        Saliencia_MAT2

saliencia_front -->
        reverseNormals
        Saliencia_MAT

Saliencia_MAT -->
        alignScopeToGeometry(zUp,0,world.lowest)
        set (material.color.rgb, "#FFFFFF")
        set (material.name, "Pedra_Branco")
        texture (Tex_Pedra_Branco)
        setupProjection(0, scope.xy, 0.5, 0.5)
        projectUV(0)

Saliencia_MAT2 -->
        alignScopeToGeometry(zUp,0,world.lowest)
        set (material.color.rgb, "#FFFFFF")
        set (material.name, "Pedra_Branco_lados")
        texture (Tex_Pedra_Branco)
        setupProjection(0, scope.xy, 0.5, 0.5)
        projectUV(0)

Saliencia_MATbottom -->
        alignScopeToGeometry(zUp,0,world.lowest)
        set (material.color.rgb, "#000000")
        set (material.name, "Pedra_Branco_baixo")
        texture (Tex_Pedra_Branco)
        setupProjection(0, scope.xy, 0.5, 0.5)
        projectUV(0)

Telhas -->
        alignScopeToGeometry(zUp,0,world.lowest)
        set (material.color.rgb, "#FF8C00")
        set (material.name, "Telhas")
        setupProjection(0, scope.xy, 2.5, 2.5)
        projectUV(0)
        texture (Tex_Cobertura_Telha)
```

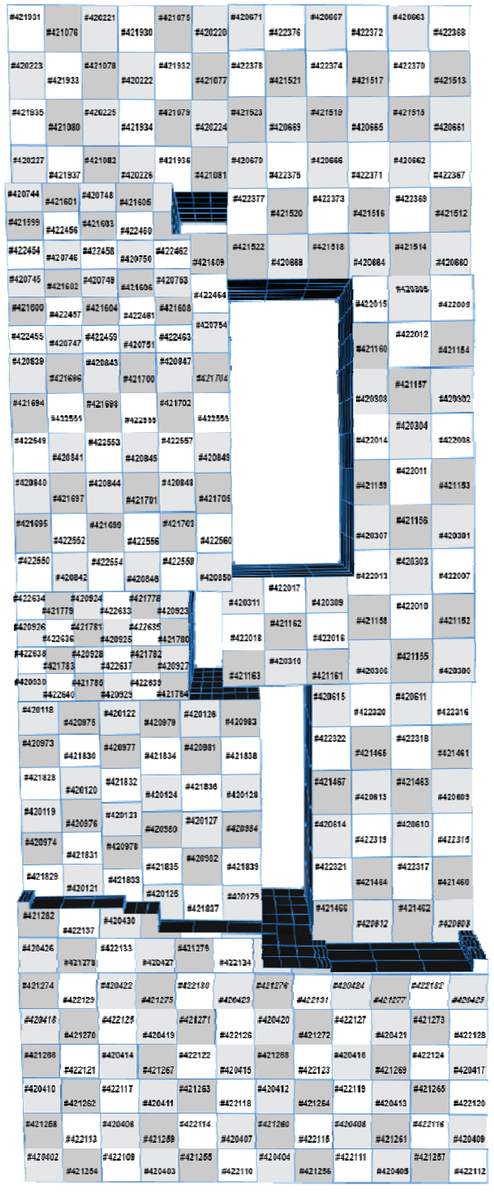
```
EdificioCOR -->
        reverseNormals
        alignScopeToGeometry(zUp,0,world.lowest)
        EdificioCOR2

EdificioCOR2 -->
        case COR == "Amarelo" && REVEST_FAC == "Pintada" :
                set (material.color.rgb, "#DAA520")
                set (material.name, "Reboco_Amarelo")
                setupProjection(0, scope.xy, 1, 1)
                projectUV(0)
                texture (Tex_Pintada_Amarelo)
        case COR == "Azul" && REVEST_FAC == "Pintada" :
                set (material.color.rgb, "#6495ED")
                set (material.name, "Reboco_Azul")
                setupProjection(0, scope.xy, 1, 1)
                projectUV(0)
                texture (Tex_Pintada_Azul)
        case COR == "Branco" && REVEST_FAC == "Pintada" :
                set (material.color.rgb, "#FFFFFF")
                set (material.name, "Reboco_Branco")
                setupProjection(0, scope.xy, 1, 1)
                projectUV(0)
                texture (Tex_Pintada_Branco)
        case COR == "Castanho" && REVEST_FAC == "Pintada" :
                set (material.color.rgb, "#A0522D")
                set (material.name, "Reboco_Castanho")
                setupProjection(0, scope.xy, 1, 1)
                projectUV(0)
                texture (Tex_Pintada_Castanho)
        case COR == "Cinzento" && REVEST_FAC == "Pintada" :
                set (material.color.rgb, "#808080")
                set (material.name, "Reboco_Cinzento")
                setupProjection(0, scope.xy, 1, 1)
                projectUV(0)
                texture (Tex_Pintada_Cinza)
        case COR == "Ocre" && REVEST_FAC == "Pintada" :
                set (material.color.rgb, "#9ACD32")
                set (material.name, "Reboco_Ocre")
                setupProjection(0, scope.xy, 1, 1)
                projectUV(0)
                texture (Tex_Pintada_Ocre)
        case COR == "Rosa" && REVEST_FAC == "Pintada" :
                set (material.color.rgb, "#FFB6C1")
                set (material.name, "Reboco_Rosa")
                setupProjection(0, scope.xy, 1, 1)
                projectUV(0)
                texture (Tex_Pintada_Rosa)
        case COR == "Salmão" && REVEST_FAC == "Pintada" :
                set (material.color.rgb, "#FA8072")
                set (material.name, "Reboco_Salmão")
