

Navegação autónoma em terreno vinhateiro

Por

Olga Maria de Sousa Contente

Orientador: Doutor Raul Manuel Pereira Morais dos Santos

Coorientador: Doutor José Nuno Panelas Nunes Lau

Tese submetida à

UNIVERSIDADE DE TRÁS-OS-MONTES E ALTO DOURO

para obtenção do grau de

DOUTOR

em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, de acordo com o disposto no

DR – I série–A, Decreto-Lei n.º 74/2006 de 24 de Março e no

Regulamento de Estudos Pós-Graduados da UTAD

DR, 2.ª série – Deliberação n.º 2391/2007

Navegação autónoma em terreno vinhateiro

Por

Olga Maria de Sousa Contente

Orientador: Doutor Raul Manuel Pereira Morais dos Santos

Coorientador: Doutor José Nuno Panelas Nunes Lau

Tese submetida à

UNIVERSIDADE DE TRÁS-OS-MONTES E ALTO DOURO

para obtenção do grau de

DOUTOR

em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, de acordo com o disposto no

DR – I série–A, Decreto-Lei n.º 74/2006 de 24 de Março e no

Regulamento de Estudos Pós-Graduados da UTAD

DR, 2.ª série – Deliberação n.º 2391/2007

Orientação Científica :

Doutor Raul Manuel Pereira Morais dos Santos

Professor Associado c/ Agregação do
Departamento de Engenharias da Escola de Ciências e Tecnologia
Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Doutor José Nuno Panelas Nunes Lau

Professor Auxiliar do
Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática
Universidade de Aveiro

“À memória do meu companheiro”

Gabriel Afonso

Navegação autónoma em terreno vinhateiro

Olga Maria de Sousa Contente

Submetido à Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro
para o preenchimento dos requisitos parciais para obtenção do grau de
Doutor em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Resumo O planeamento de trajetórias, como parte integrante de um sistema de navegação autónoma, visa otimizar a escolha do trajeto a seguir pelo dispositivo móvel. Os dispositivos terrestres móveis autónomos são atualmente utilizados na agricultura, e em particular na viticultura, quando as características morfológicas do terreno e a distribuição do cultivo permitem a sua movimentação estruturada. A presença de morfologia muito complexa ou a distribuição variável das culturas podem inviabilizar a sua utilização.

Esta tese apresenta o trabalho realizado no desenvolvimento de um sistema de planeamento de trajetórias e será parte integrante de um sistema de navegação autónomo a aplicar num trator agrícola para executar as tarefas de cultivo ou manutenção da vinha. Irá ser utilizado num ambiente particularmente difícil, onde as vinhas são plantadas em socacos escavados nas encostas sinuosas que ladeiam as margens do rio Douro, a nordeste de Portugal.

Numa primeira fase o trabalho contemplou a escolha da parcela de vinha e a determinação do modelo digital do terreno (MDT) da parcela. O critério adotado para a escolha da vinha foi o da inclusão do maior número de especificidades de entre aquelas que caracterizam as vinhas da Região Demarcada do Douro (RDD). Foi necessário efetuar o levantamento estático da parcela uma vez que o MDT existente, adquirido ao Instituto Geográfico do Exército (IgeoE) à data do início dos trabalhos, era anterior à data de plantação da vinha. O levantamento dinâmico da trajetória efetuada por um perito na condução com um trator convencional numa operação vitícola permitiu validar a metodologia adotada e o equipamento escolhido no processo de obtenção do MDT.

Na segunda fase do trabalho procurou-se determinar os possíveis percursos de condução, por aplicação de algoritmos de esqueletização a todas as vias de circulação da vinha. Foram aplicados diferentes algoritmos de esqueletização para encontrar de forma quase completamente automática os possíveis percursos de condução na vinha. Este estudo teve como resultado a escolha do algoritmo de esqueletização que melhor se adapta a este tipo de ambiente.

Por último, foi desenvolvido o sistema de planeamento de trajetórias para apoio à navegação autónoma. A implementação de um algoritmo combinado para a determinação do trajeto ótimo de aproximação e cobertura de ilhas dispersas na parcela de vinha culminou o trabalho de tese. As ilhas como resultado da aplicação de

técnicas de viticultura de precisão (VP) identificam as zonas de cobertura nas quais as operações vitícolas devem ser realizadas. A função de otimização proposta utiliza uma combinação linear de funções de custo específicas, a qual contribui tanto para o aumento do rendimento da produção como para a diminuição do impacto ambiental da atividade. Como exemplo, a distância percorrida pelo veículo e o tempo gasto em manobras contribuem diretamente para o aumento da quantidade de combustível utilizada e o nível de emissões de CO_2 .

Durante as referidas fases do trabalho, foi desenvolvida uma aplicação de apoio à navegação (denominada *Vineyard Viewer and Path Planning Application* - VVPP), onde o teste e a validação das opções foram realizados de uma forma simples e amigável. Esta possibilitou a seleção e a execução dos algoritmos desenvolvidos bem como a possibilidade de simulação da condução nas rotas de navegação determinadas.

Os resultados obtidos validam a utilização da VVPP como parte integrante de um sistema de navegação autónomo a operar em terreno vinhateiro. Vinhas com diferentes configurações podem nela ser estudadas. Pode ainda servir como ferramenta didática de teste a algoritmos de esqueletização e de planeamento de trajetórias. Este trabalho é um ponto de partida para trabalhos futuros, pois identifica as particularidades e os constrangimentos de navegação autónoma numa vinha com características próprias, inserida numa zona classificada pela UNESCO como património mundial da humanidade.

Palavras Chave: Mapeamento, esqueletização, planeamento de trajetórias, viticultura de precisão, aplicação de apoio à navegação.

Autonomous navigation in vineyard terrain

Olga Maria de Sousa Contente

Submitted to the University of Trás-os-Montes e Alto Douro
in partial fulfillment of the requirements for the degree of
Doctor of Philosophy in Electrical and Computers Engineering

Abstract Path planning, as part of an autonomous navigation system aims to optimize the choice of the path followed by a mobile vehicle. The autonomous ground vehicles are currently used in agriculture, and particularly in viticulture, when the terrain morphology and the crop field distribution allow its structured movement. The presence of very complex orography or variable distribution of crops may hinder their use.

This thesis presents the work done in developing a path planning system, as part of an autonomous navigation system, to be used on a agricultural tractor to perform the crop or the maintenance tasks of the vineyard. It will be used in a particularly difficult environment, where the vines are planted in terraces excavated in the winding slopes that line the banks of the Douro River, located in the northeast of Portugal.

Initially, the work included the choice of a vineyard plot and finding its digital terrain model (DTM). The criterion for choosing the vineyard was the inclusion of more specific features that characterize the vineyards of the Douro Region (RDD). A static survey was needed because the existing MDT, acquired from the Army Geographic Institute (IgeoE) at the beginning of this work, was built prior to the vines planting. The dynamic survey of the trajectory, performed by an expert driving a conventional tractor during a vineyard operation, allowed to validate the adopted methodology and the equipment selected in the DTM surveying stage.

Secondly, it were examined the possible paths by applying skeletonization algorithms to all the circulation routes of the vineyard. Different skeletonization algorithms were applied to find, almost fully automatically, the possible driving routes of the vineyard. This study resulted in the choice of the skeletonization algorithm that best fits this type of environment.

Finally, to support the autonomous navigation system, it was developed a path planning system. The work culminated with the development of a combined algorithm to find the optimal path to approach and coverage scattered plots of the vineyard. The plots, as a result of application of precision viticulture techniques (VP), identify the coverage areas in which the wine-growing operations must be performed.

The proposed optimization function uses a specific linear combination of cost functions, which contributes both to the increase of the production yield and to the reduction of the activity environmental impact.

As an example, the minimization of the distance traveled and the time spent on maneuvers leads directly to a fuel consumption decrease and, consequently, to the CO_2 emissions reduction.

During these work stages, a software application had been developed to support the navigation system, named Vineyard Viewer and Path Planning (VVPP). Its options, performed in a simple and friendly way, enabled the selection and implementation of the developed algorithms, as well as the possibility to simulate driving on the navigation routes previously determined.

The results validate the use of the VVPP application for use in Vineyard Mountain Fields. Through its use, vineyards with different configurations can be studied. It can also be used as a teaching tool to test skeletonization and path planning algorithms.

This work is a starting point for future work, since it identifies the particularities and the autonomous navigation constraints of a typical vineyard, set in a classified area by UNESCO as a world heritage site.

Keywords: Mapping, skeletonization, path planning, precision vineyard, user application.

Agradecimentos

Esta tese não teria sido possível realizar sem os contributos importantes de natureza diversa pelos quais desejo expressar os meus sinceros agradecimentos:

Aos meus orientadores,

Doutor Raul Morais dos Santos, meu orientador, por me colocar o desafio de fazer a tese de doutoramento numa área tão interessante e com recurso a trabalho experimental que, apesar de desgastante, se tornou memorável pelo contato com a natureza numa região tão bela como a RDD. Pelas críticas, correções e sugestões feitas durante a duração da sua orientação e pela disponibilidade e simpatia sempre demonstradas.

Doutor José Nuno Lau, meu co-orientador, pela competência científica e acompanhamento do trabalho na área da Robótica Inteligente, pela disponibilidade e amabilidade ao longo destes anos de trabalho, assim como pelas as correções e relevantes sugestões feitas durante este trabalho.

Aos professores,

Doutor Fernando Santos, pelo auxílio na escolha do terreno.

Doutor José Aranha, pela preciosa ajuda durante a primeira fase de levantamento da vinha, pelo incentivo para a criação da metodologia adotada no primeiro MDE e pela gentileza e disponibilidade com que sempre me recebeu, transmitindo-me o gosto pelos SIG.

Doutor José Martinho, que me acompanhou na segunda fase de levantamento da vinha, colaborando na realização dos trabalhos de campo, que permitiram prosseguir os de computação. Pela sua disponibilidade e simpatia.

Ao Engenheiro Abílio Tavares da Silva, proprietário da quinta, pela sua amabilidade e disponibilidade no acompanhamento na realização de todos os trabalhos de campo efetuados.

Aos colegas da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, pelo apoio em variadas circunstâncias:

José Francisco Morgado, do Departamento de Informática, pelo precioso acompanhamento na programação, pela paciência, disponibilidade e gentileza.

Aos colegas, do Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, em geral, pelo estímulo e apoio que sempre manifestaram, mas em particular à amiga Odete Lopes, sempre disponível para me ouvir, ajudar e incentivar, e à amiga Cristina Romão pelo incentivo e ajuda.

Especialmente à amiga Odete Santos pelo apoio, incentivo, dedicação e no acompanhamento deste documento.

A toda a minha querida família, pelo apoio incondicional, especialmente o incentivo da minha mãe, Irene, e os apoios diretos da minha sogra, Zilda, e dos meus cunhados Guida e Jorge.

E, por último, em especial às minhas filhas Joana e Marta, sempre presentes.

A todos um bem haja!

UTAD, Vila Real
14 de outubro, 2016

Olga Contente

Índice geral

Resumo	ix
<i>Abstract</i>	xi
Agradecimentos	xiii
Índice de tabelas	xix
Índice de figuras	xxi
Glossário, acrónimos e abreviaturas	xxvii
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento	2
1.2 Motivação	10
1.3 Objetivos	12
1.4 Contributos	14
1.5 Organização do documento da tese	16
2 Navegação autónoma em vinha de encosta em patamares	19
2.1 Enquadramento	19
2.2 Modelo Digital de Elevação	21
2.2.1 Sistema de Posicionamento Global	25
2.2.2 Levantamentos com GPS	32

2.3	Linhas de condução	33
2.3.1	Deteção em imagens (2D) das linhas de condução	35
2.3.2	Deteção em MDE (3D) de linhas de condução	38
2.4	Planeamento de trajetórias	42
2.4.1	Aplicações	44
2.4.2	Algoritmos de procura em grafos	48
3	Mapa 3D da vinha e linhas de condução	53
3.1	Escolha, identificação e caracterização da parcela da vinha	54
3.2	Levantamentos iniciais e metodologia desenvolvida	61
3.2.1	Localização e caracterização da vinha	64
3.2.2	Trabalho de campo preparatório	67
3.2.3	Levantamentos com GPS diferencial	73
3.2.4	Análise de resultados	73
3.2.5	Metodologia desenvolvida para gerar um projeto SIG	78
3.3	Obtenção e validação do MDE da vinha	83
3.3.1	Levantamentos RTK em tempo real para obtenção do MDE da vinha	83
3.3.2	Levantamentos RTK em pós-processamento para obtenção das linhas de condução	90
3.3.3	Validação do MDE e do equipamento GPS	94
3.4	Linhas de condução	102
3.4.1	Algoritmos adotados	104
3.4.2	Métrica adotada	108
3.4.3	Algoritmo escolhido	109
4	Planeamento de trajetórias em vinha de montanha	115
4.1	Definição do problema	116
4.1.1	Considerações práticas	116
4.1.2	Formulação do problema e implementação	119
4.2	Arquitetura da solução de planeamento	122
4.2.1	Algoritmos	124
4.2.2	Planeamento na VVPP	128
4.2.3	Formulação e descrição da experiência	131
4.3	Resultados	132
5	Demonstração de resultados através da aplicação VVPP	137
5.1	Arquitetura	138
5.2	Ambiente da VVPP	142
5.2.1	Menu Principal Horizontal	144

5.2.2	Menu vertical	153
5.3	Resultados nos ambientes gráficos	162
5.3.1	Visualizador da Vinha (VV)	162
5.3.2	Visualizador de Esqueletos	164
5.3.3	Visualizador do Grafo do Mapa da Vinha	168
5.4	Desenvolvimentos na VVPP	170
6	Conclusão	171
6.1	Contribuições	171
6.2	Discussão crítica	173
6.3	Trabalho futuro	176
	Referências bibliográficas	179

Índice de tabelas

3.1	Distribuição das atividades culturais ao longo do ano.	60
3.2	Tabela de atributos para levantamento de pontos.	70
3.3	Tabela de atributos para levantamento de linhas.	71
3.4	Tabela de atributos dos pontos levantados e obtidos da TIN do MDE.	88
3.5	Resultado dos levantamentos.	102
3.6	Distâncias médias, para alguns patamares e um caminho, utilizando os algoritmos de esqueletização <i>Thinning</i> e <i>Geometric</i>	111
4.1	Algumas variáveis utilizadas pelo algoritmo A^*	126
4.2	Parâmetros que definem um vértice, no grafo.	130
4.3	Parâmetros que definem uma aresta, no grafo.	130
5.1	Diretorias da VVPP.	142

Índice de figuras

1.1	Delimitação da Região Demarcada do Douro.	7
1.2	Vinha de montanha na RDD.	9
2.1	Plantação em filas ao alto.	20
2.2	Plantação em patamares largos.	20
2.3	Plantação em patamares estreitos.	20
2.4	Plantação em micro patamares.	20
2.5	Rede de Estações GNSS-SERVIR.	29
2.6	Fluxo de informação na estação virtual.	30
2.7	Condução do trator, com identificação da linha de condução.	34
2.8	Esqueletização de ortoimagem.	35
2.9	Esqueletização de parte do sistema vascular cerebral.	40
2.10	Representação esquemática dos dois tipos de grafos.	49
2.11	Representação esquemática de uma árvore.	50
3.1	Localização da vinha em estudo.	55
3.2	Vista da parcela na vinha.	56
3.3	Caminhos na vinha com identificação de algumas especificidades.	58
3.4	Vistas do caminho que contorna a parcela a oeste com identificação de algumas especificidades.	59

3.5	Modo de embardamento usado na parcela, com identificação de algumas especificidades.	59
3.6	Expansão vegetativa da planta.	60
3.7	Planta de localização.	62
3.8	Procedimento adotado para implementação da metodologia desenvolvida para gerar um SIG.	63
3.9	Etapa 1 da metodologia desenvolvida para gerar um SIG.	64
3.10	Efeitos provocados por descontinuidades artificiais com traçado dos seus limites.	65
3.11	Transições de entrada com diferentes declives com traçado dos seus limites.	66
3.12	Efeitos provocados por descontinuidade natural (patamares mancos) com traçado dos seus limites.	66
3.13	Diferentes acessos a patamares desnivelados com traçado dos seus limites.	67
3.14	Etapa 2 da metodologia desenvolvida para gerar um SIG.	68
3.15	Modelo para patamares, caminhos e transições.	69
3.16	Amostragem de pontos e linhas.	69
3.17	Imagens retiradas no levantamento inicial.	72
3.18	Etapa 3 da metodologia desenvolvida para gerar um SIG.	73
3.19	Polígono limite de parcela sobreposto nas imagens.	74
3.20	Polígono limite de parcela sobreposto aos dados originais do IgeoE.	75
3.21	Resultados dos levantamentos com GPS diferencial sobre informação do IgeoE.	76
3.22	Grelha pontos IgeoE e levantamento por pontos com GPSd.	76
3.23	Gráficos de perfil obtidos por dois cortes em duas TIN	77
3.24	Imagem georreferenciada da parcela obtido via Google Earth.	78
3.25	Diagrama esquemático da metodologia desenvolvida para gerar um SIG.	79
3.26	Levantamento na parcela em modo RTK.	85
3.27	Polígono de contorno da parcela sobre imagem de satélite.	85

3.28	Levantamento de pontos, RTK em tempo real e por estação total (GNSS).	86
3.29	Levantamento de pontos e linhas de quebra em modo RTK.	87
3.30	Levantamento linhas de quebra em modo RTK e curvas de nível de 1 m.	87
3.31	Gráficos de perfil obtidos por dois cortes em duas TIN.	89
3.32	Imagem georreferenciada da parcela obtido via Google Earth.	90
3.33	Trator com equipamento GNSS e respetiva antena.	92
3.34	Manobras durante a pulverização.	93
3.35	Correção em pós-processamento e exportação da trajetória.	95
3.36	Carregamento do MDE e da trajetória na VVPP.	95
3.37	Vista sudoeste com seleção do patamar P6 e caminho C5.	96
3.38	Trajetoira do trator sobreposta no mapa (Vista de topo).	97
3.39	Análise planimétrica aos patamares P2, P3 e P4.	99
3.40	Análise planimétrica aos patamares P73, P74 e P82.	100
3.41	Análise altimétrica aos patamares P2, P3 e P4.	101
3.42	Análise Altimétrica aos patamares P73, P74 e P82.	101
3.43	Menu de seleção, via VVPP, das opções de esqueletização.	104
3.44	Voxelização: Atribuição de cor e tamanho aos voxels.	105
3.45	Seleção, voxelização e esqueletização de um caminho.	106
3.46	Representação da distância mínima no ponto P do esqueleto.	108
3.47	Comparação dos troços de rota do trator com os esqueletos.	110
3.48	Comparação da rota do trator e dos esqueletos para o patamar P43.	112
3.49	Comparação da rota do trator e dos esqueletos para o patamar P82.	112
3.50	Vista geral dos esqueletos da totalidade dos patamares e caminhos.	113
4.1	Alteração da direção do trator nas transições: (a) e (b) patamar-patamar, (c) patamar-caminho, (d) cabeços.	117
4.2	Vista de topo da vinha, incluindo: (a),(b) e (c) Esqueletos com diferentes configurações e seus extremos; (d1), (d2) e (d3) Etapas para a definição de uma transição, seus pontos de controlo e troços-esqueleto.	118
4.3	Arquitetura da solução de planeamento.	123
4.4	Ampliação no VV, com sobreposição das transições.	129

4.5	Parte do grafo da vinha, com seleção de alguns patamares para cobertura.	129
4.6	Trituração de vimes com alfaia subida e descida.	132
4.7	Árvore de decisão para a cobertura de três patamares.	134
4.8	Teste na VVPP: Rota efetuada e planeada.	134
5.1	Arquitetura da aplicação VVPP.	139
5.2	Ambiente da aplicação VVPP.	143
5.3	Opção “About” do Menu Principal da VVPP.	144
5.4	Opção “Load” do Menu Principal da VVPP.	145
5.5	Opção “Save as *.vol ” do Menu Principal da VVPP.	146
5.6	Opção “xls to dat” desencadeada por “Convert”.	147
5.7	Opção “LxMxN.vol to” desencadeada por “Convert”..	148
5.8	Opção “Tractor: xls to vol” desencadeada por “Convert”.	149
5.9	Opção “Road Skeleton” desencadeada em “Calculus”.	150
5.10	Opção “Decision Graph” desencadeada em “Calculus”.	151
5.11	Opção “SkeletorViewer ” desencadeada no Menu Principal da VVPP.	152
5.12	Opção “Vol to txt ” desencadeada no menu vertical “Test Programs ”.	152
5.13	Opção “Extern Programs ” desencadeada no Menu Principal da VVPP.	153
5.14	Grupo de opções do topo, do menu vertical da VVPP.	154
5.15	Grupo de opções acima do meio, do menu vertical da VVPP.	156
5.16	Grupo de opções abaixo do meio no menu vertical da VVPP.	157
5.17	Grupo de opções do fundo, no menu vertical da VVPP.	158
5.18	Parâmetros da Transição.	159
5.19	Perspetiva da vinha com a seleção dos patamares para cobertura.	161
5.20	Seleção dos pontos de partida e chegada e permutações dos patamares para cobertura.	161
5.21	Visualizador da Vinha na VVPP.	163
5.22	Vistas da vinha no VV em diferentes perspetivas.	164
5.23	Vistas do VV em duas situações distintas com sobreposição de por- menores ampliados (parte menu vertical da VVPP e uma zona da imagem).	164

5.24	Vista do VV com apresentação conjunta de dois tipos de esqueletos.	
	Imagem alterada para identificação dos pormenores ampliados.	165
5.25	Opções de manipulação da imagem no menu vertical do SV.	166
5.26	Outras funcionalidades no menu vertical do SV.	168
5.27	Representação gráfica e analítica da distância para o patamar P7. . .	169
5.28	Visualizador do grafo do mapa da vinha.	170

Glossário, acrónimos e abreviaturas

Glossário

Palavra	Significado(s)
Curvas de nível	Isolinhas que unem pontos da superfície do terreno situados à mesma altitude ortométrica.
MDT	Qualquer conjunto de dados em suporte numérico que, para uma dada zona, permita associar a qualquer ponto definido sobre o plano cartográfico um valor correspondente à sua altitude.

(continua na página seguinte)

(continuação)

Palavra

Significado(s)

DGNSS

Sistema de navegação por satélite, global de precisão, constituído pelos sistema de satélites móveis, pelos satélites geoestacionários e pela rede de estações de georeferenciação terrestres. Estes sistemas de satélites emitem correções de posição das coordenadas geográficas geodésicas medidas pelos móveis a partir de informação recebida da rede de estações terrestres fixas. Designação também atribuída ao aparelho recetor de sinal proveniente da rede DGNSS.

GPS

Sistema de navegação por satélite, ou de sistema de posicionamento americano original (*Global Position System*), que permite determinar as coordenadas geográficas geodésicas de qualquer ponto à superfície da Terra com um elevado grau de exatidão. A determinação das coordenadas é possível através do uso de recetores do sinal emitido pelos satélites que compõem o segmento espacial do sistema. Designação também atribuída ao aparelho recetor de sinal proveniente de satélites com informação sobre a sua posição.

GNSS

Sistema de navegação por satélite global, constituído pela constelação de satélites que, do espaço transmitem dados de posicionamento e tempo, com cobertura global. Engloba o sistema americano, o russo, o europeu, o chinês e o indiano.

Levantamentos

Conjunto de operações destinado à execução de medições para a determinação da forma e dimensões do planeta.

(continua na página seguinte)

(continuação)

Palavra	Significado(s)
Aerolevantamentos	Conjunto das operações aéreas e/ou espaciais de medição, computação e registo de dados do terreno com o emprego de sensores e/ou equipamentos adequados, bem como a interpretação dos dados levantados ou sua tradução sob qualquer forma, segundo o art. 3º DL nº. 1177 de 21 de junho de 1971.
SIG	Sistema de informação dedicado ao arquivo, edição, processamento, apresentação e análise de informação relativa a fenómenos, variáveis, acidentes naturais ou artificiais, construções entre outros, relacionados com a superfície terrestre por coordenadas geográficas ou cartográficas.

Lista de acrónimos

Sigla	Expansão
AP	Agricultura de Precisão
AVD	Alto Douro Vinhateiro
CCR	Cobertura do Caixeiro Rural
CMR	<i>Compact Measurement Record</i>
DEM	<i>Digital Elevation Map</i>
DGPS	<i>Differential Global Positioning System</i>
DGNSS	<i>Differential Global Navigation Satellite System</i>
DL	Decreto Lei
DTM	<i>Digital Terrain model</i>
EUA	Estados Unidos da América
EGNOS	<i>European Geostationary Navigation Overlay Service</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>

Sigla	Expansão
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GSM	<i>Global System for Mobile communications</i>
HAE	<i>Height Above Elipsoide</i>
IgeoE	Instituto Geográfico Exército
IGP	Instituto Geográfico Português
IGS	<i>International Global Navigation Sattelite System Service</i>
ITRS	<i>International Terrestrial Reference System</i>
IVDP	Instituto dos Vinhos do Douro e Porto
LIDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital Terreno
MSAS	<i>Multifunctional Sattelite Augmentation System</i>
NMEA	<i>National Marine Electronics Association</i>
NNSS	<i>Navy National Security Site</i>
PDR	Programa de Desenvolvimento Rural do Continente
PV	<i>Precision Viticulture</i>
PDA	<i>Personal Digital Assistant</i>
PID	Proporcional, Integral e Derivativo
PRN	<i>PseudoRandom Code</i>
PT	Posto de Transformação
RDD	Região Demarcada do Douro
RFID	<i>Radio-Frequency IDentification</i>
RGB	<i>Red, Green and Blue</i>
RENEP	Rede Nacional de Estações Permanentes
RPC	<i>Rural Postman Coverage</i>
RTCM	<i>Radio Technical Commission for Marine Services</i>

Sigla	Expansão
RTK	<i>Real Time Kinematic</i>
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i>
SBAS	<i>Space-Based Augmentation Systems</i>
SERVIR	Rede de Estações Virtuais do IGeoE
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SLAM	<i>Simultaneous Localization and Mapping</i>
TIN	<i>Triangulated Irregular Network</i>
UNESCO	<i>United Nations Educational Scientific and Cultural Organization</i>
UTAD	Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro
USA	<i>United States of America</i>
VP	Viticultura de Precisão
VRS	<i>Virtual Reference Station</i>
VVPP	<i>Vineyard Viewer and Path Planning Application</i>
WAAS	<i>Wide Area Augmentation System</i>
WEB	<i>Word Wide Web</i>

Lista de abreviaturas

Abreviatura	Significado(s)
e.g.	por exemplo
et al.	e outros (autores)
i.e.	isto é, por conseguinte
etc.	etecetera, outros



Introdução

Esta tese aborda a temática da navegação autónoma em terrenos agrícolas não estruturados, especificamente em vinha de montanha em patamares de um bardo. Focaliza-se na obtenção da informação necessária ao desenvolvimento da componente de planeamento de trajetórias de um sistema a implementar num trator que habitualmente já realiza as operações de cultivo e manutenção da vinha de forma semiautomática.

Propõe o desenvolvimento de um algoritmo combinado para determinação do trajeto ótimo de aproximação e cobertura de ilhas dispersas, baseado em linhas de referência obtidas com algoritmos de esqueletização do Modelo Digital de Elevação (MDE) da vinha. Paralelamente, propõe uma nova técnica para gerar um projeto num Sistema de Informação Geográfica (SIG) para a região em estudo. Apresenta as funcionalidades de uma aplicação gráfica de apoio que surge da necessidade de observação, teste e validação dos resultados obtidos.

1.1 Enquadramento

A navegação consiste no deslocamento de um veículo móvel com um determinado objetivo. Este poderá compreender o seguimento de uma dada rota, o cobrimento orientado ou aleatório de uma zona estipulada, em ambiente aberto ou fechado. A condução pode fazer-se de forma manual (pelo homem) ou automática por recurso a sistemas inteligentes.

Os sistemas autónomos móveis, direcionados para aplicações de navegação em espaços abertos, são sistemas inteligentes cujo grau de complexidade cresce em espaços pouco estruturados. O seu desenvolvimento tem aumentado devido a solicitações impostas no campo das aplicações militares ([Augusto et al., 2009](#)), da exploração terrestre e do espaço ([Qiong et al., 2015](#); [Wang et al., 2009](#)), do estudo dos mares ([Zeng et al., 2015](#); [Galceran et al., 2015](#)) e da condução autónoma de veículos comerciais. Atualmente um conjunto alargado de empresas e instituições dedica-se ao desenvolvimento de veículos autónomos comerciais, com o objetivo de reduzir o número de acidentes, os custos associados ao congestionamento de tráfego, o consumo de energia e a poluição ([CB Insights, 2016](#)). A regulamentação das condições de circulação desses veículos, que tendo em conta a segurança dos potenciais ocupantes e da máquina, é um assunto tem vindo a ser tratado, nomeadamente nos países onde a circulação já é permitida ([Anderson et al., 2014](#)).

Em termos de aplicações tecnológicas no campo da agricultura, podem encontrar-se veículos que se movimentam autonomamente em terrenos planos onde a condução se faz em caminhos nas próprias plantações ou livremente de modo a cobrir a totalidade do campo agrícola. Os caminhos são formados entre filas de plantas que se encontram dispostas geralmente ao longo da fronteira mais extensa da plantação.

O desenvolvimento de sistemas de navegação autónoma na agricultura tem vindo a ser realizado por grupos de investigação que, apoiados em projetos nas mais diversas áreas tecnológicas, se dedicam à implementação de sistemas inteligentes visando aumentar a produtividade, a qualidade dos produtos e a sustentabilidade ambiental ([Reid et al., 2000](#); [Mousazadeh, 2013](#); [Emmi et al., 2014](#); [Bonadies et al., 2016](#)).

Os detentores das grandes marcas de tratores, já com larga experiência na produção de equipamentos para mecanização das operações agrícolas (como a pioneira John Deere, a ATC, a Claas e a Fendt, entre outras), mantêm a aposta na inovação e investem nos seus equipamentos a fim de torná-los totalmente autónomos (não tripulados) impulsionando as equipas de investigação que com eles trabalham. Os sistemas de navegação, cujo objetivo principal é a recolha de dados para monitorização do campo agrícola, têm também vindo a ser desenvolvidos (Diago et al., 2015). Como ferramenta de auxílio à agricultura de precisão, utilizam os avanços tecnológicos em termos de sensores, de sistemas de comunicação e de técnicas de computação (Mulla, 2013; Matese e Di Gennaro, 2015).

Atualmente, os equipamentos móveis agrícolas comerciais com condução assistida dispõem, para se localizarem, de sensores de posição e de orientação (sistemas de compensação de inclinação do terreno). Utilizam sensores inerciais, acelerómetros de pequena dimensão e giroscópios, para medir a aceleração linear e a velocidade angular e outros sensores para detetar a inversão de sentido de rotação do seu movimento ou verificar a ocorrência de sobreposição do comando manual. As versões mais recentes dispõem de um sistema elétrico de comando da direção e de uma interface cuja função é, para além de programar a forma da trajetória proposta, apresentar o erro de posicionamento estimado. Estes equipamentos recorrem a técnicas simples de planeamento de trajetórias e de controlo de navegação (Heraud e Lange, 2009). Permitem estabelecer a forma do percurso a realizar: em trajetórias lineares paralelas ou em curvas preestabelecidas, ou definidas pelo operador, distanciadas de um *offset* (normalmente a largura da alfaia) perpendicular à direção da trajetória; em pivots; em espirais; ou combinação das anteriores. Os algoritmos de controlo utilizam o erro relativo de seguimento da trajetória e o seu desfasamento angular, determinados pelo sistema de planeamento de trajetórias, para efetuar as correções necessárias na direção do veículo. Algumas versões comerciais são fornecidas com um controlador auxiliar para salvaguardar desequilíbrios do veículo quando o terreno não é suficientemente plano, evitando que tombe.

No sentido de aumentar a autonomia dos equipamentos agrícolas, utilizando os desenvolvimentos em termos de hardware e software, tem vindo a ser sugerida a implementação de novas capacidades: a deteção e a identificação de objetos ([Manduchi et al., 2005](#)) e o contorno de obstáculos são melhorias que requerem a utilização de outro tipo de sensores; o recurso a sensores laser, de tato e de cheiro e a sensores de visão (câmaras de vídeo, tecnologia de infravermelhos, entre outros) permite a implementação de novas técnicas de navegação ([Rovira-Más, 2010](#)). Os problemas da navegação em espaços abertos estão normalmente associados à possibilidade de existirem objetos móveis que, de forma não previsível, se interponham com maior ou menor dinâmica no espaço de circulação e à capacidade de os veículos móveis reagirem à sua presença, não deixando de cumprir o objetivo proposto, mas tendo porventura que alterar o plano inicialmente traçado. Contudo, uma vez que a precisão das grandezas medidas numa determinada aplicação depende muito da escolha apropriada dos sensores nela utilizados e do modo como é efetuada a sua interligação, deve ser dada uma especial atenção aos modos de fusão sensorial utilizados na navegação autónoma. As condições climatéricas variáveis, como a chuva, o nevoeiro, a luminosidade do sol, afetam diretamente a qualidade dos dados recolhidos, pelo que é necessária a inclusão de sistemas que diminuam os efeitos nefastos da diminuta iluminação em determinadas posições e a elevada reflexão de luz noutras, por exemplo.

Um maior número de sensores aumenta a precisão da navegação mas afeta a complexidade dos sistemas de fusão sensorial e compromete em termos de custo os sistemas de navegação ([Gonzalez-de Santos, 2014](#)).

As diferentes metodologias de navegação em ambientes abertos e não estruturados, umas mais direcionadas para navegação de curta duração, outras que exigem uma prévia preparação (como seja a definição de marcadores naturais ou a colocação de marcadores artificiais de terreno), outras ainda mais direcionadas para a deteção de obstáculos ou planeamento de trajetórias, têm vindo a ser objeto de investigação e desenvolvimento. Genericamente têm abrangido três áreas distintas: o reconhecimento ou mapeamento do território, o planeamento de trajetórias e a condução autónoma.

- Os métodos de navegação baseados em mapas pré-conhecidos fornecem informação de navegação com elevada precisão. Exigem, contudo, uma preparação prévia para serem aplicados (por exemplo, a recolha de dados sobre a elevação do terreno). O modelo tridimensional inicial do espaço será uma mais valia, mesmo que tenha de ser continuamente atualizado devido à dinâmica associada à alteração da localização dos objetos nele representados ou da sua configuração, de carácter temporário (movimentação de terra devido a intempéries) ou permanente (plantação de nova vinha).

A capacidade de localização e mapeamento simultâneos (SLAM, *Simultaneous Localization and Mapping*) como medida da autonomia de um veículo tem-se refletido em trabalhos que utilizam algoritmos de visão e localização para criar mapas detalhados das áreas em estudo. Algumas técnicas fazem-no em tempo real, navegando no terreno, localizando fronteiras dos caminhos ou obstáculos que se interpõem à sua livre circulação e criando marcadores de terreno. O mapeamento tridimensional recorrendo a sistemas de visão deve ser encarado como um novo contributo para a agricultura de precisão, mais concretamente como ferramenta para auxiliar a navegação autónoma e para efetuar tarefas de monitorização de campos agrícolas ([Agrawal et al., 2007](#); [Auat Cheein et al., 2011](#); [Santos et al., 2015](#)). Os mapas digitais tridimensionais do terreno, utilizados para auxiliar os sistemas autónomos de navegação quando estes se baseiam principalmente em dados recolhidos por um equipamento de leitura de posição de um ponto na terra por recurso a informação fornecida pelo sistema de satélites (*Differential Global Navigation Satellite System*, DGNSS ou GNSS Diferencial), permitem diminuir o grau de complexidade da navegação ([Tso-gas et al., 2011](#)). Este auxílio, fundamental em espaços não estruturados, é tão mais importante quanto maior a irregularidade do terreno, principalmente quando pequenas diferenças de posição correspondem a grandes desvios verticais e um erro mínimo de navegação resulte numa queda grave que pode danificar ou mesmo destruir o equipamento móvel. O mesmo acontecendo, no caso de produções agrícolas, às plantas e aos frutos.

- Um dos meios que tem contribuído para melhorar os diferentes sistemas de navegação autónoma tem sido o recurso a técnicas de planeamento de trajetórias.

Nos últimos anos, os métodos heurísticos para planeamento de trajetórias têm-se sobreposto à teoria clássica (Choset et al., 2005; LaValle, 2006; Masehian e Sedighizadeh, 2007). Os métodos heurísticos baseiam-se na escolha da trajetória para satisfazer um objetivo e na otimização de uma determinada função de custo (Ferguson et al., 2005). As soluções híbridas, que se enquadram em diferentes áreas de estudo, têm vindo a ser largamente utilizadas (Garcia et al., 2009).

- O comando da direção do sistema de navegação pode ter como referência uma diretriz (identificada durante uma passagem anterior ou por uma linha ou um conjunto de pontos pré-estabelecidos) ou até um cabo colocado no terreno (Bak e Jakobsen, 2004; Yao et al., 2005; García-Pérez et al., 2008; Li et al., 2009; Shalal et al.). As três classes de sensores utilizados na automatização dos veículos agrícolas, ou seja, os medidores de movimento e os detetores de marcadores artificiais ou os de características locais, têm vindo a ser utilizados, conjuntamente com diferentes técnicas de comando, para efetuar a condução segura dos veículos (Hague et al., 2000). Destas técnicas de comando salientam-se o controlo da direção em malha aberta, o controlo PID (Proporcional, Integral e Derivativo), o controlo difuso e o controlo adaptativo.

Para a implementação das diferentes metodologias de navegação, segundo uma revisão recente no campo dos veículos agrícolas autónomos (Mousazadeh, 2013), os algoritmos utilizados podem agrupar-se em seis classes consoante o tipo e a técnica de manipulação da informação: os algoritmos baseados em medições relativas e controlo remoto; os que recorrem ao processamento da imagem; os que se baseiam em informação estatística; aqueles que utilizam lógica difusa; os que usam redes neurais e algoritmos genéticos e os que se baseiam nos filtros de Kalman.

No processo de implementação e teste de sistemas autónomos de navegação, é frequente o desenvolvimento paralelo de aplicações para verificar e validar a sua aplicabilidade (Arguenon et al., 2006). Para dar apoio ao planeamento de trajetórias ou para simular a condução do veículo, as aplicações amigáveis de comunicação com o utilizador são, hoje em dia, um requisito fundamental nas quais é aplicado o crescente desenvolvimento da tecnologia de computação gráfica. Ao longo dos últimos

anos, sob diferentes sistemas operativos e linguagens, foram várias as plataformas de software usadas na robótica no campo agricultura de precisão (Jensen et al., 2014).

A mecanização integral da poda e da vindima em vinhas planas, tanto na Austrália, como nos EUA (Morris, 2007) e na Europa (em alguns países como a França, a Itália e a Espanha), é uma realidade e comprova-se ser um fator determinante no desenvolvimento de um sistema produtivo mais eficiente e mais competitivo, não tendo sido verificadas diminuições acentuadas da qualidade dos vinhos quando a produção é mantida dentro dos limites de capacidade das videiras (Clingeffer, 2000). Em Portugal, no Alentejo e na Estremadura onde os terrenos são de latifúndio e planos, a mecanização da vinha com máquinas de grande porte é uma realidade. Segundo Cruz et al. (2010), a poda mecanizada aumenta a produção de cachos mas diminui o vigor das videiras ao longo dos anos.

