

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA,
GEOFÍSICA E ENERGIA



**MODELOS URBANOS TRIDIMENSIONAIS:
UMA ANÁLISE NA PERSPECTIVA DOS SISTEMAS DE
INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA**

Joana Rita Gaspar Guerra Pereira

DISSERTAÇÃO

MESTRADO EM SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA

– TECNOLOGIAS E APLICAÇÕES

2012

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA,
GEOFÍSICA E ENERGIA



**MODELOS URBANOS TRIDIMENSIONAIS:
UMA ANÁLISE NA PERSPECTIVA DOS SISTEMAS DE
INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA**

Joana Rita Gaspar Guerra Pereira

DISSERTAÇÃO

MESTRADO EM SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA

– TECNOLOGIAS E APLICAÇÕES

Dissertação Orientada por Professora Doutora Cristina Catita e

Professora Doutora Paula Redweik

2012

“A nossa civilização é eminentemente urbana.”

Teresa Barata Salgueiro

A Cidade em Portugal

Resumo: A presente dissertação procura definir um método para a representação tridimensional de fachadas e integração e análise de dados acerca da radiação solar que zona elementar da estrutura recebe anualmente. A radiação solar nas fachadas apresenta uma variabilidade em Z e o seu estudo e análise ainda se encontram pouco desenvolvidos, devido à sua complexidade quer de modelação quer de representação. No entanto, os SIG começam a mostrar crescentes capacidades na área dos 3D, e como tal, foi levantada a possibilidade de utilizar modelos urbanos tridimensionais da área em estudo, o Campus da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (FCUL) para levar a cabo este objectivo. Para isso, foram criados os modelos tridimensionais dos edifícios do Campus, utilizando um método tradicional de modelação - *bottom-up*, partindo das pegadas dos edifícios e criando todos os detalhes do edifício de uma forma interactiva com base em fotografias. Foi também desenvolvida uma nova metodologia para a derivação de modelos digitais do terreno a partir de dados LiDAR reamostrados, utilizando indicadores locais de autocorrelação espacial para isolar e remover aglomerados classificados com valores residuais altos e positivos. Posteriormente foi gerada uma nova estrutura de pontos para receber os valores da radiação calculados previamente. Este estudo é parte integrante de um projecto a decorrer no Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia da FCUL, que visa calcular o potencial fotovoltaico urbano.

Palavras-chave: Modelo Tridimensional de Edifícios, Modelo Digital do Terreno, LiDAR, Fachadas, Radiação Solar, SIG.

Abstract: This dissertation aims to define a method to represent three-dimensional façades that allow integration and analysis of solar radiation data that each element of the structure receives annually. The Z variability of the solar radiation phenomenon and its overall complexity sets a tone for its difficult modelling and analysis and this might be the reason why façades are often discarded from the scope of solar radiation studies. GIS software is starting to show great capabilities in the 3D field and therefore the possibility of using three-dimensional urban models of the study area, the Campus of the Faculty of Sciences of Lisbon University (FCUL), was raised. To do so, the buildings of the study area were modeled using the traditional bottom-up approach, starting from the buildings' footprints and adding details based on photographs of the site. Also a new methodology to create a digital terrain model from resampled LiDAR data was developed, and it uses local indicators of spatial association to separate and remove high residuals clusters that can be classified as non-terrain objects. Finally, a new point structure for the façade was generated and can be joined spatially with the solar radiation data calculated previously. This study is part of a project in development in the Department of Geographic Engineering, Geophysics and Energy that has the purpose of assess the urban photovoltaic potential.

Key-words: Three-Dimensional Building Model, Digital Terrain Model, LiDAR, Façades, Solar Radiation, GIS.

Agradecimentos

Às Professoras Doutora Cristina Catita e Doutora Paula Redweik agradeço toda a ajuda, entusiasmo e encorajamento constante ao longo do meu percurso, sem os quais nada disto seria possível. Foi um privilégio trabalhar com ambas e, sem dúvida, uma experiência única e rica em aprendizagens.

Aos meus pais por me darem a possibilidade de aprender sem restrições e por me lembrarem da importância das coisas sem nunca me deixarem desistir. A eles devo tudo.

À Catarina Morawska Vianna pelas palavras sábias sempre que foram necessárias.

E finalmente à minha irmã Ana e ao Marco, os meus melhores amigos, por todo o apoio, dedicação e amizade que sempre demonstraram e sem os quais a minha vida seria certamente menos colorida.

Índice

Resumo	i
Abstract.....	ii
Agradecimentos	iii
Lista de Figuras	vi
Lista de Abreviaturas e Siglas	ix
Capítulo 1 – Introdução	2
1.1 – Introdução	2
1.2 – Motivação	3
1.3 – Objectivos do Projecto	5
1.4 – Metodologia	6
1.5 – Contribuição Científica	8
1.6 – Estrutura da Dissertação	9
Capítulo 2 – Estado da Arte.....	11
2.1 – Modelos Urbanos Tridimensionais	11
2.1.1 – Modelos Tridimensionais de Edifícios.....	11
2.1.2 – Métodos de Modelação Tridimensional dos Edifícios	12
2.2 – Modelos Digitais do Terreno	13
2.3 – Aplicações dos Modelos Urbanos Tridimensionais.....	15
2.4 – Os Modelos Tridimensionais em Portugal.....	16
2.5 – Os Sistemas de Informação Geográfica e o 3D	18
2.6 – Casos de Estudo: Modelos Urbanos 3D aplicados ao estudo da Radiação Solar	19
Capítulo 3 - Metodologia.....	22
3.1 – Caracterização da Área de Estudo	22
3.2 – Informação Geográfica Utilizada.....	24
3.3 – Modelação Tridimensional dos Edifícios	24
3.4 – Derivação do Modelo Digital do Terreno	27
3.4.1 – Teste de metodologias existentes para a derivação do MDT	28
3.4.2 – Nova Metodologia para a Derivação do MDT.....	31
3.5 – Integração do Modelo Tridimensional Urbano em Software SIG	41
Capítulo 4 – Análise e Discussão de Resultados	51

4.1 – Modelo Tridimensional dos Edifícios.....	51
4.2 – Modelo Digital do Terreno	52
4.3 – Visualização e Análise da Radiação Solar nas Fachadas.....	52
Capítulo 5 – Conclusões	56
5.1 – Considerações Finais	56
5.2 – Perspectivas Futuras	59
Referências Bibliográficas.....	60

Lista de Figuras

Figura 1 – Excerto de fotografias tiradas a partir do mesmo local, entre o dia 2 de Dezembro de 2011 e dia 5 para demonstrar os níveis de poluição atmosférica que se fazem sentir na cidade de Pequim, China [China Daily].....	4
Figura 2 – Descrição das Etapas do Projecto.	7
Figura 3 – Modelos tridimensionais de edifícios da cidade de Lisboa [Google Earth].	17
Figura 4 – Simulação tridimensional das ruínas da vila Romana de Casal de Freiria [Rua e Alvito, 2011].	17
Figura 5 – Fotografia aérea da área de estudo (ETRS89 TM06 Portugal).....	22
Figura 6 – Pegada dos Edifícios C3, C4 e C5.	23
Figura 7 – Pormenor das estruturas de betão das fachadas do edifício C8.	23
Figura 8 – Conceptualização do modelo tridimensional [Lorenz e Döllner, 2010]	25
Figura 9 – a) Fotografia panorâmica do edifício do ICAT. b) Modelo tridimensional do mesmo edifício.	26
Figura 10 – Modelo tridimensional dos edifícios do Campus da FCUL.....	26
Figura 11 – Modelo tridimensional em formato CityGML do edifício C6.....	27
Figura 12 – Pesquisa de atributos, em CityGML, do modelo tridimensional dos edifícios.	27
Figura 13 – MDS da área de estudo, proveniente de dados LiDAR.	29
Figura 14 – MDT resultante da aplicação de filtros morfológicos.....	29
Figura 15 – Perfil original do jardim a Este do Edifício C8.....	30
Figura 16 – Pormenor do MDT resultante da aplicação de filtros morfológicos.....	30
Figura 17 – MDS de Lisboa com a localização das três áreas de teste.	31
Figura 18 – Esquema da nova metodologia para a derivação de MDT a partir de dados LiDAR.	32
Figura 19 – MDS da Praça de Touros do Campo Pequeno.....	33
Figura 20 – Representação da zona de perfil.	34

Figura 21 – Perfil do MDS e das diferentes ST.	34
Figura 24 – MDT final da Praça de Touros do Campo Grande	37
Figura 25 – MDS do Campus da FCUL.....	37
Figura 26 – Células classificadas como objectos na primeira (a verde) e segunda iteração (a cor-de-laranja).....	38
Figura 27 – MDT final do Campus da FCUL.	39
Figura 28 – MDS da Penha de França.....	39
Figura 29 – Resultado da extracção dos objectos identificados na primeira iteração... 40	
Figura 30 – MDT final da Penha de França.	40
Figura 31 – Modelo Urbano Tridimensional do Campus da FCUL.....	42
Figura 32 – Visualização dos Hiperpontos das Fachadas.	42
Figura 33 – Selecção dos hiperpontos que representam dos edifícios C6.....	43
Figura 34 – Pormenor da distribuição dos hiperpontos ao longo das fachadas.....	44
Figura 35 – Criação de estrutura de pontos regulares (a preto).....	44
Figura 36 – Estrutura final de pontos com informação sobre a radiação solar desviada 1 metro do plano das fachadas do edifício C6 (a azul).....	45
Figura 37 – Identificação de um dos pontos da nova estrutura.	45
Figura 38 – Visualização da informação sobre a radiação global anual nas fachadas do edifício C6. À esquerda fachadas vistas de Sudeste; à direita fachadas vistas de Norte.46	
Figura 39 – Representação esquemática do rebatimento de uma das fachadas do edifício C6.	47
Figura 40 – Selecção e representação de uma das fachadas do edifício C6.....	47
Figura 41 – Fachada do C6, rebatida e representada a duas dimensões.....	48
Figura 42 – a) Selecção de pontos da fachada com radiação solar global igual ou superior a 800000 Wh/m ² ; b) cálculo das estatísticas dos pontos seleccionados.....	48

Figura 43 – a) Estrutura de pontos regulares com informação sobre a radiação solar global anual definida para toda a área de estudo; b) cálculo das estatísticas dos pontos seleccionados.....	49
Figura 44 – Representação da fachada em análise do edifício C6 no Google Earth.....	49
Figura 45 – Demarcação de problemas encontrados na representação da estrutura de pontos no edifício C2.....	53

Lista de Abreviaturas e Siglas

CAD – Computer-Aided Design;

DGPS/INS – Differential Global Positioning System/ Inertial Navigation System

FCUL – Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

GPS – Global Positioning System;

ICAT – Instituto de Ciência Aplicada e Tecnologia

LiDAR – Light Detection and Ranging;

MDS – Modelo Digital da Superfície.

MDT – Modelo Digital do Terreno;

OGC – Open Geospatial Consortium;

SIG – Sistemas de Informação Geográfica;

ST – Superfície de Tendência;

SU – SketchUp

SVF – Sky View Factor

Capítulo 1 - Introdução

1.1 – Introdução

1.2 – Motivação

1.3 – Objectivos

1.4 – Metodologia

1.5 – Contribuição Científica

1.6 – Estrutura do Documento

Capítulo 1 - Introdução

1.1 – Introdução

No dia 31 de Outubro de 2011, as Nações Unidas celebraram a meta estimada de que a população mundial teria atingido os 7 mil milhões de habitantes. O crescimento da população mundial tem ocorrido a um ritmo muito acelerado, se se tiver em conta que apenas em 1950 a população era estimada em 2,6 milhares de milhões de pessoas e que praticamente a cada 10 anos há um incremento populacional de aproximadamente 1 milhar de milhão [Nações Unidas].

De acordo com as estimativas globais descritas no documento “Urban Population, Development and the Environment 2011”, elaborado pela Divisão de População do Departamento de Economia e Assuntos Sociais das Nações Unidas, 50% da população mundial está concentrada em áreas urbanas sendo que 35% da população urbana vive em bairros de lata, em situações de carência.

Este crescimento populacional acentuado e contínuo, assim como o aumento específico da população nas cidades resultante de movimentos migratórios de pessoas à procura de melhores condições de vida e oportunidades, tem implicações sérias em termos de ordenamento do território e qualidade de vida, inerentes ao fenómeno da “urbanização”. Este fenómeno tem como consequências o constante crescimento e rápida expansão horizontal e vertical das cidades que por sua vez são a causa de problemas sociais e estruturais cada vez mais complexos que necessitam de respostas adequadas e urgentes. Como tal, é necessário o desenvolvimento de ferramentas de visualização e análise sofisticadas que possibilitem um planeamento urbano sustentável [Mao *et al*, 2009] e que “*permitam entender a cidade como forma de organização da superfície terrestre, como uma estrutura espacial que representa um grande avanço das sociedades humanas*” [Barata Salgueiro, 1992].

A análise espacial de dados geográficos a duas dimensões apresenta limitações e já não é suficiente para responder às necessidades dos cientistas, principalmente quando se pretende analisar um determinado fenómeno com comportamento tridimensional, como é o caso da poluição sonora, poluição atmosférica ou cheias [Stoter e Zlatanova,

2003]. Para colmatar esta necessidade, a procura de informação contida em modelos de cidades tridimensionais está a tornar-se cada vez mais evidente.

O Mundo é tridimensional e os fenómenos físicos que nele ocorrem também o são, como tal devem ter-se em conta a variabilidade dos factores Z que por vezes os condicionam, e que são descurados numa análise bidimensional. Uma abordagem a três dimensões apresenta-se como uma excelente valência para as áreas do planeamento e manutenção de espaço público, seja este subterrâneo ou à superfície [Stoter, 2011].

Para o desenvolvimento da presente dissertação e tendo em consideração o crescente interesse ao nível dos modelos urbanos tridimensionais por parte dos cientistas das mais diferentes áreas, foi levantada a seguinte questão: *Estarão os Sistemas de Informação Geográfica preparados para a representação, visualização e análise de modelos urbanos tridimensionais?*

1.2 – Motivação

As cidades são grandes consumidoras de recursos e são responsáveis pela emissão de 50% do dióxido de carbono emitido a nível global [Khasreen, 2009]. Com a grande quantidade de energia que é necessário produzir para alimentar todo o tecido industrial e urbano de uma cidade, a resposta passa muitas vezes pela produção de energia a partir de combustíveis fósseis, que libertam grandes quantidades de gases de efeito estufa para a atmosfera e potenciam uma grande poluição atmosférica local e em alguns locais, como na cidade de Pequim na China, são responsáveis pelo conhecido fenómeno de “smog” (Figura 1).



Figura 1 – Excerto de fotografias tiradas a partir do mesmo local, entre o dia 2 de Dezembro de 2011 e dia 5 para demonstrar os níveis de poluição atmosférica que se fazem sentir na cidade de Pequim, China [China Daily].

Este tipo de fenómenos deve ser questionado quando somos confrontados com o facto de que a radiação solar que atinge a superfície terrestre durante uma hora é suficiente para colmatar toda a necessidade energética mundial durante um ano. Este facto levanta uma questão: como pode ser aproveitado o potencial da radiação solar nas cidades? Observando a estrutura das cidades, verifica-se que além de telhados, estas apresentam edifícios com grandes áreas úteis, correspondentes às fachadas, para instalação de diferentes tipos de tecnologia fotovoltaica.

Suri, adaptado de Hofierka e Kanuk [2009] afirma que as áreas urbanas oferecem superfícies suficientemente grandes para acomodar sistemas fotovoltaicos capazes de suprimir as suas necessidades energéticas anuais. Importa referir que o maior potencial fotovoltaico se localiza em zonas com grandes edifícios geralmente caracterizados funcionalmente como escolas, universidades, edifícios de escritórios ou apartamentos residenciais. Estes edifícios apresentam boas áreas disponíveis, ao nível dos telhados e fachadas, sendo portanto as estruturas ideais para pôr em prática o conceito de “*Eco Refurbishment*” que começa a emergir lado a lado com o conceito de “Cidades Inteligentes” e de modo a cumprir a mais recente directiva sobre eficiência energética, aprovada pelo Parlamento Europeu, que impõe a obrigação aos países membros de renovar os edifícios públicos com o objectivo de reduzir em 20% os consumos energéticos das estruturas.

Suri, citado por Hofierka e Kanuk [2009] defende também que os SIG podem contribuir para a análise efectiva dos recursos solares, contudo é essencial ter em consideração que a interacção da radiação solar com os diferentes cenários (naturais e construídos) se traduz numa relação complexa e por sua vez em bases de dados espaciais e ferramentas de processamento sofisticadas.

Esta temática suscita um grande interesse pessoal e a sua actualidade aliada à grande necessidade de encontrar soluções para o planeamento de cidades cada vez mais sobrepovoadas e esgotadas em termos energéticos e ambientais foram motivos suficientes para conduzir ao estudo descrito ao longo do presente documento.

1.3 – Objectivos do Projecto

Os SIG, sendo sistemas dotados de ferramentas para o processamento e análise de dados complexos, têm potencial para fazer a análise de recursos solares em diferentes níveis de escala mas apesar disso têm sido pouco aplicados ao estudo da radiação solar em áreas urbanas [Hofierka e Kanuk, 2009].

O presente trabalho tem como objectivo analisar o fenómeno da radiação solar em fachadas à luz dos sistemas de informação geográfica, recorrendo a informação tridimensional, numa tentativa de compreender de que modo a tecnologia actualmente existente está ou não apta a possibilitar a utilização deste tipo de informação.

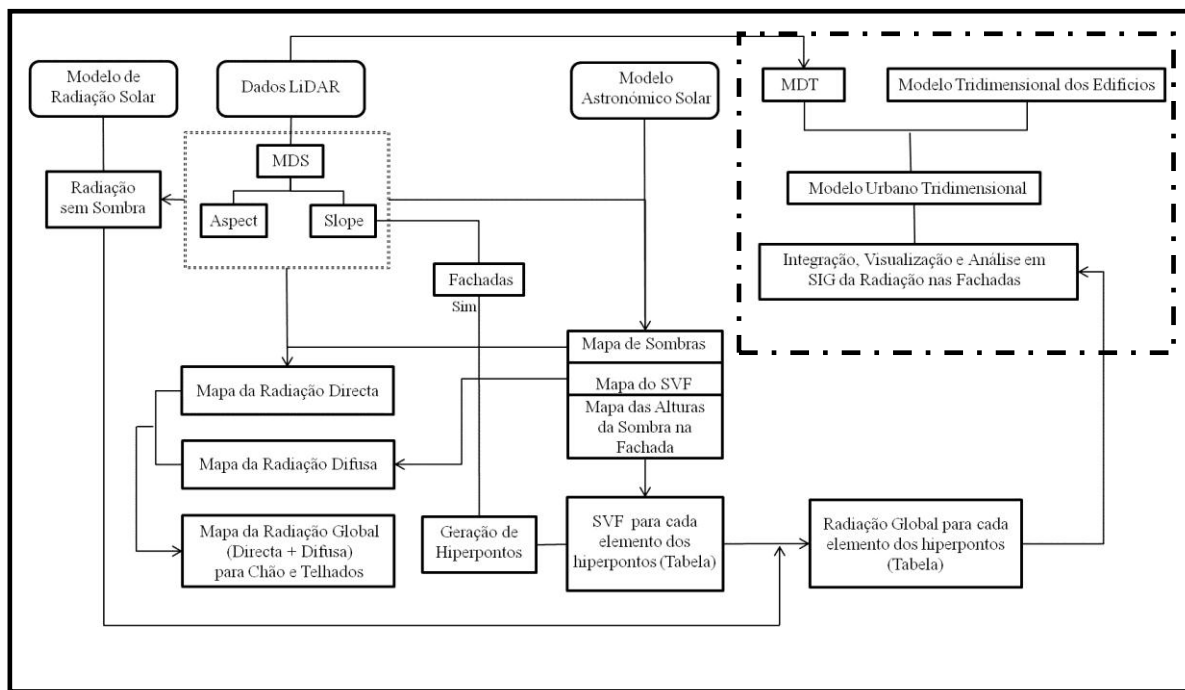
Em suma, esta dissertação pretende investigar, até que ponto a versatilidade dos modelos tridimensionais, aplicados aos sistemas de informação geográfica, é suficiente para permitir a análise detalhada de um fenómeno complexo, como é o da radiação solar das fachadas. Para tal, foi necessário criar modelos tridimensionais dos edifícios de uma área específica, bem como derivar um modelo digital do terreno a partir de dados LiDAR de modo a integrar ambos num modelo urbano tridimensional, e determinar uma metodologia para análise de um fenómeno com dispersão em Z.