                setupProjection(0, scope.xy, 1, 1)
                projectUV(0)
```

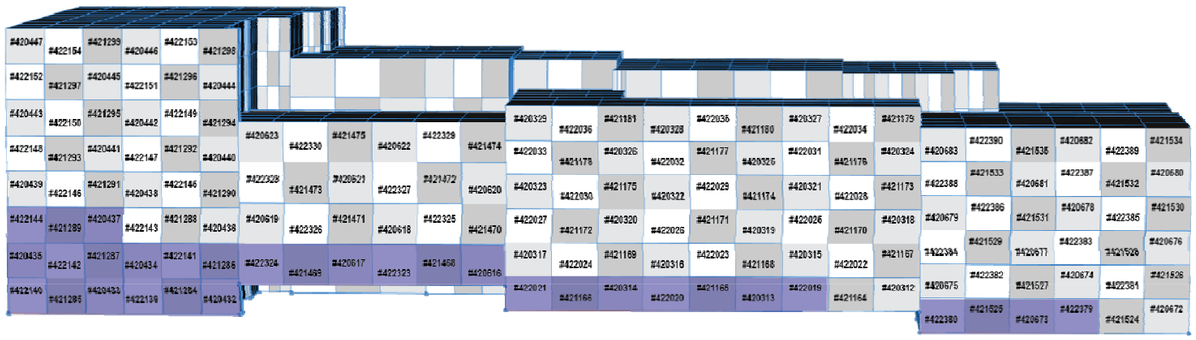
```
            texture (Tex_Pintada_Salmao)
case COR == "Vermelho" && REVEST_FAC == "Pintada" :
            set (material.color.rgb, "#B22222")
            set (material.name, "Reboco_Vermelho")
            setupProjection(0, scope.xy, 1, 1)
            projectUV(0)
            texture (Tex_Pintada_Vermelho)
case COR == "Amarelo" && REVEST_FAC == "Azulejo" :
            set (material.color.rgb, "#DAA520")
            set (material.name, "Azulejo_Amarelo")
            setupProjection(0, scope.xy, 1, 1)
            projectUV(0)
            texture (Tex_Azulejo_Amarelo)
case COR == "Azul" && REVEST_FAC == "Azulejo" :
            set (material.color.rgb, "#6495ED")
            set (material.name, "Azulejo_Azul")
            setupProjection(0, scope.xy, 1, 1)
            projectUV(0)
            texture (Tex_Azulejo_Azul)
case COR == "Branco" && REVEST_FAC == "Azulejo" :
            set (material.color.rgb, "#FFFFFF")
            set (material.name, "Azulejo_Branco")
            setupProjection(0, scope.xy, 1, 1)
            projectUV(0)
            texture (Tex_Azulejo_Branco)
case COR == "Castanho" && REVEST_FAC == "Azulejo" :
            set (material.color.rgb, "#A0522D")
            set (material.name, "Azulejo_Castanho")
            setupProjection(0, scope.xy, 1, 1)
            projectUV(0)
            texture (Tex_Azulejo_Castanho)
case COR == "Cinzento" && REVEST_FAC == "Azulejo" :
            set (material.color.rgb, "#808080")
            set (material.name, "Azulejo_Cinzento")
            setupProjection(0, scope.xy, 1, 1)
            projectUV(0)
            texture (Tex_Azulejo_Cinza)
case COR == "Verde" && REVEST_FAC == "Azulejo" :
            set (material.color.rgb, "#6B8E23")
            set (material.name, "Azulejo_Verde")
            setupProjection(0, scope.xy, 1, 1)
            projectUV(0)
            texture (Tex_Azulejo_Verde)
case COR == "Vermelho" && REVEST_FAC == "Azulejo" :
            set (material.color.rgb, "#B22222")
            set (material.name, "Azulejo_Vermelho")
            setupProjection(0, scope.xy, 1, 1)
            projectUV(0)
            texture (Tex_Azulejo_Vermelho)
case COR == "Branco" && REVEST_FAC == "Pedra" :
            set (material.color.rgb, "#FFFFFF")
            set (material.name, "Pedra_Branco")
            setupProjection(0, scope.xy, 1, 1)
```

```
            projectUV(0)
            texture (Tex_Pedra_Branco)
case COR == "Cinzento" && REVEST_FAC == "Pedra" :
            set (material.color.rgb, "#808080")
            set (material.name, "Pedra_Cinzento")
            setupProjection(0, scope.xy, 1, 1)
            projectUV(0)
            texture (Tex_Pedra_Cinza)
else :
            set (material.color.rgb, "#DAA520")
            set (material.name, "Reboco_Amarelo")
            setupProjection(0, scope.xy, 1, 1)
            projectUV(0)
            texture (Tex_Pintada_Amarelo)
```

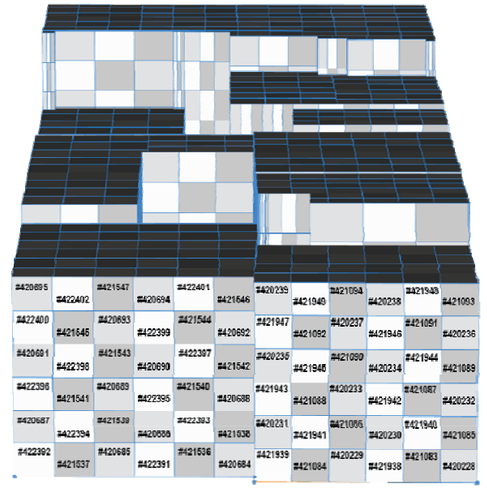
Anexo II – Numeração dos Painéis do Quarteirão no *Ecotect*



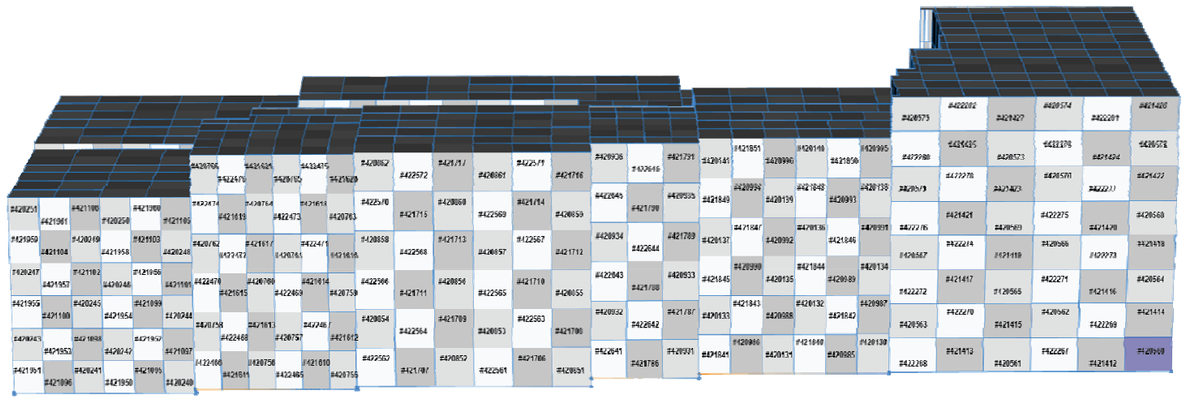
Cobertura



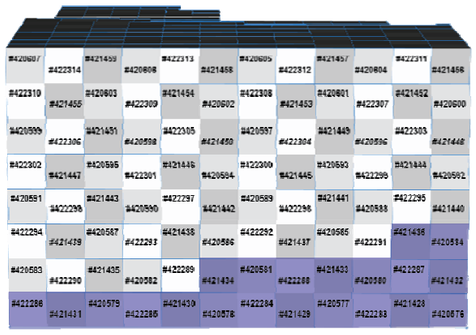
Este



Norte



Oeste



Sul

Anexo III – Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²)

A Figura 5.15 exibe a localização dos painéis no modelo, enquanto os quadros seguintes apresentam os valores de radiação global, directa e difusa, assim como os valores de diferença entre radiação.