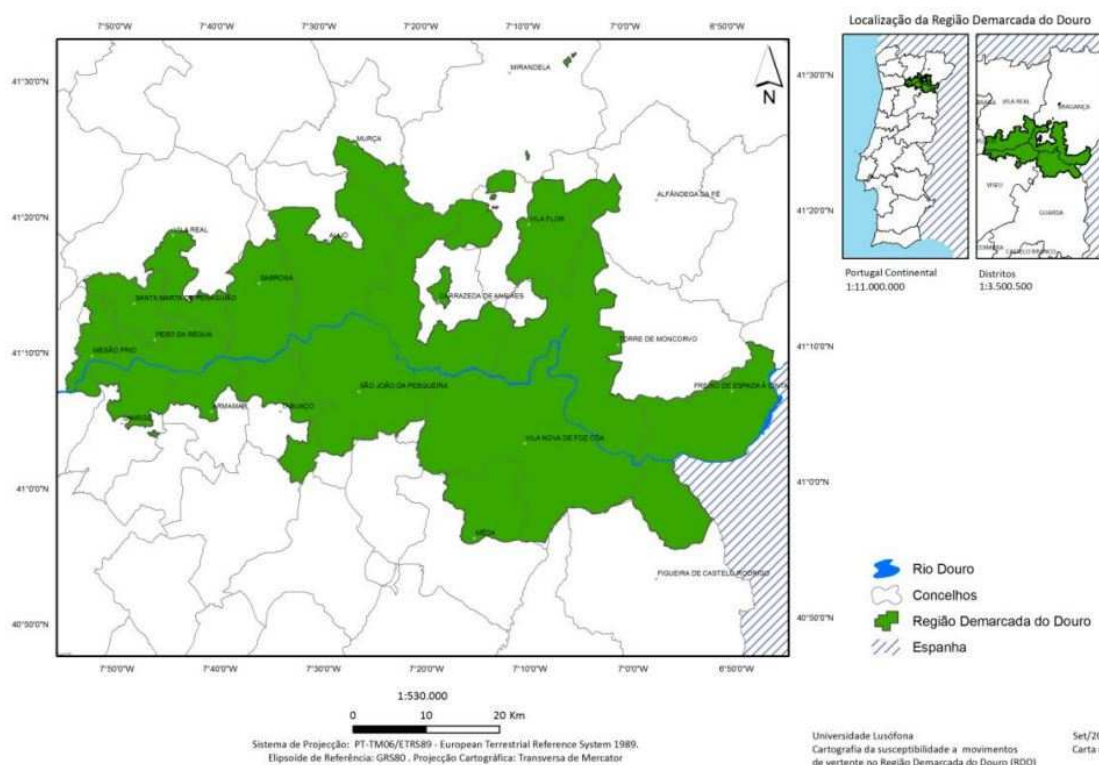


Figura 1.1 – Delimitação da Região Demarcada do Douro [retirada de (Bat)].

A Região Demarcada do Douro (RDD), a primeira região vinícola demarcada do

mundo, regulamentada pelo DL n.º 173/2009 de 3 de agosto; está localizada a Nordeste de Portugal, geograficamente entre as latitudes 40°06'N e 41°15'N e as longitudes 7°06'W e 7°52'W, Figura 1.1. Compreende atualmente uma área total de cerca de 45000 hectares de vinhas dividida em três subregiões, Baixo Corgo, Cima Corgo e Douro Superior, com condições climáticas e sócio-económicas distintas. A sua primeira demarcação remonta a 1757, ao reinado de D. José, tendo sofrido algumas alterações até à demarcação atual, de 1921, estabelecida por DL n.º. 7934 de 10 de dezembro, assinada pelo então ministro da agricultura Antão de Carvalho.

A RDD apresenta montanhas íngremes e estreitos vales cavados pelo rio Douro. As vinhas são plantadas em patamares formados a partir das encostas rochosas e apoiados por centenas de quilómetros de muros de pedra (Andresen et al., 2004). As castas distribuem-se nos terraços em talhões separados e individualizados. Em 2001, o Alto Douro Vinhateiro (ADV) foi reconhecido pela Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (*United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*, UNESCO) como Património Mundial da Humanidade. A viticultura na RDD pode ser praticada de forma manual ou mecanizada. A mecanização da vinha só é possível nas vinhas cuja reconversão se desenvolveu segundo o Plano Intermunicipal de Ordenamento do Território (PIOT-ADV).

Já foram realizados estudos para incluir a mecanização de algumas atividades vinícolas na RDD recorrendo a máquinas automáticas de pequeno porte (Santos et al., 1998), pelo que se sugere a adaptação de equipamentos existentes ou o desenvolvimento de novos protótipos.

A mecanização, quando a vinha é sistematizada em patamares com aproximadamente 2,3 m de largura e uma única linha de videiras disposta na parte externa do patamar com talude em terra, é assegurada por tratores vinhateiros de bitola estreita (geralmente entre 1,10 a 1,30 m) que se movimentam nos patamares junto à base do talude e nos caminhos de acesso aos mesmos (Magalhães, 2012). As características do terreno de algumas vinhas é uma das principais limitações para a automatização da agricultura e daí a necessidade de desenvolver sistemas específicos (Santos, 2000b,a). Devido às suas características únicas, a RDD coloca desafios muito particulares, principalmente devido ao seu perfil topográfico, às variações climáticas acentuadas e às



Figura 1.2 – Vinha de montanha na RDD.

características complexas do solo, Figura 1.2.

O acordo de parceria adotado entre Portugal e a Comissão Europeia (Portugal 2020) reúne a atuação dos cinco Fundos Europeus Estruturais e de Investimento com vista à coesão e desenvolvimento económico, social e territorial de Portugal, entre 2014 e 2020. Inclui para a sua operacionalização dezasseis programas, um dos quais, o Programa de Desenvolvimento Rural ([PDR](#)), contempla a ação de investimento à exploração agrícola para aumentar a competitividade e promover a sustentabilidade dos espaços rurais, identificando como despesas elegíveis a compra ou locação de novo equipamento para melhorar a eficiência da exploração, tanto a ambiental como a energética.

O programa do Instituto dos Vinhos do Douro e Porto ([IVDP, 2010](#)) inclui o tema da viticultura de precisão (VP) como área a desenvolver e a aplicar nos seus planos de atividades. Neste sentido, a VP no Douro é justificada com base no melhoramento da qualidade dos vinhos e porque se vislumbra um investimento com retorno. A

formação superior dos agricultores e o seu elevado nível de conhecimentos é, sem dúvida, uma ferramenta facilitadora da implementação destas práticas.

O êxodo rural e a falta de mão-de-obra local fazem com que seja necessária a contratação especializada e temporária (principalmente para as atividades de poda e vindima) de mão-de-obra em empreitada.

A utilização de um trator agrícola que já se encontre disponível na exploração minimiza o investimento e dá autonomia ao proprietário ou ao gestor para que possa desta forma programar o trabalho sem estar dependente de terceiros.

1.2 Motivação

Os sistemas autónomos de navegação desenvolvidos para auxiliar as tarefas agrícolas em campo aberto são geralmente usados quer em plantações rasteiras, quer em plantações de árvores. No caso da vinha, e já que as videiras estão geralmente distribuídas segundo linhas paralelas numa direção preferencial no terreno, é mais frequente o seu enquadramento no grupo das plantações rasteiras.

As vinhas de encosta sistematizadas em patamares (doravante designadas simplesmente por vinhas em patamares), não podendo ser enquadradas em nenhum dos grupos anteriores, requerem uma abordagem diferente, o que motivou em parte o presente trabalho.

A implementação de um sistema de planeamento de trajetórias com vista à determinação da melhor rota de execução de uma atividade agrícola é um fator decisivo para rentabilizar o investimento.

Os sistemas de planeamento de trajetórias usando grafos têm vindo a ser estudados em pormenor na área da investigação operacional há mais de cinquenta anos ([Bochtis e Sørensen, 2009](#)). A sua implementação num sistema de gestão de tarefas agrícolas começou a ser explorada numa abordagem semelhante ao problema do carteiro rural (RPP, *Rural Postman Problem*) ([Sørensen et al., 2004](#)).

O problema do planeamento em campos agrícolas tanto é de aproximação como de cobertura ([Galceran e Carreras, 2013](#)). O interesse consiste em minimizar a circulação do trator ou frota de tratores nos cabeços, onde não é efetuada nenhuma operação cultural, mas apenas são realizadas manobras, e garantir a cobertura total da área a tratar, otimizando um determinado critério ([Bochtis e Vougioukas, 2008a](#)).

O tamanho e as características do trator condicionam a formulação do problema da navegação, quando esta se faz em linhas paralelas de modo a cobrir a totalidade da plantação, só sendo otimizável a ordem pela qual a trajetória é efetuada e a direção de varrimento, tendo em conta a eventual existência de obstáculos.

No caso em estudo, onde a circulação se faz segundo curvas, mais ou menos niveladas, acompanhando o contorno da montanha, o problema torna-se mais complexo. Esta particularidade exigiu a aplicação de algoritmos exatos e tornou ainda mais motivador o presente trabalho.

Além disso, é de salientar a possibilidade de poder contribuir para a modernização da vinha através de ações que visam diminuir o esforço árduo do homem, deixando-o livre para tarefas mais gratificantes.

O trabalho permitiu aumentar os conhecimentos em diferentes áreas pela participação num projeto multidisciplinar associado a Viticultura de Precisão envolvendo a colaboração de especialistas de diferentes ramos da engenharia.

Mais acresce a possibilidade de trabalhar com um grupo de investigadores ligados a centros de competência portugueses, em áreas distintas, cuja contribuição para a viticultura de precisão aplicada à RDD tem vindo a dar frutos. Salientam-se, entre outros, os trabalhos que visaram:

- dotar a vinha de um sistema inteligente com capacidade de recolha de informação e tomada de decisão em tempo real, recorrendo às novas tecnologias de comunicação sem fios, utilizando fontes de energia alternativa e um conjunto alargado de sensores dedicados ([Cunha et al., 2010](#); [Peres et al., 2011](#); [Fernandes et al., 2013](#));

- desenvolver um sistema de visão para detetar o estado de maturação das uvas (Reis et al., 2011) e distinguir os cachos de uva branca nas folhas da videira e adicionalmente localizar a ráquis do cacho, o que pode ajudar na condução de um robô vinhateiro (Reis et al., 2012);
- desenvolver um robô de monitorização da vinha em patamares e um sistema híbrido de localização e mapeamento simultâneos (SLAM) onde são utilizados como marcadores naturais os troncos das videiras e os postos dispostos ao longo de cada linha da vinha e onde é proposta a utilização de identificadores de rádio frequência (*Radio-Frequency IDentification*, RFID) como marcadores artificiais a colocar estrategicamente nos terminais de cada linha (Santos et al., 2015).

O trabalho que se desenvolve nesta tese, quando inserido num sistema de navegação, dará um contributo importante na área da agricultura de precisão pois poderá ser utilizado para movimentar veículos semelhantes, em qualquer região rural de terreno irregular, recorrendo a tecnologia de baixo custo.

1.3 Objetivos

Este trabalho pretende desenvolver a componente de planeamento de trajetórias de um sistema a implementar num trator vinhateiro, para operar em terreno de vinhas em patamares, no sentido de tornar autónoma a sua navegação.

O sistema de navegação, apoiado num GPS (equipamento de georeferenciação, vulgarmente conhecido pelo nome do sistema americano original de posicionamento por satélite, o *Global Positioning System* (GPS) mas que hoje em dia designa aquele que recebe informação do sistema GNSS ou DGNSS dependendo das suas características) de precisão, num conjunto de outros sensores essenciais para a navegação em segurança, num mapa do terreno e numa rota obtida através da utilização de algoritmos de planeamento de trajetórias, deverá, quando implementado, ser capaz de orientar o trator durante a realização das tarefas de cultivo e manutenção da vinha. Como exemplo de operações onde a mecanização já é utilizada pode citar-se

a aplicação de fito-fármacos (pesticidas, fungicidas e herbicidas) através da pulverização e o destroçamento de vimes após a poda. Estão em vias de mecanização na RDD a despona ([Santos et al., 1998](#)), a poda e a vindima.

O sistema de planeamento de trajetórias, baseado na informação disponibilizada no mapa da vinha, no tipo e na forma como irá ser realizada a operação e reconhecendo a posição inicial do trator, determinará o percurso ótimo. A posição final, caso não coincida com a posição inicial, deverá ser especificada. O critério de otimização poderá ser escolhido quer por seleção de diferentes funções quer por alteração da sua ponderação relativa.

Deverá ser adotada uma abordagem que inclua o planeamento de situações de deslocamento ótimo do trator entre dois pontos da vinha, sem que seja realizada uma operação, e de situações de cobertura de áreas de trabalho durante as quais é exigida uma operação especificada. A ponderação relativa dos critérios adotados poderá ser testada com o objetivo último da otimização global.

Para concretizar o objetivo supracitado, foi necessário realizar as seguintes ações:

- Escolher uma parcela de vinha que contivesse o maior número de especificidades das que caracterizam as vinhas da Região Demarcada do Douro (RDD).
- Determinar o modelo digital do terreno (MDT) da parcela, uma vez que o existente, adquirido ao Instituto Geográfico do Exército (IgeoE) à data do início dos trabalhos, era anterior à plantação da vinha e não tinha a precisão necessária para a identificação pormenorizada dos seus patamares.
- Efetuar o levantamento da trajetória aquando da execução, por um perito num trator convencional, de uma operação de aplicação de herbicida nos patamares da vinha.
- Determinar as possíveis rotas de navegação, por aplicação de diferentes algoritmos de esqueletização aos espaços de circulação do trator na vinha.

- Desenvolver uma aplicação (denominada *Vineyard Viewer and Path Planning Application* - VVPP) onde o teste e a validação das opções tomadas pudessem ser realizados de forma simples e amigável com o utilizador. A aplicação possibilitou a seleção e a execução dos algoritmos desenvolvidos e a simulação das rotas de navegação pré-configuradas.

1.4 Contributos

Com a realização deste trabalho foram dados contributos em quatro áreas: Em termos de levantamento, foi criada uma nova técnica, direcionada para as vinhas em patamares, para gerar um projeto SIG (Sistema de Informação Geográfica) (Contente et al., 2013). Em termos de navegação, foram dados dois contributos para a condução de um veículo móvel na vinha: o primeiro na validação de um equipamento GNSS diferencial (Contente et al., 2015a) e um segundo na verificação da possibilidade de usar linhas de referência determinadas com recurso a algoritmos de esqueletização (Contente et al., 2015b). Em termos de planeamento de trajetórias foi desenvolvido um algoritmo combinado para determinação do trajeto ótimo de aproximação e cobertura de ilhas dispersas da vinha (Contente et al., 2016). Paralelamente, um contributo não menos importante foi dado na criação e desenvolvimento de uma aplicação gráfica de apoio à navegação, onde foi possível testar e validar estas contribuições.

- No levantamento **estático** de trajetórias foi especificamente determinado o Mapa Digital de Elevação do Terreno (MDT, cujo acrónimo em inglês é DEM ou seja *Digital Elevation Map*) da parcela da vinha em estudo, com uma precisão média de 10 cm, através da utilização do conjunto de procedimentos que constituem uma nova técnica poderá servir para levantamento de outras vinhas da Região Demarcada do Douro (RDD) e será apresentada em pormenor. Permitiu criar um mapa altimétrico detalhado e preciso da localização dos patamares e dos caminhos de acesso aos patamares (identificação doravante usada para designar simultaneamente os acessos entre patamares e os

caminhos de contorno da vinha). E permitiu ainda recolher informação variada e independente, em diferentes posições da vinha, numa estrutura de dados criada para o efeito e que num sistema SIG é armazenada em camadas temáticas independentes sendo relacionáveis, de forma rápida e simples, por sobreposição.

- Na navegação, através de um levantamento **dinâmico** de uma atividade de cultivo e manutenção da vinha, foi validado um equipamento GNSS diferencial específico por comparação dos resultados com os obtidos através do levantamento estático. Foi ainda dado um contributo importante na determinação de forma semiautomática das linhas de condução, pela aplicação de dois algoritmos distintos a cada uma das superfícies tridimensionais que definem os caminhos possíveis de circulação. As curvas esqueleto resultantes foram comparadas com o percurso efetuado por um perito na condução de um trator durante a operação de cultivo e manutenção da vinha (realizada para a totalidade da vinha). Apesar de numa primeira fase ter sido apenas validado um dos algoritmos, aquele que minimizava o erro quadrático médio entre a curva esqueleto e a trajetória do veículo móvel, mais tarde foi verificado que ambos podiam ser utilizados, dependendo da forma como os patamares e os caminhos de acesso aos patamares se orientam preferencialmente numa direção. As curvas esqueleto deste modo validadas, consideradas para a navegação como linhas de referência, passaram a ser designadas como linhas de condução.
- No planeamento de trajetórias, após identificado e tipificado o problema, foi encontrada uma solução baseada num grafo de decisão. O problema de aproximação e cobertura parcial da vinha foi enquadrado como de Cobertura do Carteiro Rural (CCR), em inglês *Rural Postman Coverage* (RPC). A abordagem desenvolvida utiliza simultaneamente os algoritmos A* e Dijkstra para determinar a sequência ótima de troços das linhas de condução (ou das linhas de condução quando estas não necessitam de ser divididas em troços). Cumulativamente, considera troços para cobertura (no interior das áreas/ilhas de vinha) e para aproximação (entre áreas/ilhas). Implicitamente, a abordagem contempla ainda a determinação dos pontos ótimos para iniciar e terminar em

cada área de cobertura. Numa primeira fase, a otimização foi determinada por minimização da distância percorrida e do tempo gasto. Mais tarde, entre outros requisitos, pensa-se considerar o custo do combustível (tendo em conta que as subidas condicionam a mudança de velocidade). O sistema de decisão foi suportado por um grafo contendo a informação do Modelo Digital de Elevação (MDE) da vinha.

- A aplicação gráfica de visualização e de planeamento de trajetórias desenvolvida possibilitou a representação do MDE da vinha e a visualização dos seus pormenores num ambiente gráfico com características OpenGL. Usando a aplicação, podem ser observadas diferentes projeções da vinha bem como os pontos limite dos patamares e dos seus caminhos de acesso, as linhas da trajetória efetuada pelo trator em diferentes operações de cultivo e manutenção e as linhas esqueleto. A aplicação permite ainda a seleção e a execução dos diferentes métodos de esqueletização e planeamento de trajetórias implementados no decorrer deste trabalho. Por ter sido estruturada de forma modular, deixa em aberto a possibilidade de ser expandida a sua função inicial para incluir ferramentas de condução a aplicar diretamente no trator para que o perito possa testar as suas funcionalidades.

1.5 Organização do documento da tese

Esta dissertação encontra-se estruturada em seis capítulos.

Neste capítulo introdutório identifica-se o problema que deu origem ao presente trabalho enquadrando-o no tema mais vasto da navegação autónoma de veículos móveis de apoio às atividades vitivinícolas em terrenos pouco estruturados onde práticas de viticultura de precisão já são uma realidade ou urge implementar. São aqui apresentados os objetivos e os fatores que motivaram a sua realização, bem como os seus contributos mais marcantes.

No capítulo seguinte, intitulado navegação autónoma em vinha de encosta em patamares, faz-se uma reflexão sobre a atividade científica desenvolvida e publicada nas

quatro áreas de estudo em que incide este trabalho. Nomeadamente no âmbito da determinação de mapas, mencionando as técnicas de levantamento de informação 3D do terreno; no âmbito da determinação das linhas de condução para auxiliar a navegação, referindo os métodos de esqueletização; e, no âmbito das técnicas de planeamento de trajetórias, fazendo referência aquelas que envolvem cumulativamente operações de determinação do percurso ótimo entre duas localizações e as que envolvem a cobertura de uma ou mais zonas, previamente delimitadas, dispersas no mapa. Faz-se ainda referência, no final de cada subsecção, ao modo como o assunto abordado se relaciona com o presente trabalho.

Nos capítulos 3 e 4, intitulados “Mapa 3D da vinha e linhas de condução” e “Planeamento de trajetórias em vinha de montanha”, respetivamente, encontram-se descritos os contributos fundamentais deste trabalho nas diferentes vertentes supracitadas. Nestes, o problema é caracterizado numa fase inicial, sendo depois apresentada a metodologia encontrada para a sua solução e, por fim, apresentados os resultados. Quando necessária a sua validação, são também referidas as ações desencadeadas para o efeito.

No capítulo 5, referente à aplicação VVPP, apresenta-se a arquitetura da ferramenta desenvolvida para simultaneamente executar as diferentes ações executadas durante a trabalho e permitir a fácil interação com o utilizador. As funcionalidades da aplicação VVPP são explicadas de forma sucinta.

No último capítulo, é efetuada uma análise do trabalho na sua globalidade, retirando as devidas conclusões. São apontadas as contribuições relevantes e efetuada a sua discussão crítica. É ainda avaliada a forma como o trabalho poderá ser complementado ou servir de incentivo para trabalhos futuros.

2

Navegação autónoma em vinha de encosta em patamares

No capítulo anterior foi feito o enquadramento à navegação autónoma em espaços abertos não estruturados, como é o caso de terrenos agrícolas. Neste capítulo são introduzidas as temáticas e apresentados os desenvolvimentos encontrados nas áreas abrangidas pelo presente trabalho de tese, nomeadamente nos que diz respeito às técnicas de levantamento com GPS para elaboração de um modelo tridimensional de um terreno agrícola, determinação das linhas de condução de forma automática, planeamento de trajetórias e aplicações de apoio à navegação.

Esta abordagem visa enquadrar o problema mais específico do planeamento de trajetórias em vinha de encosta sistematizada em patamares numa quinta típica da RDD.

2.1 Enquadramento

Na RDD a vinha encontra-se plantada ao alto, em patamares largos ou estreitos e em micro patamares em antigos geios, segundo as novas técnicas, como se pode observar nas Figuras [2.1](#), [2.2](#), [2.3](#) e [2.4](#) ([Magalhães, 2012](#)).



Figura 2.1 – Plantação em filas ao alto.



Figura 2.2 – Plantação em patamares largos.



Figura 2.3 – Plantação em patamares estreitos.



Figura 2.4 – Plantação em micro patamares.

No caso particular da vinha plantada em patamares estreitos, muitas vezes desníveis e com comprimentos não uniformes devido à necessidade de acompanharem a encosta, a condução de máquinas para realização de operações culturais é uma tarefa difícil de realizar de forma automática. Só um perito na condução, conhecedor da topografia do terreno, consegue realizar as operações na sua plenitude e sem

acidentes.

A inclusão de práticas de viticultura de precisão na região e a implementação de sistemas autónomos de produção (envolvendo a automatização de tarefas e a condução de veículos) que visem o aumento da produção e simultaneamente a manutenção da excelente qualidade dos vinhos da região, diminuindo o esforço humano despendido em tarefas árduas e todos os custos associados, é o desafio que envolve várias entidades que se propõem contribuir para o desenvolvimento de uma região que é património da humanidade.

Hoje em dia, apesar dos desenvolvimentos tecnológicos (e especialmente dos sistemas inteligentes), algumas das práticas agrícolas já são realizadas de forma mecanizada; contudo, devido a constrangimentos como as condições orográficas do terreno, estas práticas não são ainda realizadas de forma autónoma. A viticultura de precisão tem vindo a ser implementada na região para deteção de doenças, avaliação das castas, monitorização da qualidade e desenvolvimento de novos vinhos, entre outras vertentes ([Braga, 2009](#)).

Para automatização da condução de veículos móveis que habitualmente realizam as práticas agrícolas o conhecimento dos mapas das vinhas é fundamental, tanto para a condução do trator como para a implementação de sistemas de planeamento de trajetórias. O mapa da vinha é fundamental para o registo de incidências, para o planeamento da produção, a vindima, entre outras atividades necessárias à implementação das práticas de viticultura de precisão. Contudo, a inexistência de mapas digitais do terreno precisos para a região justifica, por si só, o levantamento topográfico para construção desses mapas.

2.2 Modelo Digital de Elevação

Por modelo digital do terreno, MDT (em inglês *Digital Terrain Model*, DTM), designa-se um conjunto de dados em suporte numérico que, para uma dada zona, permite associar a qualquer ponto definido sobre o plano cartográfico um valor correspondente à sua altitude ([Matos, 2001](#)).

Por modelo digital da superfície, MDS (em inglês *Digital Surface Model*, DSM), designa-se o MDT, os elementos naturais e outros construídos pelo homem. O MDT constitui um conjunto irregular de pontos que pode incluir fatores do foro climatérico, morfológico, oceanográfico e geológico da superfície terrestre.

O MDE (em inglês *Digital Elevation Model*, DEM) pode identificar-se como a representação tridimensional de uma informação georreferenciada da superfície da terra (somente o terreno) numa grelha uniforme de pontos. No presente trabalho, à semelhança de outros autores, os termos MDT e MDE são usados para representar a superfície da vinha, excluindo as plantas e construções feitas pelo homem nela existente.

Os MDE são criados em quatro fases distintas: a aquisição, a modelação (envolvendo operações de computação e modelação), a gestão e manipulação da informação e o desenvolvimento da aplicação.

A aquisição da informação compreende os processos de recolha de imagens georreferenciadas do terreno (pelo recurso a várias técnicas como a fotometria), o levantamento de pontos notáveis, a cartografia e a captação sensorial remota onde se incluem a aquisição ótica e radiométrica de imagem, a recolha sistemática por radar (*Synthetic Aperture Radar*, SAR) e as técnicas de deteção de luz e radar (*Light Detection And Ranging*, LIDAR).

Para a construção de um modelo numérico do relevo, a informação pode ser obtida por levantamentos topográficos, pelos métodos clássico e aerofotogramétrico ou mistos, por levantamentos hidrográficos e por digitalização das curvas de nível de cartas e plantas topográficas existentes (Casaca et al., 2005).

A informação altimétrica recolhida pelo método clássico tem em geral uma distribuição irregular, sendo selecionados os pontos notáveis do relevo: pontos de inflexão, pontos sobre as linhas de descontinuidade, entre outros. Os levantamentos topográficos pelo método aerofotogramétrico baseiam-se na análise, medição e interpretação de fotografias aéreas, com recurso a aparelhos de restituição estereoscópica que permitem uma amostragem ao longo das curvas de nível (método convencional) ou segundo malhas regulares com espaçamento variável (método de amostragem

progressiva).

A numerização vetorial ou matricial de curvas de nível e pontos cotados de cartas topográficas é um método cuja precisão é em geral inferior aos restantes, mas é o método mais prático de amostragem (com distribuição irregular). A Carta Topográfica Militar de Portugal à escala 1:25000 do IGeoE possui versão numérica.

Durante a fase de modelação, para além das técnicas já referidas, pode recorrer-se à computação gráfica e geométrica e ao processamento de imagens. São também diferentes as técnicas usadas para a gestão de informação e para o desenvolvimento da aplicação para visualização do mapa.

Os levantamentos podem subdividir-se, conforme o modo como são realizados, em geodésicos, topográficos, tridimensionais por GPS e aerolevantamentos, seguidamente detalhados:

1. Os levantamentos geodésicos podem ser de âmbito nacional (de precisão e alta precisão) ou local para fins topográficos. Os levantamentos geodésicos permitem o controlo horizontal e vertical, através da determinação de coordenadas geodésicas e altimétricas. Os métodos utilizados para levantamento são planimétricos (destacam-se a triangulação, a trilateração e a poligonação), altimétricos (destacam-se os nivelamentos geométrico, trigonométrico e barométrico) e gravimétricos.
2. Os levantamentos topográficos são operações através das quais se realizam medições com a finalidade de determinar a posição relativa de pontos da superfície da terra no horizonte topográfico correspondente a um círculo de raio de dez quilómetros.
3. Os levantamentos tridimensionais por GPS são levantamentos efetuados por dispositivos que recebem informação da posição de satélites. Foram inicialmente desenvolvidos pela Marinha dos EUA com a finalidade da navegação e posicionamento da sua frota e baseados na transmissão por radar (NNSS, *Navy National Security Site*), em frequências de rádio muito altas (bandas de microondas). Atualmente o sistema de posicionamento global por Satélite (*Global*

Navigation Satellite System, GNSS) e a sua versão aumentada, o GNSS diferencial (*Differential Global Navigation Satellite System*, DGNSS) ocupam o primeiro lugar entre os métodos utilizados em quase todas as aplicações de georeferenciação que envolvam dados de campo. O posicionamento engloba as seguintes classificações:

- o posicionamento absoluto onde a informação é obtida diretamente da rede de satélites de órbitas pré definidas (ou fixas), GNSS. Não é utilizado quando os trabalhos de campo exigem precisão submétrica;
- o posicionamento diferencial por satélite, onde a informação é obtida pelo recetor móvel e inclui a proveniente da rede de satélites de orbitas móveis (Sistema de Satélites de Base Aumentada, DGNSS) que, comunicando com os satélites de orbitas fixas e estações terrestres determinam os erros de posição para o local). A precisão submétrica já se adequa a alguns trabalhos de campo.
- o posicionamento diferencial por recetor terrestre fixo, que estacionado num ponto de coordenadas conhecidas, envia ao recetor móvel (comunicando entre si por ligações rádio, ou outras) as correções determinadas. A precisão é em geral centimétrica.

Os recetores GPS podem incluir tecnologia para posicionamento classificado como misto, contudo em todas as situações a precisão alcançada depende do número de satélites disponíveis no local.

4. Os aerolevantamentos utilizam equipamento aero ou espacialmente transportado (câmaras fotográficas e métricas e outros sensores) para efetuarem a observação geométrica de determinada superfície. Compreendem, para além das operações de medição, computação e registo de dados do terreno, as de sua interpretação e tradução sob a forma de cartas e mapas.

2.2.1 Sistema de Posicionamento Global

A determinação da posição, em tempo real, de um ponto na terra pode fazer-se por recolha e tratamento da informação disponibilizada pelo IGS (*International Global Navigation Satellite System Service*), através da utilização de recetores de sinal particulares (Dow et al., 2009).

O Sistema de Posicionamento Global (*GPS - Global Position System*), original do GNSS, é um sistema de navegação e posicionamento baseado num conjunto de satélites. Disponibilizado à comunidade civil é constituído por 24 satélites que descrevem órbitas predefinidas em torno da superfície terrestre. De cada satélite são emitidas duas ondas portadoras derivadas da frequência fundamental de 10,23 MHz: L1, a 1575,42 MHz e L2, a 1227,60 MHz. Podem identificar-se, mais próximos do utilizador, os recetores, as antenas e o software cuja função é receber, decodificar e processar os sinais, facultando o seu posicionamento em formato normalizado. As sequências aleatórias de impulsos (código PRN - *PseudoRandom Code*) modeladas na portadora L1 são recebidas pelos recetores GPS e, através de processos de trilateração da posição dos satélites, permitem determinar a sua posição. Podem ainda identificar-se, no sistema de posicionamento, a estação de controlo e as estações de monitorização. As últimas fazem o rastreio dos satélites e enviam os dados à estação de controlo que, por sua vez, faz o seu processamento.

No processamento de sinais GPS são identificados erros de diferentes origens: os das efemérides ou de órbita (os satélites não percorrem exatamente a órbita programada), os dos relógios (tanto dos satélites como dos recetores), os de propagação de sinal (por influência da atmosfera, especialmente na ionosfera) e os de medida dos recetores, são alguns exemplos (Karsky, 2004). A sua acumulação é minimizada pela correção individual de cada termo. As estações de controlo e monitorização efetuam estas correções, enviando aos recetores sinais com as diferenças encontradas. No caso da navegação em terrenos agrícolas, a ocorrência de leituras imprecisas pode dever-se ainda à existência de acidentes orográficos ou de vegetação densa que impedem a receção, mesmo que temporária, dos sinais enviados pelos satélites.

Existem atualmente no mercado mais de meia centena de marcas de recetores GPS

de diferentes tipos.

Algumas das características destes dispositivos são, designadamente, o peso, o tamanho, a possibilidade de incluírem um sistema inercial e de receberem dados através de ligações *ethernet*, rádio ou telemóvel (GSM - Sistema Global para Comunicações Móveis).

A escolha do dispositivo depende principalmente do fim a que se destina, sendo de considerar também outros fatores, entre os quais a relação entre precisão e custo. O atributo precisão permitiu classificar os recetores GPS com correção diferencial em três segmentos diferentes: submétricos, decimétricos e centimétricos. Na escolha do equipamento é conveniente que se verifiquem os requisitos mínimos apontados para o equipamento durante 99 % do tempo da sua utilização ([Rasmussen, 2005](#)).

A determinação de um valor de posição preciso depende do número de satélites lidos, da existência ou não de uma comparação diferencial e ainda da frequência com que o valor de posição é atualizado.

Quanto ao tipo de informação, estes dispositivos podem fornecer dados atualizados do tempo, da distância percorrida e da velocidade, bem como gerar as trajetórias efetuadas, num mapa. Existem atualmente, para aplicação no campo da agricultura de precisão e na condução automática de máquinas agrícolas, dispositivos com múltiplas capacidades, para além do posicionamento absoluto. Podem citar-se os equipamentos EZ-Guide 500 System (*Trimble*, USA), Star 5 Tracker (*MahtechS*, Italia) e Tronik (*Stara*, Brasil), entre outros.

Quanto à capacidade de receberem sinal corrigido, os recetores podem classificar-se em dispositivos com ou sem correção. Esta pode fazer-se em tempo real ou em pós-processamento. O tipo de posicionamento associado é designado por posicionamento sem correção, com correção diferencial em tempo real e com correção diferencial em pós-processamento .

- O posicionamento sem correção é utilizado em dispositivos comerciais, normalmente de bolso, de pouca precisão e baixo custo, que funcionam de modo autónomo, dispondo de canais de receção de sinal satélite em número limitado.

- O posicionamento com correção diferencial em tempo real pode recorrer aos sistemas de transmissão da correção diferencial via satélite ou rádio-frequência (por antenas colocadas em referenciais fixos ou por comunicação com bases externas próprias). Quando a correção é efetuada no próprio recetor não existe, como é óbvio, transmissão e o processo é designado por correção eletrónica interna.

A transmissão por **satélite** tanto é assegurada por serviços livres como por privados, estes últimos pagos anualmente (também conhecidos por *L-Band*). Entre os serviços livres de satélite de base aumentada incluem-se o sistema europeu EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*), o americano WAAS (*Wide Area Augmentation System*) e o japonês MSAS (*Multi-functional Satellite Augmentation System*). Estes sistemas possuem uma rede de estações de referência na terra (na sua área de abrangência) que recebe o sinal dos 24 satélites do sistema base, efetua a sua correção, e envia o sinal corrigido para satélites estacionários específicos próprios. Através de recetores dedicados, os utilizadores conseguem aceder às referidas correções. A mesma metodologia de funcionamento é identificada nos serviços privados onde se destacam os fornecidos pelas empresas, a inglesa Racal e a americana Omnistar.

A transmissão por **antenas**, colocadas junto a faróis, foi inicialmente desenvolvida pela guarda costeira de diferentes países como auxílio à navegação marítima. O princípio de determinação das correções a efetuar às leituras recebidas do IGS base, em pontos georeferenciados, é o mesmo. A diferença está no fato de as correções serem enviadas, via rádio frequência, para os recetores particulares (capazes de receber sinal DGPS) numa cobertura de aproximadamente 300 Km e não para um satélite dedicado. Em Portugal, a transmissão por antenas é, atualmente, assegurada pela Direção de Faróis. Esta entidade gere as quatro estações DGPS que servem a costa portuguesa, Cabo Carvoeiro, Sagres, Horta e Porto Santo. A rede, inicialmente implementada pelo Instituto Hidrográfico da Marinha Portuguesa para ajudar a navegação marítima, disponibiliza gratuitamente sinal DGPS para todos os utilizadores com recetores diferenciais. Neste sistema de rádio navegação de base terrestre, o sinal de correção diferencial é transmitido, como noutras redes mundiais, a uma

frequência baixa de 300 kHz ([Honorato C., 2001](#)).

A transmissão do sinal corrigido de **base própria** localizada em ponto georeferenciado é uma técnica de navegação por satélite que utiliza uma base de referência fixa, com cobertura de aproximadamente 10 km, que comunica diretamente com um ou mais recetores GPS através de uma ligação rádio. Este tipo de sistema apresenta algumas desvantagens, nomeadamente a necessidade de se utilizarem pelo menos dois recetores de sinal GPS (um fixo e outro móvel), a autorização para utilização da gama de frequências das ondas rádio transmitidas e o fato de a transmissão poder sofrer interferências de outras estações de rádio ou de sombras que se colocam no meio (arbustos ou acidentes orográficos). Dependendo do modo como são aplicadas as correções às pseudodistâncias ou à fase portadora, assim as técnicas se denominam diferencial GPS (DGPS, *Diferencial Global Position System*) ou Cinemático em tempo real (RTK, *Real Time Kinematic*). As principais diferenças entre DGPS e RTK podem ser identificadas do seguinte modo: para efetuar a comunicação RTK é necessária a utilização de recetores de dupla frequência enquanto que para DGPS basta utilizar recetores de frequência única; os recetores não necessitam de tempo de inicialização enquanto que os RTK necessitam de, pelo menos, um minuto; a precisão dimensional nas três dimensões é alcançada com RTK enquanto que em DGPS a maior precisão se verifica na horizontal; e a correção RTK (correção temporal e espacial dos erros) só se pode efetuar recorrendo a uma base própria enquanto que a correção DGPS (correção espacial dos erros) pode fazer-se em base própria, por antenas, e via satélite ([Jaime et al., 2006](#)).

O Instituto Geográfico Português (IGP) possui um serviço público de geoposicionamento, a Rede Nacional de Estações Permanentes (RENEP), que disponibiliza de forma gratuita aos utilizadores de equipamento GPS dados que facultam a determinação das coordenadas geográficas. A RENEP é constituída por estações GPS/IGS, de observação contínua, que difundem as correções para posicionamento em tempo-real utilizando a técnica RTK ([REN](#)).

Para que a abrangência de uma transmissão de sinal corrigido de base própria

se faça num perímetro maior, com a mesma precisão, é necessária a implementação de um maior número de bases de referência. Os desenvolvimentos neste sentido originaram o conceito de rede de estações RTK ou de estação virtual (VRS, *Virtual Reference Station*). O projeto SERVIR (Sistema de Estações de Referência GNSS VIRTuais do IGeoE) teve por objetivo a implementação, em Portugal, de uma Rede de Estações de GNSS de Referência Virtuais para Posicionamento em Tempo Real (RTK), Figura 2.5.

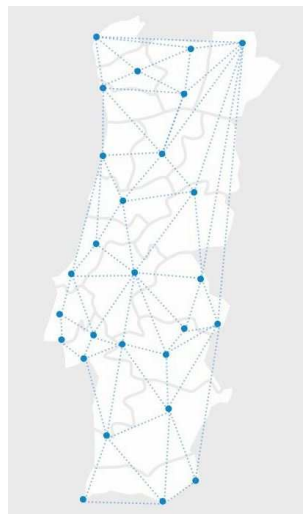


Figura 2.5 – Rede de Estações GNSS-SERVIR [retirado de ([SER](#))].

Baseado no conceito de estação virtual, o projeto permite que um utilizador posicionado na área de abrangência da referida rede estabeleça uma ligação bidirecional com o centro de controlo. Este, por sua vez, mantém permanentemente a comunicação com a rede de estações. A comunicação pode fazer-se por três vias: *internet* (*WEB*, *World Wide Web*), comunicação móvel (GSM, *Global System for Mobile Communications*) ou comunicação rádio (GPRS, *General Packet Radio Service*). A posição do móvel é enviada à estação de controlo como mensagem em formato NMEA (*National Marine Electronics Association*). Depois de aceite a referida posição, o centro de controlo responde, enviando ao móvel as correções em formato RTCM (*Radio Technical Commission for Marine Services*) ou em formato proprietário CMR (*Compact Measurement Record*). As versões dos formatos de comunicação podem ser consultadas no

site do Centro de Informação Geoespacial do Exército. As correções são determinadas em função dos erros obtidos nas estações envolvidas e chegam quase que instantaneamente aos equipamentos receptores sendo difundidas no referencial ITRF 2005 (*International Terrestrial Reference System*). Assim que o móvel recebe esses dados, atualiza a sua posição para uma solução DGPS e volta a enviar a posição corrigida para o centro de controlo. É este vaivém de informação que assemelha o móvel a uma estação de referência, daí o nome de estação virtual (Landau et al., 2002). O método VRS estende a utilização do sistema de correção diferencial RTK a qualquer ponto localizado na área de abrangência da rede de estações de referência, tanto no interior (por interpolação de valores) como no exterior (por extrapolação de valores) da rede, verificando-se, contudo, uma menor precisão na segunda situação, Figura 2.6.

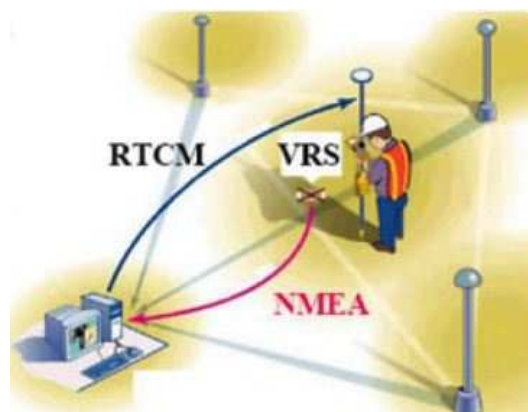


Figura 2.6 – Fluxo informação na estação virtual [retirado de (Landau et al., 2002)].