1.4 – Metodologia

O ponto de partida foi a criação de um modelo urbano tridimensional. Um modelo urbano tridimensional representa a cidade, ou parte dela, como um todo, sendo portanto necessário para além da modelação tridimensional dos edifícios ou objectos da área de estudo, derivar dos dados primários (LiDAR) um modelo digital do terreno (MDT) com uma resolução equivalente à resolução dos modelos tridimensionais dos edifícios de modo a permitir uma boa integração de ambos num SIG e a sua posterior análise.

O presente estudo é parte integrante de um projecto em curso no Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, que visa calcular o potencial fotovoltaico urbano, considerando a radiação solar directa, difusa e reflectida que atinge um determinado ponto, localizado no chão, telhado ou fachada de um edifício tal como descrito em Redweik et al [2011]. No âmbito deste projecto, pretende-se explorar as capacidades dos SIG para análise e visualização do fenómeno em estudo a diferentes níveis de detalhe (por edifício ou por fachada), em dados tridimensionais.

Na Figura 2, encontram-se esquematizadas as diferentes etapas do projecto como um todo e a área de intervenção do presente estudo.



Projecto do Cálculo do Potencial Solar em Áreas Urbanas

Âmbito do Presente Projecto

Figura 2 – Descrição das Etapas do Projecto.

Antecipando o grande volume de dados com que seria necessário trabalhar, optou-se por escolher uma área de estudo relativamente pequena, correspondente ao Campus da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa e ao Museu da Cidade.

Em suma, o projecto pode ser caracterizado por quatro etapas fundamentais de trabalho:

- Modelação tridimensional dos edifícios da área de estudo (Campus da FCUL) – Os edifícios que se inserem totalmente na área de estudo foram modelados com um nível de detalhe caracterizado na literatura como LoD 3, representando um modelo arquitectónico.
- Criação do modelo digital do terreno, a partir da classificação de dados LiDAR, utilizando uma nova metodologia – Partindo dos dados reamostrados LiDAR, houve necessidade de derivar um modelo digital do terreno de grande resolução, para integrar o modelo urbano tridimensional.

Para a sua criação foram utilizados indicadores de autocorrelação espacial que permitiram detectar grandes aglomerados e pontos extremos na área de estudo e criaram condições para a sua remoção, mantendo as cotas do terreno com os valores originais.

- Integração do Modelo Urbano Tridimensional em software SIG – Foi feita uma extensa pesquisa sobre a capacidade dos softwares SIG suportarem ou não a visualização e análise de dados tridimensionais.
- Visualização e Análise dos Dados – Foi desenvolvida uma nova metodologia para a visualização e análise de dados com variabilidade em Z, que se apresenta como uma solução, que pode ser adaptada a outros estudos ambientais com dispersão tridimensional. Desta forma a informação tridimensional de determinados fenómenos, que tem vindo a ser ignorada em grande parte dos estudos, pode ser visualizada, analisada e servir de base para a criação de relatórios com auxiliares visuais que permitem uma fácil interpretação para quem se destinam.

1.5 - Contribuição Científica

Este trabalho apresenta uma nova metodologia para a análise e visualização da radiação solar em fachadas. O cálculo da radiação solar nas fachadas dos edifícios é um assunto pouco desenvolvido dentro da temática dos recursos solares devido à sua complexidade, quer em termos de modelação quer em termos de análise e aplicações deste género que são praticamente inexistentes ao nível de *software* SIG. Esta abordagem tem o potencial de ser adaptada a outros estudos ambientais em que o fenómeno em causa tenha uma variabilidade em Z, como por exemplo a poluição sonora a que um edifício de vários andares está sujeito, devido à passagem de uma estrada próxima ou um aeroporto.

Durante o percurso de construção da informação surgiu também a necessidade de desenvolver uma nova metodologia para a derivação de um MDT a partir da classificação de dados LiDAR, utilizando uma análise de autocorrelação espacial. Esta nova metodologia apresenta-se como uma alternativa às existentes, que no geral não são

consensuais nem apresentam resultados totalmente satisfatórios em zonas urbanas caracterizadas por uma malha densa de edificado e topografia do terreno acidentada, como é o caso da cidade Lisboa. Para o efeito desenvolveu-se uma metodologia baseada na análise de autocorrelação espacial, que permite de forma satisfatória classificar os dados LiDAR reamostrados em duas classes e objectos: terreno e não-terreno permitindo a sua extracção do MDS.

1.6 – Estrutura da Dissertação

A presente dissertação é constituída por cinco capítulos. No primeiro capítulo, na Introdução, foi feito um breve enquadramento sobre a necessidade de se começar a planear as cidades tridimensionalmente, foram descritos os motivos que levaram à escolha desta temática, assim como os objectivos do projecto e ainda a metodologia utilizada para o seu desenvolvimento.

No capítulo do Estado da Arte, é feito um enquadramento teórico dos conceitos abordados ao longo do projecto. Este capítulo aborda em maior profundidade os conceitos de modelos tridimensionais de edifícios, modelos digitais do terreno, o que se passa actualmente com os Sistemas de Informação Geográfica e a utilização de informação tridimensional e finalmente apresenta dois casos de estudo que abordam a análise da radiação solar com recurso aos SIG.

O terceiro capítulo descreve o processo de criação dos modelos tridimensionais dos edifícios da área de estudo e também os procedimentos metodológicos desenvolvidos para a derivação de modelos digitais do terreno a partir de dados LiDAR e para a integração e representação de dados sobre a radiação solar da área de estudo.

No quarto capítulo é feita uma análise crítica dos resultados da aplicação das metodologias descritas anteriormente.

E finalmente, no quinto capítulo fazem-se as considerações finais relativamente ao tema em análise e ainda se definem algumas melhorias a fazer futuramente.

Capítulo 2 – Estado da Arte

2.1 – Modelos Urbanos Tridimensionais

2.1.1– Modelos Tridimensionais de Edifícios

2.1.1– Métodos de Modelação Tridimensional de Edifícios

2.2 – Modelos Digitais do Terreno

2.3 – Aplicações dos Modelos Urbanos Tridimensionais

2.4 – Os Modelos Tridimensionais em Portugal

2.5 – Os Sistemas de Informação Geográfica e o 3D

2.6 – Casos de Estudo: Modelos Urbanos 3D aplicados ao estudo da Radiação Solar

Capítulo 2 – Estado da Arte

2.1 - Modelos Urbanos Tridimensionais

Os modelos urbanos tridimensionais definem a estrutura de uma cidade e são constituídos por terreno e construções, sendo portanto representados pelos modelos tridimensionais dos edifícios e o modelo digital do terreno correspondentes à área em causa [Gröger e Plümer, 2011].

2.1.1 - Modelos Tridimensionais de Edifícios

Um modelo tridimensional de um edifício é definido como um volume constituído por faces tridimensionais e um conjunto de linhas e planos que definem os seus elementos estruturais [Scianna *et al*, 2006] e traduz-se numa imagem gráfica capaz de descrever a forma, posição, orientação e o tamanho das entidades em causa [Xu *et al*, 2010].

Na última década têm surgido tecnologias que possibilitam a criação e a manutenção de informação geográfica tridimensional [Stoter *et al*, 2011] que aos poucos podem vir a substituir as convencionais maquetas, que dificilmente se podem usar para representar toda a área construída de uma cidade. Jogos para consolas e computadores, a par com os sistemas CAD, têm sido os grandes impulsionadores do 3D, uma vez que a terceira dimensão, possibilita uma melhor compreensão do espaço e as relações espaciais entre objectos [Rakkolainen e Vainio, 2001] facilitando a navegação e orientação dos utilizadores [Scianna e Ammoscato, 2010], o que justifica o facto de grande parte do *software* disponível para a modelação ser dedicado à animação. Contudo, tanto o *design* gráfico como o desenho assistido por computador têm graves lacunas na componente de análise espacial – esta simplesmente não existe, ficando essencialmente dependente do avanço dos sistemas de informação geográfica [Shiode, 2001].

O desenvolvimento de ferramentas de visualização e análise de ferramentas 3D revela-se de extrema importância para um planeamento sustentável e uma comunicação

efectiva com o público [Mao *et al*, 2009]. Os modelos tridimensionais das cidades são a unidade básica destas ferramentas e sendo estes o ponto de partida para a realização de operações de visualização e análise é importante que contenham informação de qualidade e coerente que culminará numa boa representação virtual e tridimensional dos ambientes urbanos permitindo que a informação contida nos modelos possa ser utilizada nas mais diferentes áreas científicas desde o planeamento urbano [Scianna e Ammoscato, 2010] ao estudo ambiental e planeamento de emergência [Kolbe *et al*, 2005].

2.1.2 - Métodos de Modelação Tridimensional dos Edifícios

De acordo com Xu *et al* [2010], os métodos para a modelação podem ser divididos em duas categorias: modelação interactiva e modelação semi-automática a partir de dados LiDAR.

A modelação interactiva é classificada na literatura como a abordagem mais tradicional, por ser mais frequente, apesar de ter maiores custos associados devido ao facto de ter uma grande quantidade de trabalho de modelação e edição manual [Takase *et al*, 2003]. Esta modelação tem uma aproximação *bottom-up*, partindo das pegadas dos edifícios, previamente restituídas e extrudidas, para a modelação mais pormenorizada da geometria de cada edifício.

A segunda abordagem baseia-se no pressuposto de que a fotogrametria permite aceder à informação tridimensional necessária para a construção de um modelo [Zhang Z. *et al*, 2003], e utiliza tecnologias como o varrimento por laser e derivação de modelos tridimensionais de edifícios a partir de nuvens de pontos.

A escolha do método a utilizar está intimamente ligada com o que se pretende obter a partir do modelo. O modelo é construído com base em factores externos, tais como, a quem se destina, com que objectivo, orçamento existente, tempo para a modelação e área a modelar [Shiode, 2001]. O nível de detalhe pretendido, os dados associados e a funcionalidade a que se destinam influenciam em grande medida o custo, tempo e potencialidade do modelo.

2.2 - Modelos Digitais do Terreno

O conceito de modelos urbanos das cidades, como já foi referido anteriormente, é indissociável do conceito de modelo representativo da superfície do terreno da área em causa – modelo digital do terreno (MDT), que é uma importante fonte de dados espaciais para a análise de fenómenos em SIG [Binh, 2007].

Um MDT é uma representação digital da topografia de uma determinada área da superfície terrestre [Weibel e Heller, 1991]. É caracterizado por ser um modelo numérico, definido por um conjunto de pontos planimétricos XYZ, que, por meio de interpolação, representa a forma e o relevo da superfície terrestre através da distribuição espacial da altitude do terreno [Weibel, 1997].

Os dados para a construção deste tipo de modelos, podem ser adquiridos por métodos mais clássicos, como o levantamento topográfico, a restituição fotogramétrica ou a digitalização de cartas e posterior vectorização. Aproximadamente meio século após o surgimento do conceito de modelo digital do terreno, este tipo de informação foi recebendo uma crescente atenção relativamente ao desenvolvimento de métodos de aquisição de dados [Binh, 2007], que se foram tornando tendencialmente mais automáticos, mais rápidos e com melhor resolução, como por exemplo o varrimento por laser aéreo (LiDAR).

O LiDAR (Light Detection and Ranging) aéreo apresenta-se como uma tecnologia relativamente recente para a obtenção de modelos digitais da superfície (MDS) que descrevem todos os elementos característicos da superfície terrestre natural e construída, como o terreno, coberto vegetal e objectos construídos. É um sistema activo de detecção remota, montado num avião ou helicóptero, que emite um feixe de raios laser para detectar e fazer o levantamento tridimensional da informação de cotas, sob a forma de nuvem de pontos coordenados, da superfície terrestre [Liu e Zhang, 2009]. Esta tecnologia possibilita a recolha de dados directa, durante o dia ou de noite, com uma grande densidade e precisão de pontos [Elaksher e Bethel, 2002], de forma rápida, e a custos mais baixos (eficácia/custo), comparativamente aos métodos clássicos [Zhou e Neumann, 2008] e com a vantagem de conseguir detectar alguns pontos que se encontram em oclusão, isto é, o sistema consegue captar pontos terreno ou de telhados que se encontrem obstruídos por vegetação.

O varrimento aéreo LiDAR utiliza um sistema para a emissão do feixe de raios laser, e um sistema computacional que permite medir a distância entre o ponto de emissão do raio emitido (posição do meio aéreo) e o seu eco, com uma densidade de pontos que pode variar entre 1 ponto por metro² e 40 pontos por m². Também recorre a sistemas de posicionamento DGPS/INS, que permitem não só obter informações sobre o posicionamento diferencial global do meio aéreo utilizado, como também a sua direcção, velocidade e ângulos de atitude (Yaw, Pitch, Roll), permitindo obter as coordenadas do ponto levantado [Antollin Sánchez e Brovelli, 2007]. Desta forma é possível obter medidas concretas de precisão – 15 cm de precisão vertical, 30 cm de precisão horizontal [Antollin Sánchez e Brovelli, 2007].

Actualmente os dados recolhidos a partir deste método de aquisição são utilizados para a construção de MDT e para a modelação semi-automática de edifícios tridimensionais, após processamento e edição de informação de ruído, em falta ou redundante [Bodum *et al*, 2006].

Existem diversas metodologias para o processamento da nuvem de pontos e a geração de um MDT, tal como descritas por Feng *et al* [2009], que no geral têm como objectivos a identificação e extracção de objectos não classificados como terreno, como é o caso do coberto vegetal e estruturas artificiais [Antollin Sánchez e Brovelli, 2007].

Sithole e Vosselmann [2004] defendem que a filtragem de dados LiDAR em zonas urbanas ainda se impõe como um grande desafio. Após o estudo elaborado pelos autores, onde foram comparados oito tipos de métodos de classificação, concluiu-se que nenhum dos métodos apresenta resultados óptimos, mas todos apresentam resultados satisfatórios em áreas de estudo menos complexas, caracterizadas por terrenos pouco declivosos, pequenos edifícios e vegetação espaçada, e todos apresentam erros em zonas mais urbanizadas, com maiores declives e vegetação densa. Não existindo portanto nenhuma abordagem comum que possa ser adoptada e que garanta resultados a 100% fiáveis, sendo que alguns dos filtros têm tendência para provocar “over-filtering”, tornando a superfície demasiado artificial e filtrada [Wang e Tseng, 2010]. Este foi um dos condicionantes que levou ao desenvolvimento e proposta de uma nova metodologia para a filtragem dos dados originais, que será abordada no capítulo 3.

2.3 - Aplicações dos Modelos Urbanos Tridimensionais

As cidades virtuais, até ao presente, têm sido essencialmente vocacionadas para a visualização, dando particular ênfase à semelhança dos modelos com a realidade [Bodum *et al*, 2006] e pouca utilidade real.

Os modelos tridimensionais têm aplicações que vão para além da visualização, podendo ser utilizados para estudar o impacto que a construção de um novo edifício tem no seu perímetro circundante através de realidade virtual, cadastro, alterações da configuração das cidades ao longo do tempo [Stoter *et al*, 2011], estudos ambientais como a propagação de ruído, cheias, planeamento de emergência e realidade aumentada [Kolbe, 2009].

Generalizando, as aplicações dos modelos tridimensionais podem ser organizadas em três categorias bastante abrangentes:

- Planeamento de Emergência

No caso do planeamento de emergência, este tipo de informação permite, segundo Kolbe *et al* [2005], uma visualização tridimensional para localização e orientação no exterior ou dentro de um edifício; a sobreposição com recurso à realidade aumentada de perigos que não se encontram visíveis, como por exemplo condutas de gás num prédio a arder; simulação de cenários para treino de profissionais; simulação de desastres naturais, avaliação da extensão dos danos existentes após a sua ocorrência e uma vez que as características dos edifícios se encontram guardadas, estes dados podem ser utilizados como auxiliares na sua reconstrução.

- Arquitectura/Planeamento Urbano de Infra-estruturas e Serviços

Para a arquitectura, os modelos tridimensionais podem ser úteis para dar resposta a problemas de localização para novas construções, permitindo analisar de que forma uma nova construção se insere numa determinada paisagem urbana, e de que modo essa nova estrutura se relaciona com o ambiente circundante considerando as sombras e a oclusão que irá provocar aos edifícios envolventes [Shiode, 2001].

Relativamente ao planeamento urbano, pode tomar-se como exemplo a utilização de informação sobre condutas subterrâneas (água, gás) modeladas a três dimensões, para o planeamento da construção de um novo túnel de metropolitano

[Uchôa *et al*, 2006]. Este é um exemplo que demonstra as limitações da informação bidimensional, uma vez que é necessário ter informação sobre o volume das condutas de modo a evitar acidentes durante a construção dos túneis. A modelação tridimensional das condutas e a realização de operações de análise espacial facilitaria todo o processo de planeamento do novo traçado.

A poluição sonora é outro fenómeno a ter em conta no planeamento urbano. É comum fazer-se a modelação do fenómeno da propagação do ruído sonoro a duas dimensões, contudo, quando estamos perante um meio muito urbanizado, é importante ter em consideração que existem obstáculos que provocam um efeito de barreira à propagação do som, e que no caso concreto de um edifício, nem todas as fachadas estão sujeitas aos mesmos níveis de decibéis [Stoter *et al*, 2008].

- Turismo

Actualmente, os modelos urbanos tridimensionais são particularmente usados para visualização. Podem encontrar-se na internet para promoção turística de cidades e em museus para melhor compreensão de um determinado local. No Museu da Cidade de Lisboa, existe um modelo tridimensional virtual que demonstra como seria a cidade antes de esta ser destruída pelo fatídico terramoto de 1755.

2.4 - Os Modelos Tridimensionais em Portugal

Em Portugal, observando os edifícios que se encontram modelados no Google Earth, denota-se algum interesse por parte de entusiastas anónimos do 3D e algumas empresas que se dedicam a esta área. Praticamente toda a cidade de Lisboa se encontra modelada, tal como se pode verificar na Figura 3.

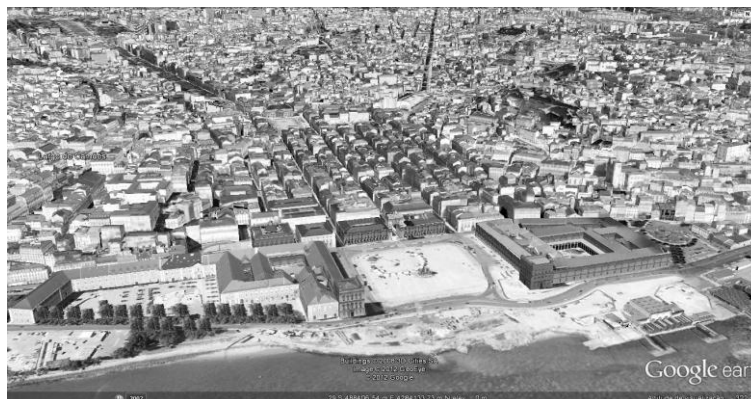


Figura 3 – Modelos tridimensionais de edifícios da cidade de Lisboa [Google Earth].