Uma vez que os painéis enterrados não deveriam registar radiação, quando os painéis com diferença mais acentuada se encontram enterrados (representados a vermelho) foram identificados também os painéis não enterrados com maior diferença.

Anexo III. 1 – Situação 1: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1a e M2a na Cobertura

	21-Dez			21-Jun		
Nº do Painel	**420405**	**420416**	**421261**	**420402**	**422112**	**420409**
Diferença Rad. Global	5,113	5,036	5,033	45,178	44,582	43,984
Radiação Global (M1a)	2183,010	2211,363	2209,037	8348,551	8304,085	8310,936
Radiação Global (M2a)	2188,123	2216,399	2214,070	8393,729	8348,667	8354,920
Diferença Rad. Directa	0,000	0,000	0,000	36,542	32,805	32,805
Radiação Directa (M1a)	1291,942	1313,961	1313,961	6194,358	6161,553	6161,553
Radiação Directa (M2a)	1291,942	1313,961	1313,961	6230,900	6194,358	6194,358
Diferença Rad. Difusa	5,113	5,037	5,033	8,635	11,778	11,179
Radiação Difusa (M1a)	891,067	897,402	895,076	2154,193	2142,531	2149,383
Radiação Difusa (M2a)	896,180	902,439	900,109	2162,828	2154,309	2160,562

Anexo III. 2 – Situação 1: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1a e M2a na fachada Sul (painéis enterrados a vermelho)

	21-Dez			21-Jun		
Nº do Painel	**420576**	**421428**	**422283**	**420576**	**421428**	**422283**
Diferença Rad. Global	45,733	41,209	37,294	62,168	51,288	41,869
Radiação Global (M1a)	178,660	178,660	178,355	238,399	238,399	237,666
Radiação Global (M2a)	224,393	219,869	215,649	300,567	289,687	279,535
Diferença Rad. Directa	19,887	19,887	19,887	0,000	0,000	0,000
Radiação Directa (M1a)	79,545	79,545	79,545	0,000	0,000	0,000
Radiação Directa (M2a)	99,432	99,432	99,432	0,000	0,000	0,000
Diferença Rad. Difusa	25,846	21,323	17,407	62,168	51,288	41,869
Radiação Difusa (M1a)	99,115	99,115	98,810	238,399	238,399	237,666
Radiação Difusa (M2a)	124,961	120,438	116,217	300,567	289,687	279,535

Anexo III. 3 – Situação 1: Painéis não enterrados com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1a e M2a na fachada Sul

	21-Dez			21-Jun		
Nº do Painel	**421457**	**420605**	**422311**	**421457**	**420605**	**422311**
Diferença Rad. Global	3,515	3,367	3,359	8,453	8,099	8,079
Radiação Global (M1a)	860,004	441,519	942,457	2271,004	2261,413	2278,133
Radiação Global (M2a)	863,519	444,886	945,816	2279,457	2269,512	2286,212
Diferença Rad. Directa	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Radiação Directa (M1a)	545,566	131,068	625,055	1514,689	1514,689	1514,689
Radiação Directa (M2a)	545,566	131,068	625,055	1514,689	1514,689	1514,689
Diferença Rad. Difusa	3,514	3,367	3,358	8,453	8,100	8,079
Radiação Difusa (M1a)	314,439	310,451	317,403	756,315	746,723	763,444
Radiação Difusa (M2a)	317,953	313,818	320,761	764,768	754,823	771,523

Anexo III. 4 – Situação 1: Painéis não enterrados com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1a e M2a na fachada Oeste

	21-Dez			21-Jun		
Nº do Painel	**422268**	**420130**	**420985**	**420561**	**422268**	**422267**
Diferença Rad. Global	133,236	125,604	81,473	42,950	40,998	40,620
Radiação Global (M1a)	472,779	448,903	420,595	1883,159	1461,015	2164,587
Radiação Global (M2a)	606,015	574,507	502,068	1926,109	1502,013	2205,207
Diferença Rad. Directa	116,191	116,191	77,460	0,000	0,000	0,000
Radiação Directa (M1a)	210,999	210,999	202,976	1215,925	831,359	1491,141
Radiação Directa (M2a)	327,190	327,190	280,436	1215,925	831,359	1491,141
Diferença Rad. Difusa	17,045	9,414	4,013	42,950	40,998	40,620
Radiação Difusa (M1a)	261,780	237,904	217,619	667,234	629,656	673,446
Radiação Difusa (M2a)	278,825	247,318	221,632	710,184	670,654	714,066

Anexo III. 5 – Situação 1: Painéis não enterrados com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1a e M2a na fachada Norte

	21-Dez			21-Jun		
Nº do Painel	**420228**	**421085**	**420232**	**420228**	**421085**	**420232**
Diferença Rad. Global	14,627	11,762	10,243	35,181	28,290	24,638
Radiação Global (M1a)	292,323	307,955	325,967	932,478	970,079	1013,402
Radiação Global (M2a)	306,950	319,717	336,210	967,659	998,369	1038,040
Diferença Rad. Directa	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Radiação Directa (M1a)	0,000	0,000	0,000	229,358	229,358	229,358
Radiação Directa (M2a)	0,000	0,000	0,000	229,358	229,358	229,358
Diferença Rad. Difusa	14,627	11,762	10,243	35,182	28,291	24,637
Radiação Difusa (M1a)	292,323	307,955	325,967	703,120	740,721	784,045
Radiação Difusa (M2a)	306,950	319,717	336,210	738,302	769,012	808,682

Anexo III. 6 – Situação 1: Painéis não enterrados com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1a e M2a na fachada Este (painéis enterrados a vermelho)

	21-Dez			21-Jun		
Nº do Painel	**422140**	**421285**	**420433**	**422154**	**420446**	**421299**
Diferença Rad. Global	48,697	43,782	39,060	236,744	235,867	234,524
Radiação Global (M1a)	178,881	180,017	178,894	3187,896	3192,825	3182,302
Radiação Global (M2a)	227,578	223,799	217,954	3424,640	3428,692	3416,826
Diferença Rad. Directa	15,621	15,775	15,621	207,811	207,811	207,760
Radiação Directa (M1a)	62,485	63,101	62,485	2289,458	2289,458	2280,052
Radiação Directa (M2a)	78,106	78,876	78,106	2497,269	2497,269	2487,812
Diferença Rad. Difusa	33,077	28,006	23,439	28,934	28,057	26,764
Radiação Difusa (M1a)	116,396	116,917	116,409	898,438	903,367	902,250
Radiação Difusa (M2a)	149,473	144,923	139,848	927,372	931,424	929,014

Anexo III. 7 – Situação 1: Painéis não enterrados com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1a e M2a na fachada Este