O modo de estabelecer comunicação com a rede em tempo real, para um utilizador vulgar, é por GPRS através de protocolo NTRIP (*Net-worked Transport of RTCM via Internet Protocol*) acedendo ao IP fixo de *internet* do IGeoE. Para pós-processamento, é disponibilizado ao utilizador, previamente registado, o acesso a dados RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*) através da página Web do SERVIR. O acesso via rádio só é disponibilizado a móveis militares de radio frequências próprias e o acesso GSM só é possível em caso de emergência, quando o computador servidor *Web* não estiver a funcionar.

- A correção eletrónica interna é um método de correção, patenteado pela empresa americana Satloc, que não recorre a bases referenciais exteriores. É designado comercialmente por e-Dif (*Extended differential technology*) ou diferencial autónomo. Segundo a empresa Hemisphere, o sistema e-Dif gera internamente a correção diferencial com base na posição inicial, por modelação ao longo do tempo de correções diferenciais de modo a manter uma posição relativa consistente. O sistema usa-se em qualquer parte do mundo. O operador pode aceder durante um longo período de tempo com um desvio mínimo na precisão ou retornar à posição inicial em qualquer altura para atualizar as correções diferenciais. A tecnologia é ideal para locais sem cobertura de sinal diferencial radiodifundido. Pode ainda ser utilizada em dispositivos GPS de dupla tecnologia aliando a e-Dif por exemplo ao DGPS (este transmitido por satélite ou radiodifundido), tanto no ar como na terra. O e-Dif apresenta num período de 40 minutos um desvio menor que 90 cm. Existe atualmente uma tecnologia baseada na eletrónica interna designada L-Dif (*Localized Corrections*) que recorre a uma unidade de base estacionária que radiodifunde as correções através de uma ligação *wireless* para a unidade móvel. As correções localizadas são processadas no móvel para se atingir a precisão e a repetibilidade desejadas, as quais não são possíveis com a transmissão de correções diferenciais via satélite, antenas, e-Dif ou outros modos de transmissão. Contudo, requerem um processador SX2 e uma antena RTK de qualidade.
- O posicionamento com correção diferencial em pós-processamento consiste em receber informação da posição do recetor sem correção diferencial e corrigir, mais tarde, esse valor com informação referente às trajetórias seguidas pelos satélites, ao estado da ionosfera e à outra obtida de estações georreferenciadas fidedignas. A correção em pós-processamento pode fazer-se em Portugal consultando os ficheiros RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*) adquiridos à ReNEP (Rede Nacional de Estações Permanentes GNSS) ou os sites do IGP (on-line, após pedido, durante 1 mês) ou do Sistema de Estações GPS Terrestres da Europa (*EUREF, EUREF Permanent Network*).

O serviço de correção diferencial cuja fonte de sinal diferencial é o sistema de satélites

EGNOS permite uma precisão submétrica. Os recetores diferenciais que têm como fonte de sinal o satélite não asseguram a repetibilidade da informação (capacidade de devolver uma localização exata ao longo do tempo ou em instantes de tempo distintos).

Existem atualmente recetores da Satloc com dupla tecnologia onde é possível efetuar a comutação entre o posicionamento diferencial por satélite e o posicionamento interno.

O serviço de correção diferencial RTK apresenta uma precisão centimétrica. A correção diferencial melhora significativamente a qualidade do posicionamento dos recetores móveis. A qualidade é avaliada pela comparação entre recetores GPS sem e com correção diferencial RTK ([N. L. Cappeli, 2006](#)). A técnica de navegação RTK apresenta, para além do elevado preço dos equipamentos (GPS, estação, software, *data logger*), alguns inconvenientes importantes como sejam a necessidade de existir uma linha aberta entre os GPS e a estação e de uma distância inferior a 15 km entre o móvel e a estação fixa para que os erros não sejam significativos (a precisão decresce à medida que o móvel se distancia da base de referência) e precisarem de um tempo para a sua inicialização interna (30 minutos em alguns equipamentos).

A comparação de algumas características importantes para a escolha de um equipamento GNSS pode ser consultada no estudo recentemente efetuado pela empresa canadiana NovAtel, publicado na revista *GPS World*, que apresenta um conjunto alargado de sistemas de diferentes marcas ([NovAtel, 2015](#)). A título meramente informativo o custo de um equipamento GNSS, com uma precisão centimétrica, pode rondar os 7000 euros, o que pode inviabilizar a sua aquisição e utilização num sistema de navegação autónomo.

2.2.2 Levantamentos com GPS

Nos métodos tradicionais de recolha de dados topográficos para criar um MDT podem incluir-se os que combinam a estação total e o equipamento trigonométrico para aquisição de linhas de nível, aqueles que recorrem cumulativamente a níveis

diferenciais e digitais cruzando a informação e ainda os métodos GPS com RTK para aquisição de pontos e de características topográficas lineares, onde o recetor é colocado no cimo do bastão ou montado num veículo móvel.

Na fotogrametria aérea podem utilizar-se câmaras de baixa altitude (por exemplo na deteção de defeitos em ambientes industriais, designada por fotogrametria por inspeção) e de média altitude com controlo de posição da terra por via aérea. Os métodos de alta altitude são associados à aquisição de imagens por satélite.

Existem ainda os métodos combinados onde são utilizados conjuntamente o GPS em modo RTK, os giroscópios e os sensores laser, de uso generalizado a partir de 2000 por engenheiros civis para gerarem os seus DTM.

Contudo, a escolha das técnicas depende das verbas disponíveis para realizar o trabalho, da precisão requerida e de aspetos associados à taxa de utilização do equipamento.

2.3 Linhas de condução

O conhecimento das possíveis trajetórias de condução, doravante designadas por linhas de condução, é sem dúvida uma mais valia para a navegação autónoma.

Na Figura 2.7 pode identificar-se uma possível linha de condução para orientação da manobra de transposição de uma transição, na passagem de um patamar para outro, efetuada com um trator vinhateiro ao realizar uma operação de destrocamento de vimes.

As linhas de condução podem ser obtidas por via terrestre (levantamentos de campo) ou por via aérea (pelos designados aerolevantamentos) onde o resultado no último caso é um conjunto de imagens georeferenciadas que, quando sobrepostas, dão origem a uma imagem formada por um conjunto de pixels com diferentes cores. Tanto as imagens aéreas como as de satélite de alta definição podem ser usadas para delas se extrair as redes de circulação e analisar o modo como são alteradas.



Figura 2.7 – Condução do trator, com identificação da linha de condução.

Os levantamentos de campo locais normalmente conduzem à produção de cartas ou mapas topográficos.

A sobreposição de objetos (como árvores, carros ou outros que, produzindo sombra, dificultam a identificação das estradas) é contudo o grande problema dos métodos de reconhecimento de imagem (em formato Raster, ou de pixels bidirecionais, com maior ou menor resolução).

Os métodos de extração, quer o manual, o semiautomático ou o totalmente automático, encontram-se ainda em desenvolvimento.

O método manual apresenta bons resultados mas depende da experiência do operador. A sua morosidade cresce à medida que aumenta o número de vias a identificar, por imagem. O processo automático é muito afetado pela qualidade espacial das imagens em análise e depende fortemente do ruído associado a fatores atmosféricos, da frequência de aquisição da imagem e do número de objetos que se interponham nas vias.

O processo semiautomático é apontado como uma solução inicial no desenvolvimento de novos algoritmos de reconhecimento e posterior extração de estradas.

Tendo em conta o modo pelo qual são extraídas as linhas centrais das estradas, os métodos podem ainda ser agrupados em processos conduzidos pelo operador (com

identificação dos pontos inicial e terminal de um troço de estrada), os baseados no reconhecimento da linha, de uma região ou de outra informação complementar, (Cao e Sun, 2014).

2.3.1 Detecção em imagens (2D) das linhas de condução

O processo de extração das linhas de contorno das estradas de mapas topográficos digitalizados envolve a execução sequencial dos seguintes procedimentos: a segmentação da imagem a cores para nela reconhecer os objetos, a determinação da morfologia e a aplicação de filtros para eliminar informação não relevante. Terão de ser incluídos pontos terminais e de encontro de referências, para cruzar informação e ligar linhas de contorno interrompidas (Samet et al., 2010).

Os algoritmos desenvolvidos para extrair estradas de imagens aéreas de baixa resolução podem a ser usados em imagens obtidas de satélite de alta definição.

A classificação dos métodos de extração automática, com base nas diferenças identificadas em cada uma das suas etapas, pode ser encontrada em artigo publicado por Mena (2003). Mais tarde, especificamente para a deteção em imagens aéreas de alta resolução de espaços rurais ou semi-urbanos, foi publicado um novo artigo (Mena e Malpica, 2005). Nele são apresentados os resultados da aplicação sucessiva de dois algoritmos de esqueletização para a vetorização automática de uma ortoimagem (após ter sido aplicado um filtro mediano como primeiro tratamento de imagem), Figura 2.8.

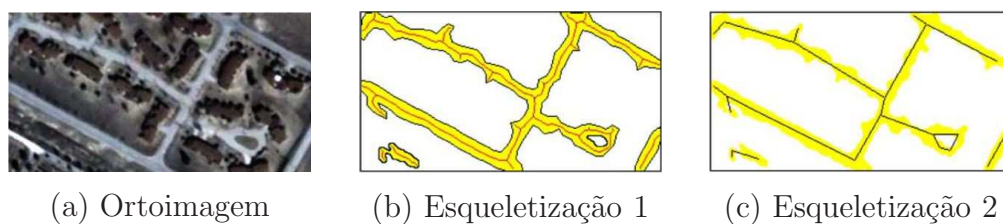


Figura 2.8 – Esqueletização de ortoimagem [adaptada de (Mena e Malpica, 2005)].

Estudos comparativos, realizados nos últimos anos, revelam ser vários os métodos

desenvolvidos que recorrem à análise das características geométricas da estrada, para extração de redes viárias usando imagens satélite de alta definição.

- [Desai e Vala \(2014\)](#) evidenciam as vantagens e limitações da aplicação de cinco dos principais métodos de extração, nomeadamente o método geodésico ([Miao et al., 2014](#)), o MSM (*Mean Shift Method*), o SVM (*Support Vector Machine*), o LSM (*Level Set Method*) e o SFM (*Shape Feature Method*). Concluem sobre a importância do recurso à abordagem semiautomática.
- [Kaur \(2013\)](#) faz também uma análise sobre os diferentes métodos de extração existentes, identificando as lacunas que neles encontra e apontando possíveis soluções.
- [Babaali et al. \(2014\)](#) classificam os métodos automáticos de extração de redes de estradas em duas classes: a técnica geral e a combinada. Na geral, que compreende os métodos tradicionais de deteção da forma, incluem-se os processos de segmentação, os de vetorização e os que envolvem as redes neuronais e os algoritmos genéticos (para otimização dos resultados obtidos e não para a extração propriamente dita). Na técnica combinada a imagem é pré-processada e durante a extração são usados novos parâmetros como a textura, a morfologia ou a informação espectral da estrada. Os autores apresentam os diferentes métodos e concluem não existir um universal que possa ser aplicado a todas as imagens. A escolha da técnica depende essencialmente do tipo de imagem e do tipo e da forma dos objetos nela identificados.

Enumeram-se, pela sua especificidade, alguns dos desenvolvimentos na deteção de estradas em imagens de satélite de alta definição:

- [Tian e Kamata \(2007\)](#) propõem um novo método para extrair as características comuns entre uma imagem aérea e um mapa, designado por caminho de difusão geodésica (DGP, *Diffusion Geodesic Path*), e a sua utilização no processo de registo dos limites ou fronteiras dos objetos reconhecidos (vias de circulação, entre outros).

- [Li e Briggs \(2009\)](#) introduzem um novo método, designado por círculo de referência, para identificar corretamente os pixels que pertencem à mesma estrada e usam essa informação para reconstruir a totalidade da rede de estradas. Afirmam ser o seu método invariável à forma e direção da estrada, tolerando elevadas perturbações.
- [Gupta e Singh \(2014\)](#) propõem um método que recorre simultaneamente aos algoritmos genéticos, à teoria de controlo difuso e à morfologia. Neste são utilizadas imagens pancromáticas multi espectrais (RGB) com um metro e quatro metros de resolução, obtidas do satélite de observação terrestre comercial IKONOS.
- [Miao et al. \(2014\)](#) defendem a solução semiautomática como a mais robusta e a que apresenta melhor qualidade. Propõem uma solução baseada no método geodésico que, tendo dado bons resultados para imagens aéreas de baixa resolução, não os tinha ainda dado para alta resolução. O método compreende três etapas principais: inicialmente, recorrendo ao método geodésico, permite extrair os segmentos de estrada que ligam os pontos inicial e terminal definidos pelo utilizador; em seguida, é produzido um mapa de probabilidade com base nos segmentos definidos e recorrendo a um operador de limiar, separando a parte da imagem que é estrada; e, por último, o método geodésico é novamente aplicado para ligar os pontos com base numa função que estima a densidade do mapa. Como resultado é apresentada, de forma suave, a linha central extraída para a estrada. Concluem sobre a robustez da solução, uma vez que não faz depender o método da localização dos pontos definidos de forma manual e não apresenta as descontinuidades da estrada, como acontecia no método original. Os autores apresentam a intenção de, em trabalhos futuros, apurar o método, tornando automática a identificação dos pontos terminais e utilizando a teoria dos grafos para determinar a totalidade da rede de estradas.
- [Anil e Natarajan \(2010\)](#) propõem a extração da rede de estradas a utilizando um método de fusão estatística da região, na etapa de segmentação da imagem, seguindo-se a esqueletização das curvas discretas resultantes. Afirmam que o método dá bons resultados mesmo em imagens de diferente resolução desde que

as vias não se apresentam encobertas pela presença de nuvens, por exemplo.

[Xu et al. \(2016\)](#) apresentam um novo método automático de extração das linhas de nível de um mapa topográfico de qualidade média digitalizado via *scanner*. As mais valias deste método aplicam-se em termos da segmentação onde é utilizado um algoritmo difuso de análise espacial, para a resolução dos problemas de existirem linhas finas, com a remoção dos nós, e lacunas ou descontinuidades das curvas de nível. Este método quando aplicado a um mapa, poderia ser usado para deteção estradas.

[Cao e Sun \(2014\)](#) apresentam um método totalmente automático de determinação da linha mediana das estradas tendo como ponto de partida uma imagem e a informação georeferenciada de características da estrada como seja a forma, o tipo de rede de estradas e a relação entre troços. Visa ser aplicado a estradas com diferentes formas, a cenários complexos e a imagens de diferente resolução.

Do conjunto de métodos disponíveis de cada classe não se pode dizer qual deles tem mais sucesso; depende da cor da imagem obtida, do tipo de interferências na estrada e mesmo do seu tipo.

Uma abordagem diferente é efetuada quando considerado o caso tridimensional.

2.3.2 Deteção em MDE (3D) de linhas de condução

Na navegação em ambiente 3D, uma vez conhecido o MDE da totalidade da superfície, a identificação das vias ou superfícies de circulação deve ser considerada como etapa inicial. A identificação pode fazer-se por segmentação da superfície total ou por reconhecimento das vias através de um parâmetro previamente introduzido na estrutura do MDE durante o levantamento.

Podem ser extraídas diretamente do MDE algumas das suas características, como as linhas de festo e de água, identificando as falésias e os vales, respetivamente. Para obtenção de resultados mais precisos, [Gülgen e Gökğöz \(2004\)](#) sugerem a introdução tanto de informação morfológica georeferenciada como de informação cartográfica.

As linhas de condução são extraídas das superfícies 3D correspondentes às vias de circulação e definem a sua topologia. A extração da forma de um objeto 3D pode fazer-se por um processo de esqueletização.

A esqueletização compreende o conjunto de procedimentos, onde é garantida a geometria e topologia do objeto, numa representação concisa unidirecional (1D).

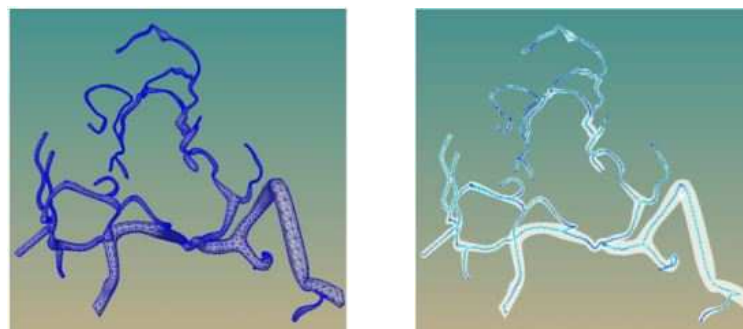
As curvas esqueleto, ou simplesmente esqueletos, são úteis em diferentes aplicações como:

- na navegação virtual, para determinação de linhas de condução em exames de inspeção não invasivos no interior de órgãos humanos para o reconhecimento de malformações ou deteção precoce de doenças do aparelho respiratório ([Morales Pinzón et al., 2017](#)), do aparelho digestivo ([Jiang e Gu, 2005](#); [Bevilacqua et al., 2009](#)) e dos vasos sanguíneos ([Wang et al., 2012](#)) (Figura 2.9), por exemplo;
- na animação, sendo uma das aplicações a determinação do esqueleto do corpo a animar ([Sharf et al., 2007](#); [Tierny et al., 2008](#));
- no processamento, simplificando objetos para que possam ser comparados com outros, e para diferentes fins como o registo de informação, a ligação entre objetos, ou para identificação/recuperação de informação;
- na análise científica, na recuperação e identificação de formas.

Uma descrição extensiva das propriedades das curvas esqueleto, aplicações e algoritmos pode ser encontrada na leitura do artigo de [Cornea et al. \(2007\)](#).

Nas últimas décadas têm vindo a ser desenvolvidos novos algoritmos para extrair as curvas esqueleto de objetos 3D, especialmente com a emergência de dispositivos de reconhecimento de imagem 3D (tais como os *scanners* de varrimento) e o desenvolvimento de interfaces gráficas para análise e animação.

Os processos de esqueletização podem ser classificados, com base na forma de representação dos dados de entrada do objeto, em três grandes grupos: os métodos



(a) Parte do sistema vascular cerebral

(b) Esqueletos de (a)

Figura 2.9 – Esqueletização de parte do sistema vascular cerebral [adaptada de (Mena e Malpica, 2005)].

volumétricos ou com esqueletização de volumes (recorrendo à discretização do volume/massa do objeto), os métodos de superfície onde a superfície exterior do objeto é apresentado sob a forma de malha (recorrendo a dados poligonais) e ainda os de nuvens de pontos (quando os dados são produzidos pelos sistemas de leitura com varrimento de campo e necessitam de pós-processamento).

A voxelização é a designação dada à transformação binária que compreende a divisão de um volume (que contem um objeto e a parte do seu meio envolvente) em vários volumes elementares (voxels), em número suficiente, para garantir uma descrição detalhada da superfície do objeto. No processo de voxelização é atribuído a cada volume elementar o valor um (voxel preto) quando este pertence à superfície e o valor zero (voxel branco) no caso contrário.

Dependendo do tipo de algoritmo a aplicar aos objetos e da forma como são introduzido os dados de entrada, os métodos de esqueletização são classificados de diferente forma.

- Os métodos **volumétricos** requerem um procedimento de voxelização dos dados de entrada. Os métodos topológicos de voxelização removem iterativamente voxels específicos (os voxels singulares diferem entre si principalmente

pela sua definição e pela ordem de prioridade com que são removidos.

Baseado no tipo de métodos de implementação, podem ser usados como algoritmos de esqueletização: o adelgaçamento topológico local (*Topological Local Thinning*, TLT), o campo de distância (*Distance Field*, DF), o geométrico (*Geometric*, G) e os baseados em funções gerais (GFB, *General-function-based*) (Cornea et al., 2005).

- Os métodos TLT removem iterativamente camadas de pontos singulares da fronteira do objeto até que seja obtido um esqueleto com uma fina camada, (Ma e Sonka, 1996) e (Wang e Basu, 2007).
- Nos métodos DF (Wan et al., 2001) ou GFB (Pantuwong e Sugimoto, 2013) é usada uma função distância, ou de campo (como o campo potencial), para determinar quais os voxels potenciais candidatos a pontos esqueleto. No DF, durante o processo de remoção de candidatos, pode acontecer, dependendo da forma do objeto, a formação de aglomerados de voxels. Os últimos passos compreendem a determinação da superfície mediana do objeto (através da ligação desses aglomerados) e o desbaste desta até à obtenção do esqueleto unidirecional. No campo da potência (inserido no GFB), o valor do potencial de cada ponto no interior do objeto é determinado pela soma dos potenciais gerados pelos pontos de carga na fronteira do objeto. Os lugares de afundamento do campo são então ligados entre si por recurso a um determinado algoritmo.
- Nos métodos G, normalmente usados quando os objetos são representados por malhas poligonais, o espaço é dividido em regiões pelo grau de proximidade ao elemento gerador. Os limites internos e as faces das regiões são usados para extrair o esqueleto do objeto (Bühler et al., 2004).

Também podem ser usadas soluções híbridas.

- Nos métodos **de superfície**, i.e., quando o objeto é identificado por uma malha poligonal, o esqueleto pode ser extraído diretamente ou seguindo dois estágios; neste caso, envolve em primeiro lugar a aplicação ao objeto de um algoritmo de determinação do eixo mediana por forma a obter uma superfície

2D, seguido-se a aplicação do mesmo algoritmo, ou de um método de campo de distância, para obter o esqueleto.

- Nos métodos **de nuvem de pontos**, onde os dados de entrada se apresentam em forma de aglomerado de pontos, duas abordagens podem ser consideradas: as que são aplicadas a conjunto de dados de entrada completos ([Cao et al., 2010](#)) e as que são aplicáveis a dados de entrada incompletos.

Foi adotado para determinação das linhas de condução na vinha, um conjunto de métodos da classe volumétricos.

No entanto, existem métodos que dadas as suas características podem ser aplicados a mais do que um tipo de dados de entrada. Por exemplo, podem citar-se [Tagliasacchi et al. \(2009\)](#) cujo algoritmo pode ser aplicado na malha ou no aglomerado de pontos, permitindo determinar a topologia do objeto pela análise do seu modelo de deformação.

Usando objetos 3D sob a forma de malha como dados de entrada, [Wang et al. \(2012\)](#) desenvolveram um algoritmo que iterativamente contrai a malha até que seja suficientemente fina sendo depois subdividida. O algoritmo gera então a curva-esqueleto baseada na nuvem de pontos obtida pela eliminação de alguns pontos de junção e de ramificação, não essenciais, do modelo da malha contraída.

2.4 Planeamento de trajetórias

Dependendo do tipo de informação sobre o ambiente, o planeamento de trajetórias pode ser entendido numa ótica global, com base na informação prévia do ambiente, ou numa ótica local, quando essa informação é adquirida em tempo real (ambientes parcialmente conhecidos e os dinâmicos).

Em espaços agrícolas com plantações de grande porte ou mantidas durante pelo menos uma década (caso da vinha) o ambiente é conhecido e o planeamento pode ser encarado numa ótica global.

Nessa ótica, o problema pode ser definido como a determinação da sequência de ações que transformam um estado inicial num determinado estado final. Os estados inicial e final são localizações do dispositivo móvel e as ligações entre posições representam ações que o veículo pode efetuar, as quais têm um custo associado. A trajetória ótima é aquela na qual é menor o custo da soma das ligações intermédias, de uma posição inicial à final. Pressupõe-se conhecido o conjunto de posições que definem o terreno. O modelo do espaço de navegação pode ser representado por um mapa métrico (num referencial, em coordenadas globais) ou por um mapa topológico (representação numa rede de vértices e arestas). Uma das formas mais habituais em robótica para representar o espaço de movimentação do veículo móvel é através de um grafo.

O conjunto de algoritmos desenvolvidos para efetuar o planeamento de trajetórias em ambientes estáticos conhecidos, designado por teoria clássica, não cobre de forma eficiente os casos de ambientes parcialmente conhecidos ou os dinâmicos. Contudo, alguns deles permitem a sua expansão para obtenção de soluções sub-ótimas em tempos muito curtos, podendo a sua otimização ser efetuada em determinadas situações, subsequentemente, num tempo mais longo.

O algoritmo diz-se completo quando determina a solução ótima num tempo finito ou quando informa da impossibilidade de encontrar essa solução em tempo finito. O algoritmo completo fornece sempre a solução ótima. As duas técnicas determinísticas mais vulgares no planeamento de trajetórias são os algoritmos baseados em heurísticas e os aleatórios; em oposição, existem as técnicas probabilísticas (La-Valle, 2006).

A divisão do problema do planeamento de trajetórias em espaços abertos agrícolas para determinação da melhor rota para atingir um ponto pelo caminho mais curto designa-se de aproximação. Outro problema frequente na agricultura é o da cobertura de uma zona, entendido como de varrimento. Há situações onde coexistem os dois problemas e que podem ser resolvidos recorrendo ao planeamento de trajetórias.

Conhecido modelo do espaço onde o veículo se move, traduzido em forma de grafo, para se obter o caminho ótimo é aplicado um algoritmo de procura. A determinação do espaço de navegação poderá fazer-se pelos métodos de roteamento (*Roadmap*

methods) ou de decomposição em células (*Cell decomposition methods*). Contudo, quando encontrados obstáculos, o problema do planeamento terá de ser reformulado.

Os algoritmos de planeamento em grafo podem incluir procura em largura, em profundidade e em aprofundamento iterativo. São exemplos o algoritmo Dijkstra (Dijkstra, 1959), A* (Nilsson, 1982) e outros algoritmos melhorados.

Vários têm sido os métodos estudados para resolução destes problemas em diferentes áreas que, contudo, só há pouco tempo são aplicados na agricultura.

De um modo geral, o objetivo da cobertura no planeamento de trajetórias (CPP, *Coverage Path Planning*) é a determinação do melhor caminho ou rota que cobre pelo menos uma vez a totalidade de um conjunto de pontos de interesse vizinhos, recorrendo a um critério de otimização pré estabelecido, evitando ao mesmo tempo os obstáculos.

Para robôs móveis agrícolas, a resolução do problema da cobertura, livre de colisões, em ambientes conhecidos, envolve geralmente a subdivisão da área do terreno em pequenas regiões poligonais, para encontrar a melhor rota. Em campos onde as filas de culturas permanecem inalterados ao longo de uma década, podem ser considerados os métodos *off-line*.

Em ambientes com configuração similar às redes viárias representadas como um grafo (Delling et al., 2014), a otimização é resolvida através da atribuição de um custo a cada aresta e procurando a solução ideal (quando não há restrições de tempo) ou uma muito aproximada (quando esta existem).

2.4.1 Aplicações

Uma pesquisa recente sobre os avanços na última década dos métodos de cobertura aplicados na área da robótica é apresentada por Galceran e Carreras (2013) com uma nova classificação qualitativa dos métodos, diferente da anterior de Choset (2001), com base em diferentes abordagens. No entanto, esta é aplicada a algoritmos *on-line* ou *off-line* e mostra como os ambientes são manipulados. Referem

diversas obras enquadradas em diferentes categorias. Os autores fazem uma revisão dos métodos mais utilizados em planeamento de trajetórias, em diferentes áreas de estudo. Segundo eles, o termo cobertura refere a tarefa de determinação da rota que passa por todos os pontos de uma área ou volume de interesse contemplando o contorno de obstáculos. Especificam alguns requisitos da tarefa, como sejam: 1) a passagem por todos os pontos que definem a área de cobertura; 2) a passagem por cada ponto uma única vez; 3) a execução contínua e sequencial de uma tarefa, sem repetição; 4) o evitar a colisão com obstáculos; 5) a realização de movimentos retilíneos ou em circunferência para simplificar operações de controlo da máquina; 6) a determinação de uma trajetória ótima, sob estas condições.

Em espaço aberto, onde os obstáculos são definidos no mapa, a condução segue a rota determinada pelo sistema de planeamento de trajetórias, acompanhando as linhas determinadas para a totalidade das vias de navegação. A navegação é fundamentalmente apoiada num sistema de GPS de precisão e num conjunto diverso de sensores utilizados complementarmente. O mapa e as rotas poderão vir a ser retificados durante a navegação quando ocorram situações de alteração do terreno.

Para extrair uma solução, exata ou aproximada, para o problema da determinação da melhor rota, foram adotadas diversas técnicas de otimização, tais como: redes neuronais, algoritmos genéticos ([Hameed, 2012](#); [Hameed et al., 2013](#); [Hameed, 2014](#)), de colónia de formigas ([Zhou et al., 2014](#)) e de campo potencial artificial ou uma combinação destas ([Noguchi e Terao, 1997](#); [Garcia et al., 2009](#); [García-Pérez et al., 2008](#)).

[Ryerson e Zhang \(2007\)](#) propuseram uma abordagem baseada na aplicação de um algoritmo genético para resolver o problema da cobertura. Numa representação do campo em grelha, a solução compreende a determinação da sequência ótima de células que formam o percurso, considerando como critérios de cobertura a distância mínima e máxima.

[Bochtis](#) aborda o problema da cobertura de um campo agrícola, único ou disperso, por uma máquina ou uma frota como o da determinação do caminho mais curto na travessia de um grafo pesado. Usam B-padrões, como representações de partes

do campo, no processo de otimização combinatória onde foram testados métodos diferentes.

Mais tarde, foi implementada numa máquina convencional com sistema automático de condução, a técnica desenvolvida permitiu diminuir mais de metade do número de manobras realizadas nas cabeceiras dos terrenos de cultivos ([Bochtis e Vougioukas, 2008b](#)). [D. D. Bochtis, S. G. Vougioukas \(2009\)](#) propuseram o problema do caixeiro viajante, no planeamento de uma frota de tratores para realizarem tarefas de campo. Usaram os B-padrões no planeamento das operações de cobertura, tais como o corte de erva, o plantio e a pulverização. A abordagem foi aplicada do mesmo modo a outras operações agrícolas, como o corte de relva, a sementeira e a pulverização ([D. D. Bochtis, S. G. Vougioukas, 2009](#)).

[Bakhtiari et al. \(2013\)](#) para gerar as melhores rotas, utilizam também os B-padrões, numa heurística de otimização colónia de formigas (que minimiza os critérios operacionais, tais como tempo, distância não-trabalho percorrida, consumo de combustível, entre outros). [Zhou et al. \(2014\)](#) apresentaram um método de planeamento para simulação de operações agrícolas em campos com múltiplas áreas de obstáculos com uma abordagem semelhante à do últimos autores referidos. O método decorre em três fases: uma primeira fase em que a área e os objetos do campo são representados num grafo geométrico (incluindo obstáculos e faixas de trabalho), uma segunda fase onde é efetuada a decomposição do campo em blocos (o que implica a divisão das faixas de trabalho anteriores) e uma fase final, onde é obtida a sequência ideal dos blocos, considerando os parâmetros de campo e das máquinas.

[Oksanen e Visala \(2009\)](#) desenvolveram um algoritmo para determinar as melhores rotas e medir a sua eficiência em termos energéticos, em campos agrícolas finlandeses de formas complexas. Este estudo, considerando a necessidade de reabastecer a máquina, inclui a combinação de dois algoritmos gulosos (um *off-line* e um *on-line*). Estes são usados para dividir a região em sub-regiões (com linhas de condução paralelas), para selecionar a sequência das que obrigam a menor número de manobras nas cabeceiras, tendo em conta a direção pretendida ([Oksanen e Visala, 2007](#)). Os autores pressupõem conhecida a posição do veículo durante a navegação e que os limites do campo são invariáveis. Embora nenhum dos dois algoritmos sozinhos

ou combinados possa resolver o problema de forma otimizada, constituem mais um contributo para a determinação automática de rotas em operações agrícolas.

[Conesa-Munoz et al. \(2015\)](#) apresentam resultados na determinação da sequência ótima de máquinas agrícolas a intervir para fazer a cobertura de uma parcela de terreno. O trabalho enquadra-se no planeamento de múltiplas rotas para uma frota de máquinas agrícolas autónomas utilizando como critério um conjunto variado de funções, como sejam a distância, o tempo e a sua combinação paramétrica. A operação realiza-se em plantações agrícolas que se distribuem em filas paralelas em planos com configuração retangular. A movimentação da máquina agrícola segue a linha de plantação, sem constrangimentos e sem manobras. Estas, quando necessárias para inverter o sentido da máquina, são realizadas nas cabeceiras, fora da zona de plantação. A metodologia de planeamento é efetuada em dois estágios: a divisão do terreno em troços de acordo com a linha orientadora das plantas e da largura da ferramenta da máquina agrícola; a determinação da sequência ótima de troços segundo o critério acima referido. Como cada troço só pode ser intervencionado uma vez, a sequência de troços é representada como permutações do conjunto dos troços. Esta para uma intervenção é limitada pela quantidade de recursos disponíveis.

As características cinemáticas e dinâmicas do veículo motor deverão ser consideradas no planeamento de trajetórias. A dimensão e geometria do veículo (condicionando a avaliação do espaço necessário às manobras), a velocidade e a aceleração permitidas em cada troço, função do declive do terreno e constrangimentos associados.

[Bochtis e Sørensen \(2009\)](#) apresentaram um trabalho onde referem as operações agrícolas que envolvem o planeamento de trajetórias.

Na introdução do artigo classificam os diferentes algoritmos para determinação da rota que otimiza uma determinada função de custo (VRP - *Vehicle Routing Problem*). Fazem-no para resolver o problema da determinação da rota mais económica para distribuição de produtos, de um ponto de origem a diferentes pontos espalhados no território. A rota tem de ser gerada de modo a que a totalidade dos pontos só sejam visitados uma vez e por um único veículo, mas garantindo que a quantidade

pedida não ultrapasse a capacidade do transporte. Referem ainda que o VRP é uma generalização do problema de base (TSP- *Travel Salesman Problem*), onde o agente tem de visitar todos os pontos de distribuição. O problema TSP pode ser generalizado para o caso (m-TSP) em que existe mais do que um agente. Quando limitado em termos de capacidade, o problema m-TSP transforma-se em VRP. Quando existem constrangimentos em termos de capacidade da frota e prazos, surgem variantes à formulação original.

Esquematizam a relação entre os diferentes tipos de problemas de determinação de rotas e identificam os métodos entretanto aplicados, para os resolver em: os métodos exatos (*Branch-and-bound* e *Branch-and-cut*), os métodos heurísticos e os métodos metaheurísticos (*Simulated annealing*, *Tabu Search*, Algoritmos Genéticos e Colónia de formigas).

Em resumo, o problema da cobertura em aplicações agrícolas tem sido encarado, em algumas abordagens, como o do caixeiro viajante onde as informações relevantes associadas ao espaço de navegação são inseridas num grafo. A formulação do problema da determinação da melhor rota, em alguns casos, é apresentada como a do carteiro chinês (Edmonds, 1973) ou a do carteiro rural (Eiselt et al., 1995). Em ambas os casos, pode ser proposta uma abordagem heurística de otimização combinatória para encontrar a solução, NP difícil.

2.4.2 Algoritmos de procura em grafos

O grafo pode ser definido como um conjunto de nós e arestas, i.e., $G = (V, A)$. Outro termo vulgarmente utilizado para nós, adotado neste texto, é vértices. No planeamento do movimento, os vértices são associados a locais que podem ou não ser mutuamente acessíveis pelas arestas (ou trajetos). Uma aresta diz-se direcionada quando contempla o trajeto num único sentido. A expressão aplica-se ao grafo, designado por direcionado quando as arestas são desse tipo. Um grafo diz-se não direcionado quando o trajeto entre vértices pode realizar-se nos dois sentidos, Figura 2.10. Quando as arestas são referenciadas com um valor numérico não negativo (ou peso) que reflete o custo relativo da sua travessia, designam-se por arestas

pesadas. Um custo pode também ser associado aos vértices do grafo. Numa ou na outra situação o grafo diz-se pesado (Choset et al., 2005).

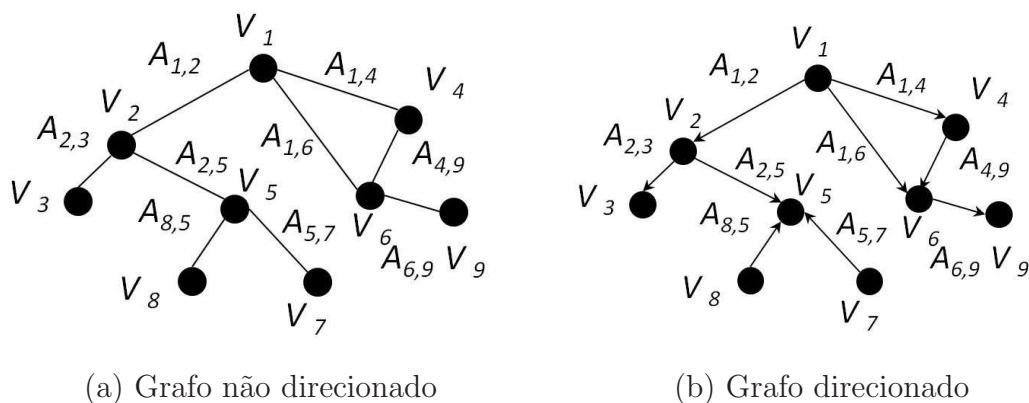


Figura 2.10 – Representação esquemática dos dois tipos de grafos.

Um trajeto num grafo é a sequência de vértices V_i para os quais existe uma aresta $A_{i,i+1}$ que liga os vértices vizinhos V_i e V_{i+1} . Num grafo ligado, para quaisquer vértices V_i e V_j existe sempre um trajeto que os liga. Um ciclo é um trajeto especial de n vértices onde o primeiro e o último coincidem, i.e. $V_1=V_n$.

Uma árvore é um grafo direcionado ligado sem ciclos. A árvore possui um vértice especial designado por raiz, que é o único vértice que não possui aresta de entrada. Outro vértice especial da árvore é o vértice terminal, aquele que não tem arestas de saída, colocado no extremo de cada ramo da árvore. Um ramo de uma árvore é uma sequência de vértices descendentes uns dos outros. Um ramo inicia-se na raiz e termina num vértice terminal, Figura 2.11.

Um algoritmo de procura numa árvore diz-se em largura quando se inicia no vértice de raiz e se propaga a todos os seus descendentes diretos. Depois a procura propaga-se a todos os descendentes dos últimos e por aí em diante. Neste caso que a procura é tanto menos demorada quanto o vértice de chegada esteja perto da raiz.

A procura em profundidade inicia-se na raiz, escolhe um descendente e continua pelo descendente consecutivo até chegar ao nó terminal. Caso a solução seja encontrada o processo de expansão termina; em caso contrário, continua ascendendo ao nível anterior e procurando o irmão para continuar o processo de expansão.

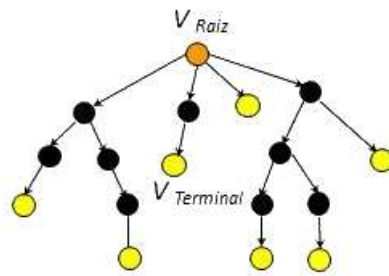


Figura 2.11 – Representação esquemática de uma árvore.

Tanto a procura em largura como em profundidade são sem informação (“cegas”) pois apenas percorrem o grafo (ou árvore) de modo sistemático, descobrindo em cada etapa como efetuar a expansão, sem qualquer outra informação geral do problema. A procura com base no custo associado às transições de estado, onde a expansão é efetuada com base na análise do custo da travessia de um vértice para os seus vizinhos (vértices adjacentes), é classificada como procura de custo uniforme. Neste caso é utilizada uma função $g(n)$, que representa o custo acumulado da travessia até ao referido vértice. Um dos métodos mais usados de procura de custo uniforme foi proposta por Dijkstra ([Misa e Frana, 2010](#)).

Uma heurística pode ser definida como uma função de procura guiada por regras e que visa encontrar uma boa solução. A meta-heurística representa uma combinação de procedimentos de procura com estratégias do mais alto nível, procurando escapar de ótimos locais com o intuito de encontrar soluções muito próximas do ótimo global, mas sem garantir a otimalidade.

Um algoritmo é exato quando encontra uma solução exata, enquanto que os aproximados ou não exatos procuram encontrar uma solução próxima, através de uma estratégia determinística ou aleatória. Estes algoritmos são aplicados a problemas muito complexos para os quais a resposta correta é inviável, devido à sua complexidade computacional.

Os algoritmos de procura heurística baseiam-se, para além do conhecimento das grandezas de posição que lhe permitem reconhecer e identificar as posições de tomada de decisão (vértices do grafo), em informação adicional que permite a avaliação de

estimativas para o custo da navegação.