Na literatura encontram-se aplicações dos modelos tridimensionais, com ênfase na visualização, aplicados à arqueologia [Rua e Alvito, 2011]. Neste exemplo, os modelos são utilizados para reconstruir locais onde foram feitas escavações arqueológicas e simular as diferentes teorias acerca das ruínas encontradas na aldeia de Casal de Freiria (Figura 4).



Figura 4 – Simulação tridimensional das ruínas da vila Romana de Casal de Freiria [Rua e Alvito, 2011].

A modelação do local permite construir/modelar diferentes cenários hipotéticos de uma forma mais rápida, a três dimensões para melhor análise facilitando a discussão e partilha da informação entre especialistas. Os autores afirmam mesmo que *“os modelos 3D são mais que um meio para a visualização, são fundamentais para pesquisa arqueológica e uma nova maneira de olhar para a história”*.

2.5 - Os Sistemas de Informação Geográfica e o 3D

Os SIG surgem retratados como a tecnologia a utilizar quando se aborda o tema do 3D pelo simples facto de além de possibilitarem a visualização, apresentarem um grande potencial para a análise espacial [Batty, 2000].

Könninger e Bartel, em 1998, escreveram sobre o que se esperava de um SIG com capacidades tridimensionais. Neste artigo, os autores colocam ênfase na necessidade criar alternativas às técnicas de planeamento usadas até então - mapas ou desenhos apoiados por modelos visuais 3D sob a forma de maquetes de cartão ou madeira, uma vez que para planear a visualização estas técnicas não são suficientes. Numa década em que os SIG apenas suportavam 2D e 2.5D, onde o CAD era usado para edição 3D mas com pouca capacidade para armazenamento de informação, o autor argumentou que para o estudo urbano, geometria dos objectos e respectivos atributos são essenciais e que os métodos de aquisição deste tipo de informação deviam ser resultantes de processos automáticos. Porém, a emergência desta tecnologia tem estado sempre condicionada pelos avanços da tecnologia computacional.

Um dos principais condicionantes à disseminação da utilização de informação tridimensional está relacionado com a limitada oferta de software de SIG 3D. *“Os verdadeiros SIG 3D devem permitir uma representação realista da terceira dimensão, uma movimentação livre do utilizador pelo ambiente 3D, funções normais de um sistema de informação geográfica como análise espacial, sobreposições e funções de análise de superfícies 3D”* [Faust (1995), traduzido de Brooks e Whalley, 2005]. Estas operações são particularmente complicadas de concretizar devido à grande quantidade de informação e complexidade dos modelos.

A necessidade de trabalhar em modelos tridimensionais tem vindo a sentir-se em vários campos da ciência, revelando uma mudança de rumo no que respeita aos sistemas de informação geográfica tradicionais e a duas dimensões [Takase *et al*, 2003], contudo este tipo de informação tem tido um progresso lento [Soter *et al*, 2011]. O tema recorrente associado a este tipo de informação é o *software*, e não é de todo consensual entre autores. Alguns argumentam que as tecnologias estão mais que desenvolvidas para tratar o 3D, faltando apenas *“know-how”* [Soter *et al*, 2011] enquanto outros defendem que no caso particular dos Sistemas de Informação Geográfica não existem funções

avançadas que permitam o processamento e análise espacial dos objectos tridimensionais [Scianna et al, 2006] existindo apenas avanço relativamente à geometria, sendo que os modelos se encontram em estado latente à espera de serem preenchidos com atributos [Batty, 2000].

2.6 - Casos de Estudo: Modelos Urbanos 3D aplicados ao estudo da Radiação Solar

Os SIG, não são a primeira escolha dos cientistas quando se pretende fazer uma análise do potencial fotovoltaico de uma determinada área urbana ou edifício. Na prática, e apesar de os modelos de radiação solar implementados nas ferramentas SIG serem usados com frequência para estudos ambientais, poucos estudos focam a utilização de softwares SIG para o estudo da radiação solar em áreas urbanas [Hofierka e Kanuk, 2009].

Hofierka e Kanuk [2009] apresentaram uma metodologia com o propósito de analisar o potencial fotovoltaico das áreas urbanas, com incidência apenas nos telhados dos edifícios da área de estudo, utilizando um modelo urbano tridimensional num SIG. O trabalho foi realizado em três etapas: criação do modelo urbano 3D; modelação da radiação solar espacialmente e temporalmente e o cálculo do potencial de produção de electricidade.

Carneiro *et al* [2010] foca-se na extracção de indicadores de qualidade ambiental urbana a partir da análise da radiação solar e morfologia em diferentes áreas urbanas. O trabalho incidiu sobre a análise da radiação solar nas fachadas e telhados dos edifícios. Com base em modelos de radiação solar, que permitem calcular a radiação directa e difusa, horária, para qualquer orientação e inclinação relativamente à superfície, foi possível avaliar as sombras provocadas pelas construções envolventes e a irradiação solar dos telhados e das fachadas dos edifícios. Posteriormente estes dados foram representados sob a forma de gráficos, a visualização das fachadas foi feita a duas dimensões e a informação sobre a irradiação dos telhados foi projectada tridimensionalmente.

Como foi referido, os SIG não são por defeito muito utilizados nas análises de radiação solar em áreas urbanas. Este tipo de avaliação é mais comum no ramo da arquitectura, para o qual existem diferentes ferramentas para uma análise/simulação mais dedicada e precisa do desempenho energético dos edifícios [Carneiro, Urban] em detrimento do estudo do potencial geral do meio urbano em que estes se inserem devido ao desafio que é analisar este tipo de dados a três dimensões.

Em ambos os casos de estudo apresentados, as fachadas ficaram em segundo plano, sendo que no primeiro caso foram totalmente ignoradas e remetidas para uma análise num projecto futuro, e no outro foram apenas utilizadas para o cálculo de um atributo comum a toda a fachada de um andar. O mesmo acontece com a análise do cadastro solar, onde é feita a exclusão das fachadas apesar do seu grande potencial [Lorenz e Döllner, 2010].

Por estas razões, e sabendo que as fachadas se apresentam como elementos de grande expressão [Lorenz e Döllner, 2010], foram levantadas algumas questões relacionadas com a análise da radiação solar em áreas urbanas e conseqüente potencial das fachadas.

- Como pode a informação sobre a radiação solar das fachadas ser representada?
- Serão os modelos tridimensionais dos edifícios a solução?
- Os SIG estão preparados para este tipo de análise?

Capítulo 3 – Metodologia

3.1 – Caracterização da Área de Estudo

3.2 – Informação Geográfica Utilizada

3.3 – Modelação Tridimensional dos Edifícios da Área de Estudo

3.4 – Derivação do Modelo Digital do Terreno a partir de dados LiDAR

3.4.1– Teste de metodologia para a derivação do MDT

3.4.2 – Nova metodologia para a derivação de MDT

3.5 – Integração do Modelo Tridimensional Urbano em Software SIG

3.6 – Criação de Estrutura para Visualização e Análise dos Dados da Radiação Solar em Fachadas Tridimensionais

Capítulo 3 - Metodologia

3.1 - Caracterização da Área de Estudo

O maior potencial fotovoltaico pode ser encontrado em áreas caracterizadas por grandes edifícios, uma vez que no geral apresentam áreas significativas disponíveis quer nos telhados quer nas fachadas que podem apresentar um grande potencial de produção de energia por edifício [Hofierka e Kanuk, 2009].

Tendo em conta os dados disponíveis e o facto de ser caracterizado por edifícios com dimensões satisfatórias para o problema em causa, foi escolhida como área de estudo o Campus da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (FCUL) e as suas envolventes imediatas (Figura 5).

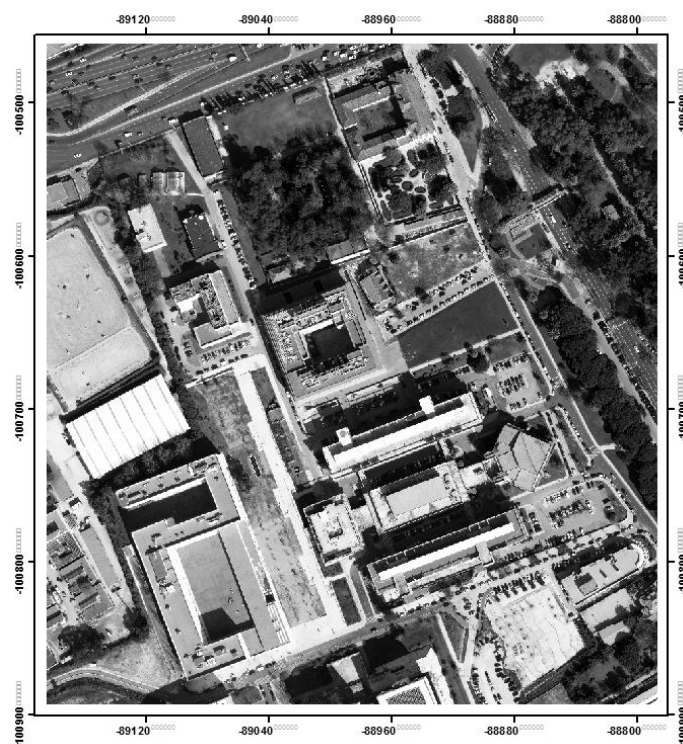


Figura 5 – Fotografia aérea da área de estudo (ETRS89 TM06 Portugal).

A área de estudo tem aproximadamente 183 000 m², pelos quais se dispersam, além dos oito edifícios da FCUL, três institutos de investigação, o edifício da Junta de Freguesia do Campo Grande e o Museu da Cidade de Lisboa.

As estruturas com maior ênfase na análise são edifícios onde se desenvolvem as principais actividades da FCUL. Estes são propriedade pública e foram construídos entre 1982 e 2002 [Universidade de Lisboa]. São edifícios atípicos, de planta bastante irregular (Figura 6) e alguns são caracterizados por estruturas complexas, como é o caso do edifício C8 (Figura 7), galardoado com o prémio Valmor em 2002.

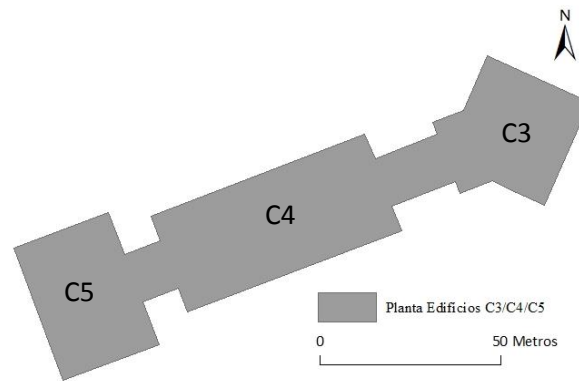


Figura 6 – Pegada dos Edifícios C3, C4 e C5.



Figura 7 – Pormenor das estruturas de betão das fachadas do edifício C8.

3.2 - Informação Geográfica Utilizada

Os dados de partida para este trabalho foram:

- Fotografias aéreas – Propriedade da Universidade de Lisboa, as fotografias aéreas utilizadas são o produto de um levantamento fotográfico feito pela empresa Municipia em 2010, e foram obtidas com uma câmara DMC da Zeiss-Intergraph com 120 mm de constante a uma escala de 1:8000.
- LiDAR – Levantamento laser feito pela empresa LOGICA em 2006 a bordo de um helicóptero. O levantamento foi feito com uma densidade de 20 pontos por m². Os dados apresentam uma precisão horizontal de 50 cm e 15 cm de precisão vertical e encontram-se reamostrados num raster com células de 1mx1m.
- Polígonos 2D das pegadas dos edifícios – Informação estereorestituída por Rita Matildes a partir das fotografias aéreas.

Para a modelação tridimensional dos edifícios e tendo em consideração o nível de detalhe definido à partida, foi necessário fotografar todo o campus de modo a obter imagens que pudessem servir de textura aos modelos e permitissem extrair as medidas dos detalhes das fachadas. Nos casos onde foi impossível fotografar devido ao ângulo posicional e proximidade entre edifícios, recorreu-se a imagens aéreas com um ângulo oblíquo de 45° relativamente ao plano (Bird's Eye), que facilitam a visualização das fachadas, extraídas do Bing Maps.

3.3 - Modelação Tridimensional dos Edifícios

O ponto de partida desta dissertação foi a conceptualização de um modelo tridimensional, no qual fosse possível armazenar informação individual em fachadas (Figura 8). Estas fachadas seriam definidas por células de um tamanho definido de 1mx1m, às quais seriam associados atributos relativos à radiação solar calculados para essa localização permitindo posteriormente uma análise espacial em elementos tridimensionais.

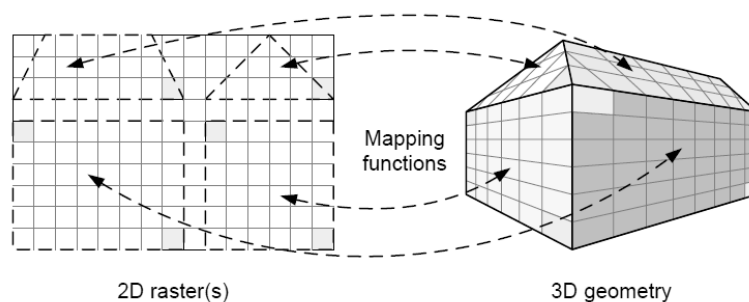


Figura 8 – Conceptualização do modelo tridimensional [Lorenz e Döllner, 2010]

Após alguma pesquisa sobre o assunto verificou-se que a temática da modelação tridimensional é praticamente indissociável de um formato aberto, baseado em XML, particularmente dedicado à criação, armazenamento e partilha de modelos 3D – o CityGML [Lorenzini, 2009]. Este formato, cujas especificações foram lançadas pela primeira vez em Agosto de 2008 pelo Open Geospatial Consortium (OGC), apresenta-se como um modelo de informação, orientado para a representação de geometria e topologia associadas a informação semântica [Scianna *et al*, 2006] com o objectivo de permitir uma definição comum das partes constituintes de um modelo tridimensional (entidades básicas, atributos, relações topológicas) [Lorenzini, 2009]. Perante estes factos, pensou-se que seria possível, modelar as fachadas dos edifícios com atributos para executar a conceptualização inicial.

Assim, a hipótese de exportar os modelos para o formato CityGML, condicionou a escolha do software de modelação. Uma vez que a oferta é extensa, com bastantes programas de modelação pagos, gratuitos e alguns em código aberto, foi escolhido o Google SketchUp (SU, agora chamado Trimble SketchUp), por ser altamente intuitivo e permitir a instalação de *plugins* com a capacidade de exportar os modelos para CityGML.

Os modelos foram então construídos, utilizando a abordagem mais interactiva e tradicional, partindo das pegadas dos edifícios previamente restituídas. Deste modo, as alturas de cada edifício foram obtidas estereoscopicamente a partir de fotografias aéreas, e utilizadas para extrudir as pegadas dos mesmos para a forma de bloco. Posteriormente foram adicionados os detalhes das fachadas, como por exemplo janelas e varandas a partir de fotografias obtidas no levantamento fotográfico da área de estudo (Figura 9),

ou como aconteceu em algumas situações, quando o ângulo não permitia fotografar foram utilizadas as imagens aéreas oblíquas retiradas do Bing Maps.

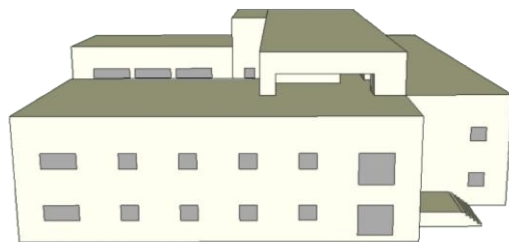


Figura 9 – a) Fotografia panorâmica do edifício do ICAT. b) Modelo tridimensional do mesmo edifício.

Foram modelados todos os edifícios e estruturas de apoio que se encontram na área de estudo, perfazendo um total de dezanove (Figura 10) e exportados com alguns atributos standart (ano de construção, id, função) utilizando o plugin do CityGML para o SU (Figura 11), com um nível de detalhe (LoD) 3, que na literatura é classificado como um modelo arquitectónico detalhado [Kolbe, 2009].

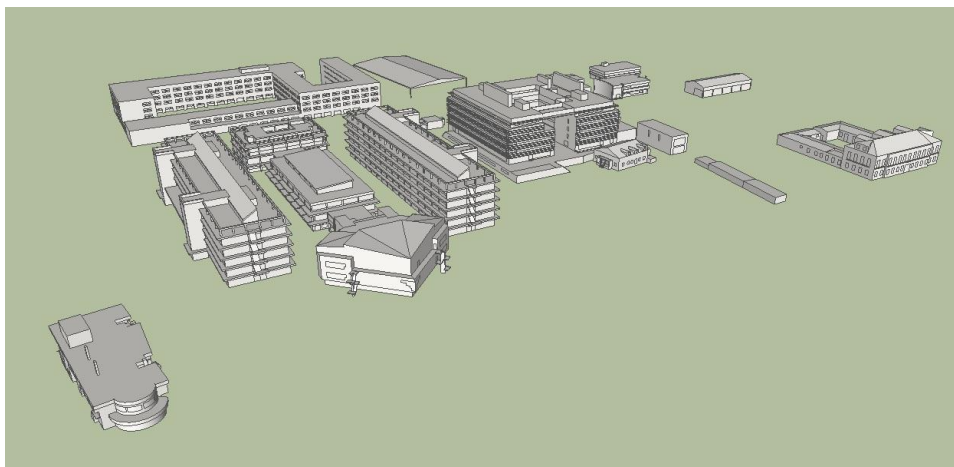


Figura 10 – Modelo tridimensional dos edifícios do Campus da FCUL.

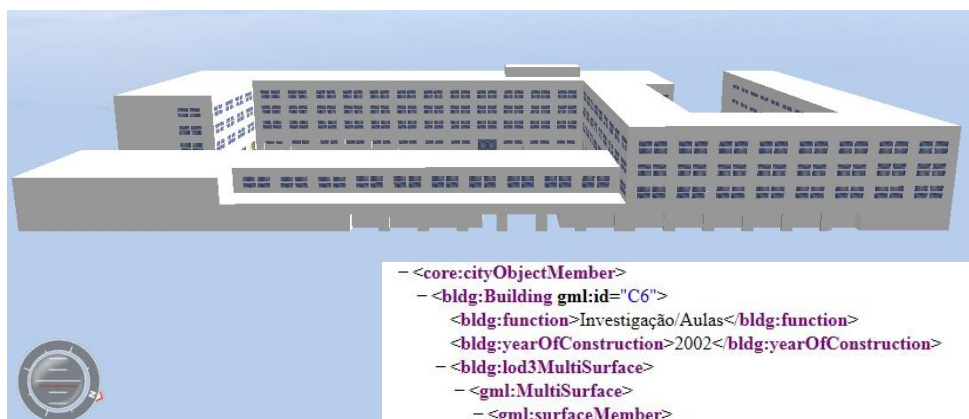


Figura 11 – Modelo tridimensional em formato CityGML do edifício C6.