	21-Dez			21-Jun		
Nº do Painel	**421299**	**421181**	**422154**	**422154**	**420446**	**421299**
Diferença Rad. Global	26,547	15,783	12,029	236,744	235,867	234,524
Radiação Global (M1a)	542,323	538,720	532,480	3187,896	3192,825	3182,302
Radiação Global (M2a)	568,870	554,503	544,509	3424,640	3428,692	3416,826
Diferença Rad. Directa	15,421	15,420	0,000	207,811	207,811	207,760
Radiação Directa (M1a)	167,211	182,632	158,954	2289,458	2289,458	2280,052
Radiação Directa (M2a)	182,632	198,052	158,954	2497,269	2497,269	2487,812
Diferença Rad. Difusa	11,127	0,363	12,029	28,934	28,057	26,764
Radiação Difusa (M1a)	375,111	356,088	373,527	898,438	903,367	902,250
Radiação Difusa (M2a)	386,238	356,451	385,556	927,372	931,424	929,014

Anexo III. 8 – Situação 2: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1b e M2b na Cobertura

	21-Dez			21-Jun		
Nº do Painel	**420417**	**422120**	**420425**	**422010**	**421152**	**422008**
Diferença Rad. Global	13,048	12,901	12,901	113,155	112,976	112,057
Radiação Global (M1b)	2214,498	2214,645	2214,645	8246,764	8249,279	8255,785
Radiação Global (M2b)	2227,546	2227,546	2227,546	8359,919	8362,255	8367,842
Diferença Rad. Directa	5,585	5,585	5,585	98,413	98,413	98,413
Radiação Directa (M1b)	1313,961	1313,961	1313,961	6095,943	6095,943	6095,943
Radiação Directa (M2b)	1319,546	1319,546	1319,546	6194,356	6194,356	6194,356
Diferença Rad. Difusa	7,463	7,316	7,316	14,743	14,563	13,643
Radiação Difusa (M1b)	900,537	900,684	900,684	2150,820	2153,336	2159,842
Radiação Difusa (M2b)	908,000	908,000	908,000	2165,563	2167,899	2173,485

Anexo III. 9 – Situação 2: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1b e M2b na fachada Sul (painéis enterrados a vermelho)

	21-Dez			21-Jun		
Nº do Painel	**420576**	**420604**	**421457**	**420576**	**421428**	**422283**
Diferença Rad. Global	156,926	111,452	111,380	101,632	93,657	83,770
Radiação Global (M1b)	199,193	3187,053	3187,586	239,955	239,185	239,185
Radiação Global (M2b)	356,119	3298,505	3298,966	341,587	332,842	322,955
Diferença Rad. Directa	115,224	99,431	99,431	1,329	0,000	0,000
Radiação Directa (M1b)	99,432	2751,400	2751,400	0,000	0,000	0,000
Radiação Directa (M2b)	214,656	2850,831	2850,831	1,329	0,000	0,000
Diferença Rad. Difusa	41,701	12,020	11,948	100,303	93,657	83,770
Radiação Difusa (M1b)	99,761	435,654	436,187	239,955	239,185	239,185
Radiação Difusa (M2b)	141,462	447,674	448,135	340,258	332,842	322,955

Anexo III. 10 – Situação 2: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1b e M2b na fachada Sul

	21-Dez			21-Jun		
Nº do Painel	**420604**	**421457**	**422312**	**421456**	**422311**	**420604**
Diferença Rad. Global	111,452	111,380	111,134	29,389	29,281	28,913
Radiação Global (M1b)	3187,053	3187,586	3188,013	2559,729	2561,248	2562,561
Radiação Global (M2b)	3298,505	3298,966	3299,147	2589,118	2590,529	2591,474
Diferença Rad. Directa	99,431	99,431	99,431	0,000	0,000	0,000
Radiação Directa (M1b)	2751,400	2751,400	2751,400	1514,689	1514,689	1514,689
Radiação Directa (M2b)	2850,831	2850,831	2850,831	1514,689	1514,689	1514,689
Diferença Rad. Difusa	12,020	11,948	11,702	29,389	29,281	28,913
Radiação Difusa (M1b)	435,654	436,187	436,614	1045,040	1046,559	1047,872
Radiação Difusa (M2b)	447,674	448,135	448,316	1074,429	1075,840	1076,785

Anexo III. 11 – Situação 2: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1b e M2b na fachada Oeste

	21-Dez			21-Jun		
Nº do Painel	**420240**	**421951**	**421096**	**420240**	**421951**	**421096**
Diferença Rad. Global	13,766	13,604	13,604	33,113	32,719	32,719
Radiação Global (M1b)	1485,009	1485,336	1485,333	2564,719	2565,508	2565,500
Radiação Global (M2b)	1498,775	1498,940	1498,937	2597,832	2598,227	2598,219
Diferença Rad. Directa	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Radiação Directa (M1b)	1049,104	1049,104	1049,104	1516,245	1516,245	1516,245
Radiação Directa (M2b)	1049,104	1049,104	1049,104	1516,245	1516,245	1516,245
Diferença Rad. Difusa	13,767	13,603	13,603	33,113	32,719	32,720
Radiação Difusa (M1b)	435,904	436,232	436,229	1048,474	1049,263	1049,255
Radiação Difusa (M2b)	449,671	449,835	449,832	1081,587	1081,982	1081,975

Anexo III. 12 – Situação 2: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1b e M2b na fachada Norte

	21-Dez			21-Jun		
Nº do Painel	**421938**	**420229**	**420685**	**421938**	**420229**	**420685**
Diferença Rad. Global	10,981	10,968	10,888	26,413	26,379	26,188
Radiação Global (M1b)	436,854	436,618	434,979	1280,116	1279,550	1275,607
Radiação Global (M2b)	447,835	447,586	445,867	1306,529	1305,929	1301,795
Diferença Rad. Directa	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Radiação Directa (M1b)	0,000	0,000	0,000	229,358	229,358	229,358
Radiação Directa (M2b)	0,000	0,000	0,000	229,358	229,358	229,358
Diferença Rad. Difusa	10,981	10,968	10,888	26,414	26,379	26,189
Radiação Difusa (M1b)	436,854	436,618	434,979	1050,758	1050,192	1046,249
Radiação Difusa (M2b)	447,835	447,586	445,867	1077,172	1076,571	1072,438

Anexo III. 13 – Situação 2: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1b e M2b na fachada Este (painéis enterrados a vermelho)

	21-Dez			21-Jun		
Nº do Painel	**422140**	**421285**	**420433**	**421297**	**422152**	**420445**
Diferença Rad. Global	135,689	134,913	130,828	644,146	642,389	571,358
Radiação Global (M1b)	195,194	196,872	196,221	3224,232	3215,690	3215,602
Radiação Global (M2b)	330,883	331,785	327,049	3868,378	3858,079	3786,960