Existem atualmente muitos métodos de procura usando diferentes heurísticas, de forma combinada ou não, que a seguir se referem: Procura gulosa (de função heurística única, $h(n)$) e A^* e seus derivados (de função heurística combinada).

O algoritmo A^* , como método de convencional de procura em grafo, foi desenvolvido para determinar o caminho de menor custo num grafo pesado. Utiliza uma função heurística $f(n) = g(n) + h(n)$ que estima o menor custo de ir de um vértice inicial ao final passando pelo vértice n . A heurística estabelece a ordem pela qual os vértices são procurados de forma a encontrar o melhor caminho no mais curto tempo possível. A heurística é a soma de duas funções: $g(n)$ a função de custo do vértice inicial ao vértice atual (n) e $h(n)$ a função que estima o custo de ir do vértice atual ao vértice final. Para implementação do algoritmo são usadas duas listas, a lista O (Open, aberta) que contém o conjunto de vértices do grafo a explorar e a lista C (Closed, fechada) que contém os vértice do grafo previamente explorados. Os vértices da lista C já estiveram na lista O e, depois de explorados, passaram para a lista C. Estas listas armazenam o vértice que é usado para obter o caminho mais curto. Se a heurística for admissível, então o custo desse caminho é garantido que seja o ótimo. Quando a informação do mapa é alterada durante a navegação, é necessário reformular o grafo. Como o algoritmo A^* funciona sobre um mapa preexistente, é necessário reiniciar a formulação do problema, o que aumenta o tempo de execução do procedimento de procura.

Deste modo, seria interessante a proposta de uma solução que considerasse a alcançada com o mapa inicial e o algoritmo A^* convencional e que a reajustasse com base no tipo de alterações a que o mapa foi sujeito.

Foram recentemente propostas alterações ao algoritmo A^* , no âmbito da robótica móvel, com vista a contemplar modificações do ambiente provocadas pela existência de obstáculos.

Para resolver problemas reais envolvendo situações extremamente dinâmicas e muito complexas (que requerem novos planeamentos), o desenvolvimento de um algoritmo AD^* novo, combinando a capacidade de planeamento continuo do algoritmo D^* com

a performance do ARA^* , é proposto por [Nascimento et al. \(2012\)](#). Nesta abordagem, a função heurística do algoritmo A^* é mantida e a alterada a representação do ambiente.

Como modificações do algoritmo A^* , para contemplarem alterações no espaço, podem citar-se ainda: D^* (*Focused Dynamic A^**) e o D^* -*Lite* da família dos algoritmos designados por D^* ; ARA^* (*Anytime Repairing A^**) e AD^* (*Anytime Dynamic A^**).

3

Mapa 3D da vinha e linhas de condução

Neste capítulo apresenta-se a metodologia e o trabalho realizado que permitiu obter a definição das linhas de condução para a parcela de vinha que serviu de base para o presente estudo.

Tendo como requisito a avaliação das condições de navegabilidade de um robô vinhateiro na RDD, foi efetuada uma visita à quinta que permitiu conhecer a parcela de vinha e constatar a necessidade de obter um modelo tridimensional preciso do terreno para auxiliar a navegação em geral e especificamente o planeamento de trajetórias. O modelo, obtido e validado com equipamento adequado, foi utilizado para a determinação automática de troços das linhas de condução a considerar no planeamento de trajetórias.

Este capítulo encontra-se organizado do seguinte modo:

Na secção 3.1 apresentam-se os critérios de escolha da parcela de vinha, a sua identificação e caracterização.

Na secção 3.2 apresentam-se os procedimentos adotados nas duas formas de levantamento inicialmente escolhidas, durante as fases de preparação, de recolha de informação e de tratamento dos dados recolhidos. Termina com a apresentação da

metodologia desenvolvida para levantamento com GPS e geração de um SIG (Sistema de Informação Geográfica), na sua forma mais geral.

Na secção 3.3, para determinar o MDE final (subsecção 3.3.1), são especificados os dois levantamentos realizados com um equipamento mais preciso e, para obter as linhas de condução, são apresentados (subsecção 3.3.2) os resultados do levantamento realizado com o equipamento configurado em modo funcionamento distinto durante uma operação de pulverização da vinha.

As linhas de condução levantadas, sobrepostas no mapa 3D da vinha (representado, na plataforma virtual desenvolvida para a etapa de planeamento de trajetórias, com dados exportados do SIG), serão usadas para a validação do MDE e do equipamento, quando se sobrepuserem no interior das superfícies de navegação (subsecção 3.3.3).

Na secção 3.4 são apresentados os métodos de esqueletização utilizados para determinar as linhas de condução de forma automática. É escolhido o método que apresenta, para a totalidade de patamares e caminhos da parcela de vinha, um menor erro quadrático médio. Para a aplicação e para o teste dos diferentes métodos é utilizada a plataforma virtual (designada VVPP) cujos desenvolvimentos decorrem das necessidades e cujas funcionalidades e potencialidades são descritas no capítulo 5 desta tese.

3.1 Escolha, identificação e caracterização da parcela da vinha

Após a escolha de uma vinha privada recentemente plantada na qual algumas operações culturais já eram praticadas de forma mecanizada, adequando-se aos fins do presente estudo, estabeleceram-se os procedimentos necessários à sua utilização. Estes incluíram o contato com o proprietário para obter autorização de permanência durante os trabalhos de campo, para filmar as operações culturais que se desenvolvem durante o ano, para instrumentação do trator em utilização, entre outros, tendo-se aquele mostrado muito recetivo à aplicação de novas tecnologias. Depois

de escolhida a parcela, foi identificada a sua localização geográfica como pertencente à RDD.

De acordo com o Plano Intermunicipal de Ordenamento do Território do Alto Douro Vinhateiro (PIOT-ADV), ratificado pela Resolução do Conselho de Ministros nº 150/2003, ao abrigo do disposto no artigo 68º do Decreto-Lei nº 380/99 de 22 de setembro e Despacho Conjunto 473/2004 de 30 de junho, a parcela de vinha em estudo enquadra-se na RDD na unidade de paisagem Pinhão/Torto - concelho de São João da Pesqueira.

A parcela compreende 0.63 hectares de uma vinha, de aproximadamente 14 ha denominada Bateiras, situada na freguesia de Ervedosa do Douro, distrito de Viseu, Portugal, Figura 3.1.

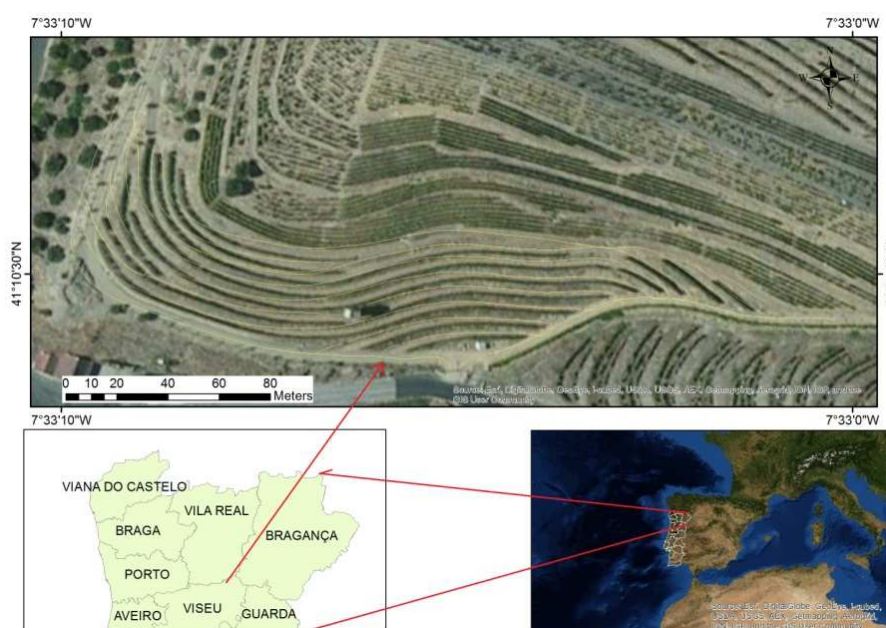


Figura 3.1 – Localização da vinha em estudo.

Está localizada na parte inferior da encosta a este do rio Douro e a norte do seu afluente, o rio Tordo, entre os paralelos $41^{\circ}10'49,44''$ e $41^{\circ}10'23,52''$ N e os meridianos $7^{\circ}33'23,04''$ e $7^{\circ}32'57,12''$ W. A parcela situa-se à entrada da quinta, Figura 3.2.

Foram os seguintes os aspetos que influenciaram a sua escolha e que podem ser



Figura 3.2 – Vista da parcela na vinha.

observados na fotografia, tirada de um ponto mais elevado da encosta ainda no interior da quinta:

- perfil muito heterogêneo da encosta, onde vários patamares são interrompidos na ligação a outros, o que obriga a um aumento de manobras nas intervenções mecanizadas e, conseqüentemente, perdas importantes de eficiência nas operações culturais;
- dimensão reduzida e nela terem sido identificados elementos que aumentam a dificuldade de navegação com GPS, como sejam:
 - um muro de pedra que limita a parte superior da parcela e que em determinadas posições atinge mais de 3 m de altura, contribuindo para o enfraquecimento do sinal GPS,
 - um posto de transformação de eletricidade que, para além de provocar constrangimentos à receção de sinal GPS, limita a possibilidade de utilização de um drone ou de outro dispositivo para captação de imagens

aéreas; impede ainda a livre circulação de um dispositivo móvel ao longo do patamar onde está instalado.

Os aspetos mencionados influenciaram a identificação e caracterização de um número significativo de especificidades que são detalhadas adiante, na primeira etapa da metodologia desenvolvida para criar um projeto SIG.

O terreno da encosta da vinha, com declive superior a 40%, é sistematizado em patamares estreitos horizontais com talude natural em terra, onde é plantada uma única linha de videiras na zona externa da plataforma. O desnível entre os patamares é de aproximadamente 2 metros. A sua largura varia entre 1,60 m (patamares mais estreitos) e 1,80 m (patamares mais largos), quando se apresentam de forma uniforme. Nas zonas de descontinuidade, a variação de largura é já um aspeto a considerar.

A parcela de vinha possui dois caminhos distintos de trabalho. Um, estreito com declive mais acentuado, a este da entrada da quinta, no qual existe uma fila de vinha e por onde somente podem circular veículos especiais de tração às quatro rodas, e outro mais largo, a oeste, em terra batida, com declive mais ligeiro que o primeiro, onde um veículo comercial pode circular, Figura 3.3.

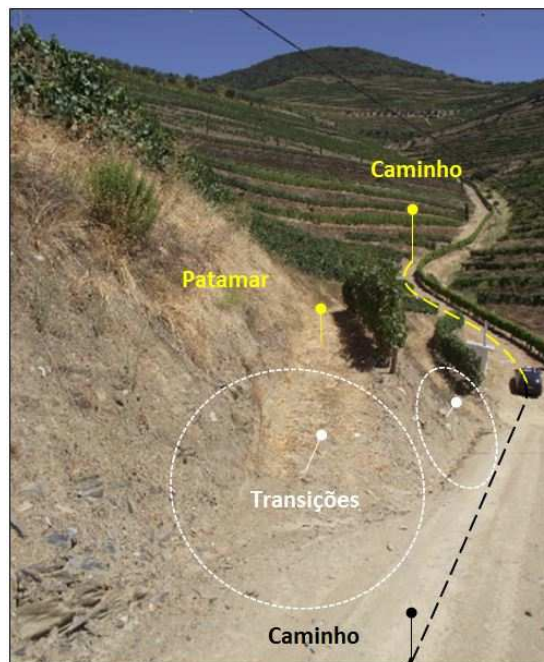
No caminho a oeste não foi plantada vinha, mas sim alternadamente oliveiras e ciprestes para sustentarem o terreno e contribuírem para a biodiversidade, Figura 3.4 (a). Apresentam traçado oblíquo à estrutura dos patamares para redução do comprimento dos mesmos. Permitem assim um fácil acesso das máquinas aos patamares e consequente diminuição dos tempos utilizados na realização de determinadas operações (reabastecimento da máquinas de pulverização, por exemplo). Apresentam uma largura entre os 3,0 m e os 3,5 m e um declive no sentido longitudinal não superior a 10-15%. O caminho a oeste possui uma zona mais larga onde é permitida a execução de manobras, Figura 3.4 (b). Tanto os caminhos como os patamares foram talhados com um declive para o bordo interior da ordem dos 2 a 5% (a inclinação foi garantida por equipamento laser que controlou os *bulldozers* na preparação do solo) a fim de permitir uma drenagem mais eficiente das águas fluviais, via manilhas, para os coletores e por sua vez para o exterior da parcela



(a) Caminho a oeste



(b) Caminho a este



(c) Vista dos dois caminhos

Figura 3.3 – Caminhos na vinha com identificação de algumas especificidades.

(Figura 3.4 (b)).

Os postes de madeira que sustentam a fila de vinha após enterrados apresentam uma altura, h , entre 1,50 m e 1,60 m e um diâmetro, ϕ , de 80 mm, Figura 3.5 (a). Estão dispostos de 4 em 4 metros ao longo da linha. O embardamento é feito por duas filas de arame duplo, uma no topo a 1,40 m e outra a 0,90 m de altura do patamar para a primeira ampara dos pâmpanos, e ainda uma fila de arame simples, 0,25 m abaixo da anterior, que sustenta o tubo de rega afastado do arame sensivelmente 5 cm (altura dos cliques de sustentação). A fixação das cabeceiras é feita com arriostas de madeira distanciadas do último poste sensivelmente 1 m, Figura 3.5 (b).

As operações culturais são realizadas ao longo do ano, Tabela 3.1.

A adubação, a cava, a escava, a redra, a empara, a desponta, a fertilização, os tratamentos fitossanitários, a poda, a empa, a enxertia e a vindima são idênticas às efetuadas noutras regiões do país, sendo mais penosas de realizar na RDD devido

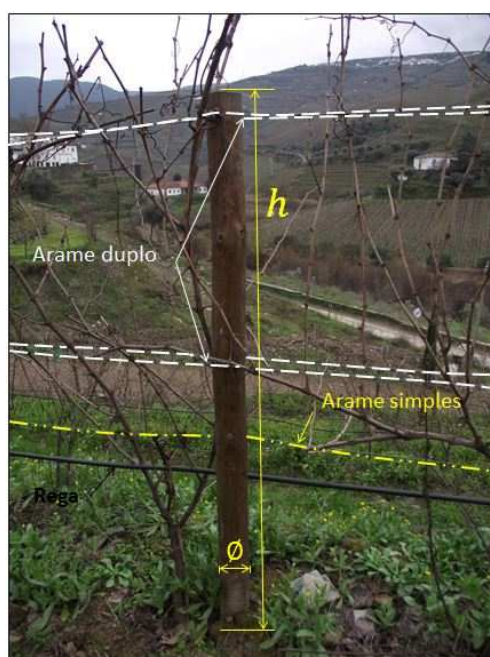


(a) Disposição da flora

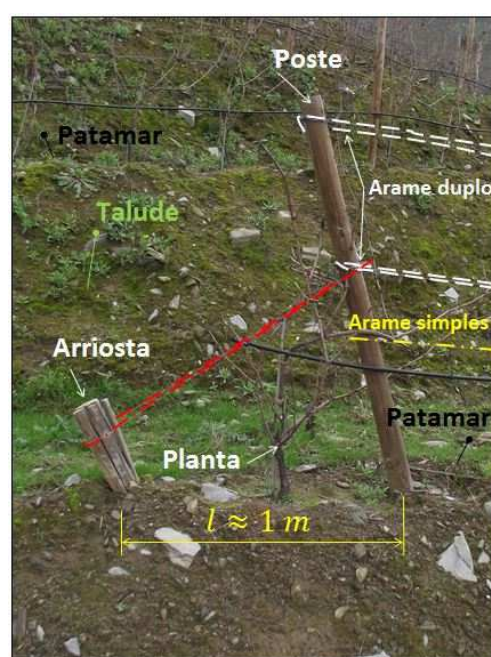


(b) Local de manobras

Figura 3.4 – Vistas do caminho que contorna a parcela a oeste com identificação de algumas especificidades.



(a) Disposição do arame no poste



(b) Poste e arriosta

Figura 3.5 – Modo de embardamento usado na parcela, com identificação de algumas especificidades.

Tabela 3.1 – Distribuição das atividades culturais ao longo do ano.

Ativ. culturais	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set
Adubação										
Cava										
Desponta										
Empara										
Enxertia										
Escava										
Fertilização										
Poda										
Redra										
Trat. Fitossanitários										
Vindima										

às condições climáticas e ao acentuado declive do terreno.

Em janeiro, a planta encontra-se desprovida de folha. A expansão vegetativa máxima compreende uma largura de vinte a trinta centímetros ao redor do pé da planta, atingindo o seu valor maior em julho, antes da vindima, Figura 3.6. Este aspeto tem de ser considerado na medida em que a expansão vegetativa da planta limita o espaço de circulação do veículo móvel ao longo do patamar.

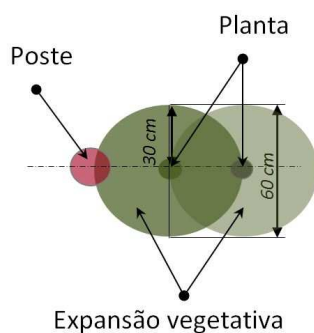


Figura 3.6 – Expansão vegetativa da planta.

Em resumo, durante o processo de identificação e caracterização da parcela, foi necessário efetuar várias visitas à vinha durante um ano para conhecer a atividade agrícola, identificar as operações e o modo como eram realizadas. Avaliaram-se alguns aspetos relacionados com os constrangimentos oferecidos à movimentação do trator, como por exemplo o estado vegetativo das plantas o que diretamente afeta a

condução no interior dos patamares. Verificou-se o modo como um perito em manobrar a máquina realizava as diferentes operações culturais, tentando não despende muito tempo mas fazendo-o com cuidado para que não houvesse necessidade de as repetir. Foram ainda tiradas notas sobre aspetos práticos observados, importantes à navegação, como pormenores e questões que só um observador externo e menos experiente deteta e questiona.

3.2 Levantamentos iniciais e metodologia desenvolvida

À data de início do trabalho de campo, a informação facultada pelo proprietário da vinha consistia na planta de localização resultante de um levantamento que se desconhece, cujo traçado foi sobreposto à folha 128 da carta militar 1:25000 e que, posteriormente, para efeitos de projeto sofreu uma ampliação para a escala 1:10000, Figura 3.7.

Os mapas, em formato digital, adquiridos nessa altura ao Instituto Geográfico do Exército (IgeoE), (IGE), tinham sido produzidos em 1966, por estereofotogrametria aérea. Eram fornecidos em formato Raster numa grelha de 8 m de resolução dos quais foi possível obter curvas de nível de contorno da montanha de 10 em 10 metros de altimetria, em formato vetorial, com pontos de 1 m de resolução. Tratando-se de mapas anteriores à data de plantação da vinha (2010), não foi possível identificar os patamares e mesmo que o fosse a sua precisão era insuficiente para os propósitos da navegação.

Definiu-se, assim, a necessidade de efetuar uma visita à vinha para realizar um estudo prévio de análise das suas características e para escolher a informação suficiente para elaborar um MDE da parcela de vinha. A identificação geográfica de um número significativo de pontos notáveis do relevo, capaz de caracterizar as vias de possível circulação do veículo móvel, permitiria solucionar o problema.

Para pequenas áreas é recomendável a utilização de um GPS para levantamento

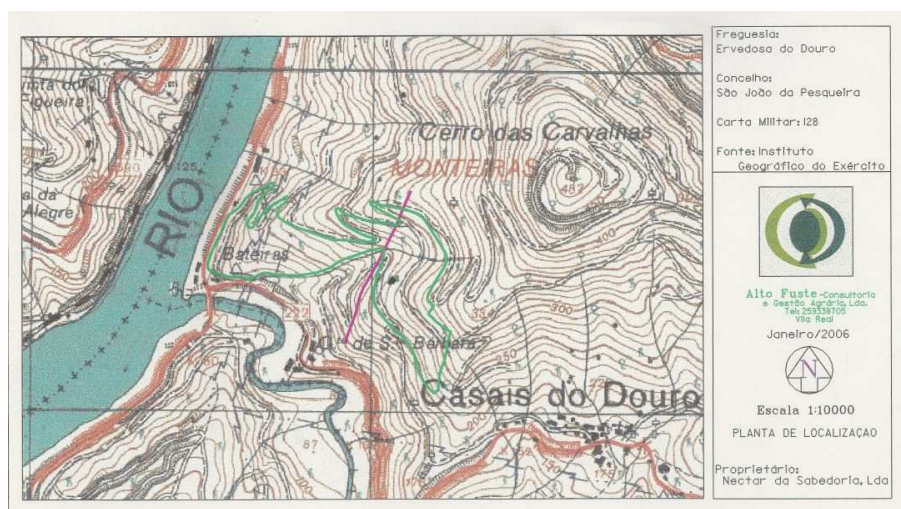


Figura 3.7 – Planta de localização.

terrestre ou o recurso à fotogrametria aérea com dispositivos telecomandados de pequeno porte (Matos, 2001). A fotogrametria por helicóptero convencional é um processo muito dispendioso (Barrientos et al., 2011). Um helicóptero telecomandado necessita, para além de uma zona suficientemente larga para aterragem, de espaço aéreo livre para a sua movimentação. Esta hipótese foi abandonada devido à existência de linhas de média tensão provenientes do posto de transformação no espaço aéreo da vinha e pela inexistência nos seu perímetro mais próximo de uma zona de aterragem. Foi inviabilizada também a utilização de um drone para captação de imagens georeferenciadas devido aos problemas de estabilização que, à data, estes dispositivos apresentavam e que, quando agravados pela topografia acidentada do local e pelos ventos fortes (as elevadas temperaturas junto ao rio criam correntes de convexão), tornavam o processo muito difícil, moroso e perigoso. Confirmou-se, portanto, o interesse em realizar o levantamento com GPS diferencial. O fluxograma do procedimento adotado para determinação do mapa da parcela encontra-se representado na Figura 3.8.

Nele se identifica como informação de entrada o MDE (Folha 128, que contempla o concelho de S. João da Pesqueira, da carta militar de Portugal, escala 1:25000, série M888), adquirido ao IGeoE, e a imagem de satélite, obtida via *Google Earth*. Para a elaboração do mapa 3D da vinha, como resultado da associação e seleção de camadas

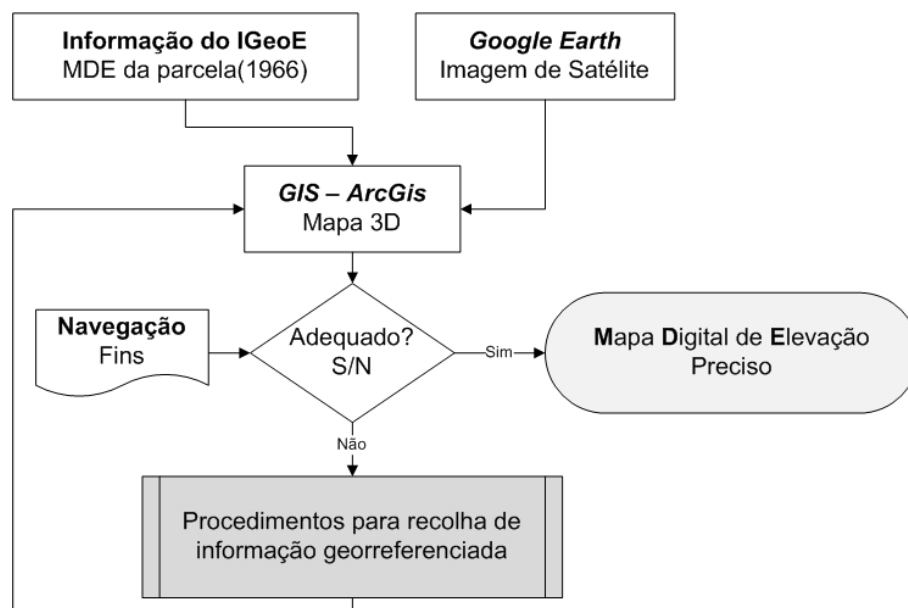


Figura 3.8 – Procedimento adotado para implementação da metodologia para gerar um SIG.

de informação geográfica arquivada na base de dados num SIG, foi necessária a aquisição das coordenadas geográficas de pontos específicos da vinha, a qual resultou num conjunto de procedimentos a adotar para levantamento com GPS diferencial em vinhas de patamares na RDD. Foi utilizado como critério de precisão um quarto do diâmetro do pneu mais pequeno (27 polegadas, aproximadamente 69 cm) de um trator de gama média que habitualmente realiza as tarefas de manutenção da vinha. Analisando a precisão do mapa obtido e comparando-a com o valor definido como recomendável para a navegação verifica-se, ou não, a necessidade de repetir e retificar o conjunto de procedimentos utilizando o mesmo equipamento configurado em modo mais preciso ou de utilizar outro de maior precisão.

Antes do levantamento foi efetuado um trabalho que englobou a escolha e a aquisição do equipamento GPS, a avaliação da necessidade de adquirir e configurar material complementar e a realização de uma visita à vinha para detetar pormenores que pudessem auxiliar no levantamento. A ordem pela qual estas operações foram realizadas pode parecer irrelevante; contudo, como os equipamentos podem ser configurados para levantamentos por pontos ou por linhas poligonais, o que condiciona

a configuração e formatação da estrutura de armazenamento da informação, foram identificadas em primeiro lugar as especificidades da vinha. Só depois foi efetuado o trabalho de configuração do software de armazenamento de dados e do equipamento, para que pudessem ser realizados num dia de trabalho de campo dois levantamentos. De seguida foi realizado o levantamento propriamente dito. A informação recolhida foi introduzida num programa de geoprocessamento (ArcGis, ESRI) para criação do MDE para a parcela, bem como a informação complementar anteriormente identificada. O MDE não se adequou aos fins propostos, como se pode verificar na análise de resultados (secção 3.2.4), mas permitiu constituir a metodologia desenvolvida para gerar um projeto SIG, apresentada no final da secção. Estes procedimentos encontram-se descritos, como etapas, nas próximas subsecções.

3.2.1 Localização e caracterização da vinha

Esta etapa contemplou uma visita do topo ao fundo da vinha utilizando como equipamento de base algum material fotográfico, um medidor de distâncias e um bloco de notas para a identificação das zonas do terreno cuja geometria e topografia condicionam a navegação (designadas anteriormente por especificidades da vinha) e sua localização relativa, Figura 3.9.

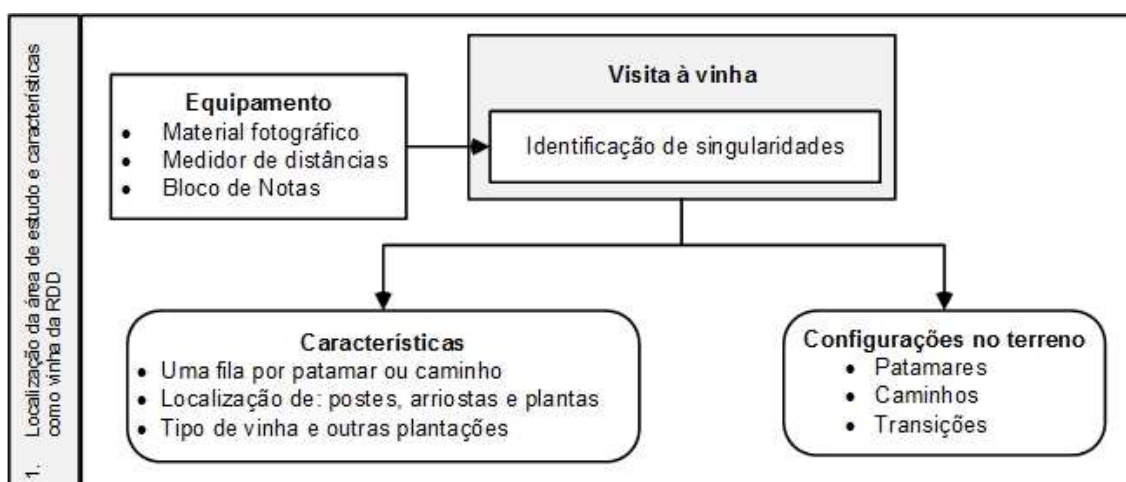


Figura 3.9 – Etapa 1 da metodologia desenvolvida para gerar um SIG.

Podem encontrar-se na vinha patamares mais longos e outros mais curtos. As interrupções nos patamares devem-se a descontinuidades naturais ou artificiais. As descontinuidades naturais estão associadas à forma da encosta ou à sua alteração quando por exemplo durante fortes chuvas a água arrasta consigo partes do terreno. As descontinuidades artificiais resultam de ações realizadas pelo homem. Como exemplo, pode citar-se a deslocação de terras durante a colocação dos coletores de água ou outras obras de carácter temporário e as decorrentes de já existirem edifícios na quinta na altura da definição dos patamares, como é o caso do posto de transformação, Figura 3.10 (b). As descontinuidades, como consequência da ocorrência de fenómenos naturais ou artificiais, podem interromper ou estrangular a circulação no patamar.



(a) Patamar estrangulado



(b) Patamar interrompido

Figura 3.10 – Efeitos provocados por descontinuidades artificiais com traçado dos seus limites.

Os patamares longos que se contorcem acompanhando a encosta iniciam-se e terminam normalmente nos acessos de caminhos a patamares (ou vice versa, dependendo do sentido da circulação). Estes acessos são doravante designados por transições de entrada, Figura 3.11.

Em geral, os patamares curtos têm origem ou terminam noutros patamares. Quando identificados como patamares “mancos” (no caso de pelo menos uma das suas extremidades dar acesso a uma transição de entrada) terminam em becos que podem, ou não, Figura 3.12 (a), dar acesso a outros patamares desnivelados, o que obriga, em caso afirmativo, ao contorno do beco e inversão do sentido, Figura 3.12 (b).



(a) Caminho a este



(b) Caminho a oeste

Figura 3.11 – Transições de entrada com diferentes declives com traçado dos seus limites.



(a) Beco sem acesso



(b) Acesso a patamar desnivelado

Figura 3.12 – Efeitos provocados por descontinuidade natural (patamares mancos) com traçado dos seus limites.

Podem ainda acontecer situações onde os patamares terminam em zonas que dão acesso a outros patamares desnivelados, Figura 3.13.

Em resumo foram identificadas as transições de entrada, entre caminhos e patamares, as transições interiores, entre patamares desnivelados que obrigam, ou não, aquando da sua transposição à alteração do sentido e os estrangulamentos da via de circulação devido a descontinuidades naturais ou artificiais. Com base na análise da forma das superfícies em que a vinha foi dividida e no modo como esta pode condicionar o processo de navegação, foi confirmada necessidade de adquirir, em termos gerais, o

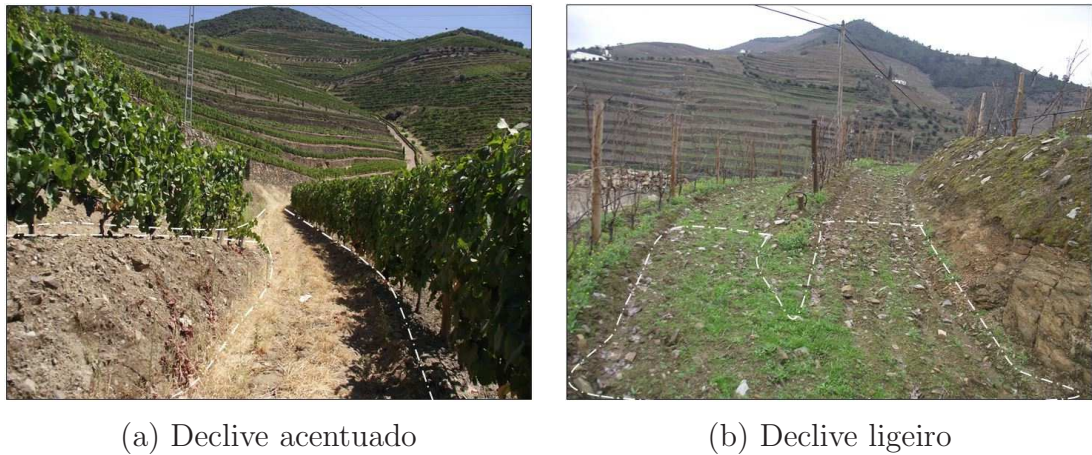


Figura 3.13 – Diferentes acessos a patamares desnivelados com traçado dos seus limites.

maior número de pontos possíveis para descrever pormenorizadamente as transições, para definir os patamares e caminhos e estabelecer uma estratégia para definir a sua localização relativa.

3.2.2 Trabalho de campo preparatório

A segunda etapa compreendeu a modelação das especificidades da vinha, a definição da estratégia de recolha de dados, a escolha da estrutura de dados e a configuração do GPS e do software, conforme a metodologia esquematizada na Figura 3.14. As diferentes fases do processo são descritas:

1. No que respeita à modelação, com base nas características geométricas do terreno, as especificidades da vinha foram agrupadas e referenciadas segundo três tipos distintos:
 - **Patamares:** superfícies com declive ligeiramente acentuado;
 - **Caminhos:** com declives bastante vincados;
 - **Transições:** superfícies que descrevem zonas com configuração irregular.

A cada modelo associou-se uma representação esquemática que foi pensada para ser futuramente utilizada como possível identificador artificial a colocar na

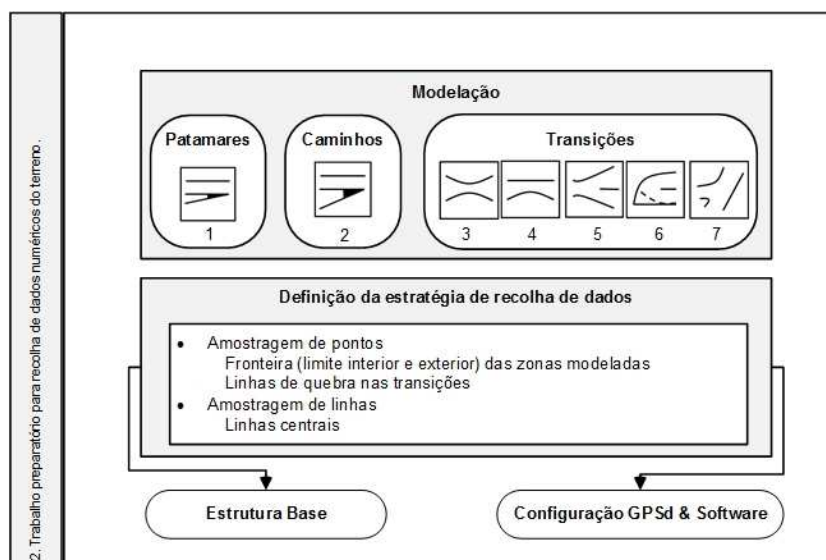


Figura 3.14 – Etapa 2 da metodologia desenvolvida para gerar um SIG.

vinha, Figura 3.15. As transições foram representadas através de cinco modelos distintos. Os modelos 3 e 4 identificam os dois tipos de estrangulamentos detetados nas vias de circulação, dos dois lados da via ou de um só lado, respetivamente. O modelo 5 aplica-se ao acesso de um patamar a outros dois desnivelados do primeiro. O modelo 6 representa uma zona de beco com acesso a outro patamar desnivelado e por último o modelo 7 reproduz a geometria de uma transição de entrada. Estas geometrias podem ser identificadas nas imagens da vinha apresentadas na subsecção anterior.

2. No que diz respeito ao planeamento da atividade de recolha de dados e para garantir a criação de uma superfície detalhada da totalidade da parcela, estipulou-se fazer o levantamento de todas as linhas de quebra que regem a forma das transições e o levantamento de pontos espaçados regularmente ao longo dos patamares e caminhos, de forma a transcrever as superfícies com pequenas variações de altura. Devido à regularidade dos patamares e caminhos estabeleceu-se a recolha, nos seus dois lados e alternadamente (no caso dos patamares junto à linha de videiras e junto ao talude) de pontos isolados, de dois em dois metros, num único sentido do movimento. A identificação das linhas de quebras, por estarem associadas a variações altimétricas significativas

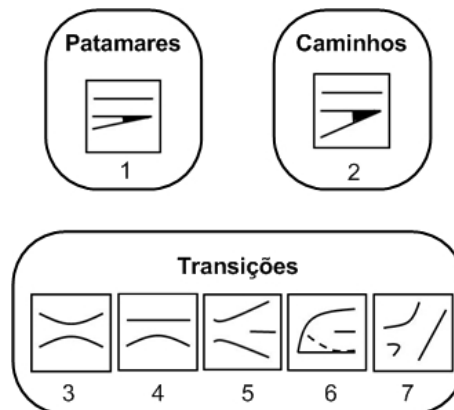
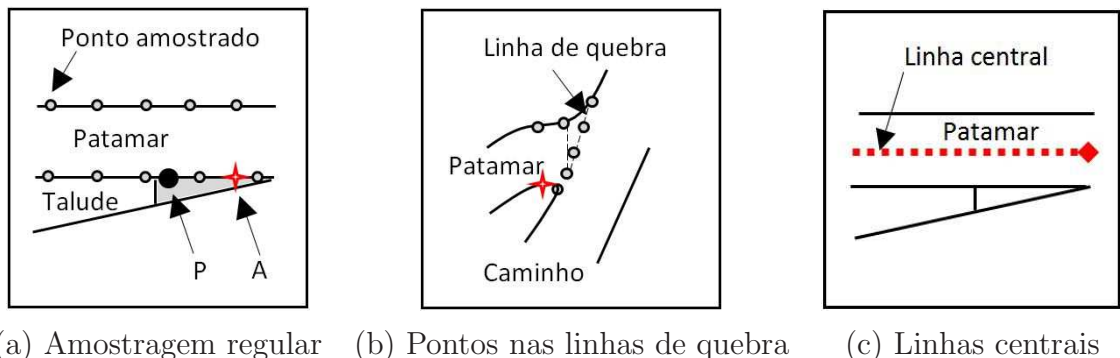


Figura 3.15 – Modelo para patamares, caminhos e transições.

em alguns casos, determinou a recolha de um maior número de pontos entre os quais a posição da arriosta (A), ou arriostas, e do poste (P), ou postes, quando incluídos na transição, Figura 3.16 (a) e (b). As posições da arriosta e do poste são fundamentais para a localização do início da linha de videiras no modelo da superfície da parcela.



(a) Amostragem regular (b) Pontos nas linhas de quebra (c) Linhas centrais

Figura 3.16 – Amostragem de pontos e linhas.

Para a determinação experimental das linhas de condução planeou-se o levantamento das linhas centrais dos patamares e dos caminhos em modo de recolha contínua de posições distanciadas entre si de um metro. Ou seja, o levantamento dinâmico de linhas poligonais iniciadas e terminadas em pontos validados para o efeito, Figura 3.16 (c).

3. O tipo de levantamento condiciona o tipo de dados a recolher e, por sua vez, a

necessidade de definir uma estrutura para o seu armazenamento. Assim, para cada ponto levantado foi definida uma estrutura com diferentes campos. Um campo para guardar as coordenadas de posição dos pontos 3D amostrados, que identificam o bordo interior e exterior dos patamares e dos caminhos e que delineiam as transições; outros diferentes para guardar outros atributos importantes de um ponto, como o tipo de área em que é levantado e se nele existe ou não vinha. Na tabela 3.2, na primeira coluna, apresentam-se os atributos de cada ponto. A sua identificação e o seu significado são explicitados por linha.

Tabela 3.2 – Tabela de atributos para levantamento de pontos.

Atrib.	Características
ID	Identificador ou número do ponto amostrado
X, Y	Coordenadas X,Y (UTM, m)
Z	Coordenada Z (UTM, m)
AT#	Tipo de área: OUT (Externo), ND (Obstáculos), P (Patamar), C (Caminho), T (Transição) #: número da área tipificada
VIN	Linha de videiras: S(Com linha), N (Sem linha)

Para distinguir as linhas poligonais (estrutura base, predefinida no software do equipamento utilizado) usou-se uma estrutura diferente, com dois campos: um reservado para a identificação da linha, à semelhança da estrutura de recolha de pontos, e outro para identificação, tipo e numeração, da área de vinha levantada refletidos no atributo AT seguido de # na tabela 3.3.

4. Configuração do GPS:

A fase de configuração do equipamento e do software para transposição de dados recolhidos e sua análise depende do equipamento e do software (SXBlue-II,

Tabela 3.3 – Tabela de atributos para levantamento de linhas.