Com os modelos dos edifícios em CityGML é possível fazer pesquisas aos seus atributos, permitindo seleccionar os objectos que com determinadas características. Na Figura 12, foi realizada uma selecção do edifício do Campus da FCUL com a função de cantina.



Figura 12 – Pesquisa de atributos, em CityGML, do modelo tridimensional dos edifícios.

3.4 - Derivação do Modelo Digital do Terreno

A derivação do MDT a partir dos dados LiDAR surgiu da necessidade de ter uma base onde sobrepôr os modelos tridimensionais dos edifícios, servindo essencialmente para visualização. O facto é que tendo acesso a dados LiDAR de alta resolução e grande precisão, não fazia sentido recorrer a MDT com resoluções espaciais

entre 30 e 90 metros, que numa área de estudo tão localizada causam uma grande perda de detalhe ao nível do terreno, sendo portanto necessário encontrar alternativas e um modo eficaz de filtrar e remover os edifícios dos dados.

3.4.1 - Teste de metodologias existentes para a derivação do MDT

Ao analisar as metodologias descritas na literatura, concluiu-se que este tema é bastante divergente, com propostas de diferentes métodos para a filtragem dos dados. Existem algumas ferramentas dedicadas gratuitas e pagas mas também software SIG com capacidade de filtrar os dados LiDAR, quando estes se encontram em formato .LAS.

O facto de os dados primários LiDAR cedidos para o desenvolvimento deste trabalho já se encontrarem reamostrados e num formato diferente, implicou a perda da informação original do LiDAR (raw data) que estas aplicações utilizam para fazer a filtragem. Desta forma o processo de remoção de objectos do terreno ficou condicionado em termos de metodologia.

Assim, optou-se inicialmente por utilizar um filtro morfológico para extrair os objectos pretendidos dos dados. Segundo Zhang K. *et al* [2003], as duas operações fundamentais dos filtros morfológicos são a erosão e a dilatação, usadas para aumentar ou reduzir um determinado objecto de uma imagem. A combinação destes dois tipos de filtros resulta em operações de abertura ou fecho, que podem ser utilizadas para remover os objectos ou restaura-los, utilizando um elemento estruturante “que define o tamanho e a forma da vizinhança” [Morais e Vieira, 2006]. Um elemento estruturante pode ter diversas formas e tamanhos com parâmetros que podem ser ajustados conforme as necessidades.

Para a filtragem dos dados primários da área de estudo (Figura 13), optou-se por testar a aplicação de uma operação de abertura que utiliza uma sequência de filtros morfológicos de erosão e dilatação [Morais e Vieira, 2006].

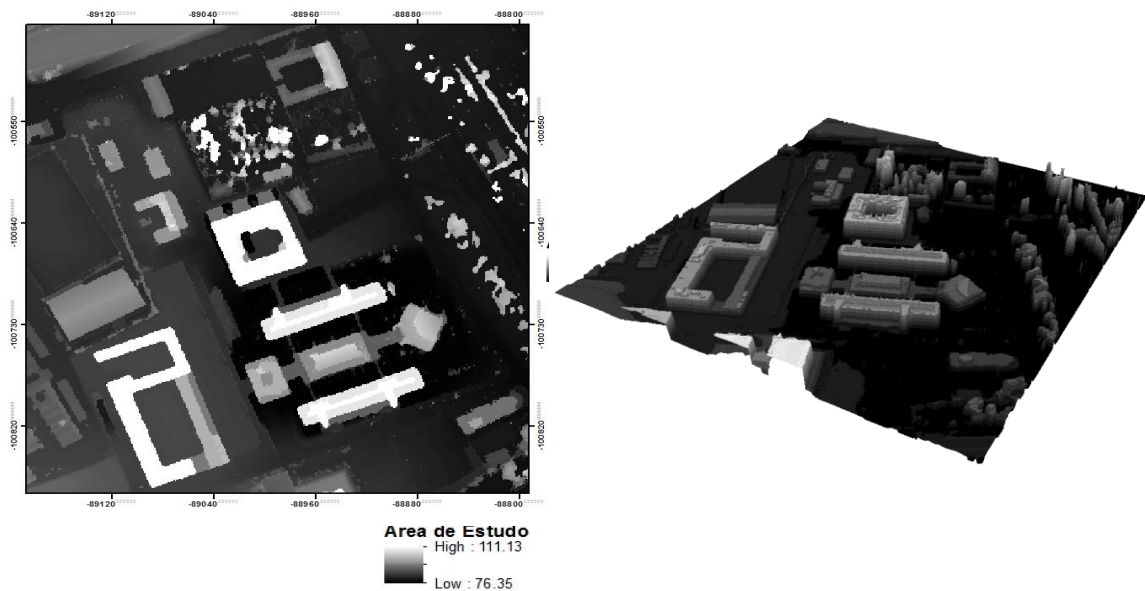


Figura 13 – MDS da área de estudo, proveniente de dados LiDAR.

Foram testados diferentes elementos estruturantes para verificar qual seria o mais adequado para a remoção dos edifícios, concluindo-se que dois elementos estruturantes com a forma de linha originavam melhores resultados. Os elementos actuaram na imagem a ângulos de 10° e 100° , no sentido contrário aos ponteiros do relógio a partir do eixo horizontal.

Os resultados não foram os desejados, uma vez que em alguns locais verificou-se um excesso de filtragem, que removeu elementos que não são edifícios, causando grandes alterações aos valores terreno, enquanto noutros não eliminou na totalidade objectos.

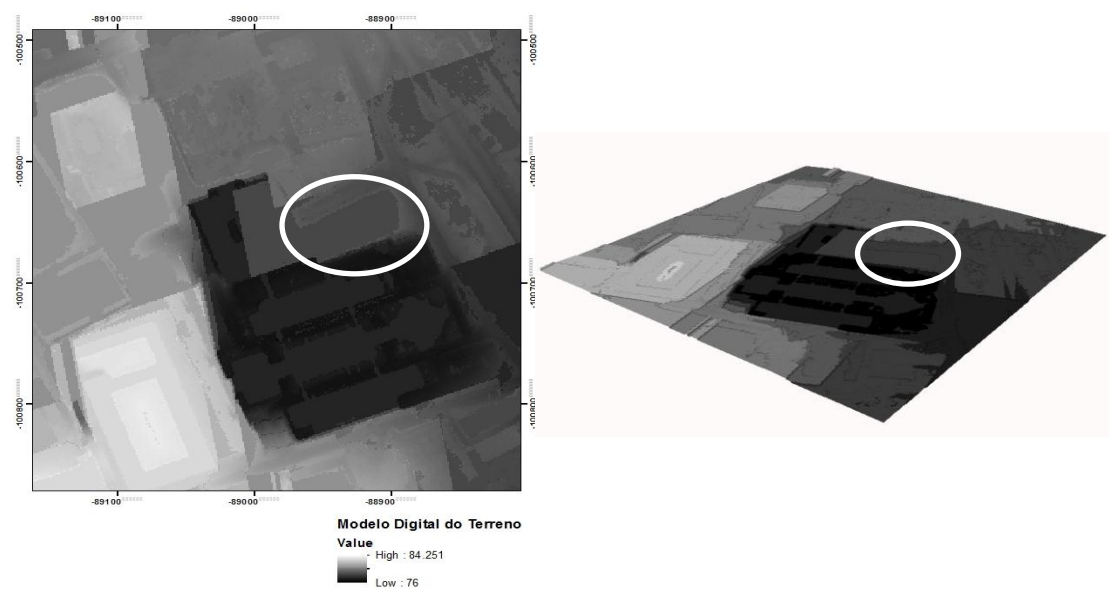


Figura 14 – MDT resultante da aplicação de filtros morfológicos.

Ao analisar a Figura 14, pode verificar-se o exemplo mais pertinente de excesso de filtragem, que ocorreu no jardim que se localiza em frente ao edifício C8 (assinalado a branco). Originalmente, este jardim tem uma configuração ligeiramente diagonal, relativamente ao plano horizontal (Figura 15), e apresenta no seu ponto mais elevado, a Sudoeste, cotas de aproximadamente 80 metros que decrescem de forma suave para Noroeste, até atingirem aproximadamente uma cota de 78 metros. Este elemento tornou-se plano, praticamente à cota da estrada (78 metros) que passa imediatamente ao lado.

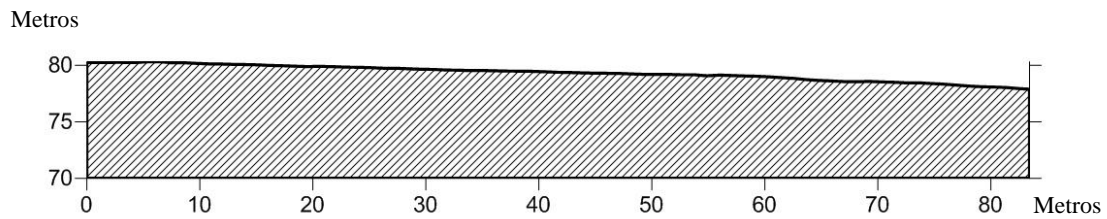


Figura 15 – Perfil original do jardim a Este do Edifício C8.

A zona central do Campus revelou-se ser a mais complexa em termos de filtragem, uma vez também as pegadas correspondentes aos edifícios C1, C2, C3, C4, C5 e pontes de acesso aos mesmos não foram totalmente removidas, assim como algumas viaturas que se encontravam nos parques de estacionamento, na altura do levantamento LiDAR (Figura 16).

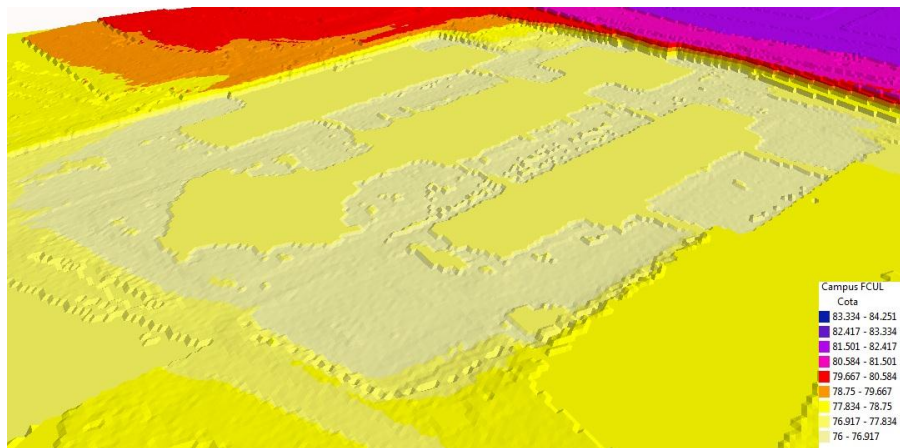


Figura 16 – Pormenor do MDT resultante da aplicação de filtros morfológicos.

Estes resultados, considerados pouco aceitáveis conduziram à decisão de desenvolver uma nova abordagem, que se pode incluir na categoria de filtros baseados em superfícies [Feng *et al*, 2003]

3.4.2 – Nova Metodologia para a Derivação do MDT

Numa tentativa de ultrapassar as dificuldades sentidas anteriormente, foi definida uma nova metodologia de derivação de MDT a partir de dados provenientes de um levantamento LiDAR, aplicada em três áreas de teste distintas relativamente ao seu tamanho, ocupação de solo e declives (Figura 17). Os primeiros resultados desta metodologia, que entretanto foi ajustada e simplificada, foram apresentados na conferência AGILE 2012 e encontram-se descritos por Catita *et al* [2012].

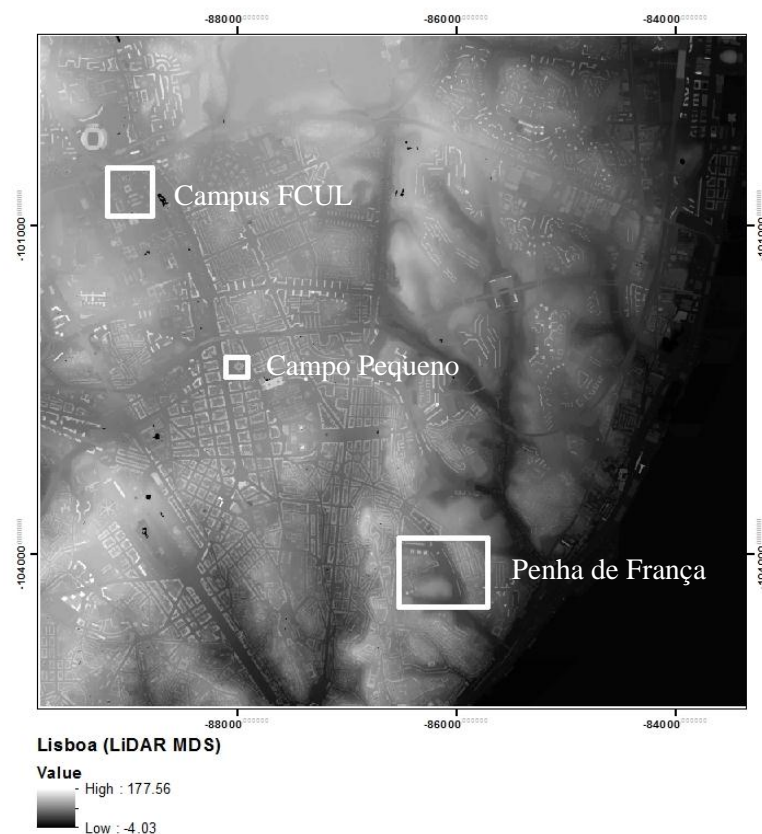


Figura 17 – MDS de Lisboa com a localização das três áreas de teste.

As etapas da metodologia de derivação do MDT podem ser esquematizadas da seguinte forma (Figura 18):

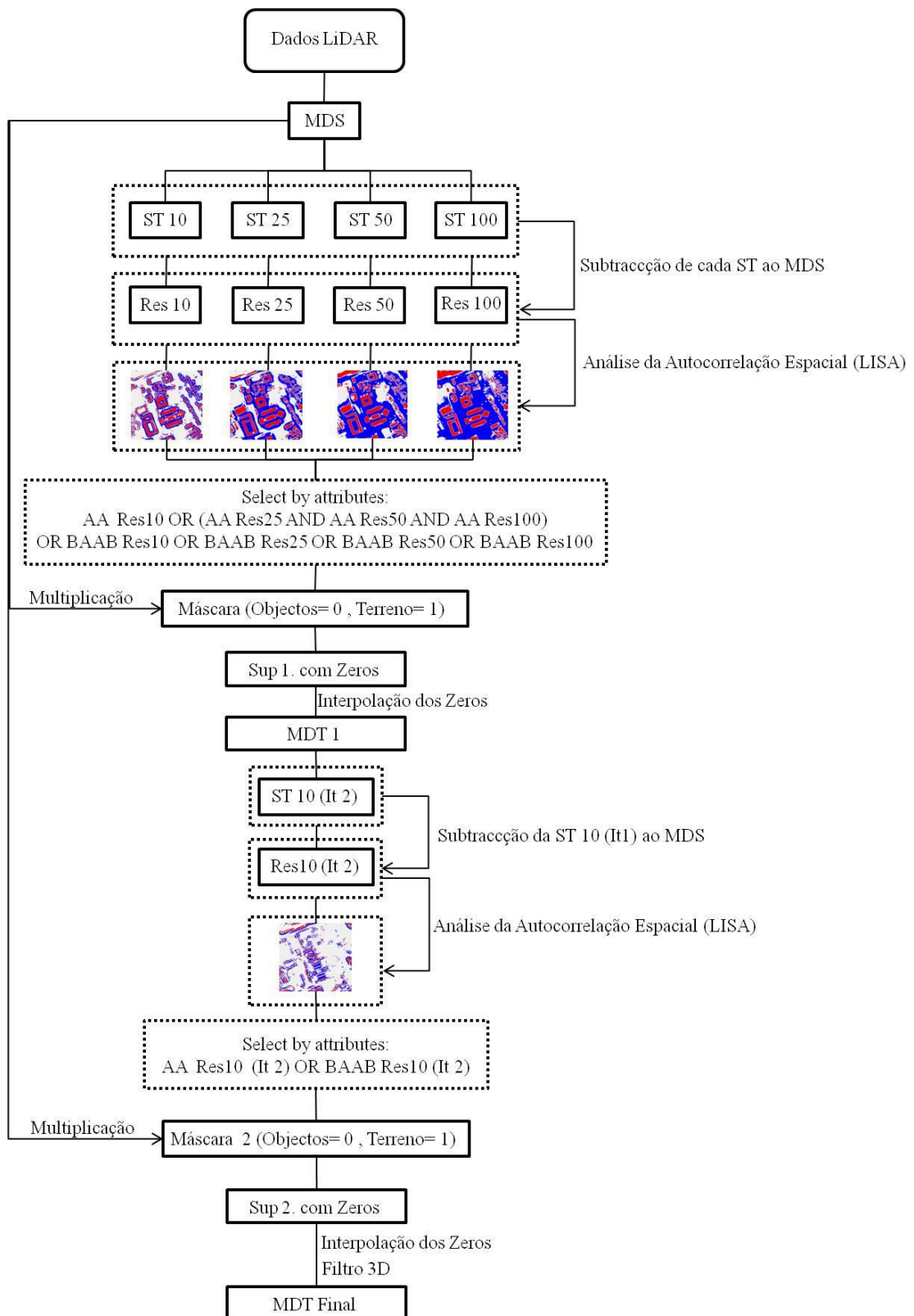


Figura 18 – Esquema da nova metodologia para a derivação de MDT a partir de dados LiDAR.

Esta metodologia utiliza superfícies de tendência (ST) derivadas da superfície original (MDS), para o cálculo de resíduos que são posteriormente analisados e classificados com base na sua associação espacial local, num processo iterativo.

As superfícies de tendência têm vindo a ser utilizadas desde 1955 com o objectivo de simplificar e analisar determinados dados sob a forma de mapa [Wren, 1973]. A partir destas superfícies é possível derivar dos dados originais dois tipos de informação essencial: informação regional, que traduz a tendência geral dos dados e informação residual, que resulta da diferença entre a superfície original e a sua superfície de tendência e expressa as alterações ou anomalias dos dados de uma forma mais detalhada ao nível local [Wren, 1973].

Partindo destes dados adquiridos, foi isolada uma área pequena de teste, correspondente à Praça de Touros do Campo Pequeno (Figura 19), à qual foi aplicada a nova metodologia.

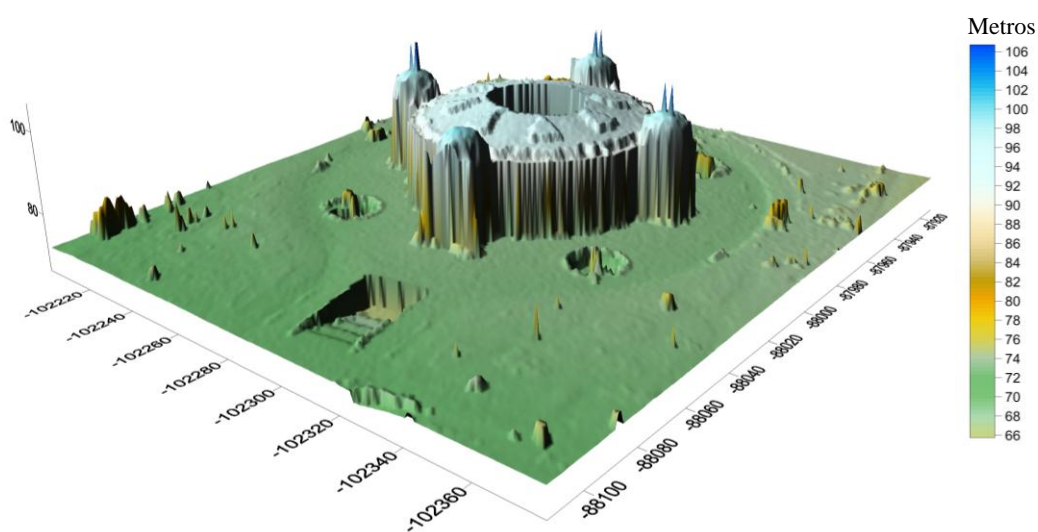


Figura 19 – MDS da Praça de Touros do Campo Pequeno.