Diferença Rad. Directa	77,101	78,211	77,101	555,334	555,415	485,884
Radiação Directa (M1b)	78,106	78,876	78,106	2289,458	2280,052	2280,052
Radiação Directa (M2b)	155,207	157,087	155,207	2844,792	2835,467	2765,936
Diferença Rad. Difusa	58,587	56,702	53,728	88,813	86,975	85,474
Radiação Difusa (M1b)	117,089	117,996	118,115	934,773	935,638	935,550
Radiação Difusa (M2b)	175,676	174,698	171,843	1023,586	1022,613	1021,024

Anexo III. 14 – Situação 2: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1b e M2b na fachada Este

	21-Dez			21-Jun		
Nº do Painel	**422154**	**420447**	**420446**	**421297**	**422152**	**420445**
Diferença Rad. Global	88,678	87,723	87,543	644,146	642,389	571,358
Radiação Global (M1b)	630,558	622,296	631,394	3224,232	3215,690	3215,602
Radiação Global (M2b)	719,236	710,019	718,937	3868,378	3858,079	3786,960
Diferença Rad. Directa	47,325	46,864	47,325	555,334	555,415	485,884
Radiação Directa (M1b)	237,165	228,892	237,165	2289,458	2280,052	2280,052
Radiação Directa (M2b)	284,490	275,756	284,490	2844,792	2835,467	2765,936
Diferença Rad. Difusa	41,351	40,859	40,217	88,813	86,975	85,474
Radiação Difusa (M1b)	393,394	393,404	394,229	934,773	935,638	935,550
Radiação Difusa (M2b)	434,745	434,263	434,446	1023,586	1022,613	1021,024

Anexo III. 15 – Situação 3: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1a e M1b na Cobertura

	21-Dez			21-Jun		
Nº do Painel	**420403**	**422109**	**422315**	**422368**	**421513**	**420661**
Diferença Rad. Global	101,892	101,080	100,682	193,386	192,533	191,974
Radiação Global (M1a)	2116,365	2117,308	910,231	8164,446	8164,559	8163,279
Radiação Global (M1b)	2218,257	2218,388	1010,913	8357,832	8357,092	8355,253
Diferença Rad. Directa	89,714	89,714	88,596	164,021	164,021	164,021
Radiação Directa (M1a)	1225,364	1225,364	77,849	6030,335	6030,335	6030,335
Radiação Directa (M1b)	1315,078	1315,078	166,445	6194,356	6194,356	6194,356
Diferença Rad. Difusa	12,177	11,366	12,086	29,365	28,511	27,951
Radiação Difusa (M1a)	891,002	891,944	832,382	2134,111	2134,224	2132,945
Radiação Difusa (M1b)	903,179	903,310	844,468	2163,476	2162,735	2160,896

Anexo III. 16 – Situação 3: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1a e M1b na fachada Sul

	21-Dez			21-Jun		
Nº do Painel	**420582**	**420586**	**421438**	**422289**	**420582**	**421435**
Diferença Rad. Global	3052,475	3051,983	3051,574	1855,808	1809,258	1733,326
Radiação Global (M1a)	116,456	120,294	121,914	658,363	708,382	789,871
Radiação Global (M1b)	3168,931	3172,277	3173,488	2514,171	2517,640	2523,197
Diferença Rad. Directa	2751,401	2751,401	2751,401	1130,800	1085,088	1016,520
Radiação Directa (M1a)	0,000	0,000	0,000	382,560	428,272	496,840
Radiação Directa (M1b)	2751,401	2751,401	2751,401	1513,360	1513,360	1513,360
Diferença Rad. Difusa	301,074	300,582	300,173	725,008	724,170	716,807
Radiação Difusa (M1a)	116,456	120,294	121,914	275,803	280,110	293,030
Radiação Difusa (M1b)	417,530	420,876	422,087	1000,811	1004,280	1009,837

Anexo III. 17 – Situação 3: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1a e M1b na fachada Oeste

	21-Dez			21-Jun		
Nº do Painel	**421706**	**422561**	**421610**	**421610**	**420851**	**421706**
Diferença Rad. Global	1176,111	1175,225	1175,140	1357,453	1313,307	1311,571
Radiação Global (M1a)	309,745	311,132	327,296	1210,123	1253,947	1255,186
Radiação Global (M1b)	1485,856	1486,357	1502,436	2567,576	2567,254	2566,757
Diferença Rad. Directa	915,565	915,565	925,533	757,080	684,886	684,886
Radiação Directa (M1a)	133,539	133,539	140,061	759,769	831,359	831,359
Radiação Directa (M1b)	1049,104	1049,104	1065,594	1516,849	1516,245	1516,245
Diferença Rad. Difusa	260,545	259,660	249,606	600,374	628,421	626,685
Radiação Difusa (M1a)	176,206	177,593	187,235	450,354	422,588	423,827
Radiação Difusa (M1b)	436,751	437,253	436,841	1050,728	1051,009	1050,512

Anexo III. 18 – Situação 3: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1a e M1b na fachada Norte

	21-Dez			21-Jun		
Nº do Painel	**421536**	**420684**	**421939**	**421536**	**420684**	**421939**
Diferença Rad. Global	233,195	230,884	229,220	560,899	555,344	551,339
Radiação Global (M1a)	202,953	206,007	207,669	717,518	724,863	728,862
Radiação Global (M1b)	436,148	436,891	436,889	1278,417	1280,207	1280,201
Diferença Rad. Directa	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Radiação Directa (M1a)	0,000	0,000	0,000	229,358	229,358	229,358
Radiação Directa (M1b)	0,000	0,000	0,000	229,358	229,358	229,358
Diferença Rad. Difusa	233,195	230,884	229,220	560,900	555,344	551,340
Radiação Difusa (M1a)	202,953	206,007	207,669	488,160	495,505	499,504
Radiação Difusa (M1b)	436,148	436,891	436,889	1049,060	1050,849	1050,844

Anexo III. 19 – Situação 3: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1a e M1b na fachada Este

	21-Dez			21-Jun		
Nº do Painel	**420676**	**422383**	**421528**	**421526**	**421530**	**420672**
Diferença Rad. Global	373,306	370,969	368,666	1773,538	1716,785	1707,559
Radiação Global (M1a)	244,580	243,229	239,137	1092,446	1404,771	774,784
Radiação Global (M1b)	617,886	614,198	607,803	2865,984	3121,556	2482,343
Diferença Rad. Directa	206,825	206,825	202,750	1346,370	1370,024	1259,818
Radiação Directa (M1a)	30,340	30,340	26,142	631,372	815,529	355,135
Radiação Directa (M1b)	237,165	237,165	228,892	1977,742	2185,553	1614,953
Diferença Rad. Difusa	166,481	164,145	165,915	427,168	346,762	447,741
Radiação Difusa (M1a)	214,240	212,889	212,996	461,074	589,242	419,649