Atrib.	Características
ID	Identificador ou número da linha recolhida
AT#	Tipo de área: OUT (Externo), P (Patamar), C (Caminho) #: número da área tipificada

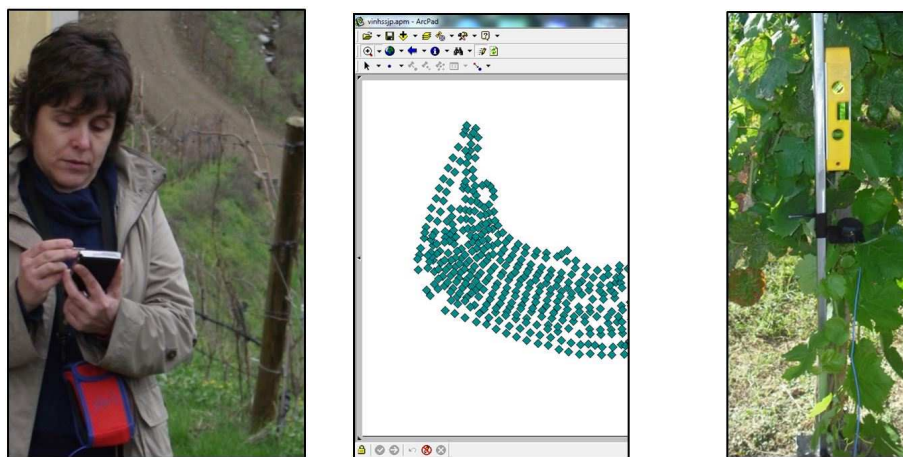
2008). Os equipamentos geralmente podem ser configurados para funcionarem em diferentes modos. Para os levantamentos iniciais foi utilizado um recetor GPS com receção de dados corrigidos via rede de satélites de base aumentada SBAS, com correções aplicadas às pseudo-distâncias, SXBlue II (GeneQinc, Canada) adequado para receber sinal com precisão submétrica horizontal, usando 95% do tempo transmissão DGPS em tempo real. Para receber e processar dados do GPS, foi utilizado um PDA (*Personal Digital Assistant*) HP iPAQ 214 com a aplicação de software instalada ArcPad 7.1 (ESRI) e o software ArcGis 9.3 GIS (ESRI) para construir o GIS completo, Figura 3.17 (a). O GPS transmitia informação ao PDA, via Bluetooth, usando o protocolo NMEA 0183 para comunicação de dados à frequência de 1 Hz.

Para facilitar a fase do levantamento foram transferidos para o PDA o projeto SIG elaborado inicialmente com dados cartográficos (128, Portugal), os limites da quinta (fornecidos pelo proprietário) que permitiram a localização da parcela e o ortofotomapa, fornecido pela UTAD. Foi então possível criar um polígono irregular de contorno da parcela (sob a forma de *shape file*) para auxiliar o utilizador na sua localização relativa durante o levantamento.

Procedeu-se separadamente à abertura de uma nova folha de trabalho no ambiente ArcPad, sobre o SIG, para cada um dos levantamentos onde foi adicionada a respetiva estrutura ainda vazia, como camada de dados, sob a forma de *shape file*, Figura 3.17 (b).

Uma vez que o equipamento GPS tinha sido adquirido sem o respetivo suporte, construiu-se um suporte extensível para fixar a antena e auxiliar o operador durante os trabalhos de campo. O sistema foi ajustado para 1.30 m de altura e a antena foi nele colocada. Para garantir a verticalidade da medida,

utilizou-se um nível de bolha com suporte magnético que, foi acoplado à antena, Figura 3.17 (c).



(a) Utilização do PDA (b) Ambiente ArcPad (c) Suporte de antena

Figura 3.17 – Imagens retiradas no levantamento inicial.

A aquisição foi configurada em dois modos distintos. No levantamento por pontos, em modo “pontos” com registo de uma média de 10 pontos por posição. No levantamento por linhas, em modo “contínuo” com um metro de distanciamento entre posições.

O equipamento foi colocado em modo “Sintonia automática”, para receber informação das correções diferenciais do sistema de satélites EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*), via frequências de GPS L1 e código C/A (aplicando as correções às pseudo-distâncias) no nível de precisão mais elevado. Em termos de garantia de qualidade de informação, foi configurado para a sua qualidade de receção máxima e emitir continuamente mensagem de erro caso a receção deixasse de ser em modo “unicamente posicionamento 3D” e “unicamente em modo DGPS”. Para se garantir a melhor geometria dos satélites na hora do levantamento, limitou-se o fator de diluição da precisão ao valor um (PDOP, *Positional Dilution Of Precision*).

Em termos de referência, para as posições foi utilizado o sistema de coordenadas local de Portugal WGS84 UTM-29N (datum G1150) que estabelece o tipo de projeção, as unidades, o esferoide e os restantes parâmetros de projeção

usados e para as alturas foi considerado o elipsoide que define o nível médio da água do mar (*Height Above Elipsoide* - HAE). Este último foi também usado na transformação de dados.

3.2.3 Levantamentos com GPS diferencial

A terceira etapa, esquematizada na Figura 3.18, compreendeu o levantamento de campo propriamente dito. O equipamento GPS foi ligado na posição de topo da parcela onde se decidiu iniciar as operações a fim de diminuir o esforço despendido pelo operador. Após terminado o processo de espera pelas melhores condições de receção de sinal, foi carregado no PDA o ficheiro, para o efeito criado, com as estruturas vazias. Seguiu-se o processo de verificação das condições de comunicação do GPS com o PDA. O levantamento foi em seguida iniciado numa primeira fase por pontos e mais tarde por linhas poligonais, seguindo a estratégia predefinida (ponto 2, secção 3.2.2).

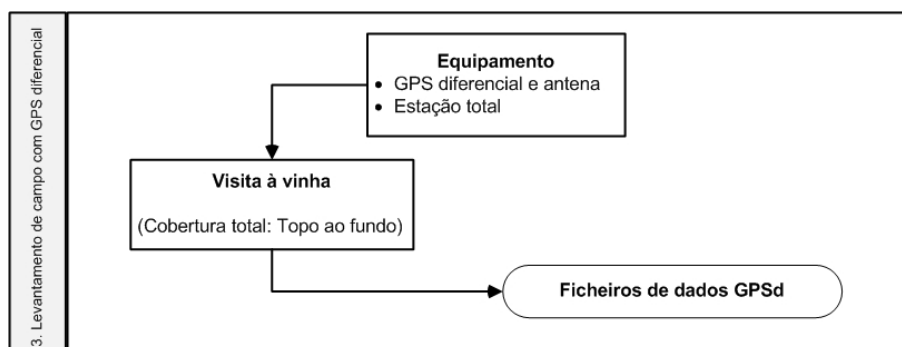


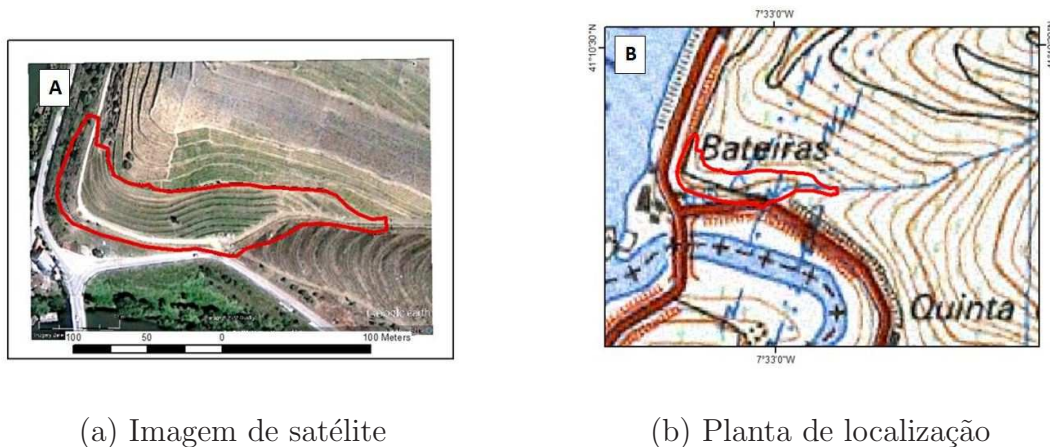
Figura 3.18 – Etapa 3 da metodologia desenvolvida para gerar um SIG.

3.2.4 Análise de resultados

A determinação de uma rede irregular triangular de pontos (TIN, *Triangulated Irregular Network*) envolve a geração e análise de uma sequência de mapas.

Para o presente caso, foi inicialmente selecionada, na imagem de satélite obtida

via Google Earth, uma área que cobrisse a parcela pelo traçado de um polígono irregular, Figura 3.19 (a). Este foi sobreposto à planta de localização da vinha, Figura 3.19 (b).



(a) Imagem de satélite

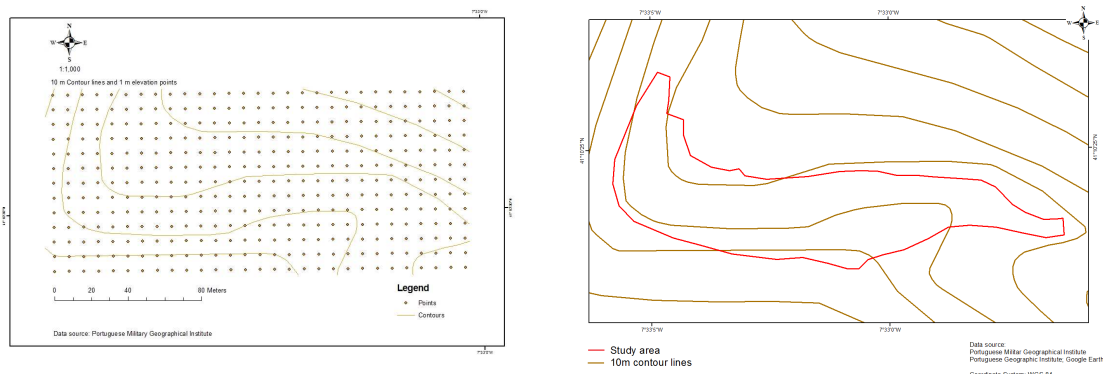
(b) Planta de localização

Figura 3.19 – Polígono limite de parcela sobreposto nas imagens.

De seguida foi determinado um polígono regular retangular envolvente da parcela para permitir fazer as interpolações necessárias à criação da TIN da parcela. A informação produzida pelo Instituto Geográfico do Exército, nomeadamente a grelha de pontos com um metro de precisão altimétrica (fornecida em formato *raster* numa grelha de 8 m) e as curvas de nível de 10 em 10 metros de contorno da região (produzida em formato vetorial) serviram de base para a construção do projeto SIG, Figura 3.20 (a). Como se pode verificar por observação da imagem do seu *layout*, a informação apresentada é insuficiente para os propósitos do presente estudo uma vez que só se pode concluir que a parcela de vinha se enquadra entre as três curvas de nível mais a sul e possui um afastamento de aproximadamente vinte metros entre o patamar mais baixo e o mais alto, Figura 3.20 (b).

Juntando ao projeto SIG a informação dos levantamentos pode observar-se, para além do posicionamento relativo da parcela na encosta, o significativo aumento de precisão, possibilitando o reconhecimento no mapa das especificidades da vinha.

Ou seja, sobrepondo as coordenadas de posição dos pontos recolhidos no levantamento “por pontos” à grelha com um metro de precisão altimétrica inicial, é visível



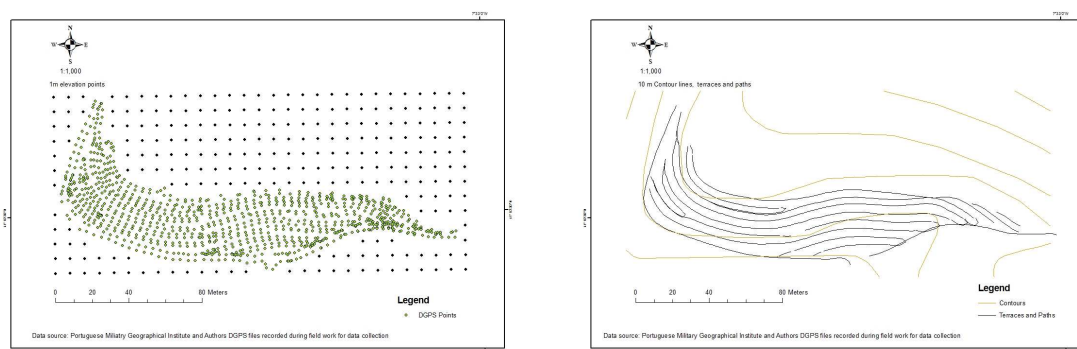
(a) Curvas de nível e grelha pontos

(b) Polígono e curvas de nível

Figura 3.20 – Polígono limite de parcela sobreposto aos dados originais do lgeoE.

a diminuição do espaçamento da malha permitindo uma melhor definição dos patamares, caminhos e transições na vinha. Como os pontos foram recolhidos de acordo com a topologia local (com sensivelmente 2 metros de espaçamento) e a metodologia definida, a malha de pontos recolhidos apresenta-se distorcida em relação à malha regular estabelecida para o local, Figura 3.21 (a). A maior descrição do declive das zonas de transição pode também ser observada pelo número de pontos apresentados mais próximos sendo ainda incrementada quando sobrepostas as linhas centrais dos patamares e caminhos, obtidas durante o levantamento em modo contínuo às curvas de nível de 10 em 10 metros de contorno da região. Na Figura 3.21 (b) pode ser observada a variação altimétrica dos diferentes patamares entre as curvas de nível originais e a distorção planimétrica da vinha que se acomoda à encosta entre as linhas de água e de festo.

Pode verificar-se pela observação da informação obtida dos levantamentos com correção diferencial por satélite que as linhas centrais se posicionam dentro dos limites interior e exterior dos patamares e caminhos, Figura 3.22. Junto ao muro de pedra, a norte da parcela, no bordo do polígono envolvente, alguns pontos não abraçam a linha central do patamar podendo concluir-se a necessidade de utilização de estação total ou virtual para correção de dados. A linha central do patamar mais a nordeste, fora do polígono irregular, evidencia ter sido este escolhido para conter apenas patamares com vinha.



(a) Pontos sobre grelha

(b) Linhas centrais sobre curvas de nível

Figura 3.21 – Resultados dos levantamentos com GPS diferencial sobre informação do IgeoE.

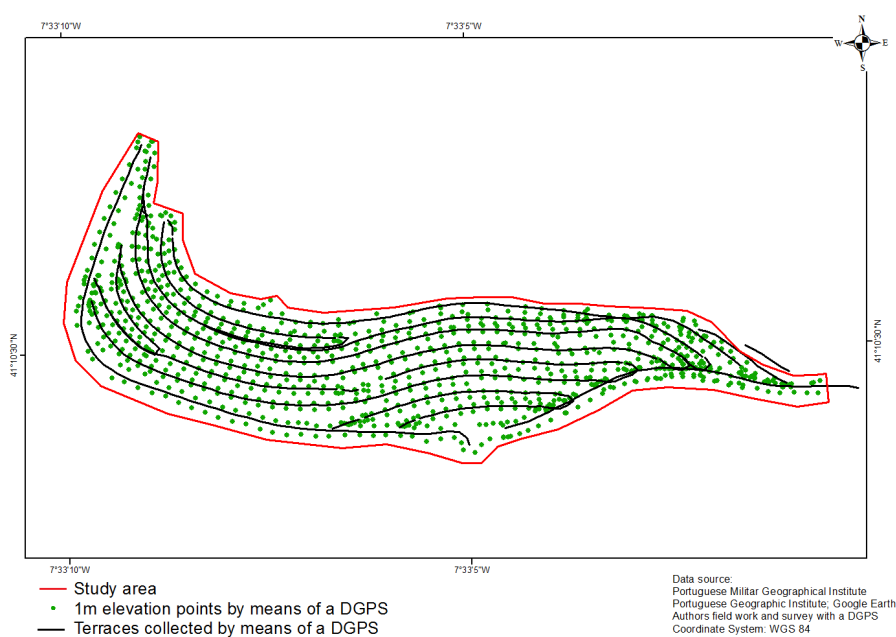
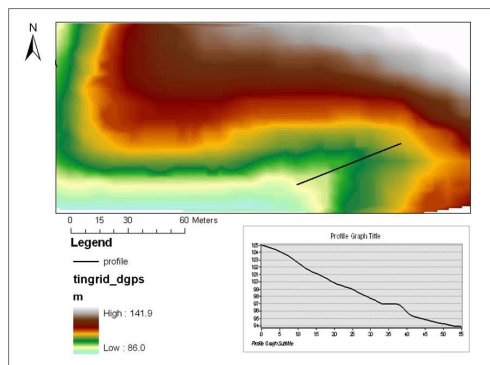


Figura 3.22 – Grelha pontos IgeoE e levantamento por pontos com GPSd.

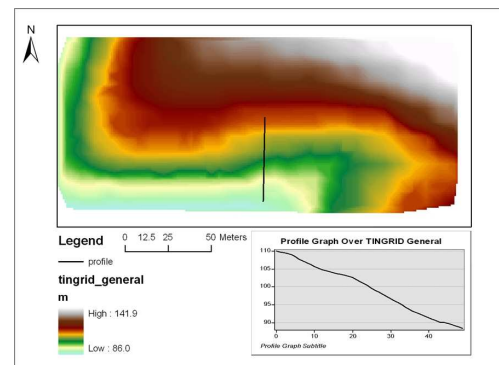
De seguida, com a informação original e a levantada, foram geradas duas TIN para a parcela.

Como pode ser verificado pela avaliação do perfil da encosta segundo linhas de corte estabelecidas nas TIN, Figura 3.23, é incrementada a descrição do declive do terreno.

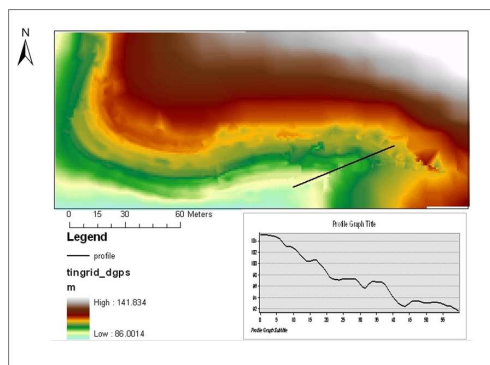
Com a informação original não são detetados os patamares no perfil da encosta, (Figuras 3.23 (a) e (c), no topo, numa grelha de 8 m de célula), enquanto que com a adição dos dados levantados, os patamares já o são no fundo das mesmas (numa grelha de células de 2 m). No corte efetuado junto ao caminho a este da parcela, paralelo à linha de água, é visível a definição dos patamares com alguma irregularidade que se justifica pela falta de uniformidade na configuração das diferentes transições de acesso aos patamares. No corte efetuado perpendicularmente à zona de distribuição uniforme dos patamares, já se reconhecem no perfil da encosta os patamares. Contudo, é de prever um aumento substancial na sua definição utilizando um equipamento mais preciso.



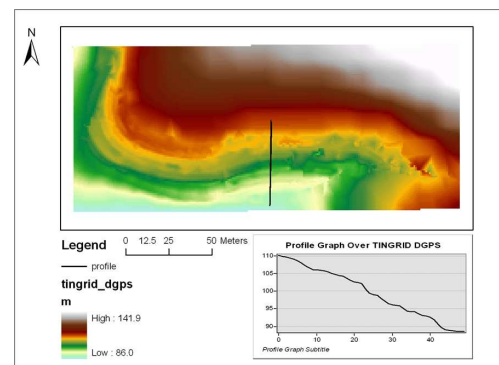
(a) Corte 1: Junto ao caminho na TIN de dados originais



(c) Corte 2: Meio da parcela na TIN de dados originais



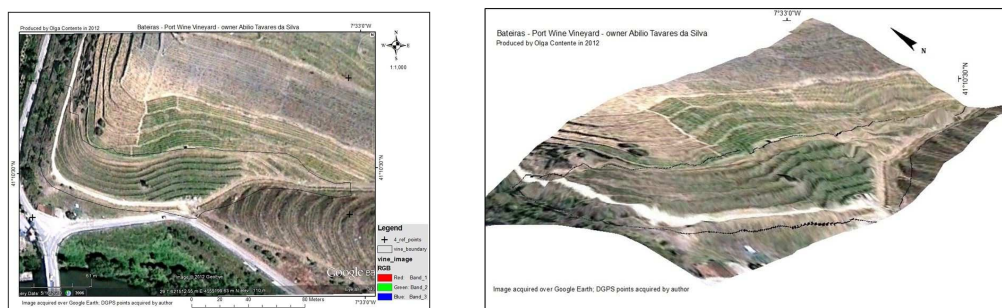
(b) Corte 1: Junto ao caminho na TIN de dados levantados



(d) Corte 2: Meio da parcela na TIN de dados levantados

Figura 3.23 – Gráficos de perfil obtidos por dois cortes em duas TIN.

A TIN de pontos levantados permitiu gerar um MDE para a parcela. Observando uma imagem georreferenciada de satélite, obtida via *Google Earth*, podemos verificar que existe, no interior do polígono desenhado à mão que delimita a parcela, um certo grau de distorção. Sobrepondo a imagem ao MDE da parcela a representação da topologia local é claramente mais precisa. É também visível a diferença de detalhe entre a parte interior (que contém os dados do levantamento por pontos) e a parte exterior do polígono desenhado, Figura 3.24.



(a) Imagem original com polígono (b) Imagem sobre pontos levantados

Figura 3.24 – Imagem georreferenciada da parcela obtido via Google Earth.

Após analisados os resultados, conclui-se que a inclusão no projeto SIG de mais informação permitiu, tal como esperado, um acréscimo de precisão do modelo. O conjunto de procedimentos adotado para o levantamento com GPS em modo de correção por satélite com GPS, para o processamento de dados recolhidos e sua sobreposição com outra informação existente, constitui uma metodologia que se apresenta de seguida.

3.2.5 Metodologia desenvolvida para gerar um projeto SIG

Foi desenvolvida uma metodologia para levantamento e criação de um projeto SIG, esquematizada na Figura 3.25. Pretende-se que esta venha a ser utilizada para outros levantamentos topográficos, não se restringindo ao propósito da navegação com GPS. A metodologia pode ser aplicada a qualquer tipo de vinha, desde que as características do terreno o justifiquem, utilizando diferentes dispositivos GPS. Podem

identificar-se três etapas, duas das quais antecedem o levantamento propriamente dito.

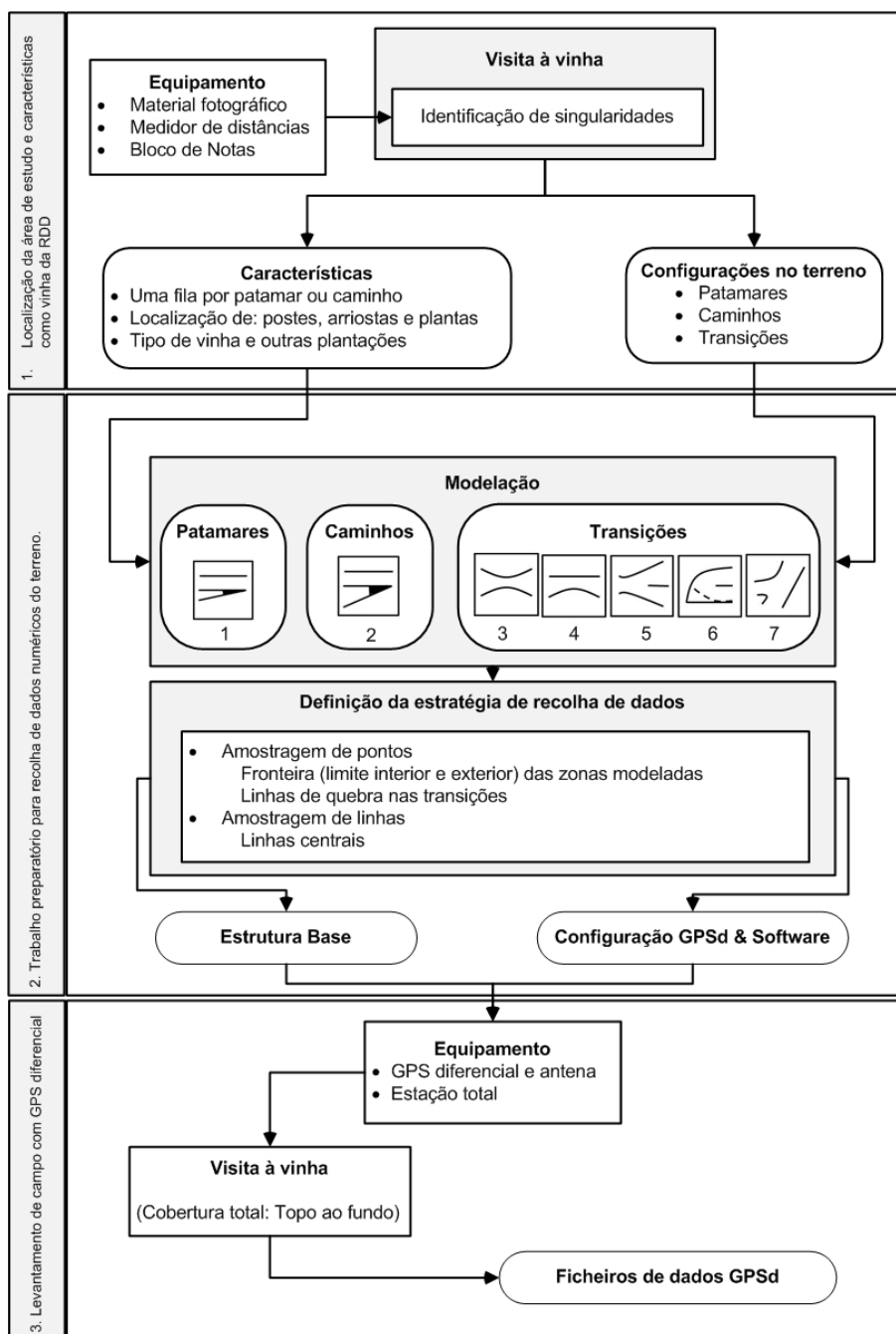


Figura 3.25 – Diagrama esquemático da metodologia desenvolvida para gerar um SIG.

A etapa inicial intitula-se localização da área em estudo e sua caracterização. Tratando-se de uma vinha enquadrada na RDD, plantada em patamares, com dimensão próxima de um hectare e com distribuição em altura, é aconselhável uma visita do topo ao fundo da vinha, a fim de diminuir o esforço despendido na operação, limitando o número de subidas, e que se faça no início da manhã, quando o sol se encontra baixo, e em meados de março (numa altura do ano em que os dias já começam a crescer e a expansão vegetativa é reduzida). A caracterização deverá culminar com a identificação e especificação das configurações e outras características notáveis para o fim a que o levantamento se propõe.

Na segunda etapa, designada por trabalho de campo preparatório, inclui-se a modelação das configurações semelhantes do terreno e a definição da estratégia de recolha de dados, em função das capacidades disponibilizadas pelo equipamento GPS.

Um levantamento por pontos com um afastamento regular entre si ou um levantamento em modo contínuo de pontos uniformemente distribuídos, ao longo do tempo ou ao longo do espaço, é suficiente para modelar configurações onde a variação planimétrica corresponda a pequenas variações altimétricas. Neste estudo, as configurações em questão são os patamares e os caminhos da parcela que se estendem preferencialmente em comprimento. Deste modo, é suficiente um levantamento por pontos, contornando alternadamente as bordas interior e exterior das configurações para definir as suas fronteiras, e um levantamento contínuo para definir as linhas centrais. Quando as configurações apresentam variação altimetria significativa a pequenas variações planimétricas (transições) aconselha-se a aquisição de um maior número de pontos segundo as linhas de quebra do terreno que as definem e que se apresentam durante o levantamento. Com o objetivo de preparar o trabalho de campo associado à etapa seguinte, sugere-se a definição da estrutura de dados a utilizar para cada tipo de levantamento e o estudo detalhado do modo de configuração dos equipamentos associados ao GPS e do software a utilizar.

Recomenda-se também a atribuição de numeração distinta que identifique cada uma das configurações semelhantes. No caso em estudo foi adotada a numeração com dois dígitos (símbolo # nas tabelas 3.2 e 3.3). O dígito da esquerda corresponde à ordem do patamar visitado no varrimento da parcela do fundo ao topo, pelo caminho este da

vinha, iniciado no extremo inferior. Dado terem sido encontrados dez patamares, ao último foi atribuído simplesmente o número dez por ser classificado como “manco” e nele não ter sido plantada vinha. Foi atribuído um número distinto ao dígito da direita de todos os patamares derivados dos primeiros já numerados, encontrados em socalcos desnivelados no varrimento da vinha no sentido oeste. Foi atribuída ao dígito da esquerda a mesma numeração do patamar que lhe deu acesso.

A terceira e última etapa da metodologia coincide com o levantamento de campo onde, após verificação e validação das condições de receção de sinal (número de satélites, máscara, etc), se aconselha a introdução, na estrutura de dados para levantamento com GPS, do maior número de atributos conhecidos e que este processo seja realizado de forma sistemática, a fim de evitar a falta de recolha de informação.

Para efetuar o controlo de qualidade da superfície modelada, é necessário o levantamento de um conjunto de pontos de controlo em áreas de circulação do veículo móvel de navegação. Estes pontos não devem ser usados para criar o modelo de superfície, mas sim como referência e controlo, através da comparação da sua altitude com as altitudes de pontos obtidos da superfície.

Para se avaliar o resultado do levantamento efetuado com a metodologia descrita, obtido na forma de ficheiro em formato *shape*, propõe-se a determinação do MDE através da criação de uma TIN com os pontos levantados e outros pontos produzidos para a área em estudo. A avaliação da necessidade de repetição do levantamento com equipamento mais preciso depende da resolução do MDE e do valor estipulado que garanta a sua adequabilidade para os fins do levantamento.

Em resumo, a representação numérica do relevo, com base na escolha de pontos notáveis do relevo e de pontos notáveis da vinha (onde o relevo embora importante não predomina sobre aspetos culturais) adquiridos com recurso a equipamento GPS diferencial com receção da correção via satélite e recolha de informação por observação local de outras características, permitiu gerar um SIG para a vinha. Neste, foi adicionada informação complementar de fontes externas fidedignas como o MDT do quarto superior esquerdo da carta 128 de Portugal continental adquirido ao IgeoE.

No processo de obtenção de um SIG, do qual se pudesse retirar um mapa 3D suficientemente preciso para a navegação na RDD, foram efetuados dois levantamentos distintos. Recorrendo a um equipamento de baixo custo foi efetuado um levantamento por pontos validados a cada instante durante o varrimento integral da vinha. Adotou-se um conjunto de procedimentos experimentais que resultaram da análise do tipo e da forma das superfícies do terreno e do prévio estudo do equipamento de medida utilizado. Foi também efetuado o levantamento das linhas intermédias da totalidade dos patamares e caminhos (para determinação de hipotéticas linhas de condução) por levantamento de linhas poligonais, em modo contínuo.

A informação recolhida nos dois levantamentos, armazenada em estruturas definidas para o efeito, não foi incluída no SIG final, por dela ter resultado um mapa 3D da parcela com uma precisão altimétrica insuficiente. Contudo, dos procedimentos adotados resultou uma metodologia que se recomenda para quaisquer outros levantamentos na RDD, uma vez que visa otimizar o trabalho de preparação e levantamento propriamente dito, contemplando ações para diminuir o esforço físico que necessariamente é despendido durante a sua realização. Esta, para além de facilitar o trabalho de levantamento topográfico na RDD, pode vir a ser útil a outros investigadores, desta ou de outras áreas de estudo, e foi desenvolvida por não terem sido encontrados trabalhos semelhantes com dados numéricos adquiridos em terreno com topografia tão variada. Serviu de base para as aquisições que posteriormente foram realizadas no presente trabalho de tese.

Analisando os resultados, identificou-se a necessidade de efetuar um levantamento mais preciso para que o detalhe do perfil da vinha viesse a ser aumentado. Foi testada a exportação de dados para uma plataforma virtual, de teste e validação de estratégias de planeamento de trajetórias, paralelamente desenvolvida e que será abordada no capítulo 4.

3.3 Obtenção e validação do MDE da vinha

Após verificação de que a precisão submétrica apontada para a configuração do equipamento de base existente só permitia obter um MDE com precisão de 1 m, e que, para que funcionasse em modo de correção cinemática em tempo real, necessitaria de investimento suplementar, foi abandonada a sua utilização optando-se por escolher um equipamento melhor.

3.3.1 Levantamentos RTK em tempo real para obtenção do MDE da vinha

Foi utilizado um novo equipamento, dispondo da funcionalidade de configuração em modo correção diferencial em tempo real calculada e transmitida da estação de referência terrestre, que permitiu um maior detalhe e precisão. O levantamento seguiu a metodologia anteriormente desenvolvida, tendo sido utilizados os resultados obtidos nas etapas 1, [Escolha, identificação e caracterização da parcela da vinha](#) e 2, [Levantamentos iniciais e metodologia desenvolvida](#). Contudo, na etapa 2, na definição da estratégia de recolha de dados, uma vez alteradas a marca do equipamento e a forma de determinação e receção das correções de posição dos pontos amostrados, o modo de configuração do equipamento e do software associado sofreu ligeiras alterações, face às apontadas na subsecção [3.2.2](#).

Assim, a metodologia foi validada com um recetor GNSS (*Global Navigation Satellite System*), MobileMapper 100 (Astech, France), de duas frequências, com sistema modem integrado (GSM/GPRS) permitindo a comunicação quer móvel, quer rádio, para receber e processar os dados recolhidos. Em termos de software, foi usado o Mapper Field, ligado à antena ASH111661 da mesma marca, com igual banda de receção e canais GNSS nas frequências L1 e L2. Em termos de hardware, recorreu-se ainda a um bastão convencional (Trimble, USA) adaptado para receber a antena e o equipamento GPS.

O equipamento foi configurado para receber as correções de posição em modo de

tempo real cinemático (RTK, *Real Time kinematic*) através da rede SERVIR (Sistema de Estações de Referência GNSS VIRTuais do IGeoE) ([SER](#)). Sob estas condições e segundo o manual do equipamento ([Platform](#)), a precisão tridimensional é tipicamente centimétrica.

Em posições onde não foi possível a correção posicional em modo RTK, após estabelecida uma estação virtual para o local, ou onde o sistema de constelações GNSS não permitia precisão centimétrica, ou quando não foi possível a captação de sinal pelo equipamento GNSS, o levantamento foi conduzido pela utilização de uma estação total local (Nikon, Japan), modelo DTM 330 ([Nikon](#)), suportada por posições definidas com o equipamento GNSS. Neste caso, foi necessária para a referida correção a transmissão com uma base externa própria.

Os dados adquiridos foram filtrados usando uma máscara para a precisão posicional menor que dois centímetros. As alturas foram referenciadas acima do elipsoide (HAE, *Height Above Ellipsoid*) e as posições foram-no no sistema de coordenadas local de Portugal PT-TM06/ETRS89 (*datum 73*) ([ETR](#)) que estabelece o tipo de projeção, as unidades, o esferoide e os restantes parâmetros de projeção.

Na etapa 3 da metodologia, aquando do levantamento propriamente dito, o procedimento consistiu na cobertura total da parcela do topo ao fundo contornando as bordas interior e exterior dos patamares e caminhos, numa amostragem uniforme de pontos. Na presença de transições, optou-se por uma amostragem mais apertada segundo as suas linhas de quebra para melhor definição de variações, altimétricas, conforme explicado na subsecção 3.2.5. A validação da informação fez-se ponto a ponto, Figura 3.26.

Na produção e comparação de resultados no projeto SIG foram adotados procedimentos semelhantes aos referidos na subsecção 3.2.4, de geração sequencial de mapas e sua análise.

Foi selecionado um polígono para delimitação da área da parcela, contendo a totalidade dos patamares a sul do muro, ou seja, semelhante ao polígono anterior mas com o patamar do topo nordeste onde não foi plantada vinha, Figura 3.27.



Figura 3.26 – Levantamento na parcela em modo RTK.



Figura 3.27 – Polígono de contorno da parcela sobre imagem de satélite.

O resultado do levantamento com GPS, em modo de correção diferencial em tempo real (RTK, por criação de uma estação virtual para o local) e com estação total de pontos pode ser observado no *layout* do projeto SIG desenvolvido, Figura 3.28.

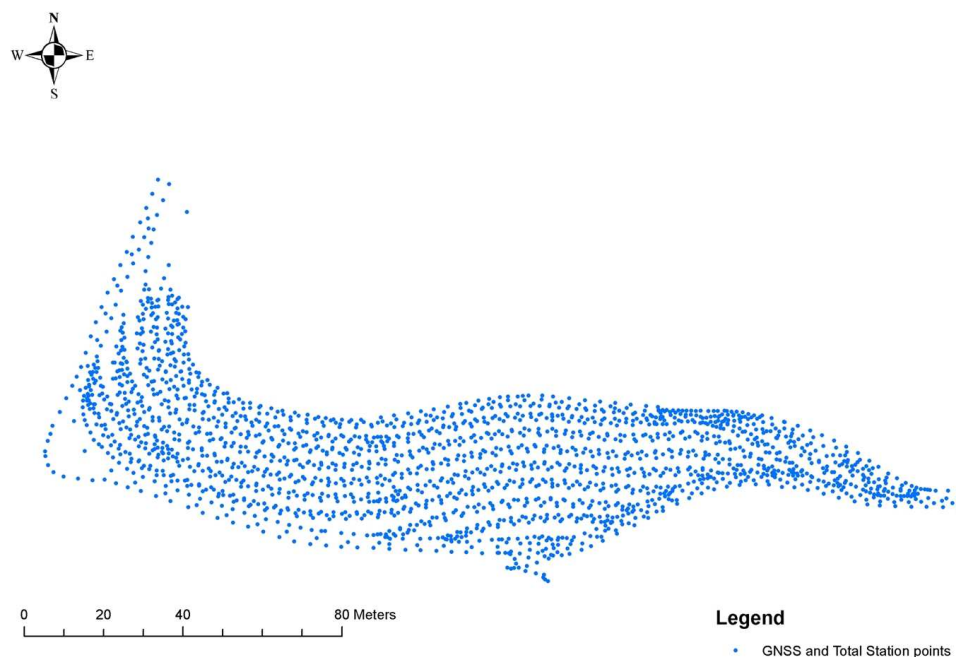


Figura 3.28 – Levantamento de pontos, RTK em tempo real e por estação total (GNSS).

Sobrepondo os pontos isolados aos definidores das linhas de quebra, obtidos pelo mesmo processo, pode verificar-se um aumento de definição das patamares e caminhos por observação do *layout* do projeto SIG, Figura 3.29.

Juntando curvas de nível de 1 metro às linhas de quebra, verifica-se no mapa topográfico da parcela um aumento significativo da clareza na definição dos patamares e dos caminhos; é então possível a avaliação do comprimento e do desnível dos estrangulamentos nos patamares junto ao muro, provocados pela existência do coletor de água, a observação da configuração das escadas de acesso à parcela superior da vinha, das bifurcações de alguns patamares e da presença de patamares sem acesso a caminho, e a percepção da variação altimétrica com um metro de resolução em cada patamar e caminho, Figura 3.30.

Para obtenção da TIN da parcela, foi mantido o método de triangulação de *Delaunay* sobre os pontos recolhidos no presente levantamento.

Para a criação do mapa 3D da parcela, foram exportados os pontos e seus atributos

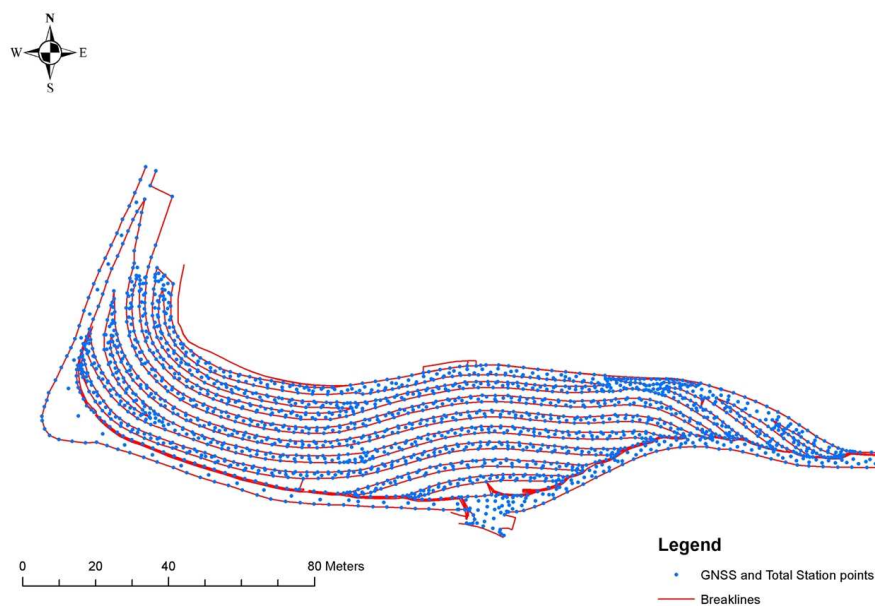


Figura 3.29 – Levantamento de pontos e linhas de quebra em modo RTK.