Para a área em causa foram calculadas quatro superfícies de tendência, com diferentes raios de vizinhança, 10, 25, 50, 100. Assim, foram geradas quatro novas superfícies, cujos valores resultam do cálculo da média aritmética das cotas dos vizinhos que se encontram no raio definido.

Na figura 20, está representado o segmento de recta utilizado para definir a zona de perfil da superfície original e respectivas superfícies de tendência (Figura 21).

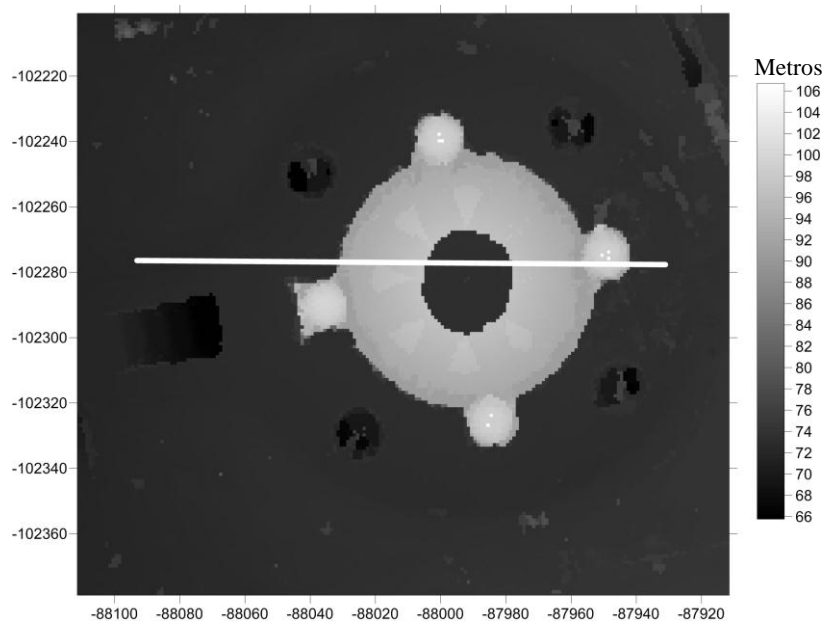


Figura 20 – Representação da zona de perfil.

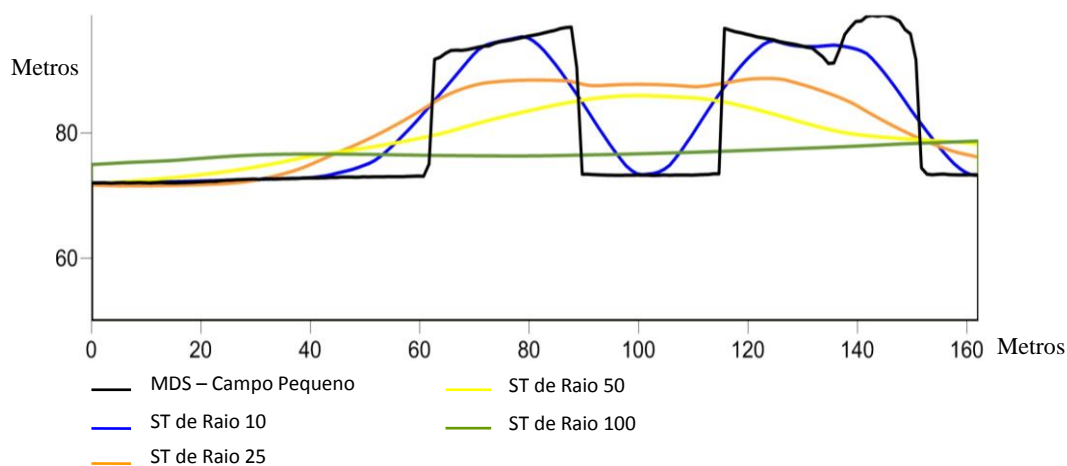


Figura 21 – Perfil do MDS e das diferentes ST.

Ao analisar os diferentes perfis, verifica-se que a ST com menor vizinhança descreve melhor a superfície real, como seria de esperar, uma vez que contempla os valores médios das cotas imediatamente mais próximas. Sendo que com o aumento do raio da vizinhança, estas superfícies passam a descrever de uma forma mais generalizada e menos realista a superfície em causa. O cálculo da diferença entre o MDS e cada uma das ST resulta na construção de uma nova camada de informação – informação residual. Os valores residuais de cada ST, que no caso da ST de raio 100,

são de uma forma geral ou positivos ou negativos, agrupando claramente os pontos relativos a objectos (aglomerados com vizinhança de pontos altos-altos) e os pontos relativos ao chão (aglomerados com vizinhança de pontos baixos-baixos), foram avaliados utilizando indicadores de associação espacial.

Os resíduos foram analisados utilizando indicadores locais de associações espaciais (LISA), a partir de uma matriz de pesos com 48 vizinhos, numa tentativa de encontrar padrões espaciais nos dados, particularmente padrões de aglomerado, a partir da análise da correlação espacial e autocorrelação da área em estudo. O facto de ser utilizado um indicador local possibilita a identificação de aglomerados em torno de uma localização individual ou a presença de valores extremos [Anselin, 1995].

Os resíduos são classificados em grupos de valores não significantes (classe 0, representada a branco), altos-altos (classe 1, representada a vermelho), baixos-baixos (classe 2, representada a azul), baixos-altos (classe 3, representada a azul-claro) e altos baixos (classe 4, representada a rosa) (Figura 22).

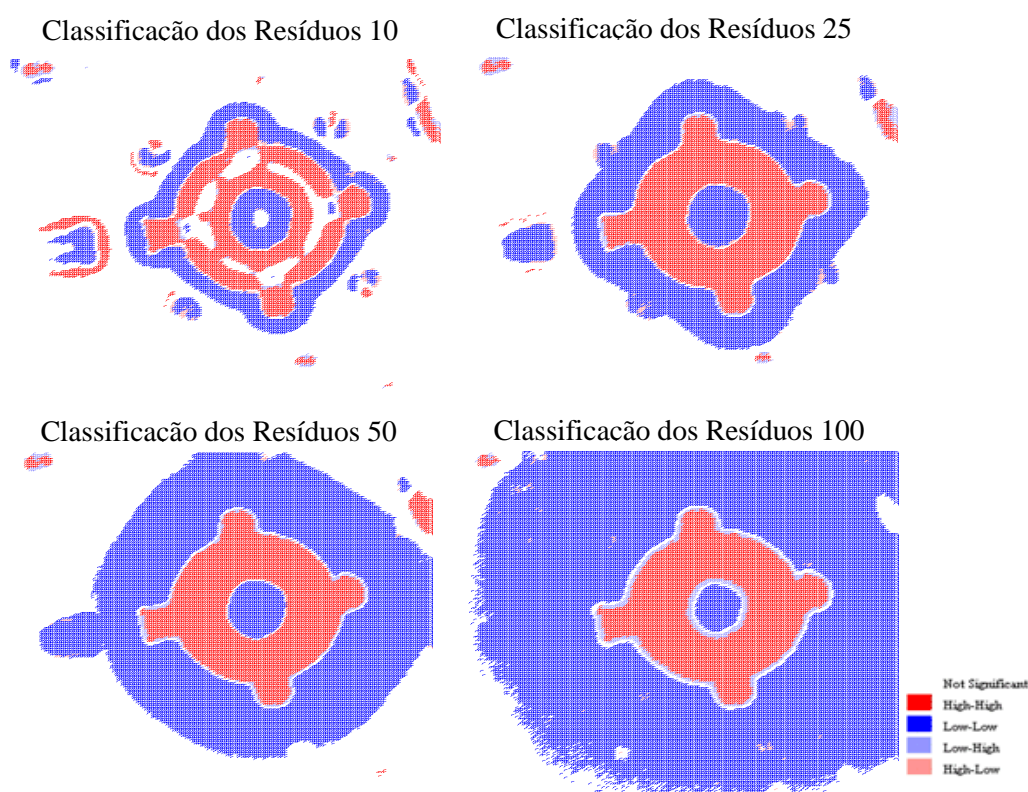


Figura 22 – Mapas com a classificação resultante da análise LISA das diferentes superfícies de resíduos.

Ao analisar os mapas da Figura 22, verifica-se que nos resíduos dos raios de 25, 50 e 100, a Praça de Touros foi perfeitamente identificada e classificada como um aglomerado de pontos altos-altos, sendo que os resíduos de raio 10, ajudaram a identificar melhor pontos extremos, referentes a entradas ao nível do chão, que dão acesso à zona comercial subterrânea, e que circundam o recinto.

Assim sendo e considerando que os pontos relevantes são os pontos pertencentes às classes 1, 3 e 4 de todas as superfícies residuais, e que as classes dos resíduos resultantes da ST de raio 10, apesar de não definirem aglomerados dos objectos na sua totalidade captam pontos extremos, foi necessário definir critérios relativamente ao modo de selecção e agrupamento dos aglomerados identificados. Deste modo foram seleccionados todos os pontos classificados como alto-altos dos resíduos de raio 10 em conjunto com os pontos altos-altos (AA) que se são comuns às três restantes superfícies e ainda todos os pontos classificados como baixos-altos (BA) e altos-baixos (AB) das quatro superfícies.

AA Res10 **OR** (AA Res25 **AND** AA Res50 **AND** AA Res100)

OR BAAB Res10 **OR** BAAB Res25 **OR** BAAB Res50 **OR** BAAB Res100

Os pontos seleccionados foram convertidos para um formato de grelha binário, onde os aglomerados altos-altos foram classificados com 0 e aglomerados baixo-baixos considerados terreno foram classificados com 1 (Figura 23) para através de uma simples operação de álgebra de mapas extrair os objectos do MDS.

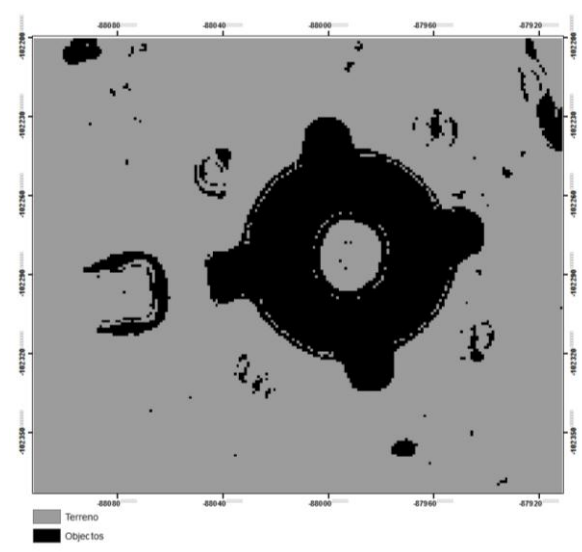


Figura 23 – Mapa binário para a remoção dos principais aglomerados do MDS.

O facto de ser uma área muito pequena e relativamente simples devido à ausência de declives acentuados e vegetação, fez com que fosse possível realizar todo o processo numa iteração, sendo apenas necessária após a remoção dos edifícios a interpolação das zonas removidas, e aplicação de um filtro 3D para a remoção de alguns valores extremos, resultando num modelo digital do terreno (Figura 24).

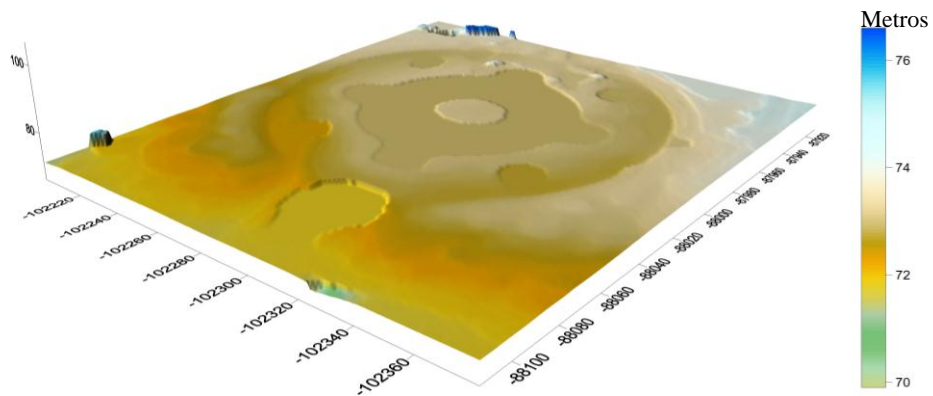


Figura 24 – MDT final da Praça de Touros do Campo Grande

Esta metodologia tem a vantagem de conservar todos os valores LiDAR em torno das áreas extraídas e interpoladas.

O mesmo processo foi aplicado à área de estudo do presente projecto, o Campus da FCUL (Figura 25).

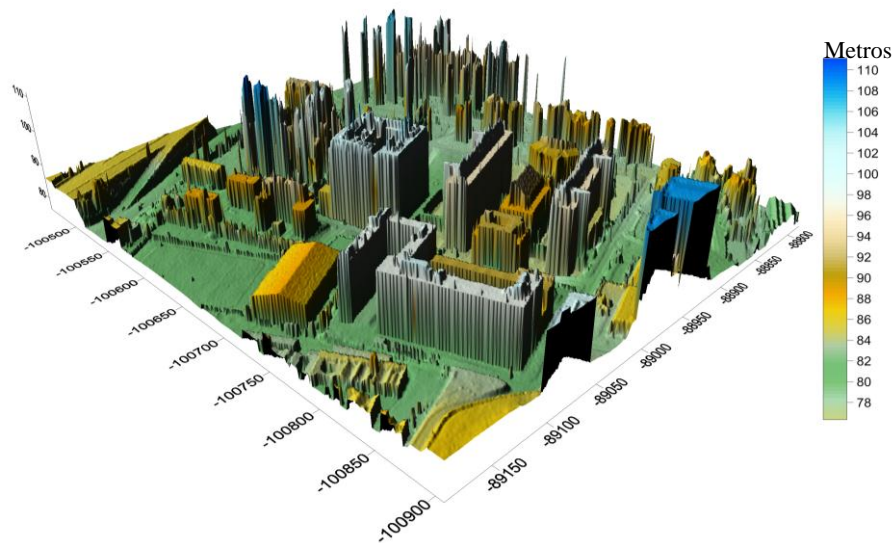


Figura 25 – MDS do Campus da FCUL

Neste caso, e reforçando a teoria de que em áreas mais complexas o processo necessita de ser iterativo, foram realizadas duas iterações. A primeira iteração foi aplicada do modo descrito anteriormente, resultando numa primeira superfície com menos objectos que a original. O facto de na primeira iteração terem sido extraídos grande parte dos aglomerados existentes na área, ficando apenas por remover pequenos aglomerados pontuais (árvores, “restos” de edifícios), que tendencialmente se encontram a uma cota mais baixa que os aglomerados removidos anteriormente e que na primeira análise de resíduos foram classificados como não significantes ou pontos baixos-baixos, obrigou a uma segunda iteração.

Esta segunda interação que surge da necessidade de remover pontos extremos e pequenos aglomerados, teve por base o cálculo de uma nova superfície de tendência de raio 10, a partir da qual foram calculados os resíduos da superfície resultante da primeira iteração, que foram analisados com o mesmo indicador local. Desta análise, foram extraídos todos os pontos classificados como altos-altos, baixos-altos, altos-baixos, convertidos para matriz binária e extraídos da superfície resultante da primeira iteração. Na figura 26, pode observar-se os objectos que foram removidos na primeira iteração (a verde) e os objectos removidos após a segunda iteração.

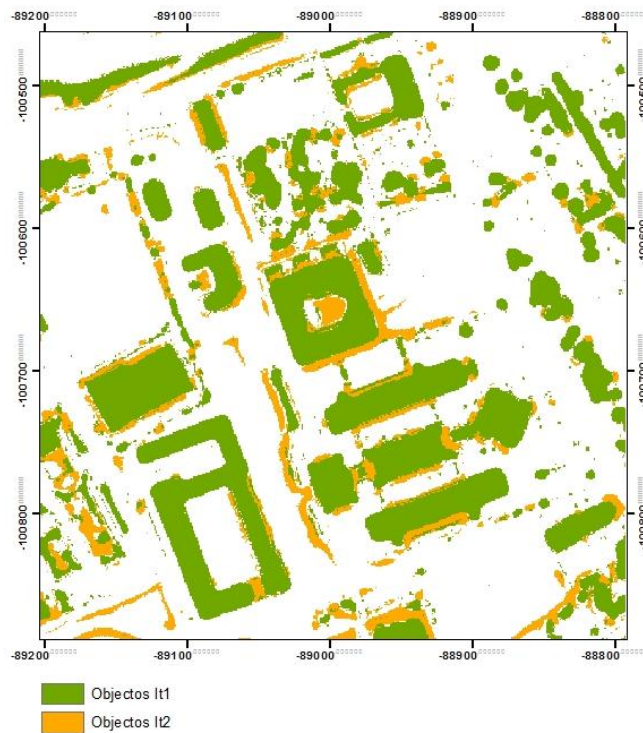


Figura 26 – Células classificadas como objectos na primeira (a verde) e segunda iteração (a cor-de-laranja).

A superfície final foi novamente sujeita a uma interpolação das áreas extraídas, feitas com recurso a ferramentas do *software* utilizadas na hidrologia, de maneira a criar um MDT sem depressões acentuadas resultantes da extracção de objectos. As zonas de aglomerados removidos foram preenchidas de modo uniforme com o valor mais baixo encontrado nas suas células limítrofes, criando terraços planos onde se vão colocar os edifícios modelados tridimensionalmente (Figura 27).

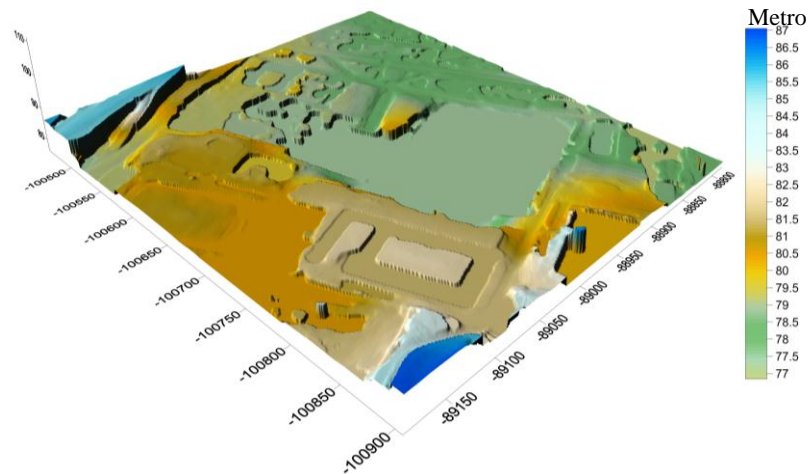


Figura 27 – MDT final do Campus da FCUL.

Após a aplicação do método à área de estudo principal, foi necessário testar o método numa área mais complexa. Para tal, foi isolada uma área situada entre a freguesia da Penha de França e São João, caracterizada por um terreno acidentado e com edificado denso em vertente (Figura 28).