Radiação Difusa (M1b)	380,721	377,034	378,911	888,242	936,004	867,390

Anexo III. 20 – Situação 4: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M2a e M2b na Cobertura

	21-Dez			21-Jun		
Nº do Painel	**422315**	**420403**	**422109**	**420608**	**421460**	**422315**
Diferença Rad. Global	107,562	107,302	106,556	261,887	212,681	209,637
Radiação Global (M2a)	910,257	2120,244	2120,990	4018,428	7881,153	8032,516
Radiação Global (M2b)	1017,819	2227,546	2227,546	4280,315	8093,834	8242,153
Diferença Rad. Directa	88,596	94,182	94,182	227,944	164,021	164,021
Radiação Directa (M2a)	77,849	1225,364	1225,364	2710,624	6030,335	6030,335
Radiação Directa (M2b)	166,445	1319,546	1319,546	2938,568	6194,356	6194,356
Diferença Rad. Difusa	18,965	13,120	12,374	33,942	48,660	45,616
Radiação Difusa (M2a)	832,408	894,880	895,626	1307,805	1850,818	2002,181
Radiação Difusa (M2b)	851,373	908,000	908,000	1341,747	1899,478	2047,797

Anexo III. 21 – Situação 4: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M2a e M2b na fachada Sul

	21-Dez			21-Jun		
Nº do Painel	**420586**	**421438**	**422293**	**422289**	**420582**	**421435**
Diferença Rad. Global	3058,910	3058,717	3057,999	1866,266	1823,074	1750,711
Radiação Global (M2a)	120,200	121,914	123,560	658,363	708,382	789,871
Radiação Global (M2b)	3179,110	3180,631	3181,559	2524,629	2531,456	2540,582
Diferença Rad. Directa	2751,401	2751,401	2751,401	1132,130	1086,418	1017,850
Radiação Directa (M2a)	0,000	0,000	0,000	382,560	428,272	496,840
Radiação Directa (M2b)	2751,401	2751,401	2751,401	1514,690	1514,690	1514,690
Diferença Rad. Difusa	307,509	307,316	306,598	734,136	736,656	732,862
Radiação Difusa (M2a)	120,200	121,914	123,560	275,803	280,110	293,030
Radiação Difusa (M2b)	427,709	429,230	430,158	1009,939	1016,766	1025,892

Anexo III. 22 – Situação 4: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M2a e M2b na fachada Oeste

	21-Dez			21-Jun		
Nº do Painel	**421706**	**422561**	**421610**	**421610**	**420851**	**421706**
Diferença Rad. Global	1188,727	1187,189	1186,996	1385,971	1343,362	1341,917
Radiação Global (M2a)	310,224	311,760	328,354	1212,668	1254,902	1256,336
Radiação Global (M2b)	1498,951	1498,949	1515,350	2598,639	2598,264	2598,253
Diferença Rad. Directa	915,565	915,565	925,533	757,080	684,886	684,886
Radiação Directa (M2a)	133,539	133,539	140,061	759,769	831,359	831,359
Radiação Directa (M2b)	1049,104	1049,104	1065,594	1516,849	1516,245	1516,245
Diferença Rad. Difusa	273,162	271,624	261,462	628,891	658,476	657,032
Radiação Difusa (M2a)	176,684	178,221	188,293	452,899	423,543	424,977
Radiação Difusa (M2b)	449,846	449,845	449,755	1081,790	1082,019	1082,009

Anexo III. 23 – Situação 4: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M2a e M2b na fachada Norte

	21-Dez			21-Jun		
Nº do Painel	**421536**	**420684**	**421939**	**421536**	**420684**	**421939**
Diferença Rad. Global	240,625	238,712	236,645	578,772	574,170	569,199
Radiação Global (M2a)	205,980	208,347	210,412	724,798	730,492	735,458
Radiação Global (M2b)	446,605	447,059	447,057	1303,570	1304,662	1304,657
Diferença Rad. Directa	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Radiação Directa (M2a)	0,000	0,000	0,000	229,358	229,358	229,358
Radiação Directa (M2b)	0,000	0,000	0,000	229,358	229,358	229,358
Diferença Rad. Difusa	240,625	238,712	236,645	578,773	574,171	569,199
Radiação Difusa (M2a)	205,980	208,347	210,412	495,440	501,134	506,100
Radiação Difusa (M2b)	446,605	447,059	447,057	1074,213	1075,305	1075,299

Anexo III. 24 – Situação 4: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M2a e M2b na fachada Este

	21-Dez			21-Jun		
Nº do Painel	**420676**	**422146**	**422383**	**420439**	**422146**	**421291**
Diferença Rad. Global	376,176	375,347	373,912	2096,791	2087,083	2078,044
Radiação Global (M2a)	246,337	247,362	244,441	1316,430	1337,530	1341,439
Radiação Global (M2b)	622,513	622,709	618,353	3413,221	3424,613	3419,483
Diferença Rad. Directa	206,825	206,825	206,825	1678,946	1681,740	1678,946
Radiação Directa (M2a)	30,340	30,340	30,340	808,866	815,529	808,866
Radiação Directa (M2b)	237,165	237,165	237,165	2487,812	2497,269	2487,812
Diferença Rad. Difusa	169,351	168,522	167,087	417,845	405,343	399,098
Radiação Difusa (M2a)	215,997	217,022	214,101	507,564	522,001	532,573
Radiação Difusa (M2b)	385,348	385,544	381,188	925,409	927,344	931,671

Anexo III. 25 – Situação 5: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1b e M3 na Cobertura

	21-Dez			21-Jun		
Nº do Painel	**422315**	**421460**	**420609**	**421152**	**422010**	**422008**
Diferença Rad. Global	16,258	16,226	16,015	166,209	165,637	164,970
Radiação Global (M1b)	1010,913	871,435	1222,466	8249,279	8246,764	8255,785
Radiação Global (M3)	1027,171	887,661	1238,481	8415,488	8412,401	8420,755
Diferença Rad. Directa	5,585	5,585	5,584	144,090	144,090	144,090
Radiação Directa (M1b)	166,445	88,596	353,344	6095,943	6095,943	6095,943
Radiação Directa (M3)	172,030	94,181	358,928	6240,033	6240,033	6240,033
Diferença Rad. Difusa	10,673	10,641	10,431	22,119	21,548	20,880
Radiação Difusa (M1b)	844,468	782,839	869,122	2153,336	2150,820	2159,842
Radiação Difusa (M3)	855,141	793,480	879,553	2175,455	2172,368	2180,722

Anexo III. 26 – Situação 5: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1b e M3 na fachada Sul (painéis enterrados a vermelho)

	21-Dez			21-Jun		
Nº do Painel	**421436**	**420584**	**421434**	**421436**	**420584**	**421434**