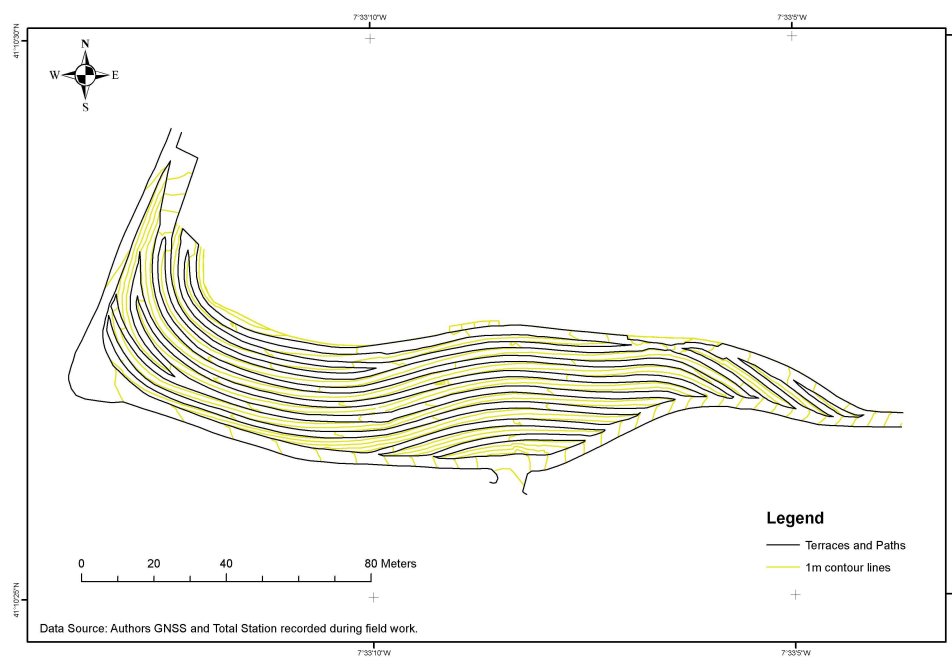


Figura 3.30 – Levantamento linhas de quebra em modo RTK e curvas de nível de 1 m.

que se especificam na tabela 3.4; ou seja, todos os atributos dos pontos levantados e daqueles que, não tendo sido levantados, foram determinados por sobreposição de uma grelha de pontos de 10 cm, inicialmente sem altimetria, ao MDE (gerado pela TIN de pontos levantados). O valor da coordenada Z dos pontos não levantados coincide com o valor altimétrico do MDE.

Tabela 3.4 – Tabela de atributos dos pontos levantados e obtidos da TIN do MDE.

Atrib.	Características
ID	Identificador ou número do ponto amostrado
X, Y	Coordenadas X,Y (UTM, m)
Z	Coordenada Z dos pontos levantados e dos pontos obtidos por sobreposição da grelha de 10 cm e TIN de pontos levantados (UTM, m)
AT#	Tipo de área: OUT (Externo), ND (Obstáculos), P (Patamar), C (Caminho), T (Transição) #: número da área tipificada
VIN	Linha de videiras: S(Com linha), N (Sem linha)

A informação obtida nos levantamentos anteriores não foi utilizada para criar um ambiente virtual de apoio ao planeamento de trajetórias por ter sido obtida com equipamentos de precisão muito diferente. Contudo, uma vez utilizada a mesma linha de corte para obtenção dos perfis das TIN anteriores, os resultados podem ser qualitativamente comparados. O número de pontos levantados aumentou significativamente, uma vez que para além da amostragem de pontos afastados aproximadamente de 2 metros nas linhas de limite interior e exterior dos patamares e dos caminhos, foi levantado maior número de pontos nas linhas de quebra.

O aumento de detalhe é também evidente quando observados na Figura 3.31 os perfis do terreno obtidos pelos dois cortes efetuados na nova TIN e na TIN de dados do IgeoE (novamente colocada na imagem para que se possa acompanhar a análise comparativa dos resultados). Na Figura 3.31 (b) identificam-se sete patamares abrangidos pela linha de corte; os três superiores encontram-se distribuídos de

forma uniforme, os dois centrais mais afastados entre si, devido à maior inclinação e altura dos respetivos taludes, e os inferiores (mais próximos da entrada da quinta) novamente distribuídos com uma certa regularidade. Este fato deve-se à sua proximidade ao caminho, junto à linha de água, que limita a este a parcela, onde a montanha forma uma concavidade. Na Figura 3.31 (d), o corte norte-sul, praticamente vertical na posição, permite obter um perfil mais abrangente em numero de patamares da parcela. Cobre oito patamares, do muro (no cimo) à entrada (no fundo). Estes apresentam-se talhados de forma uniforme acompanhando o declive da montanha.

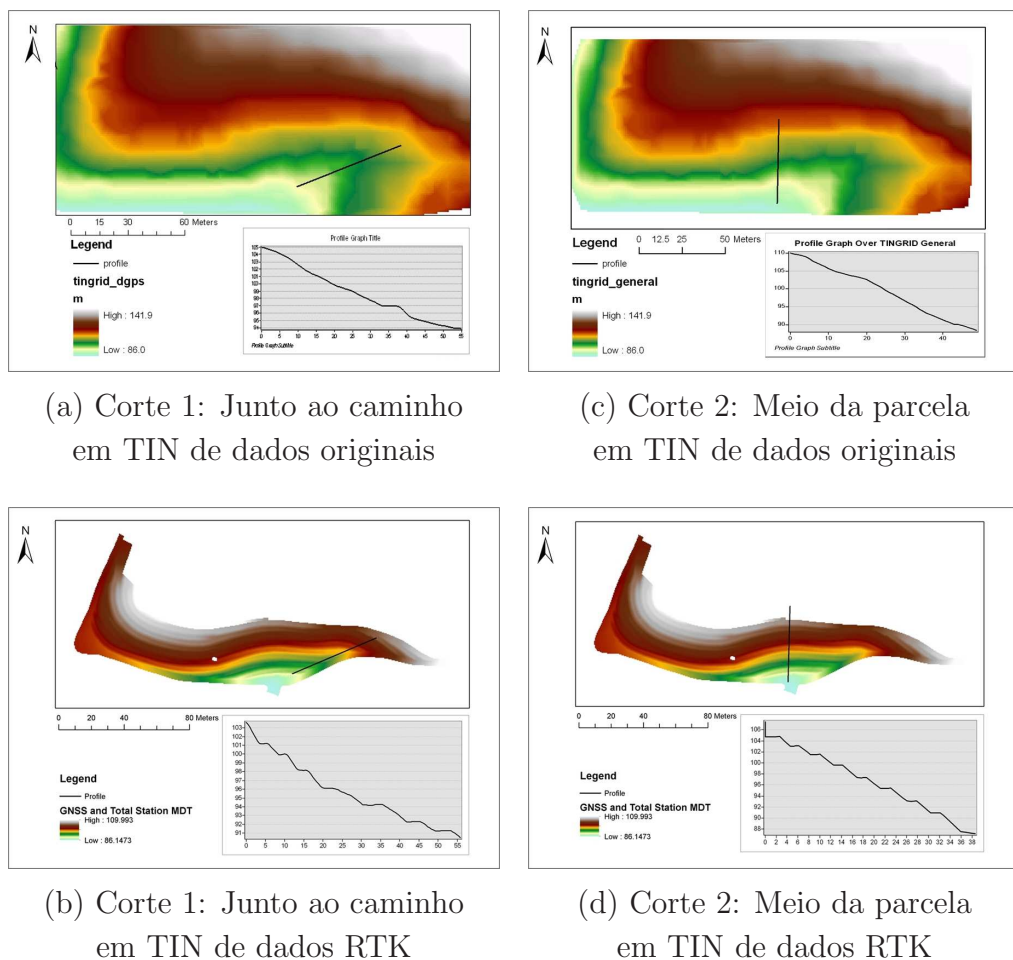


Figura 3.31 – Gráficos de perfil obtidos por dois cortes em duas TIN.

Sobrepondo a imagem georreferenciada de satélite da parcela ao MDE resultante

do levantamento cinemático em tempo real, pode observar-se, na Figura 3.32, em quatro vistas distintas uma representação da topografia mais precisa da parcela que a obtida anteriormente, Figura 3.24, resultante do levantamento com GPS diferencial por satélites.

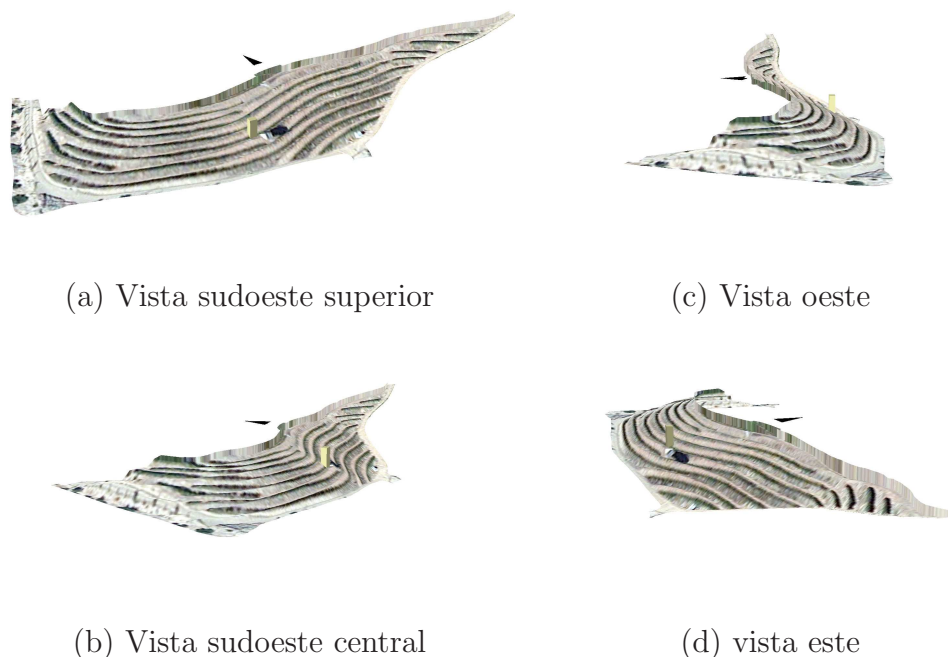


Figura 3.32 – Imagem georreferenciada da parcela obtido via Google Earth.

3.3.2 Levantamentos RTK em pós-processamento para obtenção das linhas de condução

A transposição do MDE do projeto SIG para uma plataforma virtual de simulação, com o fim de testar a aplicação de técnicas de planeamento de trajetórias, é fundamental para a implementação da navegação autónoma num terreno com as características da parcela em estudo. Pressupõe a exportação da totalidade dos pontos do MDE para um ambiente de simulação 3D onde se possa desenvolver e aplicar, de forma mais facilitada, os algoritmos diretamente associados ao planeamento de trajetórias. Contudo, para que o equipamento possa ser utilizado na navegação,

é necessário testá-lo em modo contínuo, uma vez que a informação de posição deverá ser recolhida de forma contínua ao longo do tempo, sendo impraticável com validação de pontos.

Deste modo, com o objetivo simultâneo de recolher a trajetória realizada por um perito na condução de um veículo na execução de uma prática habitual na vinha, e de validar tanto a utilização do equipamento em modo contínuo com correção diferencial (RTK) em pós-processamento como o mapa 3D resultante da exportação de informação georreferenciada da parcela para uma plataforma virtual, foi efetuado o levantamento que, seguindo a metodologia desenvolvida na subsecção 3.2.5, se descreve na presente secção.

Na etapa 2 de trabalho de campo preparatório para recolha de dados numéricos do terreno, fez-se o levantamento de uma linha que varresse toda a parcela, do topo ao fundo. Para tal usou-se o equipamento GNSS descrito na subsecção 3.3.1, montado no trator vinhateiro de médio porte, *New Holland* TCE, (TCE), utilizado habitualmente para realizar as atividades culturais na vinha.

Foi estudada a melhor posição e a forma de colocação do equipamento GNSS e da respetiva antena no trator. Inicialmente, pensou-se na construção de um sistema de fixação próprio mas, para simplificar e embaratecer, optou-se por colocar o bastão e o equipamento devidamente amarrados e protegidos sobre o contrapeso dianteiro do trator, uma vez que nem o tejadilho nem a frente apresentavam superfícies planas e niveladas, Figura 3.33.

A escolha da prática “pulverização com fitofármaco” justifica-se por abranger a totalidade dos patamares da vinha, ou seja, obrigou à passagem do trator por todos os patamares e caminhos da parcela, à realização de manobras de transposição de transições entre patamares desnivelados, Figuras 3.34 (a) e (b), de manobras de inversão em marcha, Figuras 3.34 (c) e (d) e ainda à necessidade de circulação em marcha-atrás sobre patamares interrompidos.

Nesta operação, o trator transporta um depósito de 300 l de capacidade, a turbina e o conjunto de ejetores. Todos são colocados na estrutura de suporte apoiada na



(a) Vista de frente



(b) Vista de lado

Figura 3.33 – Trator com equipamento GNSS e respetiva antena.

traseira do trator, o que causa constrangimentos à sua movimentação, mesmo utilizando na dianteira um contrapeso para equilibrar o peso da totalidade do sistema. Para além do peso (que condiciona a escolha do contrapeso, que inicialmente deverá ser inferior ao da carga, prevendo o esvaziamento do depósito durante a operação) é o tamanho do depósito e a altura a que se encontra a estrutura de suporte que obrigam a cuidados redobrados na movimentação do trator. Ora, devido à necessidade de interromper a pulverização nas transições (onde a planta não existe) e para garantir a segurança da máquina durante a transposição das transições, o movimento do trator é interrompido para que a estrutura de apoio do pulverizador seja elevada, depois o trator desloca-se até ao início de novo patamar ou caminho, altura em que se inicia (com o trator parado) a descida do sistema de suporte do pulverizador. A pulverização da linha é retomada de seguida. Contudo, durante esta sequência de operações, o levantamento não é interrompido pelo que é de esperar uma linha de pontos de distribuição espacial não uniforme.

O equipamento foi configurado para receber as frequências de GPS, L1 e L2, uma vez que as posições seriam corrigidas em pós-processamento e em “modo contínuo” numa aquisição automática de pontos em cada dois segundos. Este valor garantiu a aquisição de um número significativo de pontos durante os períodos em que o trator se deslocou em patamares uniformes, atingindo a sua maior velocidade.



(a) Início de manobra, patamar interior



(b) Fim de manobra, patamar interior



(c) Início de inversão de marcha do caminho a oeste



(d) Fim de inversão de marcha do caminho a oeste

Figura 3.34 – Manobras durante a pulverização.

Em termos de estrutura para armazenamento de dados, visto tratar-se de um levantamento contínuo, recorreu-se à estrutura anteriormente criada cuja tabela de atributos se encontra descrita na Tabela 3.3. O sistema de transformação de coordenadas adotado já foi anteriormente mencionado na subsecção 3.3.1.

Segundo a etapa 3, o levantamento foi iniciado na posição mais a nordeste da parcela que é a posição de maior altitude e a que se pode aceder da parcela vizinha superior pelo caminho de acesso fronteiro, a este. Foi conduzido de acordo com a metodologia

desenvolvida, sempre em movimentos descendentes para que o trator não tombasse e de acordo com a experiência do tratorista, por forma a otimizar o tempo de execução da operação e o combustível, garantindo a pulverização de todas as plantas.

Em resumo, a metodologia de levantamento desenvolvida para a vinha (detalhada na subsecção 3.2.5) foi adotada nos levantamentos (descritos nas subsecções seguintes, 3.3.1 e 3.3.2) efetuados com equipamento menos económico mas mais preciso, configurado em modo de correção cinemática RTK, em tempo real e em pós-processamento, recebendo nos dois modos as correções das posições oriundas da rede de estações SERVIR.

No primeiro caso, foi obtido o MDE da parcela com uma precisão posicional inferior a 2 cm o que permitiu gerar um mapa 3D detalhado com uma resolução média de 10 centímetros e que será apresentado na subsecção 3.3.3.

No segundo caso, recorrendo ao software Mobile Mapper Office, a trajetória recolhida foi corrigida em modo de pós-processamento através da receção das correções da rede de estações SERVIR, para a data e hora de aquisição. Os dados corrigidos foram filtrados usando uma máscara para uma precisão posicional estimada menor que 20 centímetros.

3.3.3 Validação do MDE e do equipamento GPS

Para validação do MDE, o conjunto de pontos corrigidos (resultante dos levantamentos RTK) foi exportado, pela ordem segundo a qual a trajetória foi efetuada, para um ficheiro em formato Excel, Figura 3.35.

Os dados adquiridos no levantamento RTK, que permitiram criar o MDE da parcela, e os dados corrigidos da trajetória do trator, referenciados no mesmo sistema de coordenadas, foram sobrepostos e analisados num ambiente virtual. Este, designado por visualizador da vinha (VV, *Vineyard Viewer*), faz parte integrante da aplicação VVPP (*Vineyard Viewer and Path Planning*), desenvolvida para auxiliar o sistema autónomo de navegação na vinha que se descreve no capítulo 5, Figura 3.36.



Figura 3.35 – Correção em pós-processamento e exportação da trajetória.

O VV permite a visualização de objetos tridimensionais em pormenor, pela representação de informação georreferenciada previamente carregada, podendo o utilizador posicionar e orientar o ponto de observação interativamente dentro e fora do espaço em estudo.



Figura 3.36 – Carregamento do MDE e da trajetória na VVPP.

Após carregada a informação do DEM pela escolha de uma das opções do menu principal da VVPP, o mapa 3D da vinha pode ser visualizado no VV. Inicialmente o referencial cartesiano do centro geométrico da parcela é posicionado no centro do visualizador, sendo a vinha orientada segundo as direções oeste-este, sul-norte e elevação, quando o observador obtém uma vista frontal superior da maior amplitude oeste-este da vinha. Utilizando as funcionalidades da aplicação, usando as opções do menu perspectiva no menu vertical à direita do VV e selecionando um determinado

patamar e caminho, pode obter-se outra perspectiva e identificar-se o posicionamento relativo desse patamar e do caminho a cor diferente, Figura 3.37. Como exemplo, foram selecionados o patamar P6 e o caminho C5.

Na VV são representados a azul marinho e a vermelho os patamares e os caminhos selecionados para os evidenciar dos não selecionados, estes representados a *cian* a a branco, respetivamente.

A vista da parcela apresentada foi tirada quando o observador se encontrava colocado num plano fora do volume envolvente da vinha, a sudoeste.

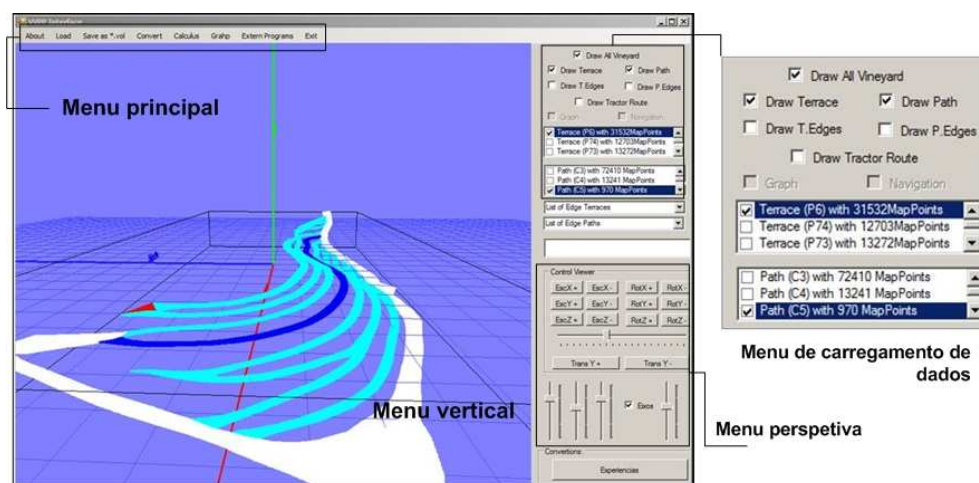


Figura 3.37 – Vista sudoeste com seleção do patamar P6 e caminho C5.

O MDE, representado sob a forma de mapa 3D da parcela no VV, pode ser validado quando a sequência de pontos levantada dinamicamente, representada no mesmo referencial, se sobrepuser no interior dos patamares ou caminhos da vinha. No VV, esta sobreposição pode ser verificada matematicamente ou por inspeção visual através das funcionalidades de ampliação, rotação e translação da imagem.

Devido à vibração e oscilação causadas pela movimentação do trator sob diferentes condições de inclinação do terreno durante o levantamento em modo contínuo, a medição da posição altimétrica não foi considerada relevante para validar o mapa uma vez que a antena GPS foi colocada sensivelmente a 1 m do solo. Contudo, foram tecidos alguns comentários sobre as diferenças altimétricas estabelecidas para dois conjuntos distintos de patamares distribuídos na vinha e que são apresentados

no final da presente subsecção.

Durante a análise dos resultados da inclusão da trajetória do trator no mapa 3D da parcela, foi dada mais ênfase à análise das imagens obtidas de topo, Figura 3.38.

A trajetória do trator representada como linha de pontos iniciou-se no ponto A (de maior elevação) e terminou no ponto B (junto à entrada da vinha), pontos estes pertencentes ao caminho mais íngreme que limita a vinha a este (parte do caminho representado a branco, à direita da entrada, na referida figura). Os pontos da trajetória sobre esse caminho marcam o percurso do trator nas manobras de orientação para acesso ao patamar e a inversão de direção na saída do patamar quando estas se realizam de marcha-atrás.

Destacam-se dois pormenores, identificados pela letras C e D.

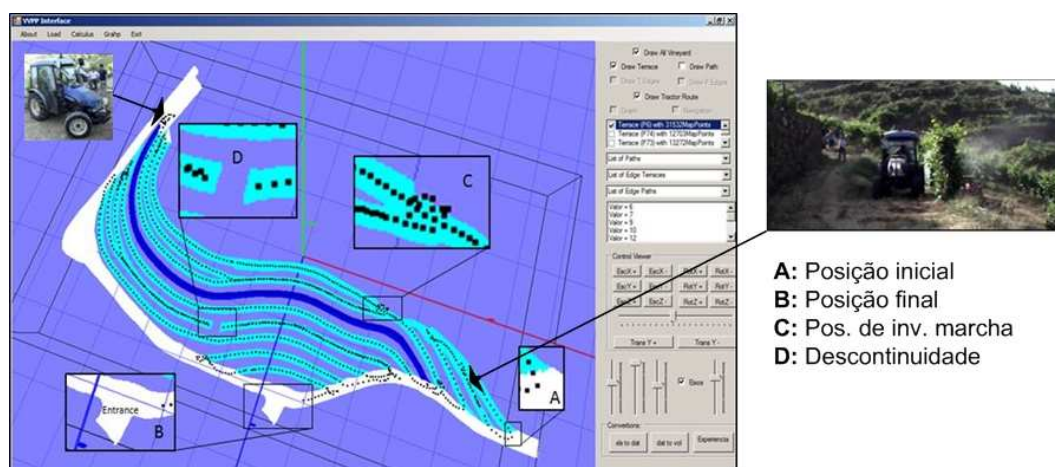


Figura 3.38 – Trajetória do trator sobreposta no mapa (Vista de topo).

No detalhe C, os pontos que ultrapassam os limites do patamar indicam posições onde a frente do trator transpôs o patamar; ou seja, devido ao estrangulamento do patamar nesse local (ponto de drenagem), o trator teve que inverter a marcha para continuar a pulverização no patamar desnivelado seguinte. Portanto, a existência de pontos no exterior do patamar não inviabilizou a utilização do GPS uma vez que os pontos exteriores representam posições da antena montada na frente do trator, num plano vertical mais à frente que o eixo das rodas e não pontos medidos com falta de precisão; as rodas do trator encontravam-se no interior do patamar, não pondo em

causa a sua estabilidade.

O pormenor D mostra a interrupção do patamar que se deve à existência do PT que o estrangula e inviabiliza a circulação do trator. É também visível a diferença no número de pontos recolhidos nos dois lados da interrupção: a oeste, o trator movimentou-se para a frente e para trás mantendo a frente do trator virada a este; a este, a aproximação do trator ao PT foi realizada de marcha-atrás tendo a pulverização sido efetuada também com a frente do trator virada a este.

Não foram analisados os caminhos fronteiros que limitam a parcela a oeste e a este pelo seguinte motivo: no caminho a oeste não existe vinha (como referido na secção 3.1 apenas ciprestes e oliveiras, Figura 3.4); no caminho a este os pontos levantados que se apresentam sobrepostos identificam apenas a trajetória do trator durante as manobras de acesso aos patamares.

Apenas foram considerados para análise de cada patamar, ou grupo de patamares, os pontos da trajetória total do trator que se sobrepõem nesse patamar, ou nesse grupo de patamares. Ou seja, tanto para a análise altimétrica como para a planimétrica a trajetória foi dividida em troços. No entanto, para os dois tipos de análise sobre o mesmo patamar, ou grupo de patamares, o número de pontos foi mantido inalterado.

Para a análise escolheram-se duas faixas de terreno distintas na vinha, compreendendo três patamares. Uma primeira abrangendo patamares côncavos suficientemente compridos para que fosse representada a sua parte mais uniforme onde não decorreram manobras e fosse verificado distribuírem-se em espaçamentos uniformes para o interior da montanha (na direção norte), onde o trator circulou somente num sentido. Uma segunda, mais a noroeste, abrangendo a parte convexa da montanha sobre a linha de fecho e com zonas de transposição entre patamares desnivelados.

Escolheram-se então os patamares P2, P3 e P4 e os patamares P73, P74 e P82, repetivamente o primeiro e segundo grupo supramencionados, para analisar o posicionamento relativo dos pontos da trajetória efetuada pelo trator durante a pulverização.

A trajetória foi realizada com uma velocidade média inferior no patamar P4, mais comprido, onde o trator circulou junto ao talude superior devido simultaneamente à

expansão vegetativa maior nesse local e à geometria do trilho desenhada no terreno pelo rodado do veículo em passagens anteriores; nos restantes patamares a trajetória seguida pelo trator enquadrou-se uniformemente nos seus limites, Figura 3.39.

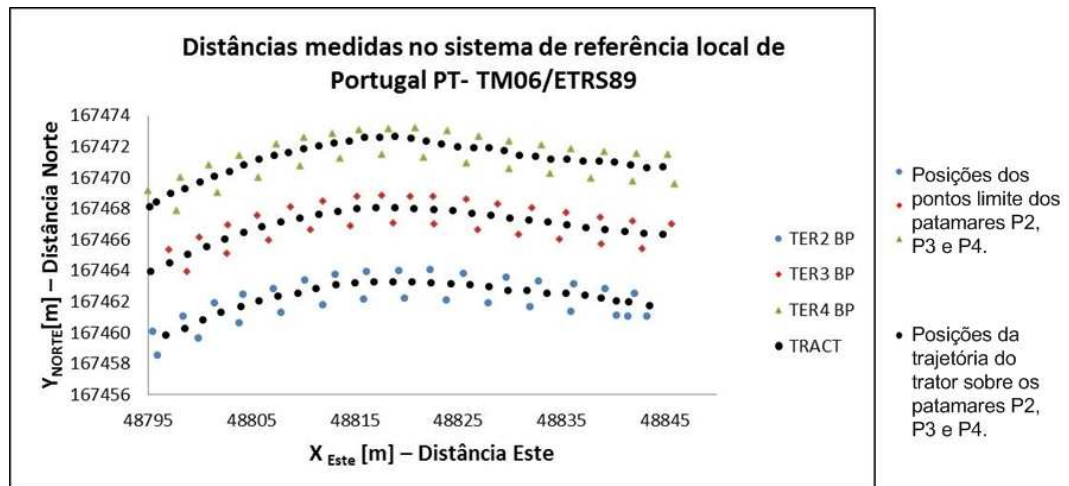


Figura 3.39 – Análise planimétrica aos patamares P2, P3 e P4.

Após realizada a manobra de transposição do patamar P82 ao P74, o trator efetuou em marcha-atrás a aproximação ao extremo noroeste do patamar P74 para encontrar o início da linha de videiras pelo que são visíveis nesse local pontos levantados sobrepostos; identificam-se os pontos onde ocorreu a rotação junto ao extremo sudeste do patamar P74 para a passagem ao P73. O trator não efetuou o varrimento total deste último patamar por nele não existir vinha (patamar de acesso ao caminho fronteiro a oeste, Figura 3.40).

Analisada da mesma forma a totalidade dos pontos da trajetória do trator e verificada a consistência dos resultados para todos os patamares cobertos, conclui-se a validação planimétrica do MDE. Confirma-se, numa vista de topo perpendicular à superfície planimétrica do mapa 3D, que os pontos da trajetória seguem o percurso efetuado pelo perito e se sobrepõem sensivelmente sobre a linha longitudinal que divide ao meio a largura dos patamares. Nos locais onde é apresentado um pequeno desvio, sempre inferior a um quarto da largura dos patamares, este resultou das condições das plantas e do terreno ou da necessidade de contorno de obstáculos. Apesar de em tempo real não terem sido corrigidas as posições medidas, foram-no em pós-processamento.

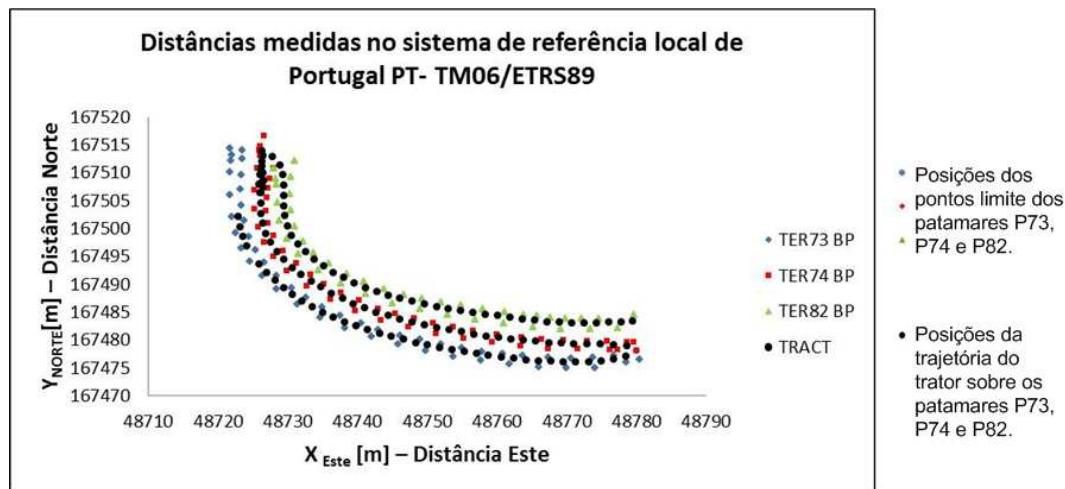


Figura 3.40 – Análise planimétrica aos patamares P73, P74 e P82.

Daí se pode prever que, conhecendo previamente as correções para o local, o equipamento pode ser configurado para funcionar em modo contínuo de pontos, com uma frequência de aquisição pré-estabelecida, com GNSS quando as correções forem efetuadas pelo próprio sistema de navegação, validando-se assim o equipamento para a navegação autónoma na vinha da RDD.

Em relação à análise altimétrica, esta foi efetuada nos mesmos moldes, ou seja, usando a mesma amostra de patamares, para as mesmas faixas de cinquenta metros de largura a este, observadas agora em altura. Aos valores de elevação dos patamares e aos de altitude medidos pelo GPS quando a antena se encontrava instalada no trator, ambos referenciados no sistema de local de Portugal TM06/ETRS89, foi subtraída a elevação do ponto mais baixo da vinha.

Com base nos dados representados nas Figuras 3.41 e 3.42, pode concluir-se que os patamares P2, P3 e P4, para a mesma faixa de distância a este, apresentam uma decréscimo uniforme de altura à medida que a distância a este aumenta. É visível a duplicação de pontos medidos próximos uns dos outros em cada patamar, o que representa a ligeira inclinação deste para o seu interior (para conveniente drenagem das águas fluviais, como apontado na secção 3.1). O decréscimo de altura dos patamares é acompanhado pelo decréscimo da altura relativa determinada para a antena do GPS na trajetória seguida pelo trator.

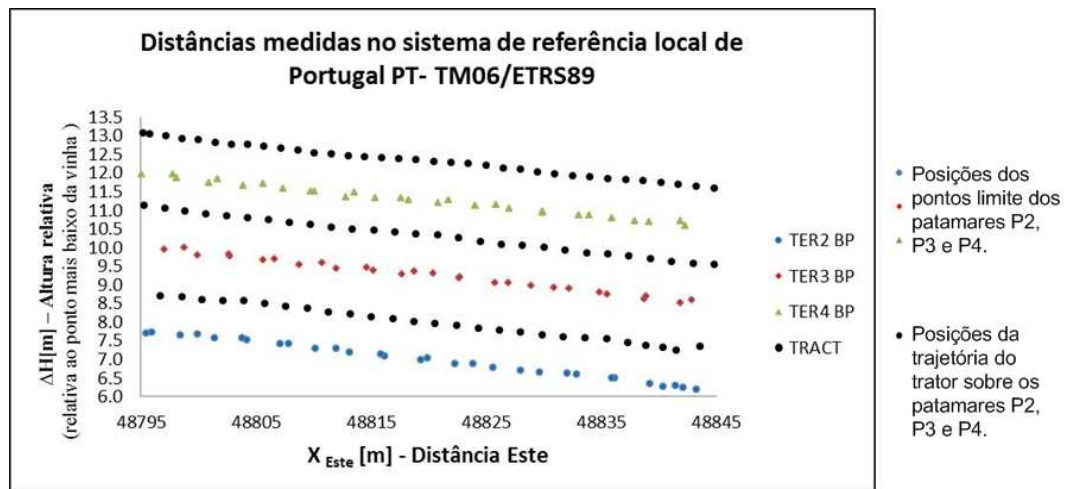


Figura 3.41 – Análise altimétrica aos patamares P2, P3 e P4.

O mesmo acontece nos patamares P73, P74 e P82 que se encontram num plano mais elevado mas apresentam um declive relativo em geral menos acentuado, onde o percurso do GPS acompanha esse declive. É contudo evidente o declive muito acentuado de acesso ao patamar P73, onde não existe vinha e no qual o trator não circulou (a linha de pontos é interrompida). Podem ser observadas também a continuidade do movimento do trator na transposição de patamares e a sobreposição de pontos no acesso entre os patamares P74 e P82, Figura 3.42.

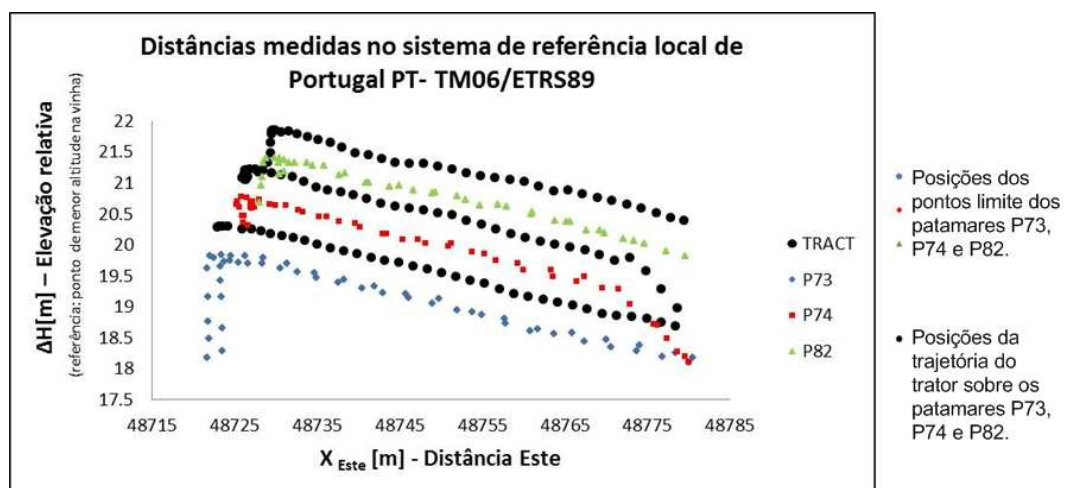


Figura 3.42 – Análise Altimétrica aos patamares P73, P74 e P82.

A análise altimétrica permitiu verificar a consistência entre a altitude dos patamares,

medida em modo RTK, e a altitude corrigida, em pós-processamento, obtida durante a operação de pulverização.

A tabela 3.5 apresenta um resumo dos resultados obtidos nos diferentes levantamentos descritos neste capítulo.

O levantamento com correção em pós-processamento, realizado mais tarde, colocando o equipamento GPS num trator vinhateiro durante a realização de uma operação cultural, permitiu recolher a linha de condução e esta validar o MDE. A exportação de dados do SIG para uma aplicação gráfica, entretanto desenvolvida e cujas funcionalidades se encontram descritas no capítulo 5, permitiu construir e visualizar em diferentes perspetivas e pormenores o mapa 3D da vinha.

Tabela 3.5 – Resultado dos levantamentos.

Etapas		Inicial		Final	
Levantamentos	Equipamento	SXBlue II, DGPS por satélite		Mobile Mapper 100, GNSS RTK, VRS-SERVIR	
	Configuração	Pontos	Linhas	Pontos / Linhas (tempo real)	Linhas (pósprocessamento)
	Caraterísticas	de 2 em 2 m (todos pontos)	cada metro (entre linhas)	de 2 em 2 m / mais pontos	de 2 em 2 s
	Precisão	>60 cm	>60 cm	>2 cm	>20 cm
Objetivos	Metodologia	Determinação	Sim	Não	Não
		Utilização		Sim	Sim
	Determinação do MDE		Não	Sim	Não
	Determin. rota trator		Não	Não	Sim

3.4 Linhas de condução

Conhecendo o MDE da parcela de vinha com uma precisão de dois centímetros, o processo mais intuitivo de obtenção das linhas de condução de forma automática seria a aplicação de um algoritmo às vias de circulação para delas retirar a sua linha central. Não sendo planas as superfícies de circulação, pensou-se na aplicação de um algoritmo de esqueletização. A escolha do seu tipo recaiu sobre aquele que recebe como entrada volumes passíveis de discretização, uma vez que era conhecido o volume das superfícies no MDE. Contudo, dada a variedade de algoritmos que recebem como entrada volumes discretizados, numa primeira fase optou-se por escolher

um de entre os três tipos mais usuais e cuja aplicação a objetos fusiformes já tinha dado bons resultados pelo que se justificava a sua aplicação a patamares e os caminhos fronteiros na vinha. Contudo, para as zonas de transposição entre patamares desnivelados que, não se cruzando com os caminhos, dão origem a superfícies sem orientação preferencial, a aplicação de algoritmos de esqueletização dependentes da orientação poderia produzir resultados menos satisfatórios.

Os esqueletos 1D podem ser usados como linhas orientadoras na condução após a sua validação. Esta compreende o processo de comparação dos esqueletos de cada patamar ou caminho com as partições da trajetória, cada uma das quais foi obtida por sobreposição da trajetória total no respetivo patamar ou caminho.

É natural pensar-se existir um certo afastamento entre alguns esqueletos e respetivas partições, uma vez que a trajetória do trator nem sempre ocorreu no centro de cada patamar ou caminho da vinha. A operação sem paragens na totalidade dos patamares provocou desvios da trajetória face à linha central do patamar ou caminho junto e sobre as transições, necessários à reorientação do trator no acesso a um novo patamar. Estes ocorreram por o operador estar preocupado em não danificar os cachos de uva que se apresentavam no caminho e em seguir o trilho traçado no terreno por anteriores passagens.

As manobras alteraram, assim, a abordagem inicialmente estabelecida para uma solução semiautomática. A obtenção automática dos esqueletos só é efetuada fora das transições. No seu interior a determinação do trajeto irá depender de outros fatores associados à navegação.