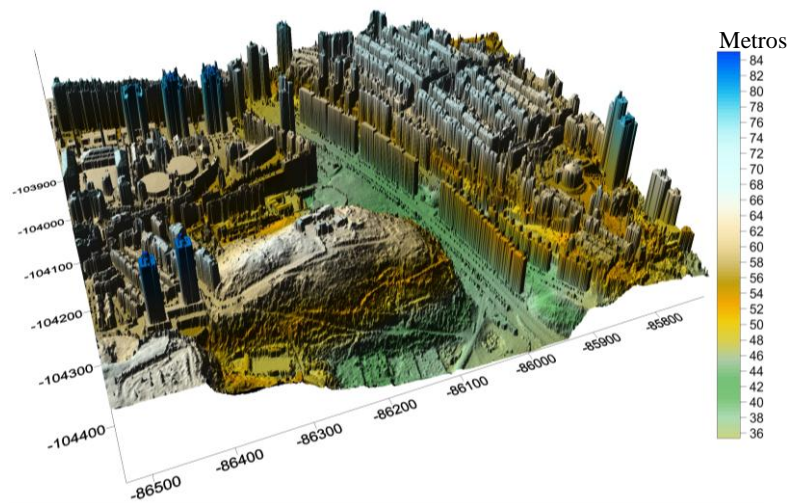


Figura 28 – MDS da Penha de França.

Após a primeira iteração completa da metodologia, grande parte dos objectos construídos foram removidos, contudo não o suficiente para justificar uma paragem (Figura 29).

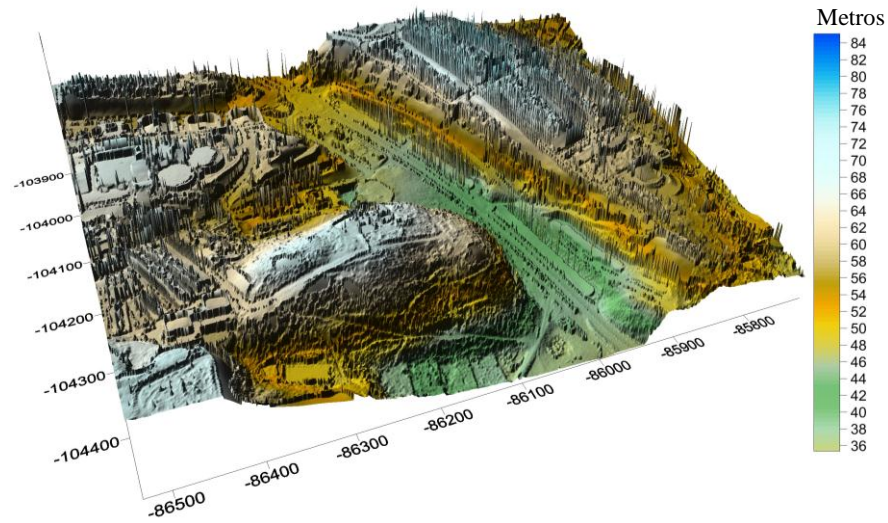


Figura 29 – Resultado da extracção dos objectos identificados na primeira iteração.

Foi necessário proceder a uma segunda iteração de modo a remover os restantes aglomerados que não haviam sido detectados. Após a segunda iteração os pontos extremos não captados pela análise foram removidos por um filtro 3D e as depressões interpoladas (Figura 30).

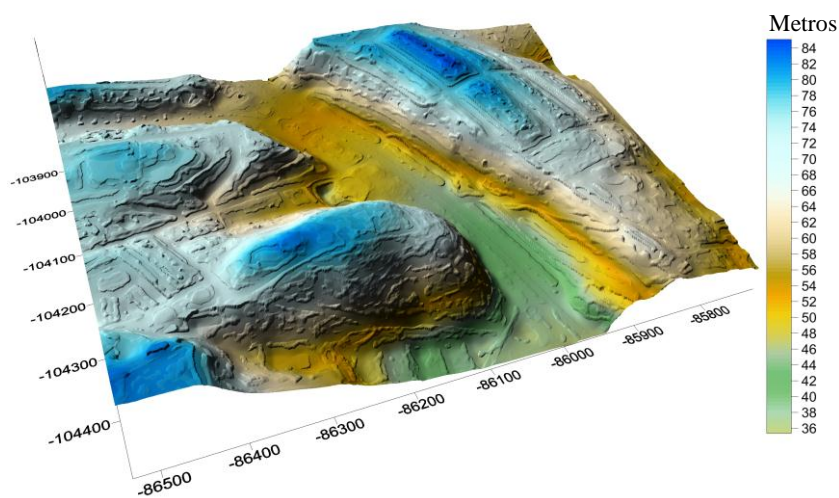


Figura 30 – MDT final da Penha de França.

No caso do terreno montanhoso a metodologia comporta-se relativamente bem, contudo a interpolação utilizada para criar terraços planos nos locais onde estavam os edifícios não funciona nas zonas de montanha, sendo necessário interpolar as depressões criadas pela remoção dos objectos com os valores da superfície de tendência de 25 para essa zona.

Tendo em conta o tipo de dados em causa e a análise a realizar aos mesmos, torna-se difícil definir um critério de paragem. Contudo e após sucessivos testes em diferentes áreas, conclui-se que duas iterações do processo são suficientes, a par com o filtro tridimensional adoptado, para eliminar os objectos e pontos extremos dos dados originais.

3.5 - Integração do Modelo Tridimensional Urbano em Software SIG

Após uma pesquisa detalhada e testes sobre como guardar os atributos da radiação solar nas células das fachadas em CityGML concluiu-se que tal seria impossível, devido à estrutura geométrica e topológica pré-estabelecida do formato, que apenas permite o reconhecimento de alguns atributos semânticos *standard* e genéricos relativos apenas ao edifício, impossibilitando o reconhecimento e pesquisa de outras entidades e atributos em termos de bases de dados. Como consequência, o foco da pesquisa alterou-se, centrando-se essencialmente em *softwares* SIG com capacidades tridimensionais. A oferta de programas de SIG tridimensionais não é particularmente extensa e grande parte das funcionalidades que vão para além da visualização estão restringidas a *software* comercial mais conhecido.

Assim, os modelos criados com o SketchUp foram exportados para Collada (.dae) importados para ambiente SIG como multipatch, georreferenciados para a área de estudo e integrados com o MDS (Figura 31).

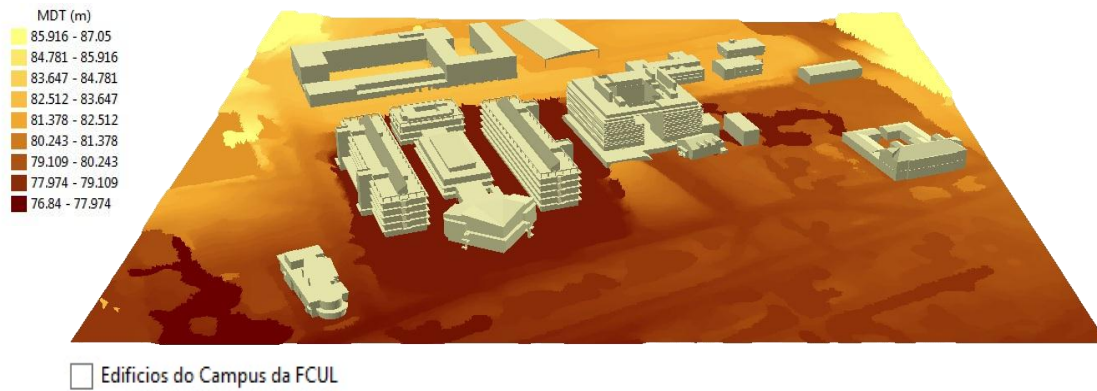


Figura 31 – Modelo Urbano Tridimensional do Campus da FCUL.

3.6 - Criação de Estrutura para Visualização e Análise dos Dados da Radiação Solar em Fachadas

Um dos requisitos para este projecto seria de que qualquer estrutura desenvolvida para visualização ou análise dos dados fosse capaz de receber dados de uma fonte externa. No caso concreto, os dados são relativos à radiação solar no Campus da FCUL, calculados a partir modelo solar desenvolvido na primeira fase do projecto. Os dados da radiação solar nas fachadas são calculados e guardados numa tabela que contem hiperpontos. Estes hiperpontos são pontos com coordenadas XYZ, com o Z a variar de metro a metro até à altura máxima da fachada de determinado edifício, em forma de tabela com diferentes atributos associados (Figura 32).

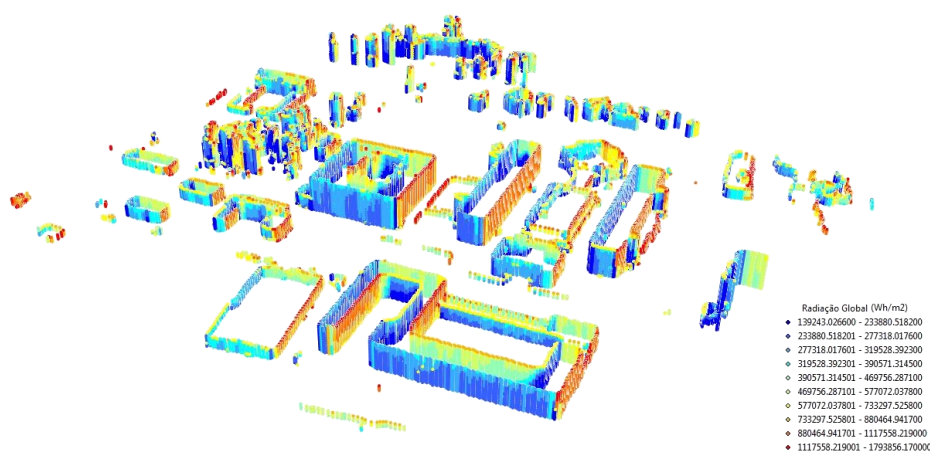


Figura 32 – Visualização dos Hiperpontos das Fachadas.

A definição das fachadas para a construção e cálculo dos atributos dos hiperpontos foi feita ao longo da primeira parte do projecto, e partiu do princípio de que todos os pixéis do MDS que se apresentam com um declive de 72° ou superior, são considerados fachadas. Isto faz com que na informação sobre os hiperpontos da radiação também apareçam árvores, uma vez que estas são tratadas como fachadas.

Para remover as manchas vegetais desta estrutura artificial, foi feita uma selecção tridimensional, a partir dos modelos dos edifícios. Para facilitar a explicação, e uma vez que o processo é o mesmo para toda a área, foi isolado o edifício que em termos estruturais, e devido ao facto de a maioria das suas fachadas serem planas, sem varandas nem outras estruturas mais complexas poderia hipoteticamente ser o mais apto a receber algum tipo de intervenção – o edifício C6 (Figura 33).

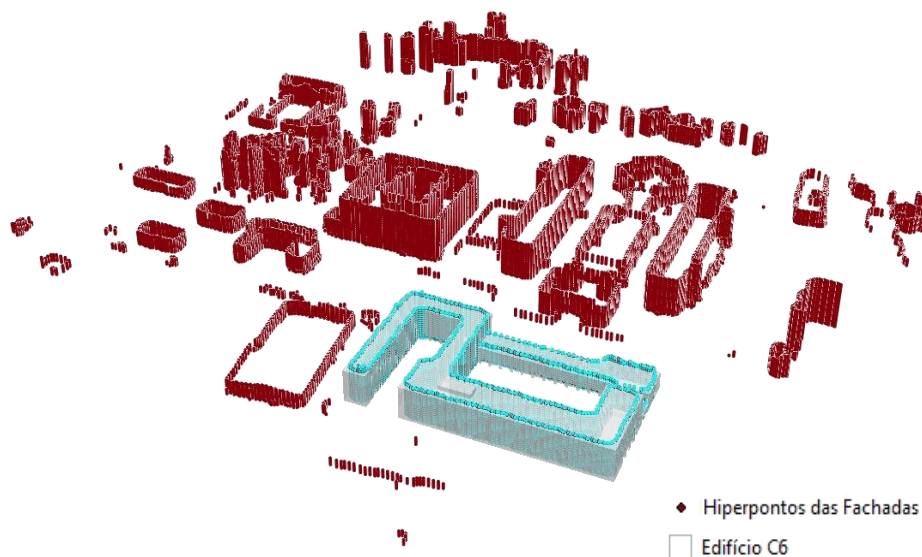


Figura 33 – Selecção dos hiperpontos que representam os edifícios C6.

Apesar da estrutura criada ser apelativa, não é regular. Isto pode criar problemas em termos análise e deve-se ao facto da reamostragem do levantamento LiDAR não ser uniforme principalmente nas zonas de fronteiras isoladas para a definição das fachadas. (Figura 34).

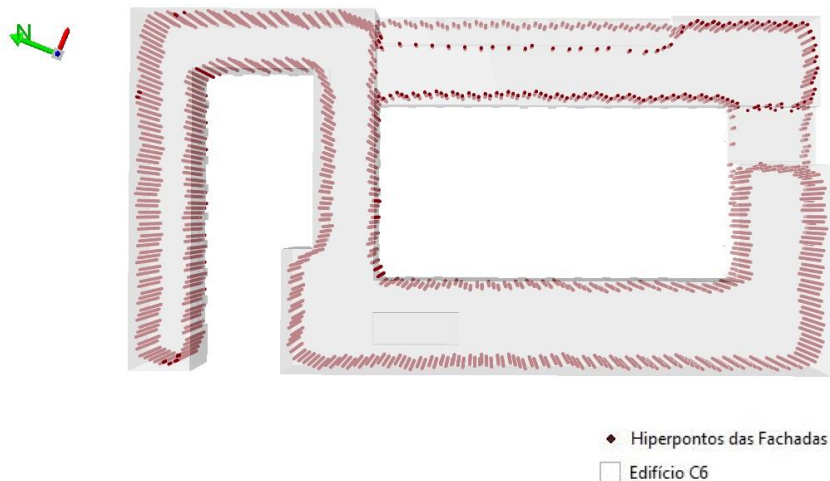


Figura 34 – Pormenor da distribuição dos hiperpontos ao longo das fachadas.

Para resolver esta situação, optou-se por definir uma estrutura regular de pontos, espaçados entre si em um metro. A simplificação dos hiperpontos numa estrutura regular, com pontos de metro a metro tem como objectivo permitir e facilitar o processo de análise dos dados. Para tal, utilizaram-se as pegadas dos modelos tridimensionais para gerar pontos com dispersão uniforme ao longo de cada linha, que representa uma fachada (Figura 35).

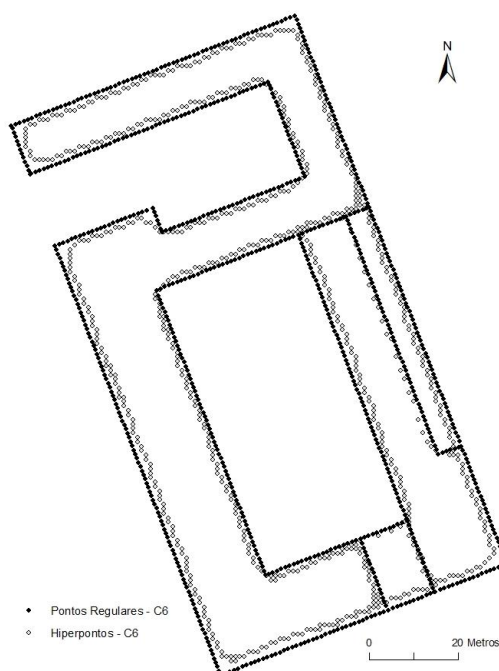


Figura 35 – Criação de estrutura de pontos regulares (a preto).

Esta nova estrutura recebeu toda a informação proveniente dos hiperpontos, incluindo informação relativa à cota de cada ponto que constitui a fachada, contendo portanto informação tridimensional. A estrutura final contendo pontos com informação sobre a radiação solar foi desviada um metro relativamente ao plano da fachada, para facilitar a visualização da informação em torno dos edifícios modelados (Figura 36).

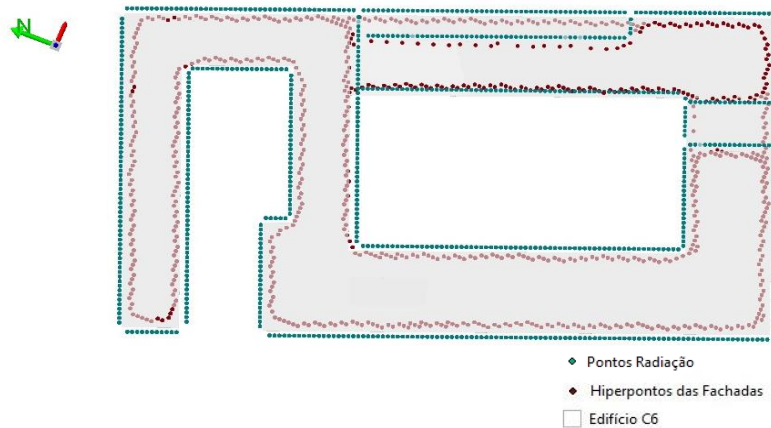


Figura 36 – Estrutura final de pontos com informação sobre a radiação solar desviada 1 metro do plano das fachadas do edifício C6 (a azul).

Cada ponto da nova estrutura contém tantos pontos quanto a altura da fachada num determinado local (Figura 37), que podem ser projectados tridimensionalmente com base nas suas cotas individuais.

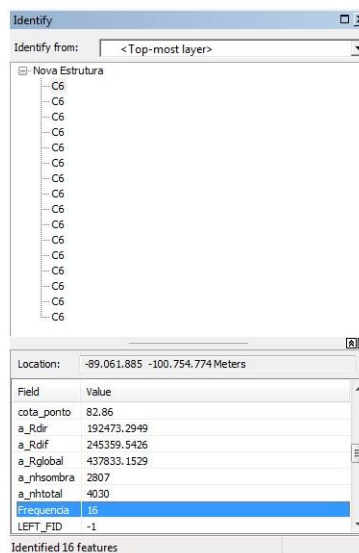


Figura 37 – Identificação de um dos pontos da nova estrutura.

Este tipo de informação visual permite constatar imediatamente e de forma empírica quais as fachadas que recebem anualmente a maior quantidade de radiação solar (Figura 38).

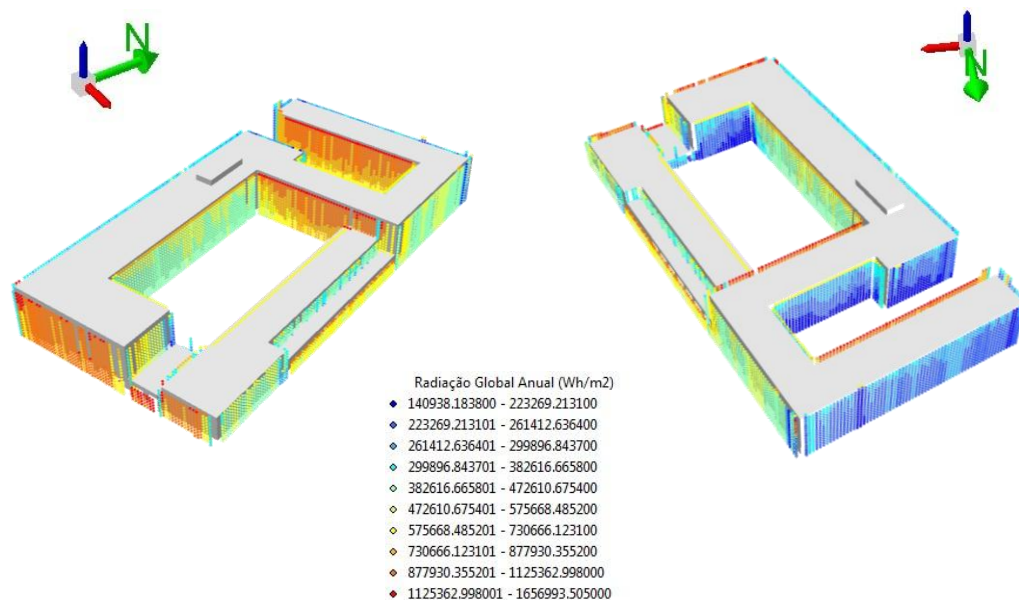


Figura 38 – Visualização da informação sobre a radiação global anual nas fachadas do edifício C6. À esquerda fachadas vistas de Sudeste; à direita fachadas vistas de Norte.