Diferença Rad. Global	3126,073	3125,147	3123,412	2368,052	2365,824	2361,650
Radiação Global (M1b)	174,691	175,611	177,352	228,852	231,065	235,254
Radiação Global (M3)	3300,764	3300,758	3300,764	2596,904	2596,889	2596,904
Diferença Rad. Directa	2771,288	2771,288	2771,288	1514,690	1514,690	1514,690
Radiação Directa (M1b)	79,545	79,545	79,545	0,000	0,000	0,000
Radiação Directa (M3)	2850,833	2850,833	2850,833	1514,690	1514,690	1514,690
Diferença Rad. Difusa	354,785	353,860	352,124	853,362	851,134	846,960
Radiação Difusa (M1b)	95,146	96,065	97,807	228,852	231,065	235,254
Radiação Difusa (M3)	449,931	449,925	449,931	1082,214	1082,199	1082,214

Anexo III. 27 – Situação 5: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1b e M3 na fachada Sul

	21-Dez			21-Jun		
Nº do Painel	**422291**	**420585**	**422289**	**422291**	**420585**	**422289**
Diferença Rad. Global	278,951	249,799	162,075	86,689	85,856	82,718
Radiação Global (M1b)	3021,807	3050,959	3138,683	2510,200	2511,033	2514,171
Radiação Global (M3)	3300,758	3300,758	3300,758	2596,889	2596,889	2596,889
Diferença Rad. Directa	243,463	214,657	128,238	1,330	1,330	1,330
Radiação Directa (M1b)	2607,370	2636,176	2722,595	1513,360	1513,360	1513,360
Radiação Directa (M3)	2850,833	2850,833	2850,833	1514,690	1514,690	1514,690
Diferença Rad. Difusa	35,488	35,142	33,837	85,359	84,527	81,388
Radiação Difusa (M1b)	414,437	414,783	416,088	996,840	997,672	1000,811
Radiação Difusa (M3)	449,925	449,925	449,925	1082,199	1082,199	1082,199

Anexo III. 28 – Situação 5: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1b e M3 na fachada Oeste (painéis enterrados a vermelho)

	21-Dez			21-Jun		
Nº do Painel	**420560**	**420240**	**421950**	**420560**	**420240**	**421950**
Diferença Rad. Global	1408,188	13,766	13,616	2379,943	33,113	32,752
Radiação Global (M1b)	90,800	1485,009	1485,304	218,400	2564,719	2565,429
Radiação Global (M3)	1498,988	1498,775	1498,920	2598,343	2597,832	2598,181
Diferença Rad. Directa	1049,104	0,000	0,000	1516,245	0,000	0,000
Radiação Directa (M1b)	0,000	1049,104	1049,104	0,000	1516,245	1516,245
Radiação Directa (M3)	1049,104	1049,104	1049,104	1516,245	1516,245	1516,245
Diferença Rad. Difusa	359,083	13,767	13,617	863,698	33,113	32,752
Radiação Difusa (M1b)	90,800	435,904	436,199	218,400	1048,474	1049,184
Radiação Difusa (M3)	449,883	449,671	449,816	1082,098	1081,587	1081,936

Anexo III. 29 – Situação 5: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1b e M3 na fachada Norte

	21-Dez			21-Jun		
Nº do Painel	**422392**	**421537**	**420685**	**422392**	**421537**	**420685**
Diferença Rad. Global	15,512	15,506	14,954	61,147	61,136	59,806
Radiação Global (M1b)	434,430	434,433	434,979	1274,287	1274,292	1275,607
Radiação Global (M3)	449,942	449,939	449,933	1335,434	1335,428	1335,413
Diferença Rad. Directa	0,000	0,000	0,000	23,838	23,838	23,838
Radiação Directa (M1b)	0,000	0,000	0,000	229,358	229,358	229,358
Radiação Directa (M3)	0,000	0,000	0,000	253,196	253,196	253,196
Diferença Rad. Difusa	15,512	15,506	14,954	37,309	37,298	35,968
Radiação Difusa (M1b)	434,430	434,433	434,979	1044,929	1044,935	1046,249
Radiação Difusa (M3)	449,942	449,939	449,933	1082,238	1082,233	1082,217

Anexo III. 30 – Situação 5: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1b e M3 na fachada Este (painéis enterrados a vermelho)

	21-Dez			21-Jun		
Nº do Painel	**420616**	**422379**	**422019**	**420616**	**421289**	**421468**
Diferença Rad. Global	675,144	621,334	616,213	3708,538	3696,972	3694,862
Radiação Global (M1b)	90,800	144,661	140,726	218,400	230,042	232,175
Radiação Global (M3)	765,944	765,995	756,939	3926,938	3927,014	3927,037
Diferença Rad. Directa	316,041	268,716	260,135	2844,792	2844,792	2844,792
Radiação Directa (M1b)	0,000	47,325	46,863	0,000	0,000	0,000
Radiação Directa (M3)	316,041	316,041	306,998	2844,792	2844,792	2844,792
Diferença Rad. Difusa	359,103	352,618	356,078	863,745	852,180	850,070
Radiação Difusa (M1b)	90,800	97,336	93,863	218,400	230,042	232,175
Radiação Difusa (M3)	449,903	449,954	449,941	1082,145	1082,222	1082,245

Anexo III. 31 – Situação 5: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M1b e M3 na fachada Este

	21-Dez			21-Jun		
Nº do Painel	**421164**	**420312**	**422382**	**421524**	**420672**	**421164**
Diferença Rad. Global	256,549	252,143	246,977	1449,773	1444,622	1106,283
Radiação Global (M1b)	509,437	504,756	518,996	2467,831	2482,343	2820,755
Radiação Global (M3)	765,986	756,899	765,973	3917,604	3926,965	3927,038
Diferença Rad. Directa	157,087	155,207	157,087	1229,266	1229,839	867,050
Radiação Directa (M1b)	158,954	151,791	158,954	1606,200	1614,953	1977,742
Radiação Directa (M3)	316,041	306,998	316,041	2835,466	2844,792	2844,792
Diferença Rad. Difusa	99,462	96,937	89,891	220,505	214,783	239,233
Radiação Difusa (M1b)	350,483	352,964	360,042	861,632	867,390	843,013
Radiação Difusa (M3)	449,945	449,901	449,933	1082,137	1082,173	1082,246

Anexo III. 32 – Situação 6: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M2b e M3 na Cobertura

	21-Dez			21-Jun		
Nº do Painel	**422367**	**421512**	**420661**	**422367**	**421512**	**420661**
Diferença Rad. Global	9,575	9,565	9,479	55,274	55,250	55,043
Radiação Global (M2b)	2215,440	2210,230	2216,797	8362,682	8350,150	8365,945
Radiação Global (M3)	2225,015	2219,795	2226,276	8417,956	8405,400	8420,988
Diferença Rad. Directa	5,585	5,585	5,585	45,677	45,677	45,677
Radiação Directa (M2b)	1313,957	1313,957	1313,957	6194,356	6194,356	6194,356