Foi então definido um perímetro em torno do ponto de cruzamento caminho/patamar (ou patamar/patamar), com identificação de pontos terminais dos patamares e dos caminhos onde a esqueletização não foi efetuada. Os desvios sentidos no interior do patamar ou caminho junto aos pontos terminais podem refletir-se num maior afastamento entre o esqueleto e a trajetória do trator e, conseqüentemente, devem ser considerados na validação da aplicação do algoritmo.

3.4.1 Algoritmos adotados

Tendo por objetivo a determinação, numa abordagem volumétrica, dos esqueletos das superfícies tridimensionais não uniformes definidas como partes do MDE da vinha, foram testados algoritmos de três classes distintas: um algoritmo de adelgaçamento (TA, *Thinning Algorithm* ou simplesmente *Thinning*) (Palágyi e Kuba, 1999), um algoritmo geométrico (GA, *Geometric Algorithm*) (Cornea et al., 2007) e um algoritmo de classe campo de distância (DFA, *Distance Field Algorithm*) (Gagvani e Silver, 1999), cujas características foram descritas na subsecção 2.3.2.

A execução dos algoritmos implementados pode ser efetuada pela seleção de qualquer uma das opções dos menus verticais que se desenvolvem em cascata sobre a opção *Calculus* do menu principal da VVPP, Figura 3.43.

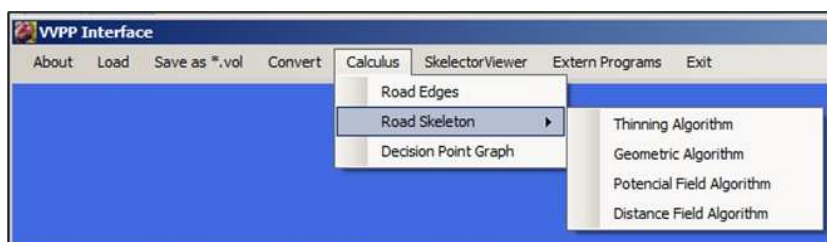


Figura 3.43 – Menu de seleção, via VVPP, das opções de esqueletização.

Todos os algoritmos recebem como dados de entrada volumes binários de partes da superfície da vinha. A transformação binária compreende a divisão do volume em vários volumes elementares (voxels) de uma décima da média das larguras dos patares, garantindo uma descrição detalhada da superfície, Figura 3.44. É atribuído a cada volume elementar o valor um (ponto preto) quando este pertence à superfície e o valor zero (ponto branco) em caso contrário.

A tarefa de obtenção da curva esqueleto envolve um processo sequencial de seleção da superfície de circulação, de voxelização do volume onde se insere e de esqueletização propriamente dito, Figura 3.44.

Na VVPP a cor preta do voxel objeto é representada por um voxel transparente de aresta branca, uma vez que se pretende mostrar a imagem do MDE sobre o

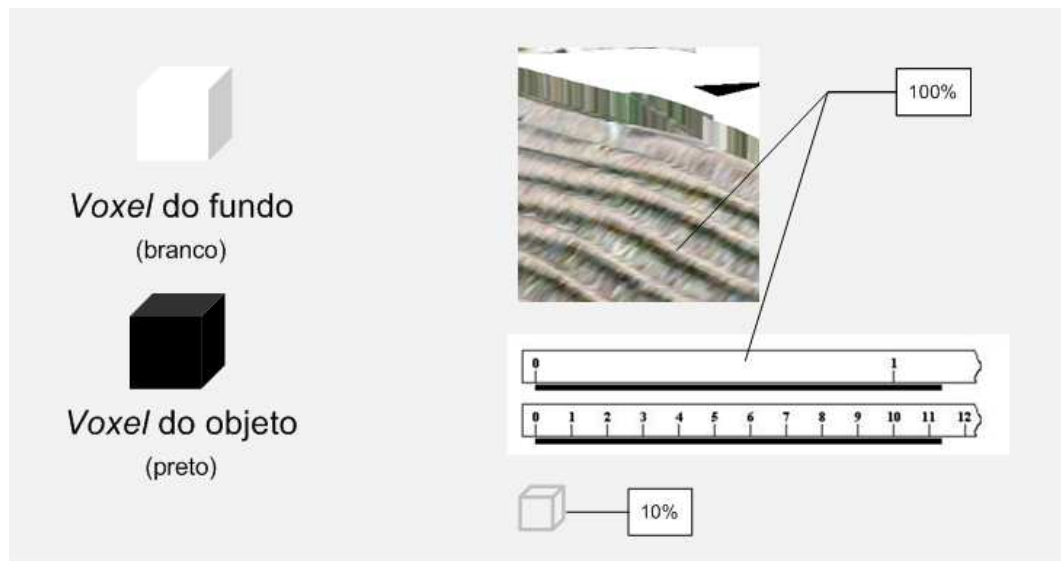


Figura 3.44 – Voxelização: Atribuição de cor e tamanho aos voxels.

fundo quadriculado no sistema de referencia adotado. A cor branca do voxel fundo, reflete-se na ausência de cor (voxels totalmente transparentes) (Figura 3.45, central). Assim a voxelização do caminho a azul escuro dá origem a um conjunto de voxels vizinhos transparentes de aresta (Figura 3.45, superior). Após esqueletização do volume selecionado e voxelizado, os voxels pertencentes ao esqueleto passam a ser representados a cor branca (Figura 3.45, inferior). A esqueletização pode ser realizada para qualquer patamar ou caminho. O resultado do algoritmo é uma imagem binária 3D do esqueleto 1D obtido.

1. Algoritmo do tipo TA

A superfície voxelizada é adelgada camada por camada até dela ser extraída uma curva esqueleto 1D. A operação de erosão consiste em tornar os voxels pretos em brancos usando um determinado critério. No método adotado designado por *Parallel Thinning Algorithm*, PTA, um “voxel singular” pode ser eliminado se não for classificado como “voxel terminal” e um voxel passível de ser eliminado tem de possuir, na vizinhança de ligação constituída por 26 vizinhos, exatamente um voxel branco ¹. Cada passo da iteração compreende

¹Para obtenção de mais informação sobre vizinhança de ligação pode consultar-se (Kong e Rosenfeld, 1989)

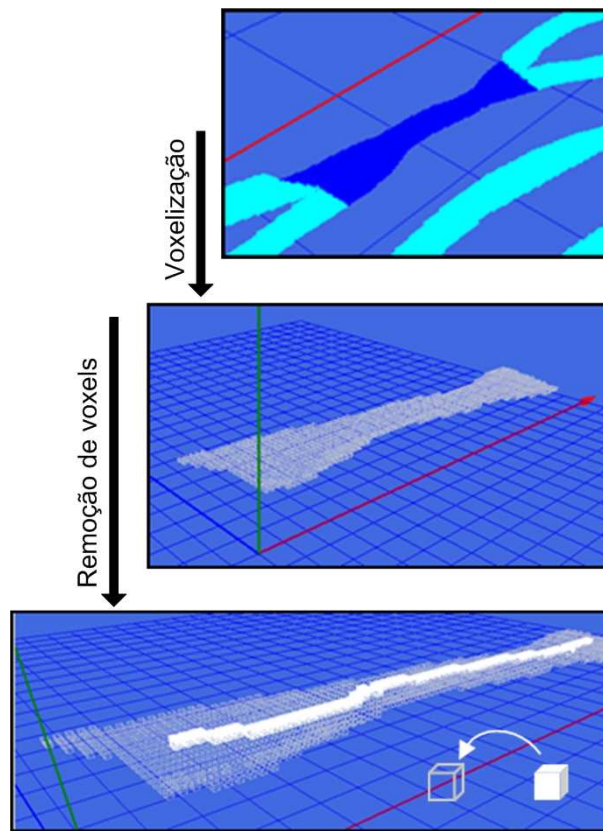


Figura 3.45 – Seleção, voxelização e esqueletização de um caminho.

um conjunto de subiterações em paralelo onde unicamente os voxels singulares de fronteira de um dado tipo podem ser eliminados em cada iteração. Este algoritmo recorre a uma estratégia direcional que permite a eliminação não simultânea de voxels de forma a preservar a topologia da superfície. Os pontos elimináveis são determinados através da sua comparação com um conjunto de voxels distribuídos de forma tipificada, constituído por 3x3x3 voxels.

2. Algoritmo do tipo GA

O algoritmo envolve o corte do volume em fatias perpendiculares à direção de maior comprimento. A cada voxel da fatia é atribuída cor, do mesmo modo que no método anterior. É iniciado o processo de determinação dos voxels ligados. Depois é calculado, para esta fatia, o centróide da mancha de voxels relacionados. O processo é repetido para todas as fatias do volume. Por último, o conjunto de todos os centróides é ligado no processo de obtenção da

curva esqueleto.

3. Algoritmo do tipo DFA

O algoritmo adotado recorre a uma técnica de adelgaçamento que propaga a fronteira para o interior, atribuindo aos voxels da superfície que são a vizinhança da fronteira do volume valores de uma função distancia. O valor de cada voxel é só atualizado se o novo valor calculado for inferior ao anterior. Assim, é iniciado o processo de identificação dos voxels essenciais para a formação da curva esqueleto. Se o valor médio da função distancia da vizinhança de um voxel for igual ou superior ao do próprio voxel este não deve ser mantido no esqueleto. A função de distância é calculada usando uma matriz ponderada. O parâmetro de ponderação (finura) permite o controlo sobre a eliminação de voxels “não testemunhos” do campo produzindo esqueletos de várias densidades. Dependendo do parâmetro de finura adotado, os voxels esqueleto apesar de capturarem as propriedades essenciais da forma da superfície, não são geralmente ligados. É assim necessária a construção da linha central de ligação para algumas aplicações, como é o caso da navegação autónoma onde a linha de condução (esqueleto) não deve ser interrompida.

Foram aplicados os três algoritmos à totalidade das superfícies não uniformes que constituem os patamares e caminhos da vinha. Dado ter sido o conjunto de pontos que definem a trajetória do trator obtido através de um levantamento dinâmico, não foi possível determinar automaticamente quais os pontos que pertenciam a um ou a outro patamar ou caminho. Foi necessário, portanto, identificar os pontos da trajetória que simultaneamente pertencem ao patamar e ao caminho. Através de um processo não automático, por sobreposição da trajetória sobre o mapa 3D da vinha com patamares e caminhos numerados, foi possível identificar os diferentes troços da trajetória do trator. Cada um foi utilizado como curva de referência na análise comparativa efetuada entre os diferentes esqueletos de cada superfície da vinha (patamar ou caminho). Foram inicialmente consideradas todas as superfícies de possível circulação na vinha e, portanto, todas as suas especificidades importantes para a navegação. Ou seja, a esqueletização foi aplicada tanto a caminhos longos como a curtos, com declives mais ou menos acentuados, e com configuração mais ou

menos uniforme. Contudo, apenas um conjunto pequeno não foi considerado para a análise comparativa correspondendo a superfícies onde o trator não circulou (devido a não ter sido necessária a aplicação de herbicida) ou onde o trator não interveio significativamente (circulando apenas num topo).

3.4.2 Métrica adotada

Para avaliação dos algoritmos de esqueletização, foram efetuados dois tipos de análise: qualitativa, por inspeção visual, e quantitativa. Para efetuar a primeira, os esqueletos obtidos e a respetiva parte da trajetória do trator (de uma certa superfície) podem ser selecionados e apresentados num ambiente gráfico 3D. Para a validação quantitativa foi determinada uma métrica de distância entre o conjunto de pontos que define o esqueleto e aqueles que definem o troço da rota do trator. A métrica escolhida, identificada pelo acrónimo DM (*Distance Metric*), não é mais do que uma função de distância quadrática média que pode ser matematicamente calculada pela expressão 3.1 onde n_{LT} é o número de pontos que define o troço da trajetória do trator, n_{LS} é o número de pontos do esqueleto e d_{min} a mínima distância calculada para todos os pontos do esqueleto, entre cada ponto do esqueleto à linha poligonal definida pelos pontos da trajetória do trator, Figura 3.46.

$$DM = \frac{\sqrt{\sum_1^{n_{LT}} d_{min}^2}}{n_{LS}} \quad (3.1)$$

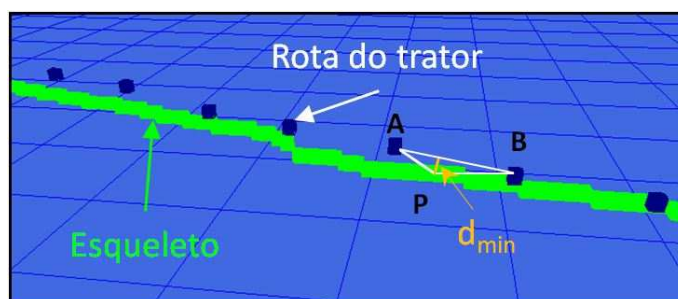


Figura 3.46 – Representação da distância mínima no ponto P do esqueleto.

Depois de usar o algoritmo DFA para diferentes parâmetros de finura e para superfícies distintas da vinha, foi tomada a decisão de abandonar a sua utilização, dado que a aplicação de crescentes parâmetros de finura ao mesmo patamar torna a superfície mediana demasiadamente fina até esta se tornar desconexa. Neste caso, a escolha do parâmetro deverá ser aquele onde a conectividade não exista. Contudo, isto implica a implementação de novo algoritmo à superfície mediana para determinar a sua linha central e, mais tarde, considerá-la como curva esqueleto 1D. Esta solução poderá ser aplicada somente se o valor do parâmetro de finura se mantiver aproximadamente constante para todas as superfícies da vinha. Não obstante, existe uma grande discrepância nesse valor. A solução envolve também a utilização de um processo semiautomático para estabelecer os pontos iniciais e finais da linha central de cada linha mediana. Assim, a utilização do algoritmo da função de campo de distância deixou de ser considerada, pelo que não foram apresentados resultados da análise quantitativa.

3.4.3 Algoritmo escolhido

A comparação dos resultados obtidos recorrendo a diferentes algoritmos e sua aplicação aos patamares e aos caminhos da vinha pode fazer-se na aplicação VVPP por inspeção visual ou analiticamente. Contudo, é necessário um conjunto de procedimentos para aplicação dos algoritmos e posterior análise comparativa.

As superfícies 3D (patamares e caminhos individuais da vinha) têm de ser voxelizadas. As superfícies digitais são então introduzidas no algoritmo sendo retirados por um processo específico voxels da superfície de forma faseada ou simultaneamente nas direções privilegiadas, por camadas de voxels da fronteira da superfícies, resultando um esqueleto unidirecional (1D). O processo tem de ser aplicado à totalidade dos patamares e caminhos, sendo k_i a designação da numeração dada e i o número inteiro compreendido entre o valor um e o número máximo de patamares e caminhos, Figura 3.47.

A análise quantitativa pode ser efetuada pela avaliação dos valores de distância

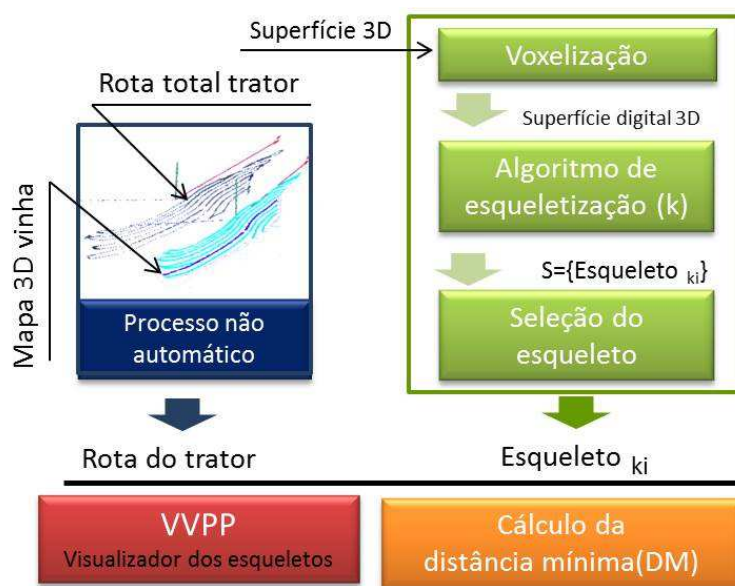


Figura 3.47 – Comparação dos troços de rota do trator com os esqueletos.

média entre as curvas esqueleto e os troços da trajetória do trator nos correspondentes patamares ou caminhos, Tabela 3.6. Como se pode verificar, os valores variam entre um mínimo de 14.40 e um máximo de 94.10 centímetros aplicando o algoritmo *Thinning* e entre um valor mínimo de 13.70 e um máximo de 71.80 centímetros para os esqueletos obtidos pelo algoritmo *Geometric*, verificando-se assim melhores resultados para este último. Para quase todas as superfícies da vinha foi obtida uma média de 33.0 centímetros pelo algoritmo selecionado, deixando para segunda escolha o algoritmo *Thinning*. Esta escolha pode também ser justificada pela grande diferença no desvio padrão médio calculado para os dois métodos analisados.

O pior resultado obtido, no valor de 71.80 centímetros, verificou-se no patamar P43, curto e não uniforme, onde o troço da rota do trator foi identificada por 18 pontos amostrados, Figura 3.48. A superfície objeto de esqueletização apresentava um conjunto de $74 \times 13 \times 178$ voxels nas três direções principais, esquematizadas no referencial apresentado, sendo fácil de verificar ser a direção sul-norte a que contém o maior número de voxels. Uma vez que o patamar apresenta uma configuração não uniforme no seu extremo noroeste (em forma de anzol) e o tratorista ao realizar a

Tabela 3.6 – Distâncias médias, para alguns patamares e um caminho, utilizando os algoritmos de esqueletização *Thinning* e *Geometric*.

Métrica de distância, DM[m]	Algoritmos de esqueletização	
	Thinning	Geometric
Superfícies		
P1	0.342	0.311
P2	0.203	0.206
P3	0.188	0.156
P4	0.261	0.247
P5	0.201	0.181
P6	0.163	0.148
P7	0.425	0.378
P10	0.769	0.557
P41	0.277	0.231
P43	0.941	0.718
P71	0.471	0.449
P72	0.260	0.259
P73	0.316	0.350
P74	0.289	0.264
P82	0.144	0.137
P91	0.546	0.593
C2	0.348	0.343
Mean DM	0.360	0.330
Max DM	0.941	0.718
Min DM	0.144	0.137
Desvio padrão	0.216	0.170

manobra não ter seguido a linha central da descontinuidade, mas sim, a orientação que mantinha ao varrer o patamar para noroeste, e dado a superfície ser curva e inclinada, as diferenças são visíveis e é a sua média maior quando aplicado o algoritmo *Thinning*.

Para o caso de um patamar muito comprido, onde o trator possa seguir uma trajetória aproximadamente constante no seu interior, os resultados são os melhores

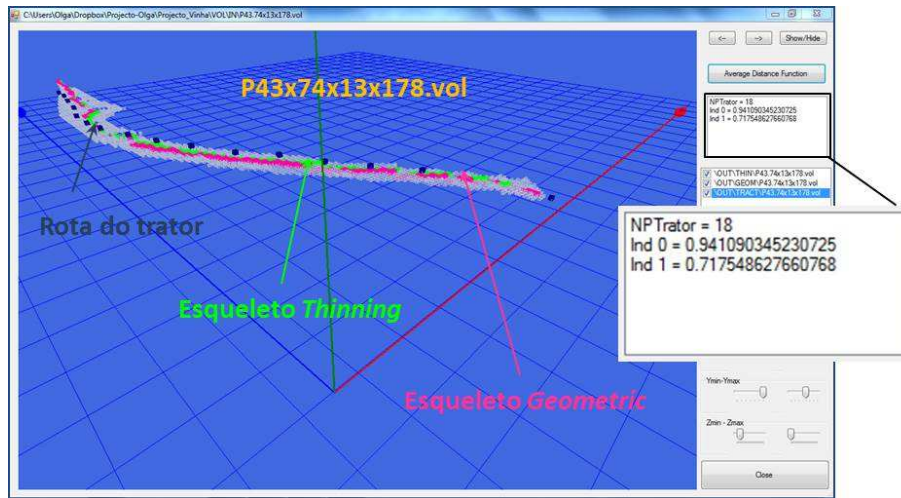


Figura 3.48 – Comparação da rota do trator e dos esqueletos para o patamar P43.

para os dois algoritmos. Especificamente no patamar P82, com um volume de contorno de $618 \times 33 \times 157$ voxels, a aplicação do algoritmo *Geometric* produziu o esqueleto que se representa na Figura 3.49. A diferença entre este e o trecho da rota do trator (com 91 pontos levantados), no valor de 13.7 centímetros, confirma a ser o algoritmo *Geometric* a melhor escolha.

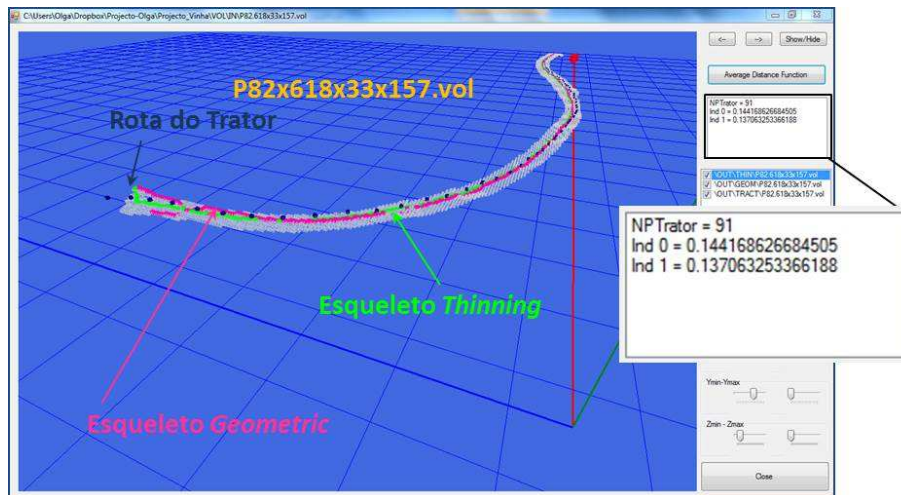


Figura 3.49 – Comparação da rota do trator e dos esqueletos para o patamar P82.

Uma vista geral da vinha e dos esqueletos obtidos pelo algoritmo *Geometric* para a

totalidade dos patamares e caminhos da vinha é apresentada na Figura 3.50.

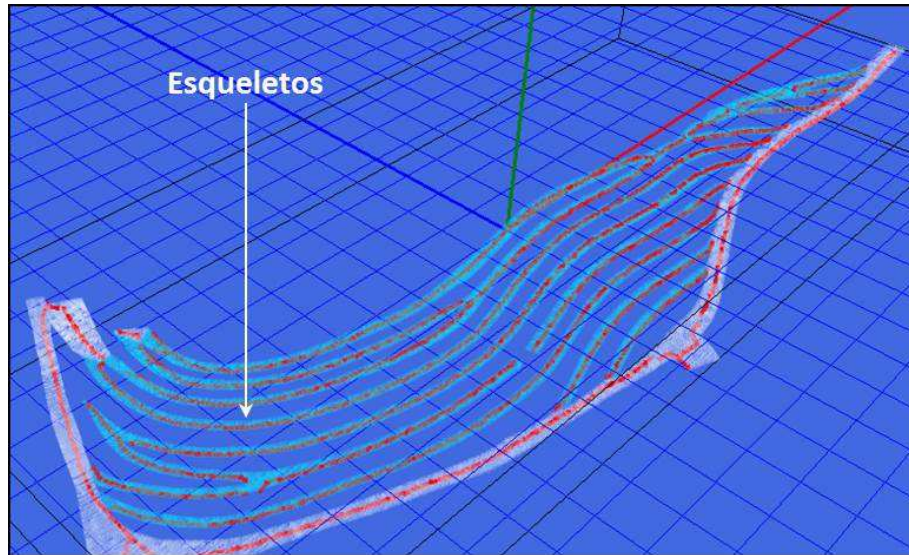


Figura 3.50 – Vista geral dos esqueletos da totalidade dos patamares e caminhos.

Em resumo, o algoritmo *Geometric* foi validado como sendo aquele que mais se adequa aos objetivos deste trabalho e porque é aquele que minimiza a função média quadrática da distância adotada, para a totalidade dos patamares e dos caminhos. Analisando os esqueletos pelo algoritmo validado, pode verificar-se que estes raramente se tocam, pois, são separados pelas transições. Ou seja, para cada extremo do esqueleto, pelo menos deverá ser considerada uma zona de transição. Torna-se assim necessário utilizar os extremos das curvas esqueleto como pontos de decisão para estabelecer os caminhos de transposição das transições e definir o melhor critério para a etapa de planeamento de trajetórias que será desenvolvida no capítulo 4.

A gráfica VVPP, pode ser usada para permitir determinar as linhas de condução no exterior das zonas de transição que compreendam patamares ou caminhos, e expandida para determinação das linhas de condução para sua transposição, o interior das zonas de transição. A sua expansão com novas funcionalidades para responder às necessidades do planeamento de trajetórias é também considerada. No capítulo 5 são apontados os desenvolvimentos para dotar a aplicação de funcionalidades de simulação para teste de estratégias de navegação.

4

Planeamento de trajetórias em vinha de montanha

O planeamento de uma operação agrícola compreende a determinação das zonas a cobrir, a escolha dos equipamentos a utilizar (veículo motor e alfaia), a previsão do abastecimento dos referidos equipamentos (combustível e/ou fitofármaco) e a determinação do percurso da navegação a efetuar, entre outros aspetos. A escolha do percurso (rota) que otimiza os recursos necessários à navegação é efetuada através do planeamento adequado de trajetórias.

A otimização de recursos decorrente de um bom planeamento engloba a racionalização do combustível, a diminuição do nível de emissão de poluentes (função do regime de funcionamento do motor), da distância percorrida e do tempo despendido na realização da tarefa, entre outras variáveis.

Neste capítulo é identificado e tipificado o problema do planeamento de trajetórias para a navegação do veículo móvel na vinha. É apresentada a estrutura para a resolução do problema e os algoritmos para esse fim desenvolvidos.

4.1 Definição do problema

No presente estudo a navegação é realizada em terreno de montanha em patamares, em vias mais ou menos estreitas, com declive ligeiro ou acentuado, tendo os obstáculos sido registados previamente no MDE da vinha. Os patamares da vinha seguem a montanha formando parcelas de configuração 3D com contorno não uniforme. Os patamares permanecem inalterados ao longo dos anos, a menos que, por exemplo, intempéries, fortes ventos e chuvas sejam responsáveis pelo derrube de videiras e/ou muros e alterações da sua configuração inicial. Apesar da navegação se realizar num espaço aberto não estruturado, é aproximada a um problema onde o modelo é previamente conhecido. Nestas condições, é possível uma abordagem *off-line* ao planeamento de trajetórias.

4.1.1 Considerações práticas

Para simplificação do problema da navegação, foram limitadas as manobras do trator na vinha. Foi considerada a necessidade de diminuição dos movimentos do trator em duas situações específicas, onde são interrompidas as operações culturais: durante as manobras nos cabeços da vinha para direcionar o trator à entrada de cada patamar e nos movimentos de aproximação do trator ao alimentador. Nos patamares não são permitidas manobras de inversão da marcha (em forma U, conhecidas em inglês por *U-turns*) pois, mesmo com ligeiro declive, estes são relativamente estreitos. Especificamente em patamares “mancos”, para voltar à entrada do patamar, a solução é circular em marcha-atrás. Nos caminhos (que geralmente contornam a vinha e que possuem um declive bastante acentuado) são possibilitadas algumas manobras, uma vez que a sua largura (superior à dos patamares) o permite. No entanto, nestes podem, ou não, existir cabeços. Em caminhos com um bardo num dos seus lados, as transições de acesso aos patamares não podem ser consideradas cabeços. Nas transições (áreas de transposição entre patamares e entre patamares e caminhos) é possível realizar manobras como a mudança de direção e a movimentação



Figura 4.1 – Alteração da direção do trator nas transições: (a) e (b) patamar-patamar, (c) patamar-caminho, (d) cabeços.

em marcha-atrás, Figura 4.1. Apenas são permitidas manobras de inversão de marcha (*U-turns*) nos cabeços da vinha cuja largura o permite.

Para o planeamento de trajetórias foi utilizada uma representação geométrica simplificada para os patamares, caminhos e transições. As rotas são identificadas por uma sequência de esqueletos dos patamares e caminhos, ou seus troços, limitados nas extremidades pelos pontos escuros, Figura 4.2 (a), (b) e (c).

Os troços dos patamares ou caminhos surgem da necessidade da partição dos seus esqueletos nos designados locais de realização de manobras, uma vez entendidos como locais de tomada de decisão na navegação.

Uma transição, por exemplo, pode ser definida quando um caminho dá acesso a um patamar, Figura 4.2 (d₁). Neste caso, é visível que o esqueleto do patamar e do caminho não se tocam, podendo a transição ser representada pela circunferência centrada no meio da reta mais curta entre os dois esqueletos, Figura 4.2 (d₂); o esqueleto do caminho é então dividido em três partes, uma antes da circunferência (Esq_{l1}, em cor de rosa), uma no seu interior (Esq_{l2}, em branco) e uma após a circunferência que identifica a transição (Esq_{l3}, em verde), Figura 4.2 (d₃). Consequentemente, são

incluídos dois pares de extremidades. Na definição de uma transição é usada uma representação com três curvas: a parte do esqueleto do caminho interior à transição e duas curvas de Bézier (que ligam as extremidade dos troços-esqueleto que atravessam a transição ao extremo do esqueleto do patamar). Na definição de uma transição são também usados três pontos de controlo (ou pontos limite) podendo estes ser extremos dos patamares.

Estendendo a nova representação das transições à totalidade da vinha (incluindo as extremidades dos esqueletos, os troços-esqueleto e as curvas Bézier) e adicionando-a à informação geográfica original, é possível construir um mapa topológico da vinha. Uma figura ampliada dos pontos e curvas que definem uma transição poderá ser observada na Figura 5.18 do capítulo 5.

O grafo é constituído por vértices que coincidem com os pontos de controlo e por arestas que representam os troços da rota. Após preenchido com a informação determinada a partir do MDE, é usado no planeamento de trajetórias e é identificado como grafo do mapa da vinha, que poderá ser consultado na Figura 4.3.

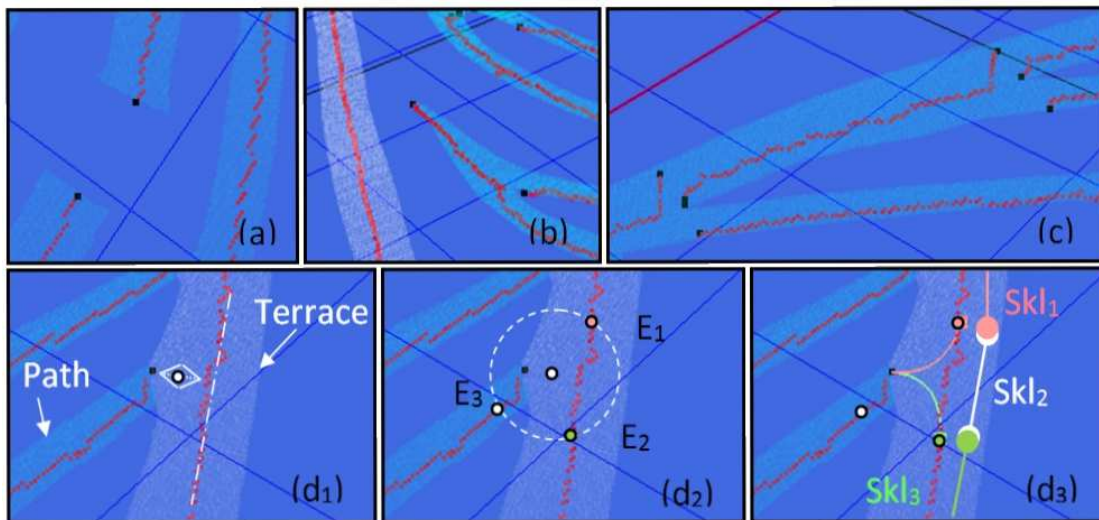


Figura 4.2 – Vista de topo da vinha, incluindo: (a),(b) e (c) Esqueletos com diferentes configurações e seus extremos; (d1), (d2) e (d3) Etapas para a definição de uma transição, seus pontos de controlo e troços-esqueleto.

O problema em estudo assemelha-se ao do Problema do Carteiro Rural, PCR (mais

conhecido pelo seu termo inglês, *Rural Postman Problem*, RPP), em que, dado um grafo $G = (V, A_S \subset A)$ onde V representa o conjunto de vértices, A o conjunto de arestas não direcionadas e A_S um subconjunto de A , se pretende encontrar o caminho fechado de custo mínimo em G , que permite visitar cada uma das arestas $a \in A_S$. O RPP procura um percurso fechado que cubra um subconjunto de arestas do grafo usando as arestas restantes como arestas de aproximação (Gomes Negreiros et al., 2009; Xu, 2011).

No entanto, encaixa-se melhor no Problema do Carteiro Rural Íngreme (mais conhecido pelo seu termo inglês, *Windy Rural Postman Problem*, WRPP) que procura uma rota num grafo direcionado, $G = (V, A)$ onde o custo de cada aresta depende da direção da travessia (Benavent et al., 2007). Neste caso, $c_{i,j}$ e $c_{j,i}$, identificam os custos não negativos da travessia do vértice i ao j e do vértice j ao i , respetivamente. Como nem sempre o percurso é fechado a semelhança com o problema do Carteiro Rural Íngreme verifica-se, neste caso, apenas na forma de implementação. Classificado como um problema NP-difícil, poderia ser resolvido pela utilização dos métodos Dijkstra ou A^* que, recorrendo a uma procura do tipo Melhor-Primeiro (*Best-first search*), encontram o percurso de menor custo para cobrir um conjunto especificado de arestas (Lenstra e Kan, 1981).

Em termos gerais, o problema consiste no desenvolvimento de um algoritmo combinado, para a determinação da sequência ótima de trajetos, que minimize uma função de custo ponderada dos requisitos estabelecidos para a navegação e garanta uma solução ótima por recurso a uma heurística otimista.

4.1.2 Formulação do problema e implementação

Seja $G = (V, A)$ um grafo onde G é designado como grafo do mapa da vinha, $V = \{v_1, \dots, v_{nV}\}$ o conjunto de vértices do grafo que representam os extremos dos troços de navegação e $A = \{a_1, \dots, a_{nA}\}$ o conjunto de arestas direcionadas que representam a totalidade dos troços de navegação. Os índices nV e nA representam o número de vértices e de arestas do grafo.

Seja S o conjunto de troços de navegação selecionados para cobertura $a_S \in S$, $S \subset A$, U o conjunto de todas as permutações diferentes, u_i , obtidas dos elementos de S , onde $i \in \{1, \dots, n_U\}$ e n_U o número de permutações¹.

Considere-se ainda dois extremos especiais dos troços de navegação $v_{Partida}$ e $v_{Chegada}$ que pertencem ao conjunto dos vértices, definidos como locais de partida e de chegada.

O problema envolve a determinação da permutação ótima de troços de navegação $u_i \in U$ que garanta a cobertura de S pelo menos uma vez e minimize uma função de custo previamente definida. Devido ao fato de nem todos os troços de navegação poderem ser cobertos, em ambas as direções, consideram-se as arestas do grafo direcionadas e a duplicação automática dos troços selecionados.

A definição de um critério de custo poderá envolver vários parâmetros, como a distância, o tempo de realização da tarefa e o tipo de manobras imposto pelo declive do troço de navegação. Nesta fase do trabalho, não foi contabilizado o tempo despendido na realização de manobras ou na adaptação do veículo para alcançar determinados ângulos de viragem ou outras restrições associadas à dinâmica do veículo.

A função deverá contemplar: os custos associados à distância percorrida (Equação 4.1), custos de entrada (Equação 4.2) e os custos associados ao tempo (Equação 4.3) requeridos para realizar a tarefa. Nela, $d(a_j)$, $c(a_j)$ e $t(a_j)$ são, respetivamente, os custos associados à distância, a termos de entrada e o ao tempo na travessia dos troços de navegação a_j , onde $j \in \{1, \dots, n_S\}$ e n_S é o número da totalidade dos troços efetivamente utilizados. Os custos de entrada referem-se aos fundos despendidos, por exemplo na aquisição de fitofármacos e combustível. O declive de cada troço de navegação influencia grandemente o consumo de combustível e indiretamente os custos associados. Para determinar a solução ótima foi adotada uma combinação linear das funções objetivo parcelares, $u^* : \Phi(u^*) = \text{Min}(\Phi(u_i)), \forall u_i \in U$. Cada função parcular, atribuída a cada aresta através da procura no grafo do mapa da

¹No âmbito da definição da árvore de decisão a_S passa a ter a designação de v_S uma vez que assume a função de vértice.

vinha G , foi definida pelas expressões seguintes:

$$\Phi_d(u_i) = \sum_{j=1}^{n_S} d(a_j) \quad (4.1)$$

$$\Phi_c(u_i) = \sum_{j=1}^{n_S} c(a_j) \quad (4.2)$$

$$\Phi_t(u_i) = \sum_{j=1}^{n_S} t(a_j) \quad (4.3)$$

O problema pode ser expresso matematicamente pela seguinte expressão:

$$\begin{aligned} \Phi(u^*) &= \text{Min}\{\Phi(u_i)\} = \\ &= \text{Min}(\alpha_d \times \Phi_d(u_i) + \alpha_c \times \Phi_c(u_i) + \alpha_t \times \Phi_t(u_i)), \forall u_i \in U \end{aligned} \quad (4.4)$$

Os coeficientes α_d , α_c e α_t representam os pesos relativos das funções de custo parcelares atribuídas a cada tarefa (ou operação cultural) e u^* a permutação ótima encontrada.

Na implementação, para determinar o conjunto de todas as permutações diferentes para a totalidade dos troços de navegação selecionados, U , recorreu-se ao algoritmo *Heap* ([Heap, 1963](#)).

O conjunto de permutações U foi utilizado para construir uma árvore de decisão, para orientar, passo-a-passo, o algoritmo *Dijkstra* na possível expansão de troços de navegação, nessa árvore, desde o vértice de partida ao vértice de chegada.

Foi utilizado o algoritmo A^* para determinar, no grafo do mapa da vinha G , o melhor caminho entre a posição de partida ($v_{Partida}$) e o extremo do primeiro troço de cada elemento de permutação u_i . O extremo é designado por $v_{IniCober}$. Recorreu-se do mesmo modo ao algoritmo A^* para determinar o melhor caminho entre o extremo do último elemento de cada permutação, designado por $v_{FinCober}$, e a posição de chegada ($v_{Chegada}$). Também se recorreu ao algoritmo A^* para determinar o caminho

de menor custo entre o extremo de um troço e o início do troço seguinte, sempre que este estiver incluído no ramo da árvore de decisão.

A função $\Phi(u_i)$, Equação 4.4, é usada como função de custo em ambos os algoritmos, A^* e Dijkstra. Para garantir uma solução ótima, foi usada, na procura no grafo do mapa da vinha para o A^* , uma heurística otimista, a distância euclidiana medida do ponto atual ao final, uma vez que a função de custo depende da distância percorrida.

Em resumo, a abordagem desenvolvida utiliza os algoritmos A^* e *Dijkstra* para determinar a sequência ótima de troços das linhas de condução (ou troços de navegação). Cumulativamente, considera troços para cobertura (no interior das áreas/ilhas de vinha) e para aproximação (entre áreas/ilhas). Implicitamente, a abordagem contempla ainda a determinação dos pontos ótimos para iniciar ($v_{IniCober}$) e terminar ($v_{FinCober}$) cada área de cobertura. Numa primeira fase, a otimização foi determinada por minimização da distância percorrida.

4.2 Arquitetura da solução de planeamento

A estrutura usada para resolver o problema de planeamento de trajetórias possui uma configuração modular, apresentada na Figura 4.3, e contempla aspetos associados à implementação dos métodos para resolução do problema e outros associados à manipulação do fluxo de informação com o utilizador.

Os métodos asseguram: a construção do grafo do mapa da vinha onde são introduzidas as grandezas do MDE associadas ao planeamento de trajetórias e as linhas de condução previamente determinadas; a criação da árvore de decisão, com base em informação proveniente da definição do problema; e a implementação de uma abordagem combinada de dois algoritmos que funcionam alternadamente numa árvore de decisão e num grafo para determinar o caminho ótimo, de acordo com critérios predefinidos, mas que podem vir a ser alterados. Os algoritmos usados serão especificados na subsecção 4.2.1.