No caso do edifício C6, as fachadas mais propícias à exposição solar são as fachadas viradas a Sudeste. Uma vez que os pontos da estrutura criada estão associados a um identificador de fachada, é possível isolar cada fachada de modo a fazer uma análise mais local. Para realizar esta análise, e uma vez que a informação pontual está expressa em três dimensões, com informação sobre as coordenadas X, Y e a cota de cada ponto, é necessário representar os pontos que compõem a fachada no espaço bidimensional. Contudo, e tendo em conta que os pontos que variam em Z apresentam exactamente as mesmas coordenadas X e Y, diferenciando-se apenas na sua cota, foi necessário definir, para cada ponto, coordenadas rebatidas para possibilitar a visualização da fachada a duas dimensões com todos os pontos que a constituem, caso contrário os pontos apareciam apenas em linha, um por linha.

As coordenadas rebatidas X, foram calculadas através do cálculo da distância euclidiana entre um determinado ponto da fachada e o ponto que se encontra na origem

de cada linha referente a essa fachada. As coordenadas Y rebatidas foram calculadas através da diferença entre a cota de um determinado ponto e a cota mínima dos pontos da fachada, fazendo com que o que outrora foi uma cota passe a ser um valor no eixo dos Y (Figura 39)

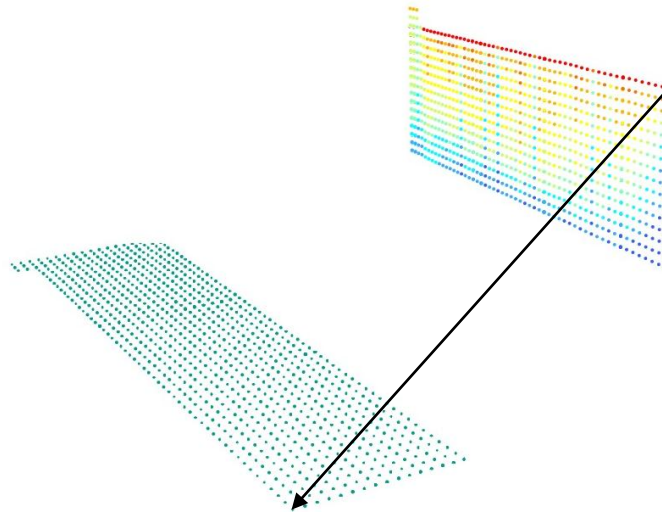


Figura 39 – Representação esquemática do rebatimento de uma das fachadas do edifício C6.

Selecionando uma das fachadas, é possível isolá-la (figura 40), rebatê-la (Figura 41) e fazer uma análise dos seus atributos (Figura 42).

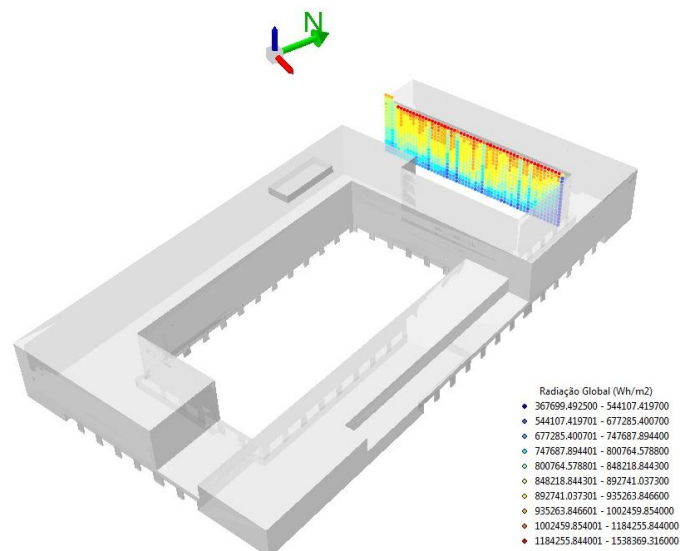


Figura 40 – Selecção e representação de uma das fachadas do edifício C6.

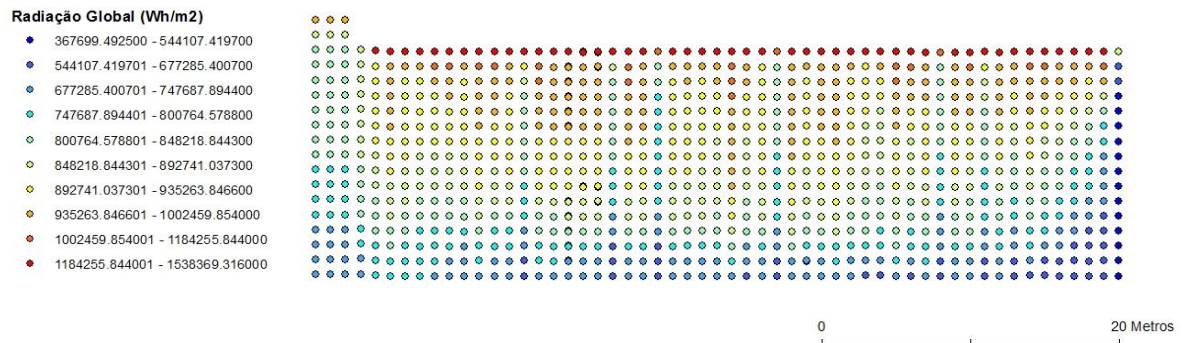


Figura 41 – Fachada do C6, rebatida e representada a duas dimensões

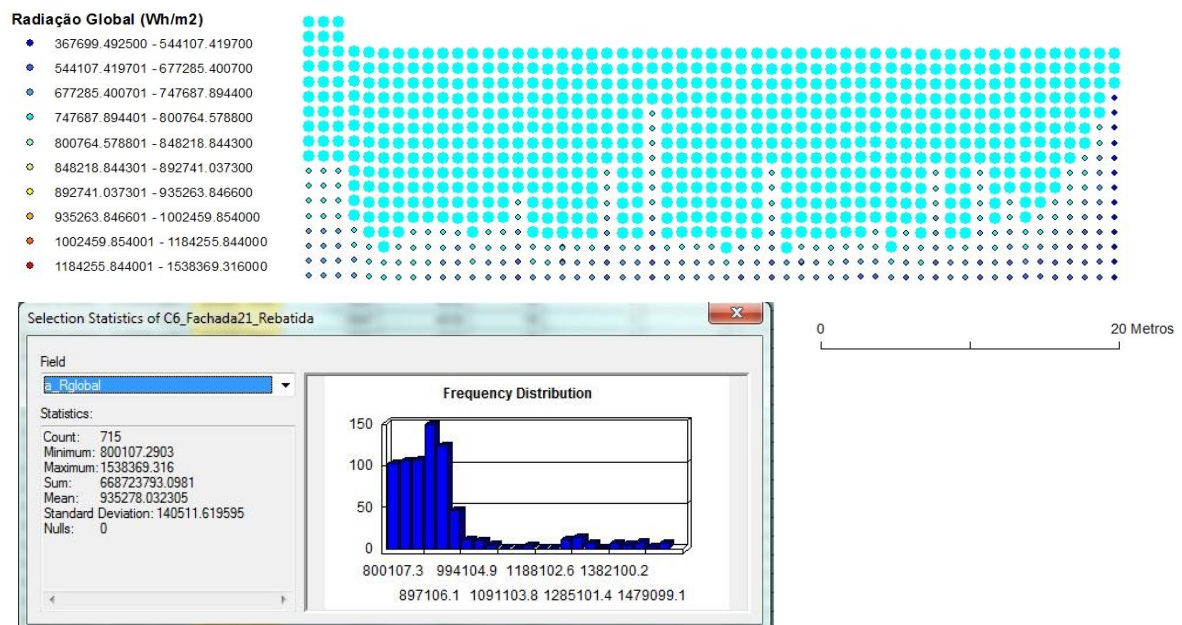


Figura 42 – a) Seleção de pontos da fachada com radiação solar global igual ou superior a 800000 Wh/m²; b) cálculo das estatísticas dos pontos seleccionados.

Supondo que se pretende saber quantos pontos recebem uma radiação solar global anual igual ou superior a 800000 Wh/m², contabilizam-se 715 pontos, que correspondem a 750 metros da fachada, aproximadamente 81,5% da sua área total.

A mesma estrutura foi criada para toda a área de estudo (Figura 43), e pode ser analisada da mesma forma que a fachada anterior.

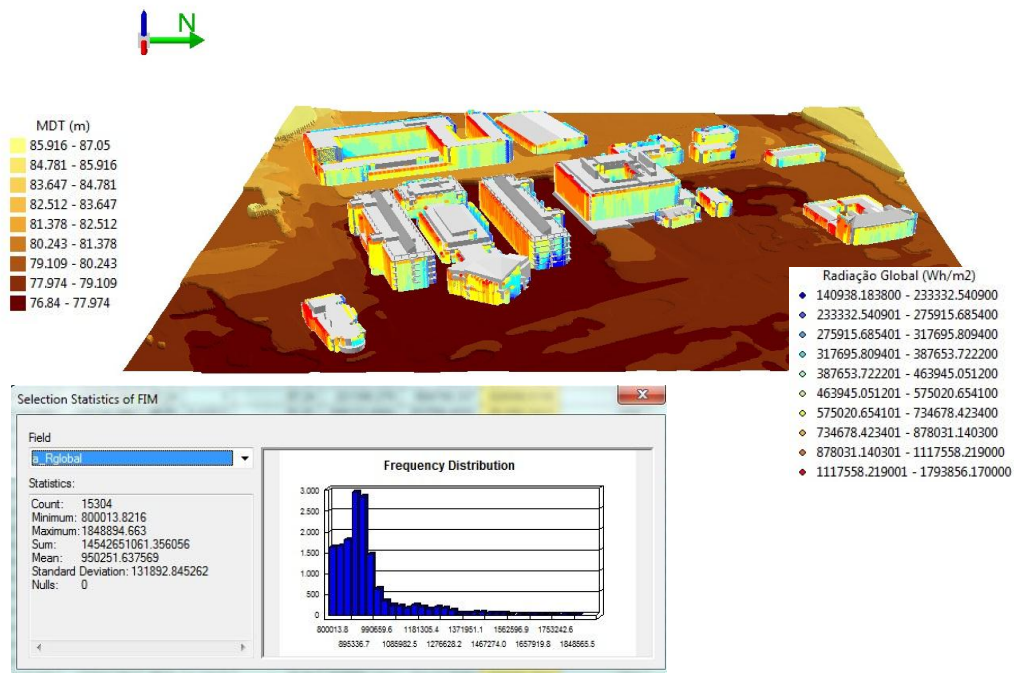


Figura 43 – a) Estrutura de pontos regulares com informação sobre a radiação solar global anual definida para toda a área de estudo; **b)** cálculo das estatísticas dos pontos seleccionados.

Fazendo uma selecção por atributos, novamente à procura dos pontos com radiação global igual ou superior a 800000, mas desta vez para toda a área do campus da FCUL, verifica-se que existem 15304 pontos que preenchem este critério, representando aproximadamente 21% do total dos pontos da área de estudo (Figura 45).

Toda a estrutura pontual e respectiva informação de atributos associada pode ser representada no Google Earth (Figura 44).

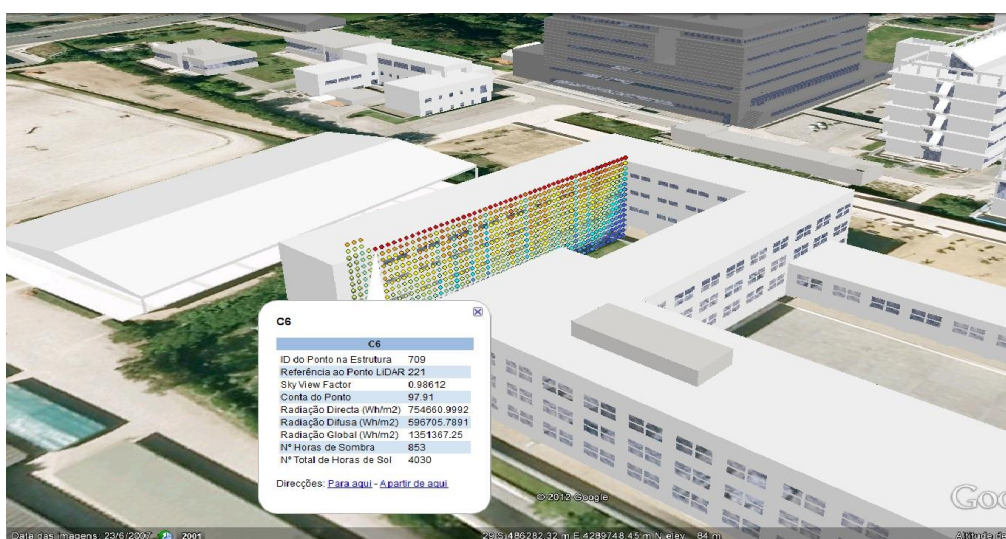


Figura 44 – Representação da fachada em análise do edifício C6 no Google Earth.

Capítulo 4 – Análise e Discussão dos Resultados

4.1 – Modelo Tridimensional dos Edifícios

4.2 – Modelo Digital do Terreno

4.3 - Visualização e Análise da Radiação Solar nas Fachadas

Capítulo 4 – Análise e Discussão de Resultados

4.1 - Modelo Tridimensional dos Edifícios

Cada edifício foi modelado com base em fotografias do local e determinação de alturas médias para a definição de andares, varandas e outras estruturas. Não foram considerados pisos subterrâneos uma vez que não seria relevante para o projecto, nem possível de modelar sem acesso às plantas dos edifícios. A utilização de tecnologia LiDAR terrestre seria imprescindível para a criação de um modelo tridimensional de grande detalhe e de alta precisão. Os presentes modelos baseiam-se principalmente na verosimilhança e são uma tentativa de aproximação à realidade das estruturas. A modelação dos edifícios do Campus da FCUL foi um processo bastante demorado, o que faz com que a metodologia escolhida para este caso em particular não seja aplicável à área total de uma cidade [Takase *et al*, 2003].

Bodum *et al* [2006] afirma que é complexo definir com exactidão os requisitos de um modelo e que as pessoas tendem a ficar fascinadas com as possibilidades de modelação em detrimento do contexto da sua aplicação. A conceptualização inicial da segunda parte do projecto condicionou o nível de detalhe da modelação. Os edifícios foram todos modelados com um nível de detalhe classificado como 3, sendo os modelos caracterizados exteriormente por janelas, portas e outras estruturas (varandas, escadas de saída de emergência). O CityGML permite a definição de 5 níveis de detalhe (LoD) que vão desde a representação 2.5D do MDT (LoD1), ao nível 4, com a representação detalhada do exterior e interior dos edifícios. A necessidade de um modelo tão complexo é discutível, se for considerado o impacto que este teve na realização do projecto. Importa contudo referir que os edifícios já estavam em fase avançada de modelação quando a conceptualização foi invalidada. Apesar deste facto, os modelos foram exportados como LoD 3, para CityGML encontrando-se armazenados num formato comum de partilha, podendo ser utilizados para futuros projectos. No seu estado actual, os modelos podem ser analisados relativamente aos seus atributos.

4.2 - Modelo Digital do Terreno

A metodologia definida para a derivação do MDT a partir dos dados LiDAR no geral apresenta bons resultados. Devido à elevada densidade de dados de partida, esta tem grandes necessidades em termos de consumos ao nível computacional, sendo que a sua aplicabilidade a uma cidade inteira ou a uma área maior está apenas dependente da capacidade do *software* utilizado.

Outra questão que se levanta, está relacionada com o método de interpolação a utilizar para criar terraços onde se possam assentar os edifícios modelados. No caso de a área a tratar ser maioritariamente plana, uma operação de preenchimento, que é frequentemente utilizada para remover as depressões dos MDT para cálculos relacionados com a hidrologia, pode ser aplicada sem qualquer problema. Esta operação preenche as zonas onde foram extraídos os objectos do MDS, com o valor do mínimo da fronteira, criando terraços planos. A aplicação desta função apresenta alguns problemas em áreas mais complexas em termos de variabilidade de declives, principalmente em zonas de fronteiras montanhosas. Para contornar o problema foi aplicado outro tipo de interpolação na área da Penha de França. Assim, foi calculada uma nova ST de raio 25 a partir superfície iterada, e os valores que se encontravam a zero foram interpolados com os valores dessa ST permitindo criar um MDT sem depressões mas também sem terraços onde assentar os edifícios.

4.3 - Visualização e Análise da Radiação Solar nas Fachadas

Os edifícios modelados foram também exportados num formato compatível com o *software* SIG utilizado ao longo do projecto. Ao serem convertidos para multipatch¹ perdem a informação sobre as janelas e portas, uma vez que este formato representa apenas os limites dos objectos em causa e estes objectos de fachada encontram-se modelados como elementos da fachada e não como aberturas.

¹ Multipatch é um tipo de geometria 3D utilizada para a representação do esqueleto de objectos que ocupam determinada área ou volume no espaço tridimensional.

Relativamente ao método definido para a integração da informação resultante da parte do projecto relativa à modelação solar, a estrutura de pontos foi a solução encontrada para representar as fachadas tridimensionalmente. Desta forma é possível visualizar todos os edifícios envoltos com a informação pretendida. Também é possível seleccionar pontos com determinados atributos, isolar fachadas e ainda foi criada a possibilidade de rebater as fachadas de modo a realizar uma análise bidimensional mais rápida e com acesso a ferramentas que não podem ser utilizadas em dados projectados tridimensionalmente.

Esta metodologia ainda apresenta alguns problemas, uma vez que para o cálculo da radiação solar nas fachadas, são definidos como pontos de fachada aqueles que apresentam declives superiores a 72° , isto significa que a estrutura de hiperpontos gerada pode conter, além de edifícios, árvores ou outros objectos que não interessam para análise e causam ruído. Quando os hiperpontos são importados no *software* SIG, é difícil definir um critério capaz de seleccionar e remover estes pontos atípicos que se apresentam como *outliers* em relação ao edifício, o que significa que em alguns casos da fachada a projecção dos pontos pode apresentar falhas (Figura 45).