Radiação Directa (M3)	1319,542	1319,542	1319,542	6240,033	6240,033	6240,033
Diferença Rad. Difusa	3,990	3,981	3,894	9,598	9,574	9,366
Radiação Difusa (M2b)	901,483	896,273	902,840	2168,325	2155,794	2171,589
Radiação Difusa (M3)	905,473	900,254	906,734	2177,923	2165,368	2180,955

Anexo III. 33 – Situação 6: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M2b e M3 na fachada Sul (painéis enterrados a vermelho)

	21-Dez			21-Jun		
Nº do Painel	**421436**	**420584**	**421434**	**421436**	**420584**	**422286**
Diferença Rad. Global	3101,046	3093,059	3089,478	2355,686	2336,475	2332,039
Radiação Global (M2b)	199,718	207,699	211,286	241,218	260,414	264,849
Radiação Global (M3)	3300,764	3300,758	3300,764	2596,904	2596,889	2596,888
Diferença Rad. Directa	2751,401	2751,401	2751,401	1514,690	1514,690	1514,690
Radiação Directa (M2b)	99,432	99,432	99,432	0,000	0,000	0,000
Radiação Directa (M3)	2850,833	2850,833	2850,833	1514,690	1514,690	1514,690
Diferença Rad. Difusa	349,645	341,657	338,076	840,996	821,785	817,350
Radiação Difusa (M2b)	100,286	108,268	111,855	241,218	260,414	264,849
Radiação Difusa (M3)	449,931	449,925	449,931	1082,214	1082,199	1082,199

Anexo III. 34 – Situação 6: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M2b e M3 na fachada Sul

	21-Dez			21-Jun		
Nº do Painel	**422291**	**420585**	**422289**	**422291**	**420585**	**422289**
Diferença Rad. Global	275,059	245,289	158,280	75,997	73,680	72,260
Radiação Global (M2b)	3025,699	3055,469	3142,478	2520,892	2523,209	2524,629
Radiação Global (M3)	3300,758	3300,758	3300,758	2596,889	2596,889	2596,889
Diferença Rad. Directa	243,463	214,657	128,238	0,000	0,000	0,000
Radiação Directa (M2b)	2607,370	2636,176	2722,595	1514,690	1514,690	1514,690
Radiação Directa (M3)	2850,833	2850,833	2850,833	1514,690	1514,690	1514,690
Diferença Rad. Difusa	31,596	30,632	30,042	75,997	73,680	72,260
Radiação Difusa (M2b)	418,329	419,293	419,883	1006,202	1008,519	1009,939
Radiação Difusa (M3)	449,925	449,925	449,925	1082,199	1082,199	1082,199

Anexo III. 35 – Situação 6: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M2b e M3 na fachada Oeste (painéis enterrados a vermelho)

	21-Dez			21-Jun		
Nº do Painel	**420560**	**421412**	**422267**	**420560**	**421412**	**422267**
Diferença Rad. Global	1408,188	0,657	0,137	2379,943	1,580	0,330
Radiação Global (M2b)	90,800	1498,307	1498,828	218,400	2596,707	2597,959
Radiação Global (M3)	1498,988	1498,964	1498,965	2598,343	2598,287	2598,289
Diferença Rad. Directa	1049,104	0,000	0,000	1516,245	0,000	0,000
Radiação Directa (M2b)	0,000	1049,104	1049,104	0,000	1516,245	1516,245
Radiação Directa (M3)	1049,104	1049,104	1049,104	1516,245	1516,245	1516,245
Diferença Rad. Difusa	359,083	0,657	0,137	863,698	1,580	0,329
Radiação Difusa (M2b)	90,800	449,203	449,724	218,400	1080,462	1081,715
Radiação Difusa (M3)	449,883	449,860	449,861	1082,098	1082,042	1082,044

Anexo III. 36 – Situação 6: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M2b e M3 na fachada Norte

	21-Dez			21-Jun		
Nº do Painel	**422392**	**421537**	**420685**	**422392**	**421537**	**420685**
Diferença Rad. Global	6,080	5,172	4,066	38,462	36,279	33,618
Radiação Global (M2b)	443,862	444,767	445,867	1296,972	1299,149	1301,795
Radiação Global (M3)	449,942	449,939	449,933	1335,434	1335,428	1335,413
Diferença Rad. Directa	0,000	0,000	0,000	23,838	23,838	23,838
Radiação Directa (M2b)	0,000	0,000	0,000	229,358	229,358	229,358
Radiação Directa (M3)	0,000	0,000	0,000	253,196	253,196	253,196
Diferença Rad. Difusa	6,080	5,172	4,066	14,624	12,442	9,779
Radiação Difusa (M2b)	443,862	444,767	445,867	1067,614	1069,791	1072,438
Radiação Difusa (M3)	449,942	449,939	449,933	1082,238	1082,233	1082,217

Anexo III. 37 – Situação 6: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M2b e M3 na fachada Este (painéis enterrados a vermelho)

	21-Dez			21-Jun		
Nº do Painel	**420616**	**422379**	**422019**	**420616**	**421289**	**421468**
Diferença Rad. Global	675,144	620,239	614,951	3708,538	3693,958	3690,145
Radiação Global (M2b)	90,800	145,756	141,988	218,400	233,056	236,892
Radiação Global (M3)	765,944	765,995	756,939	3926,938	3927,014	3927,037
Diferença Rad. Directa	316,041	268,716	260,135	2844,792	2844,792	2844,792
Radiação Directa (M2b)	0,000	47,325	46,863	0,000	0,000	0,000
Radiação Directa (M3)	316,041	316,041	306,998	2844,792	2844,792	2844,792
Diferença Rad. Difusa	359,103	351,523	354,816	863,745	849,166	845,353
Radiação Difusa (M2b)	90,800	98,431	95,125	218,400	233,056	236,892
Radiação Difusa (M3)	449,903	449,954	449,941	1082,145	1082,222	1082,245

Anexo III. 38 – Situação 6: Painéis com maior diferença entre radiação global (Wh/m²) entre modelos M2b e M3 na fachada Este

	21-Dez			21-Jun		
Nº do Painel	**421164**	**420312**	**421524**	**421524**	**420672**	**421164**
Diferença Rad. Global	256,365	251,747	245,133	1445,566	1437,515	1105,841
Radiação Global (M2b)	509,621	505,152	511,764	2472,038	2489,450	2821,197
Radiação Global (M3)	765,986	756,899	756,897	3917,604	3926,965	3927,038
Diferença Rad. Directa	157,087	155,207	155,207	1229,266	1229,839	867,050
Radiação Directa (M2b)	158,954	151,791	151,791	1606,200	1614,953	1977,742
Radiação Directa (M3)	316,041	306,998	306,998	2835,466	2844,792	2844,792
Diferença Rad. Difusa	99,278	96,540	89,927	216,299	207,676	238,791
Radiação Difusa (M2b)	350,667	353,361	359,973	865,838	874,497	843,455
Radiação Difusa (M3)	449,945	449,901	449,900	1082,137	1082,173	1082,246