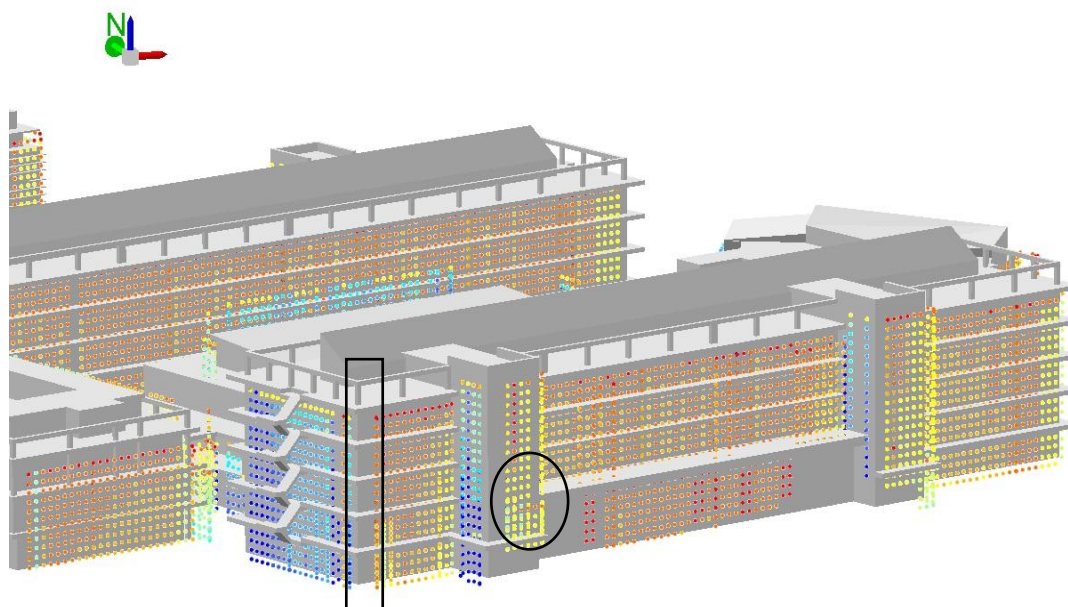


Figura 45 – Demarcação de problemas encontrados na representação da estrutura de pontos no edifício C2.

Ao analisar a Figura 45, verifica-se que existem pontos que não se encontram à cota dos vizinhos mais próximos como seria de esperar (demarcado pela elipse) e existem ainda problemas na representação dos cantos das fachadas (demarcado pelo rectângulo).

Outra questão pertinente que resulta da análise espacial é saber quais os pontos que preenchendo determinados critérios, são contíguos de modo a reunir condições para a instalação de tecnologias fotovoltaicas. Esta questão apenas pode ser esclarecida numa análise bidimensional por fachada.

Finalmente a maior crítica que se pode fazer à presente estrutura e consequente análise tem a ver com o facto, de não ser possível contabilizar a área verdadeiramente útil para a instalação de painéis solares, a partir da distinção da área relativa às janelas e portas e área de parede.

Capítulo 5 – Conclusões

5.1 – Considerações Finais

5.2 – Perspectivas

Capítulo 5 – Conclusões

5.1 - Considerações Finais

Os modelos urbanos tridimensionais estão a tornar-se cada vez mais comuns, particularmente devido ao aumento da disponibilização e acesso a ferramentas de modelação tridimensional e consequente diminuição dos custos de criação e manutenção [Stoter *et al*, 2011]. Porém, os modelos tridimensionais que se encontram em globos virtuais, como é o caso do Google Earth, têm a desvantagem de conterem apenas informação gráfica e geométrica, não permitindo operações que vão além da visualização e exploração de paisagens [Kolbe, 2009; Stoter *et al*, 2011]. Para que possam ser realizadas operações de análise, como a procura de padrões de um determinado fenómeno ou simples interrogações é necessário que exista semântica associada ao modelo geométrico e topológico [Olsson, 2009].

Ainda existe muita resistência à introdução dos modelos tridimensionais nos estudos geográficos, devido à inexistência de uma abordagem comum, normativa e à falta de conhecimento de técnicas sobre a criação e uso de dados [Stoter *et al*, 2011]. Esta necessidade vem várias vezes expressa na bibliografia e torna-se essencial particularmente para novos utilizadores, que se propõem a construir ou utilizar este tipo de informação geográfica e têm dificuldades em compreender e pôr ao uso todo o potencial dos modelos tridimensionais.

O aumento de interesse relativamente aos modelos 3D por parte das mais diferentes áreas tem sido responsável pela falta de consenso no que corresponde à adopção de uma abordagem comum para os modelos. A cada dia são desenvolvidas novas e diferentes técnicas independentes e focadas no âmbito da disciplina em que se inserem, o que provoca uma falta de coerência no, já por si complexo, paradigma da modelação [Shiode, 2001]. Shiode [2001] explica este acontecimento afirmando que o facto de não existir uma competição construtiva mas apenas derivações técnicas pode pôr em causa o desenvolvimento da tecnologia tridimensional como um todo.

O CityGML apresenta-se como a abordagem comum a utilizar quando se trata de modelos tridimensionais, mas ainda necessita ver definidos acordos formais nas

normas a utilizar, considerando as necessidades específicas dos utilizadores [Stoter *et al*, 2011] de maneira a se tornar mais versátil, uma vez que ainda é demasiado genérico, pouco dinâmico quanto ao armazenamento de nova informação [Scianna *et al*, 2006] e com pouco suporte por parte de *software* SIG. Apesar de tudo, este formato possibilita uma definição comum das entidades, atributos e relações de um modelo 3D, facilitando a sua partilha e re-utilização noutras áreas [Lorenzini, 2009].

Stoter *et al* [2011] afirma que o 3D é praticável com as tecnologias de hoje, sendo que para o usufruto de todo o potencial é necessária a aquisição de conhecimentos especializados. Esta afirmação vai directamente ao âmago da questão: a informação tridimensional, desde o processo de criação ao processo de análise é muito interdisciplinar. São essenciais conhecimentos das mais diversas áreas como por exemplo desenho técnico, programação e SIG para conseguir criar um modelo urbano tridimensional com informação relevante e útil para os estudos pretendidos. Isto obriga essencialmente a um esforço cooperativo entre diferentes disciplinas de modo a colmatar as carências das partes envolvidas [Stoter, 2011].

Em 2006, Scianna *et al*, defendia que o *software* SIG existente não apresentava nenhum tipo de funções avançadas capazes de lidar com informação urbana tridimensional, quer ao nível do processamento quer ao nível da análise espacial. Actualmente verificam-se melhorias nesta área, particularmente em *software* SIG comerciais. Estes programas já começam a apresentar compatibilidade com alguns formatos mais comuns de partilha de informação tridimensional e uma capacidade de análise mais interessante, mas ainda assim bastante diminuta.

O futuro dos SIG passará certamente pela informação tridimensional. Thill *et al* [2011] argumenta que as cidades têm muito a ganhar em termos de planeamento se forem representadas tridimensionalmente.

Segundo Stoter [2011], “*a colaboração de um grande número de participantes sem qualquer compensação financeira pode ser considerado um bom indicador do sucesso*” de um projecto, sendo talvez um grupo de trabalho colaborativo e dedicado, o que falta em Portugal, para impulsionar o 3D.

Para a realização deste projecto foi desenvolvida uma nova metodologia para a derivação de modelos digitais do terreno e um novo método para a visualização de

informação relativa a fachadas. Ao longo da progressão das diferentes etapas foram surgindo obstáculos que obrigaram a mudanças de rumo relativamente às potencialidades dos modelos urbanos tridimensionais, sendo necessário adaptar o que é possível fazer actualmente com o que se pretendia analisar concretamente. Devido a todas as limitações, o modelo urbano tridimensional tomou um papel secundário relativamente ao presente estudo. Foi utilizado para pesquisas espaciais de selecção e visualização, contudo muito aquém do que havia sido pensado conceptualmente.

As cidades apresentam variações locais muito acentuadas relativamente à radiação solar [Hofierka e Kanuk, 2009] entre outros fenómenos e como tal, qualquer contribuição em termos de metodologia é bastante útil. Principalmente no caso das fachadas, que é um assunto muito difícil de encontrar abordado de um modo extensivo na literatura e onde até agora muito pouco foi feito, uma vez que as propriedades das fachadas nos modelos 3D ainda são ignoradas apesar de todo o seu potencial. Não sendo possível definir estruturas capazes de receber atributos relativos às fachadas, é praticamente impossível representá-las e analisá-las tridimensionalmente [Lorenz e Döllner, 2010], sendo necessário definir estruturas capazes de contornar estas limitações

Em suma, é possível concluir que a tecnologia SIG existente ainda não está preparada para permitir uma integração e análise puramente tridimensional de informação das fachadas, proveniente de fontes externas, sendo que toda a metodologia aqui apresentada para a visualização e integração dos dados está bastante dependente de dados bidimensionais. Contudo, é possível representar a informação de fachadas com variabilidade em Z, sob a forma de estrutura vectorial projectada verticalmente a partir das coordenadas e cotas dos pontos e este método pode ser aplicado a outro tipo de estudos. Neste caso não foi encontrada uma solução que envolvesse de forma activa os modelos tridimensionais dos edifícios. Importa ressaltar que algum do *software* SIG existente já apresenta uma grande capacidade para a representação e visualização de modelos urbanos tridimensionais, contudo a sua análise ainda se encontra muito condicionada principalmente se o utilizador não estiver disposto a ficar restringido à análise de bacias de visão, sombreamento etc. definidos de forma automática e utilizando parâmetros muito generalizados.

5.2 - Perspectivas Futuras

Ainda há muito trabalho para desenvolver quer em relação ao MDT quer relativamente à estrutura das fachadas.

É necessário aprofundar a análise do comportamento da metodologia de derivação do modelo digital do terreno quando aplicada a áreas muito acidentadas, principalmente no que respeita à interpolação das zonas de terraços onde se encontravam os objectos removidos.

Quanto às estruturas das fachadas, é essencial procurar um modo de incluir as áreas das janelas e portas que as constituem para possibilitar uma análise mais precisa relativamente à área efectivamente útil da fachada e eventualmente tornar esta informação acessível para consulta na internet.

Este projecto serviu para testar limites e definir lacunas em termos de conhecimentos na área dos SIG 3D, sendo essencial para continuar a explorar esta temática adquirir mais e novas competências informáticas, de modo a automatizar todos os processos aqui descritos, na perspectiva de possibilitar a sua aplicação e adaptação a diferentes áreas de estudo e diferentes fenómenos de análise.

Referências Bibliográficas

Anselin, L.(1995) “Local Indicators of Spatial Association”. *Geographical Analysis*, Volume 27, Nº2.

Antolin Sánchez, R. e Brovelli, M. (2007) “LiDAR Data Filtering with GRASS GIS for the Determination of Digital Terrain Models.” *Proceedings of Jornadas de SIG Libre*, Girona, Espanha.

Barata Salgueiro, T. (1992) *A Cidade em Portugal – Uma Geografia Urbana*. 3ª Edição, Afrontamento, Porto.

Batty, M. (2000) "The new urban geography of the third dimension." *Environment and Planning B: Planning and Design* 27(4), pp. 483 – 484.

Binh, T. (2007) “On the Detection of Gross Errors in Digital Terrain Model Source Data”. *VNU Journal of Science, Earth Sciences* 23, pp. 213 – 219.

Bodum, L., Kjems, E., Jaegly, M. e Kolar, J. (2006) “Focus for 3D City Models Should Be on Interoperability: Not Verisimilarity!” *Proceedings of 25th Urban Data Management Symposium*, UDMS, cap.9.

Brooks, S., e Whalley, J.(2005) “A 2D/3D Hybrid Geographical Information System” *Proceedings of the 3rd International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques* in Australasia and Southeast Asia.

Carneiro, C., Morello, E., Desthieux, G. e Golay, F. (2010) “Urban Environment Quality Indicators: Application to Solar Radiation and Morphological Analysis on Built Area”. *Proceedings of the 3rd WSEAS International Conference on Visualization, Imaging and Simulation*.

Catita, C., Redweik, P. e Pereira, J. (2012) “Spatial Autocorrelation in the Generation of High Amplitude DTMs for 3D Urban Models from LiDAR Data”. *AGILE International Conference on Geographic Information Science (AGILE 2012)*. Avignon, França, Abril 2012.

- Elaksher, A. e Bethel, J. (2002) “Reconstructing 3D Buildings from LiDAR Data”. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, and Spatial Information Sciences*, Austria.
- Feng, Y., Ji-xian, Z., Li, Z. e Jing-xiang, G. (2009) “Urban DEM Generation from Airborne Lidar Data”. *Urban Remote Sensing Joint Event*.
- Gröger, G. e Plümer, L. (2011) “Topology of Surfaces Modelling Bridges and Tunnels in 3D-GIS”. *Computers, Environment and Urban Systems* 35, pp. 208-216.
- Hofierka, J. e Kanuk, J. (2009) “Assessment of Photovoltaic Potential in Urban Areas Using Open-Source Solar Radiation Tools”. *Renewable Energy*, Volume 34, Issue 10. Outubro 2009, pp. 2206-2216.
- Kashreen, M., Banfill, P. e Menzies, F. (2009) “Life-Cycle Assessment and the Environmental Impact of Buildings: A Review”. *Sustainability* 1 (3), pp. 674-701.
- Kolbe, T., Gröger, G. e Plümer, L. (2005) “CityGML – Interoperable Access to 3D City Models”. *Proceedings of the Int. Symposium on Geo-information for Disaster Management*, Delft, Springer Verlag.
- Kolbe, T.H. (2009) “Representing and Exchanging 3D city Models with CityGML”. *3D Geo-information Sciences*. Chapter 2, Springer, Seoul, Korea, pp.15-31.
- Könninger, A. e Bartel, S. (1998) “3D - GIS for Urban Purposes”. *Journal Geoinformatics*, Volume 2, Issue 1, pp 79-103.
- Liu, C. e Zhang, Y (2009) “Extraction of 3D Feature from LIDAR Data Fused whit Aerial Images using Improved Mean-Shift Algorithm”. *International Conference on Geo-spatial Solutions for Emergency Management and the 50th Anniversary of the Chinese Academy of Surveying and Mapping*, Volume XXXVIII, pp 20-24.
- Lorenz, H. e Döllner, J. (2010) “3D Feature Surface Properties and their Application in Geovisualization”. *Computers, Environment and Urban Systems* 34, pp. 476-483.
- Lorenzini, M. (2009) “Semantic Approach to 3D Historical Reconstruction”, *ISPRS*, Volume XXXVIII.

- Mao, B., Ban, Y. e Hahn, L. (2009) “A framework for Generalization of 3D City Models based on CityGML and X3D”. *ISPRS Workshop on Quality, Scale and Analysis Aspects on Urban City Models*, Lund, Suécia.
- Morais, V. e Vieira, C. (2006) *Matlab 7 & 8*. 3ª Edição, FCA, Lisboa.
- Osslom, E. (2009) ”Exporting 3D Geoinformation from Baggis Database to CityGML”, Supervisor Yifang Ban. Tese de Mestrado.
- Rakkolainen, I. e Vainio, T. (2001) “A 3D City Info for Mobile Users”. *Computers and Graphics* 25, pp. 619-625.
- Redweik, P., Catita, C. e Brito, M. (2011) “3D Local Scale Solar Radiation Model Based on Urban LiDAR Data”. *ISPRS Workshop High Resolution Earth Imaging for Geospatial Information*, Hamburgo.
- Rua, H. e Alvito, P. (2011) “Living the Past: 3D Models, Virtual Reality and Game Engines as Tools for Supporting Archaeology and the Reconstruction of Cultural Heritage – The Case-Study of the Roman Villa of Casal de Freiria”. *Journal of Archaeological Science* 38, pp 3296-3308.
- Scianna, A., Ammoscato, A. e Corsale, R. (2006) “A Step Toward Interoperability: Managing 3D Urban Data With GML Structure”. *Proceedings UDMS Conference*, Aalborg, Dinamarca.
- Scianna, A., Ammoscato, A. (2010) ”3D GIS Using open Source Software, in Core Spatial Databases – Updating, Maintenance and Services from Theory to Practice”. *ISPRS Archive Volume XXXVIII*, Parte 4-8-3-W9, Haifa, Israel.
- Shiode, N. (2001) “3D Urban Models: Recent Developments in the Digital Modelling of Urban Environments in Three-dimensions”. *GeoJournal* 52, pp. 263-269.
- Sithole, G. e Vosselmann, G. (2004) “Experimental Comparison of Filter Algorithms for Bare-Earth Extaction from Airborne Laser Scanning point Clouds”. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 59, pp. 85-101.

Stoter, J. e Zlatanova, S. (2003) “3D GIS where are we standing?” *Joint Workshop on Spatial, Temporal and Multi-Dimensional Data Modeling and Analysis*, 2-3 October, Quebec City, Canadá.

Stoter, J., Kluijver, H. e Kurakula, V (2008) “3D Noise Mapping in Urban areas”. *International Journal of Geographical Information Science* 22:8, pp.907-924.

Stoter, J., Vosselman, G., Goos, J., Zlatanova, S., Verbee, E., Kloster, R. e Reuvers, M. (2011) “Towards a National eD Spatial Data Infrastructure: Case of The Netherlands”. *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation*, Volume 2011, Nº 6, Dezembro 2011, pp. 405-420.

Takase, Y., Sho, N., Sone, A. e Shimiya, K. (2003) “Automatic Generation of 3D City Models and Related Applications”. *The Internacional Achives of Photogrammetry, Remote Sensing and spatial Information Systems*, Volume XXXIV.

Thill, J.C., Dao, T. e Zhou, Y. (2011) “Travelling in the Three-dimensional City: Applications and Route Planning, Accessibility Assessment, Location Analysis and Beyond”. *Journal of Transport Geography* 19, pp. 405-421.

Uchôa, H.N., Paulo, M.C., Filho. L.C. e Ferreira, P.R (2006) “The Open 3D GIS Project – A free Tool to enable 3D Geographic Systems on the Web”. *7º Fórum Internacional de Software Livre*. Porto Alegre, Brasil.

Wang, C. e Tseng, Y. (2010) “DEM Generation from Airborne LiDAR Data by an Adaptive Dual-directional Slope Filter”. *ISPRS TC VII Symposium – 100 Years ISPRS*, Volume XXXVIII, Parte 7B.

Weibel, R. & Heller, M. (1991). Digital Terrain Modeling. In: Maguire, D.J., Goodchild, M.F. and Rhind, D.W. (eds.). *Geographical Information Systems: Principles and Applications*. London: Longman, 269-297.

Weibel, R. (1997) “Digital Terrain Modelling for environmental applications – A Review of Techniques and Future Trends”. *Geographic Information 1997, From Research to Application Through Cooperation: Third Joint European Conference & Exhibition on Geographical Information*, Vienna, Austria, 1997.

Wren, A. (1973) “Trend Surface Analysis – A Review”. *Canadian Journal of Exploration Geophysics*, December 1973, Volume 9, N°1.

Xu, W., Zhu, Q., Du, Z., e Zhang, Y. (2010) “Design and Implementation of 3D Model Database for General-Purpose 3D GIS”. *Geo-spatial Information Science* 13 (3), pp. 210-215.

Zhang, K., Chen, S.C., Whitman, D., Shyu, M.L., Yan, J. e Zhang, C. (2003) “A Progressive Morphological Filter for Removing Nonground Measurements from Airborne LiDAR Data”. *IEEE, Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Volume 41, N° 4.

Zhang, Z., Wu, J., Zhang, Y., Zhang, Y. e Zhang, J. (2003) “Multi-view 3D City Model Generation with Image Sequences”. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and spatial Information Systems*, Volume XXXIV, pp. 351-356.

Zhou, Q.Y. e Neumann, U. (2008) “Fast and Extensible Building Modelling from Airborne LiDAR Data”. *Proceedings of the 16th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems*, N°7.

Bing Maps: <http://www.bing.com/maps/>

China Daily: http://www.chinadaily.com.cn/photo/2011-12/06/content_14220234.htm

Google Earth: <http://www.google.com/earth/index.html>

Universidade de Lisboa: <http://www.ul.pt>

Nações Unidas: <http://www.un.org/en/globalissues/population/>