Os aspetos associados à manipulação do fluxo de informação compreendem os desenvolvimentos na aplicação VVPP de menus para introduzir os dados do problema e outros ambientes para apresentar, de forma faseada, os resultados, auxiliando deste modo o utilizador na fase de análise de resultados².

Na arquitetura representada, na Figura 4.3, destacam-se três módulos principais:

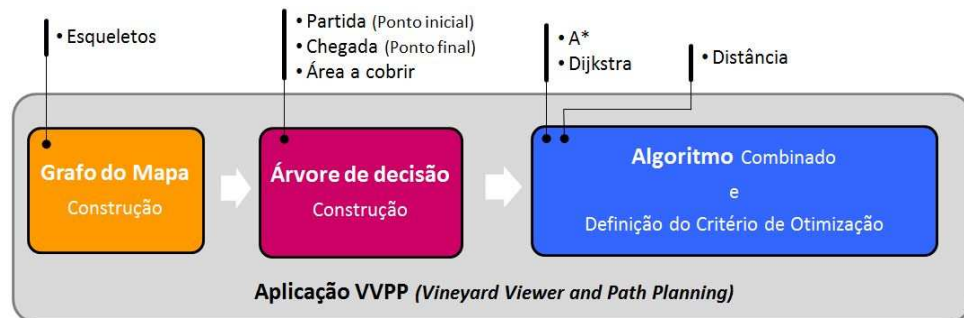


Figura 4.3 – Arquitetura da solução de planeamento.

- “Grafo do Mapa, Construção”, à esquerda, onde é construído o grafo, com base na informação do MDE e dos esqueletos (entendidos como linhas de condução em cada superfície 3D da vinha).
- “Árvore de decisão, Construção”, no meio, onde é construída a árvore de decisão, com base no ponto de partida, no ponto de chegada e no conjunto de patamares, caminhos ou seus troços definidos para cobertura. Estes elementos são introduzidos pelo utilizador, para cada problema em particular.
- “Algoritmo combinado e Definição do critério de otimização”, à direita, onde se definem: a combinação de critérios de otimização a usar; o grafo do mapa da vinha e a árvore de decisão; e o modo como a procura (no grafo e na árvore) é realizada através da associação da correspondente função de custo e heurística. No presente trabalho, dado tratar-se da primeira fase de desenvolvimento, o critério distância é ativado automaticamente para a função de custo,

²Mais informação sobre o modo de efetuar o planeamento recorrendo à aplicação VVPP pode ser consultada no capítulo 5.

sem necessidade da sua confirmação pelo utilizador. A função distância euclidiana esperada, calculada de um ponto atual ao ponto de destino, é atribuída automaticamente como função heurística. Futuramente, pensa-se tornar esta funcionalidade dinâmica, podendo o utilizador introduzir diferentes critérios para a função de custo e alterar o valor dos seus parâmetros. Estendendo-se também a funcionalidade à escolha da função heurística a considerar, podendo até ser admitida a escolha de uma função não otimista, no caso de a procura no grafo ser excessivamente demorada (Nascimento et al., 2012).

4.2.1 Algoritmos

O algoritmo de Heap (1963) gera todas as permutações de n objetos, escolhendo de forma sistemática, em cada iteração, um par de elementos que troca para produzir, exatamente uma vez, todas as permutações possíveis dos elementos. Gera cada permutação da permutação anterior, não redistribuindo os restantes $N-2$ elementos.

Foi escolhido inicialmente para gerar as permutações de um conjunto de patamares selecionados para cobertura, determinando as sequências possíveis de rotas para a navegação. Contudo, uma vez que os patamares podem ser percorridos nos dois sentidos procedeu-se à sua duplicação. Garantida aos referidos patamares uma diferente designação, a eles foi aplicado o algoritmo Heap.

Analizada a solução encontrada, verificou-se em algumas sequências a existência de elementos que correspondiam a movimentos em sentidos distintos num mesmo patamar. Assim, foi necessário depurar a solução encontrada, eliminando da sequência as repetições de movimentos em cada patamar. Só então foi considerada a nova solução para fazer parte da árvore de decisão.

Uma vez que navegação para cobertura da uma zona da vinha pode iniciar-se e terminar num ponto exterior a essa zona, na árvore de decisão são incluídos como vértices o ponto de partida e o ponto de chegada.

No topo da árvore (no vértice raiz) é colocado o ponto de partida. Cada permutação é inserida como ramo e ligada ao vértice de partida. No final de cada ramo é

ligado o vértice terminal correspondendo este ao ponto de chegada. Deste modo a árvore completa terá de conter tantos pontos de chegada quantas as permutações depuradas.

Apresenta-se de seguida o algoritmo 1 adotado.

Algoritmo 1: GeradorHeap

Entrada: n : inteiro, $lElem$: lista, $LPermut$: lista de listas

Saída: $LPermut$: lista de listas

início

```

    se  $n=1$  então
        novaLista  $\leftarrow$  CriaNovaLista()
        novaLista = lElem
        AdicionaListaElem(novaLista, LPermut)
    senão
        para  $i = 0; i < n - 1; i++$  faça
            GeradorHeap( $n - 1, lElem, LPermut$ )
            se  $n$  é ímpar então
                Troca( $lElem[i], lElem[i - 1]$ )
            senão
                Troca( $lElem[0], lElem[n - 1]$ )
            fim
        fim
    fim
fim

```

A procura do caminho ótimo na árvore de decisão faz-se através do algoritmo Dijkstra, recorrendo à função de custo adotada, garantindo uma solução ótima sem necessidade de varrer todos os ramos da árvore, a não ser que a solução só seja encontrada no final da procura.

A determinação do caminho ótimo entre o ponto de partida e o extremo do primeiro elemento de cada sequência de permutações, é efetuada por recurso ao algoritmo A^* aplicado ao grafo do mapa da vinha. O mesmo procedimento é adotado para a determinação do caminho entre o último elemento de cada sequência de permutações

e o ponto de chegada; como, aliás, foi referido atrás, na subsecção 4.1.2. A travessia de uma transição entre patamares vizinhos na permutação envolve, do mesmo modo, a procura no grafo do mapa da vinha.

Admitindo que o grafo do mapa da vinha, constituído por vértices e arestas de estrutura adiante definida (na subsecção 4.2.2), foi preenchido automaticamente, encontrando-se o grafo pesado, para a implementação do algoritmo A^* foram utilizadas as seguinte estruturas de dados adicionais: uma lista aberta O , para conter o conjunto de vértices do grafo a explorar. É uma lista ordenada prioritária, onde os vértices são colocados de forma a que o primeiro a ser analisado seja o prioritário, i.e., o de menor custo acumulado; e uma lista fechada C , para conter os vértices do grafo previamente explorados, que já estiveram em O .

O algoritmo faz referência a outras variáveis cujo significado se resume na Tabela 4.1;

Tabela 4.1 – Algumas variáveis utilizadas pelo algoritmo A^* .

Designação	Implementação	Significado
$adj(v)$	$Adjacente(G,v)$	Conjunto de vértices adjacentes ao vértice v
$c_{i,j}$	$CustoGrafV(i,i)$	Custo da aresta que une os vértices v_i e v_j
$g(v)$	<i>Newcost</i>	Custo total associado ao percurso de retorno do vértice atual, v_{act} , ao vértice inicial, v_{ini} , soma dos custos acumulados pelas arestas percorridas
$h(v)$	Heurística	Função heurística que determina os custos estimados do percurso ótimo, do vértice atual, v_{act} , ao vértice final, v_{fim}
$f(v)$	<i>Priority</i>	Custo estimado para o percurso ótimo entre os vértices inicial, v_{ini} , e o vértice final, v_{fim} , que passa por v_{act} ; $f(v) = g(v) + h(v)$,

O algoritmo Dijkstra tem uma estrutura semelhante ao A^* , apenas variando a função de procura que não contempla $h(v)$ no cálculo de $f(v)$ em cada iteração, motivo pelo qual não será apresentado neste documento de tese. Uma vez que o algoritmo Dijkstra funciona sobre uma árvore de vértices com tipos distintos (pontos e troços dos esqueletos) é necessário, antes de proceder à recolha do valor dos seus parâmetros,

identificar o seu tipo. Este aspeto não é tido em conta na implementação do algoritmo 2.

Algoritmo 2: A^*

Entrada: ini : inteiro, fim : inteiro, G : GraphV

Saída: S : ListaVertices

início

$v_{ini} \leftarrow \text{VerticeGrafo}(ini)$

$v_{fim} \leftarrow \text{VerticeGrafo}(fim)$

$O \leftarrow \text{CriaPriorityQueue}()$

$C \leftarrow \{(v_{ini}, v_{ini})\}$

$costSoFar \leftarrow \{(v_{ini}, 0)\}$

$O.PUSH(v_{ini}, \text{GetNodeCost}())$

enquanto $\text{ContaElem}(O) > 0$ **faça**

$v_{act} \leftarrow O.POP()$

se $\text{Ident}(v_{act}) = v_{fim}$ **então**

 | **BREAK**

fim

para cada $prox \in \text{Adjacente}(G, v_{act})$ **faça**

$a \leftarrow \text{Custo}(costSoFar[v_{act}])$

$b \leftarrow \text{CustoGrafV}(v_{act}, prox)$

$Newcost \leftarrow a + b$

se $((prox \notin \text{Vertice}(costSoFar)) \vee (Newcost < \text{Custo}(costSoFar[prox])))$

então

$costSoFar = costSoFar \cup \{(prox, Newcost)\}$ $Priority \leftarrow Newcost +$

$\text{Heuristic}(v_{act}, v_{fim})$

$O.PUSH(prox, Priority)$

$C \leftarrow C \cup \{(prox, v_{act})\}$

fim

fim

fim

$vC \leftarrow v_{fim}$

$S \leftarrow \{vC\}$

$termina \leftarrow \text{false}$

enquanto $\neg termina$ **faça**

$vC \leftarrow C[vC]$

$S.PUSH\text{-}FRONT(vC)$

$termina \leftarrow (vC == v_{ini})$

fim

fim

4.2.2 Planeamento na VVPP

A manipulação do fluxo de informação, nos três módulos da arquitetura da solução de planeamento, reproduz-se na VVPP do seguinte modo:

- Para construção do grafo da vinha, são apresentados no Visualizador da Vinha (*Vineyard Viewer*, VV) os patamares, os caminhos, e seus troços, e identificados para cada transição os pontos limite e as curvas de *Bézier*. Uma vista de pormenor, mostrando apenas três patamares, é apresentada na Figura 4.4. A informação da vinha é identificada da seguinte forma: as letras P e C são usadas para os patamares e os caminhos, seguidas de um número que representa a sua posição em relação ao canto mais a sudeste da vinha. Quando partidos por transições, os troços do esqueleto são numerados com um segundo dígito, colocado após um separador — do primeiro. Em perspetiva, no VV, os patamares são desenhados a vermelho, quando não seleccionados, ou a verde em caso contrário. Os caminhos são representados a amarelo³. As transições foram posteriormente referenciadas por um círculo preto a traço-ponto sobreposto na imagem. São ainda distinguidos os pontos limite de cada transição: a preto, os extremos do patamar e a vermelho, os pontos extremo dos troços do caminho. Os patamares P7, P8 e P9 encontram-se a verde porque foram seleccionados para cobertura. As curvas de *Bézier* são representadas a azul.

Os pontos limite apresentados no VV têm posições conhecidas no MDE e são transferidos, como vértices, para o grafo do mapa da vinha. Esta operação é desencadeada pela seleção da opção “2. To Graph” disponível no menu vertical da VVPP, descrito na subsecção 5.2.2. Apresenta-se na Figura 4.5 parte do grafo da vinha. Os pontos extremos dos patamares são apresentados a preto e os limite dos troços do caminho C2 a vermelho, como vértices do grafo. Para uma leitura mais clara dos elementos do mapa e do grafo são mantidas as cores. A seleção dos patamares para cobertura é efetuada através das opções do menu vertical da VVPP.

³Mais informação sobre os ambientes gráficos da VVPP pode ser encontrada no capítulo 5 deste trabalho.

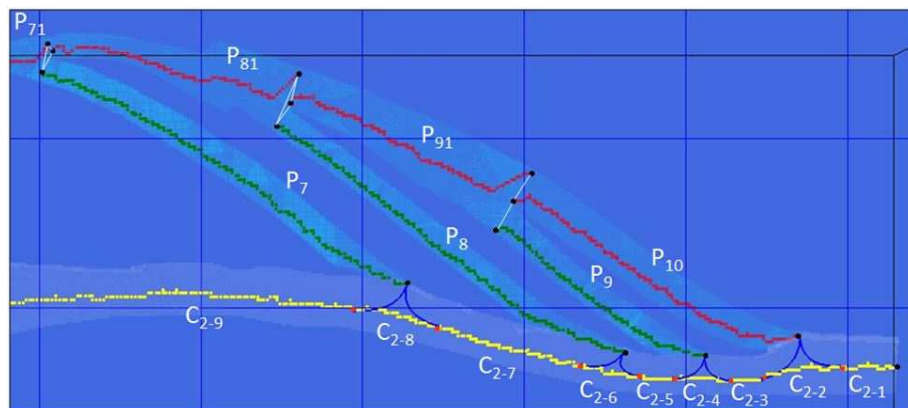


Figura 4.4 – Ampliação no VV, com sobreposição das transições.

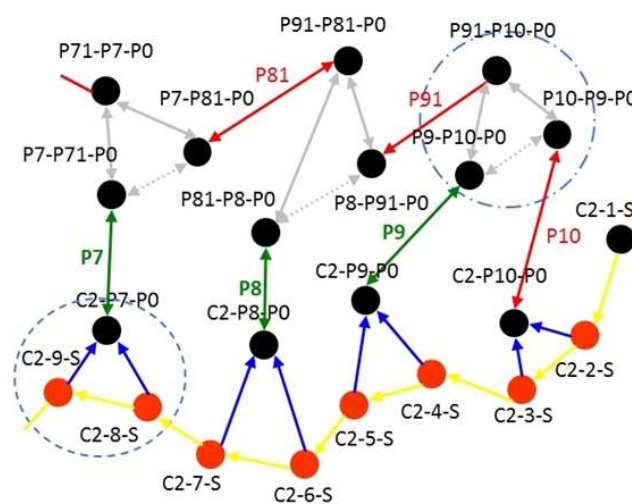


Figura 4.5 – Parte do Grafo do Vinha, com seleção de alguns patamares para cobertura.

No Visualizador do Grafo da vinha (*Graph Viewer*, GV), descrito adiante na secção 5.3.3, é possível visualizar uma representação mais compacta do grafo. Os vértices e as arestas de cada transição são identificados de forma sequencial, sendo também sequencial a apresentação das transições do grafo. Estas são

definidas por três vértices (pontos limite) e três arestas (duas curvas de *Bézier* e um troço do patamar ou caminho) e pela respetiva informação complementar da vinha. Os vértices e as arestas do grafo do mapa da vinha gerado pela VVPP possuem os seguintes parâmetros característicos, Tabelas 4.2 e 4.3.

Tabela 4.2 – Parâmetros que definem um vértice, no grafo.

Vértice		
Designação	Sigla	Significado/Referência
Identificador	v_i	(C/P)#-(P/C)#-(P0/S/I)
Posição	$p_{v_i}(x, y, z)$	Posição 3D na vinha
Peso	$c(v_j)$	Custo

Tabela 4.3 – Parâmetros que definem uma aresta, no grafo.

Aresta		
Designação	Sigla	Significado
Identificador	$a_{i,j}$	Aresta entre v_i e v_j
Vértice i	v_i	MapPoint
Vértice j	v_j	MapPoint
Peso	$c(v_i, v_j)$	Função de custo
Tipo	vin	Tem ou não vinha plantada
	decl	Declive da aresta
	veloc	Velocidade recomendada para a travessia
	temp	Tempo estimado para o percurso

- Para criação da árvore de decisão, no Visualizador da Vinha, é permitida a seleção dos patamares a cobrir por pressão do botão esquerdo do rato, quando este se encontra posicionado sobre o patamar em questão. Apenas esta possibilidade é permitida após a execução de uma sequência de funcionalidades num processo descrito no capítulo 5 e que possibilita a visualização da vinha numa perspetiva de topo. No menu vertical da VVPP é possibilitada a escolha dos pontos de partida e chegada que automaticamente permite a criação da árvore de decisão expandida. Esta é constituída por arestas direcionadas e vértices (de diferente natureza).
- A execução do algoritmo combinado poderá fazer-se por seleção da opção “Combined” do menu vertical aberto em cascata quando selecionada a opção

“Calculus” seguida da “Decision Point Graph”. A árvore de decisão deverá ter sido previamente carregada em memória bem como o grafo do mapa da vinha⁴.

4.2.3 Formulação e descrição da experiência

Foi efetuado um procedimento experimental para testar a estratégia adotada no planeamento de trajetórias.

Este consistiu no registo da trajetória real efetuada durante a condução do trator por um perito numa operação de destroçamento de vimes. Esta operação é realizada após a poda da vinha. A poda é uma operação cultural realizada ainda nos dias de hoje de forma manual na vinha em estudo. Os trabalhadores vão deixando os vimes secos cortados no chão; estes são depois partidos e compactados por uma alfaia colocada no trator para o efeito. A operação, designada por destroçamento de vimes, permite criar uma cama de proteção e nivelamento dos patamares que auxilia a passagem tanto do homem como do trator. É também uma forma de fertilização natural dos solos, uma vez que a matéria orgânica acaba por ser absorvida. No presente caso, a operação foi efetuada com recurso a um trator New Holland TCE 50 equipado com uma alfaia constituída por um cilindro de compressão Becchio-Mandrille (Series TSE). A operação cobriu a totalidade da vinha, ainda que só tenha sido considerado para planeamento o conjunto formado pelos três primeiros patamares.

Como pode ser observado na Figura 4.6, a alfaia tem de ser içada durante a realização das manobras de transposição das transições e quando, em marcha atrás, o trator se aproxima do início de um patamar para retomar a operação. Durante o destroçamento de vimes propriamente dito a alfaia tem de estar em baixo, para comprimir os vimes durante a movimentação do trator.

⁴Mais informação sobre as funcionalidades da VVPP podem ser encontradas no capítulo 5.



(a) Alfaia subida



(b) Alfaia descida

Figura 4.6 – Trituração de vimes com alfaia subida e descida.

4.3 Resultados

A experiência envolveu a entrada do trator na parcela de vinha pelo seu extremo superior, em C2-1-S, posição de maior altitude na parcela que coincide com o seu extremo nordeste; a cobertura pelos patamares P7, P8 e P9, para destroçamento dos vimes aí deixados; e a paragem do trator em C2-P7-P0, posição estipulada para terminar a tarefa e que coincide com o ponto extremo do patamar P7. Estas posições podem ser vistas na Figura 4.8.

A referência usada para identificar as posições de partida e de chegada é a mesma adotada para identificar os vértices do grafo no mapa da vinha, apresentada anteriormente na Tabela 4.2.

Verificou-se que o tratorista optou por uma solução diferente da determinada pelo sistema de planeamento implementado na VVPP.

Na Figura 4.8, os pontos de partida e chegada são representados com círculos a preto e a amarelo, respetivamente. Os percursos efetuados em marcha para a frente a traço preto e em marcha-atrás a amarelo.

Esta figura representa uma vista de topo da vinha, em esquadria, pelo que as linhas horizontais são paralelas ao eixo este e as verticais paralelas ao eixo norte do sistema

colocado no centro do paralelepípedo que envolve a parcela de vinha em estudo.

O trator percorreu o patamar P10, não selecionado para cobertura e onde não existia vinha plantada e, portanto, com a alfaia levantada. De seguida, atravessou a transição entre os três patamares P91-P10-P9 (P10-P9-P0 a P91-P10-P0 em marcha para a frente e de P91-P10-P0 a P9-P10-P0 já em marcha-atrás) e não parou em P9-P10-P0, à entrada do patamar P9 (posição de entrada, mais a nordeste) ⁵. Prosseguiu com a alfaia levantada, em marcha-atrás, percorrendo a totalidade do patamar e só parando em C2-P9-P0 (posição de entrada, mais a sudeste, no patamar P9) onde desceu a alfaia para iniciar a operação no patamar P9. Questionado sobre a sua decisão, o perito apontou como justificação o declive acentuado que o caminho C2 apresentava, que obrigava a alfaia mesmo na posição levantada a tocar no chão, desequilibrando o trator, ao realizar a manobra de aproximação a C2-P9-P0 por C2. Esta justificação foi consistente com a tomada de decisão para percorrer os restantes patamares selecionados que se apresentavam decrescentes em altura. Considerando o sentido A, aquele que corresponde a movimentos mais para oeste e o sentido B, mais para este. A experiência prosseguiu do seguinte modo:

Cobertura de P9 no sentido A (P9A), para a frente, com a alfaia em baixo. Paragem em P9-P10-P0 e subida da alfaia. Travessia de P91 e P81, após transposição das respetivas transições e colocação do trator em marcha-a-trás à entrada do patamar P8, em (P81-P8-P0). Travessia de P8 em marcha-atrás até à entrada mais a este, em (C2-P8-P0), ou seja, travessia de P8 no sentido B (P8B). Só nessa posição a alfaia é descida e o movimento de cobertura de P8 no sentido A (P8A), para a frente, é realizado.

O mesmo procedimento foi efetuado em relação a P7. Neste caso foram realizadas mais duas travessias P7B, uma antes e outra após ter sido realizado o movimento de cobertura P7A. A primeira para colocação do trator em (C2-P7-P0) para baixar a alfaia e iniciar a cobertura e a segunda, com a alfaia em cima para chegar ao ponto de chegada.

A implementação na VVPP do referido problema produziu uma árvore de decisão

⁵Descrição seguida no grafo do mapa da vinha, Figura 4.5.

expandida de 48 ramos, representada na Figura 4.7 identificando-se nesta, a preto, os vértices que correspondem a patamares a cobrir; a laranja, o vértice da raiz (ou do ponto de partida) e a amarelo, o vértice terminal (ou do ponto de chegada).

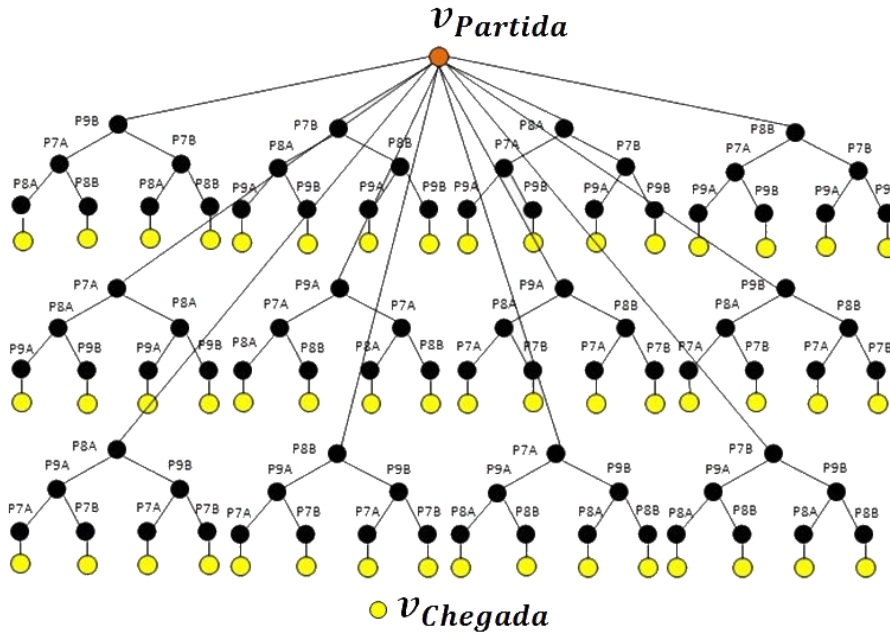
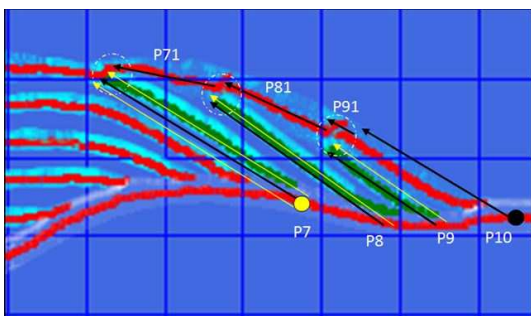
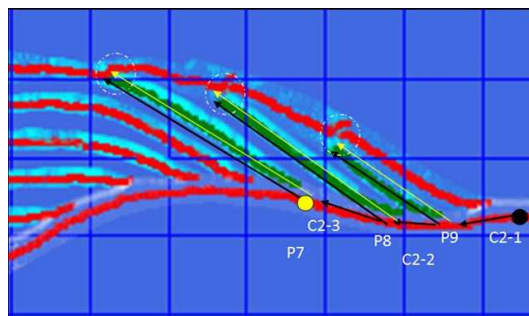


Figura 4.7 – Árvore de decisão para a cobertura de três patamares.

Na figura 4.8, estão representados sobre o VV o trajeto efetuado durante o destroçamento de vimes e o trajeto planeado pela VVPP.



(a) Trituração de vimes



(b) Planeamento da operação

Figura 4.8 – Teste na VVPP: Rota efetuada e planeada.

Em resumo, e pensando na árvore de decisão criada para resolver o problema em

estudo, pode apontar-se a solução $V_{Raiz/Partida}$ -P9A-P8A-P7A- $V_{Terminal/Chegada}$ para ambas as situações estudadas, contudo com custos associados distintos.

A solução experimental compreende, sem contabilizar os trajetos de transposição das transições (pelas curvas de *Bézier* ou troços das linhas de condução interiores à transição), a travessia da seguinte lista de troços: P10A, P91A, P9B, **P9A**, P81A, P8B, **P8A**, P71A, P7B, **P7A** e P7B onde os movimentos B foram realizados neste caso de marcha-atrás. Esta travessia corresponde a uma distância aproximada de 790 m.

A solução planeada na VVPP correspondeu a seguinte lista de troços: C2-1A, **P9A**, P9B, C2-2A, **P8A**, P8B, C2-3A, **P7A** e P7B, onde os movimentos B foram também realizados em marcha-atrás. Esta travessia corresponde a uma distância aproximada de 402 m.

O algoritmo combinado desenvolvido para determinar a rota ótima, numa primeira abordagem, mostrou ser mais favorável, uma vez que a distância estimada foi reduzida num valor superior a 25% quando comparada com a percorrida pelo trator.

A abordagem inicial simplificada considerou apenas a função distância percorrida para guiar a expansão efetuada pelo algoritmo Dijkstra numa árvore de decisão constituída pelos pontos de partida e de chegada, e pelo conjunto de patamares selecionados para cobertura ([Contente et al., 2016](#)).

A importância do planeamento de trajetórias poderá ser testada na realização de outras tarefas culturais. Espera-se melhorar os bons resultados alcançados utilizando uma função de custo mais abrangente, contemplando funções de custo e de tempo atribuídos para esta tarefa.

Para este problema específico, mais importante que o custo é a possibilidade de ocorrerem acidentes ou de se danificar a alfaia, aspeto considerado de relevância menor mas que o tratorista ponderou. Futuramente, a atribuição de pesos ao grafo do mapa da vinha terá que considerar aspetos práticos que só a experiência em realizar este tipo de tarefas permite obter.

5

Demonstração de resultados através da aplicação VVPP

A aplicação VVPP (*Vineyard Viewer and Path Planning*) é uma ferramenta de auxílio ao planeamento de trajetórias que se pretende vir a ser utilizada pelo sistema de navegação autónoma a implementar para a RDD.

Este capítulo visa apresentar a arquitetura da VVPP, na secção 5.1, e dar ao utilizador uma panorâmica geral das suas funcionalidades (secção 5.2). Na secção 5.3 são apresentados os resultados da utilização da VVPP para resolver um problema de planeamento de trajetórias especificado, através dos seus diferentes ambientes. Na secção 5.4 são indicadas as limitações encontradas e sugerem-se caminhos para desenvolvimentos futuros.

A aplicação foi desenvolvida na linguagem C#, recorrendo às suas funções OpenGL de manipulação gráfica tridimensional. Nela foi possível criar, entre outras funcionalidades, um ambiente, designado por VV (*Vineyard Viewer*), para visualizar qualquer objeto tridimensional quando previamente carregado. Ou seja, o terreno da vinha e as trajetórias de navegação efetuadas ou previstas (de forma sobreposta ou individualizada) podem ser inspecionados, uma vez que na VVPP foram disponibilizadas ferramentas para inspeção e análise de dados. As funcionalidades desenvolvidas distribuem-se em menus horizontais ou verticais (que se abrem em cascata sobre os primeiros, ou são constituídos por caixas de validação ou seleção) que vão

aparecendo no ambiente da VVPP de forma dinâmica à medida das necessidades do utilizador.

A aplicação foi desenvolvida de forma faseada, seguindo um fio condutor, até à obtenção do sistema integrado de planeamento de trajetórias atual.

5.1 Arquitetura

A arquitetura da aplicação encontra-se representada na Figura 5.1, sob a forma de módulos que comunicam entre si. O fluxo de informação é representado através de setas direcionadas. A VVPP, identificada como módulo principal, gere o modo como são executados os módulos de visualização e os aplicativos desenvolvidos. Os módulos de visualização 3D são o **V**isualizador da **V**inha (**VV**) e o **V**isualizador dos objetos **eS**queletizados (**SV**, *Skeleton Viewer*). O módulo de visualização 2D é o **V**isualizador do **G**rafo do **M**apa da **V**inha (**GV**, *Graph Viewer*). Toda a informação necessária para a execução dos módulos é armazenada em pastas distintas, identificadas como o módulo Pastas de informação, minimizando o espaço de memória necessário à execução da aplicação. Os resultados são também armazenados em ficheiros de dados tipificados, em pastas distintas.

Através das funcionalidades da aplicação, que se descrevem na secção 5.2.2, é possível a rotação, a translação e a ampliação ou redução de partes ou da totalidade do objeto que se apresenta no módulo VV. O objeto selecionado para visualizar, bem como o referencial em que é desenhado, também podem ser mostrados ou ocultos. Algumas funcionalidades são executadas diretamente pelo utilizador e outras de forma autónoma, como consequência das primeiras. A informação apresentada é carregada em memória.

O módulo **Aplicativos** designa o conjunto de métodos desenvolvidos, em C# ou em C++, que implementam os algoritmos necessários à determinação de forma automática das linhas de condução e ao planeamento de trajetórias. São executados pelo utilizador de forma sequencial, pela ativação das funcionalidades da VVPP (através do seu conjunto de menus). Estas podem corresponder à execução de

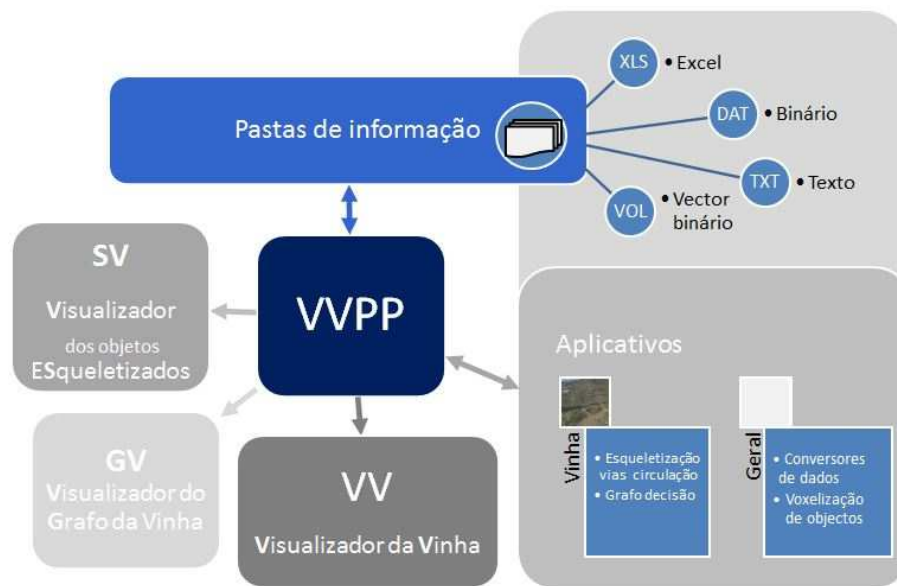


Figura 5.1 – Arquitetura da aplicação VVPP.

rotinas (ou métodos) exteriores à aplicação. Os métodos podem estar associados diretamente à execução de operações que manipulam dados da vinha. Podem estar relacionados com a determinação das linhas de condução ou com a manipulação de grafos de decisão no planeamento de trajetórias. Podem ainda, no caso de algoritmos de esqueletização, ser aplicados a outros objetos de configuração diferente com o objetivo de alargar o âmbito da VVPP.

O módulo **Pastas de informação** engloba os métodos de gestão de dados que distribuem e armazenam a informação numa estrutura de diretorias, cada uma com o mesmo tipo de ficheiros e cuja distribuição em forma de ramos pode ser observada no canto superior direito da Figura 5.1. A VVPP manipula quatro tipos de formatos de dados, uma vez que a informação é proveniente de diferentes origens e serve aplicativos que fornecem dados específicos variados. O formato .XLS criado pelo Microsoft Excel®, o .TXT de texto comum, o .DAT contendo informação arbitrária, neste caso binária, não associada a qualquer aplicação específica, e o .VOL, que consiste num cabeçalho e uma sequência valores de 8 bits que guarda dados volumétricos de imagem¹.

¹Formato especificado por Mark Dow, em Janeiro de 2001

A informação manipulada pela VVPP é armazenada segundo a distribuição indicada na Tabela 5.1.

- A pasta denominada XLS (colunas 1 e 2) contém os ficheiros de dados em formato Excel, uns exportados do SIG (com a informação do MDE da vinha), outros do levantamento com GPS no caso da trajetória executada pelo trator ao realizar a pulverização integral da vinha (colunas 1) e ainda, numa pasta denominada TRACT, aqueles que resultaram da identificação (por um processo manual) dos troços distintos da totalidade da rota do trator, um para cada uma das diferentes vias de circulação na vinha, patamares e caminhos (colunas 2). A informação é guardada nos ficheiros, de acordo com a respetiva tabela de atributos especificada anteriormente na subsecção 3.3.1. Devido ao elevado tempo necessário para a abertura e manipulação de informação em ficheiros Excel de grande tamanho, houve a necessidade de converter os ficheiros Excel para o formato binário.
- A pasta denominada DAT (colunas 3 a 6) contém todos os ficheiros em formato binário que diretamente podem ser carregados para a memória da aplicação VVPP. Nestes se identificam: na raiz (... \DAT), aqueles que foram obtidos dos que contêm a informação georreferenciada da vinha e que se encontravam na subdiretoria ... \XLS \ (coluna 3); na pasta TRACT, os que foram obtidos dos que contêm os troços individuais da rota do trator (subdiretoria ... \XLS \TRACT \) (coluna 4) e, na pasta SKLVIN, os que contêm os esqueletos das vias de circulação determinados pelos dois métodos de esqueletização que produziram resultados satisfatórios, distribuídos em pastas distintas. Os ficheiros binários dos esqueletos determinados pelo método *Thinning* são armazenados na subdiretoria ... \SKLVIN \THIN e os determinados pelo método *Geometric* são armazenados na subdiretoria ... \SKLVIN \GEO, (colunas 5 e 6, respetivamente, da Tabela 5.1) em formato binário, referenciados ao referencial total da vinha para que possam ser imediatamente desenhados.
- A determinação da linha de condução do trator, em cada patamar ou caminho, envolve a utilização de cada superfície 3D individual, sendo necessária a discretização do seu volume em volumes elementares de pequena dimensão, processo

designado discretização por voxelização. Para que possam ser representados em conjunto e separadamente, as superfícies individuais e os respectivos esqueletos têm de ser referenciados. As coordenadas de posição dos pontos menor e maior do volume (referências inferior e superior, respetivamente), são guardadas num ficheiro de texto (*.TXT). São também guardados o número extra de voxels estipulados para circundarem o volume original e a dimensão de cada volume elementar. Como forma de organizar a informação, foi criada uma pasta denominada TXT (coluna 7), com a designação do formato usado para armazenar os ficheiros. O utilizador da VVPP não tem acesso direto à pasta, uma vez que os ficheiros nela armazenados são-no num processo interno, associado à voxelização. Apenas as funcionalidades que adiante se descrevem associadas aos processos de conversão para formato (*.VOL) e as de esqueletização guardam a informação, necessária à alteração do referencial e ao processo de discretização por voxelização, em formato de texto.

- Na pasta denominada VOL (colunas 8 a 14) são guardados, nas subdiretorias \IN e \OUT, os volumes discretizados por esqueletizar e os já esqueletizados. Os ficheiros apenas contêm uma tabela tridimensional de “uns” e “zeros”, ordenados e organizados de acordo com um formato previamente definido. Este pode ser reconhecido pela interpretação do seu nome que é constituído por um conjunto de caracteres separados pelos caracteres especiais “.” e “x”. Até ao “.” identifica-se o seu nome próprio, depois, entre os caracteres especiais “x”, a dimensão dos eixos de referencia x, y e z (com origem no vértice inferior-posterior do volume em questão) e, por último, a extensão do ficheiro. Por exemplo, “C2.506x114x110.vol” é um ficheiro discretizado de nome próprio C2, com 506, 114 e 110 voxels respetivamente nos eixos coordenados x, y e z. A origem do referencial é colocada de forma automática num ficheiro TXT criado para o efeito caso a voxelização tenha sido realizada pela VVPP no âmbito do estudo da vinha. Existe a opção de criar este tipo de ficheiros apenas para teste dos algoritmos de esqueletização implementados e, nesse caso, podem ser utilizados volumes de diferentes formas, não necessitando de identificação da posição da origem do referencial. Na diretoria ...\\VOL\\IN (colunas 8 e 9) existe ainda a pasta NOVOS (coluna 9) onde são armazenados

os ficheiros que sofreram uma mudança de orientação face à dos originais contidos em ...\\VOL\\IN (coluna 8). Como o resultado da esquetização depende do algoritmo usado, foram criadas diferentes pastas no interior da diretoria ...\\VOL\\OUT, uma para cada método implementado: DISF para o campo de distância (*Distance Field*); POTF para o algoritmo de campo potencial (*Potencial Field*); GEOM para o geométrico; e THIN para o de adelgaçamento (*Thining*). Apenas os dois últimos produziram resultados satisfatórios pelo que são referenciadas as suas pastas na Tabela 5.1, nas colunas 11 e 12, respetivamente. Na pasta TRACT são armazenados especificamente os patamares e os caminhos da vinha discretizados (coluna 10), e que irão posteriormente ser mostrados no visualizador de esqueletos **SV**.

A informação contida nas pastas é carregada para um conjunto de variáveis globais da aplicação VVPP.

Tabela 5.1 – Diretorias da VVPP.

Sistema de subdiretorias da VVPP					Descrição do tipo de informação armazenada no sistema de subdiretorias da VVPP	
Dir	Subdir	Subdir	Subdir	Extensão		
...\\	XLS\\		*.xls		Dados originais dos levantamentos	1
		TRACT\\	*.xls		Troços da trajetória do trator	2
	DAT\\		*.dat		Dados dos levantamentos (formato alterado)	3
		TRACT\\	*.dat		Troços da trajetória do trator (formato alterado)	4
		SKLVIN\\	THIN\\	*.dat	Esqueletos das vias de circulação, método <i>Thinning</i>	5
			GEO\\	*.dat	Esqueletos das vias de circulação, método <i>Geometric</i>	6
	TXT\\		*.txt		Dados da voxelização para cada via de circulação	7
	VOL\\	IN\\		*.vol	Volumes discretizados para esquetização	8
			NOVOS\\	*.vol	Resultado da transf. coordenadas dos volumes *.vol	9
		OUT\\	TRACT\\	*.vol	Volumes discretizados pela VVPP, com referênciação	10
			THIN\\	*.vol	Esqueletos obtidos pelo método <i>Thinning</i>	11
			GEO\\	*.vol	Esqueletos obtidos pelo método <i>Geometric</i>	12
			DIST\\	*.vol	Esqueletos obtidos pelo método <i>Distance Field</i>	13
			POTF\\	*.vol	Esqueletos obtidos pelo método <i>Potencial Fiel</i>	14

5.2 Ambiente da VVPP

A aplicação encontra-se estruturada em módulos funcionais disponíveis quer através de um menu principal (barra horizontal no topo), quer numa secção à direita que

abrange em altura a totalidade do ecrã (Figura 5.2). No centro da interface encontra-se o VV, onde a vinha, após carregada, pode ser desenhada e que funcionará futuramente como ferramenta de simulação da navegação.

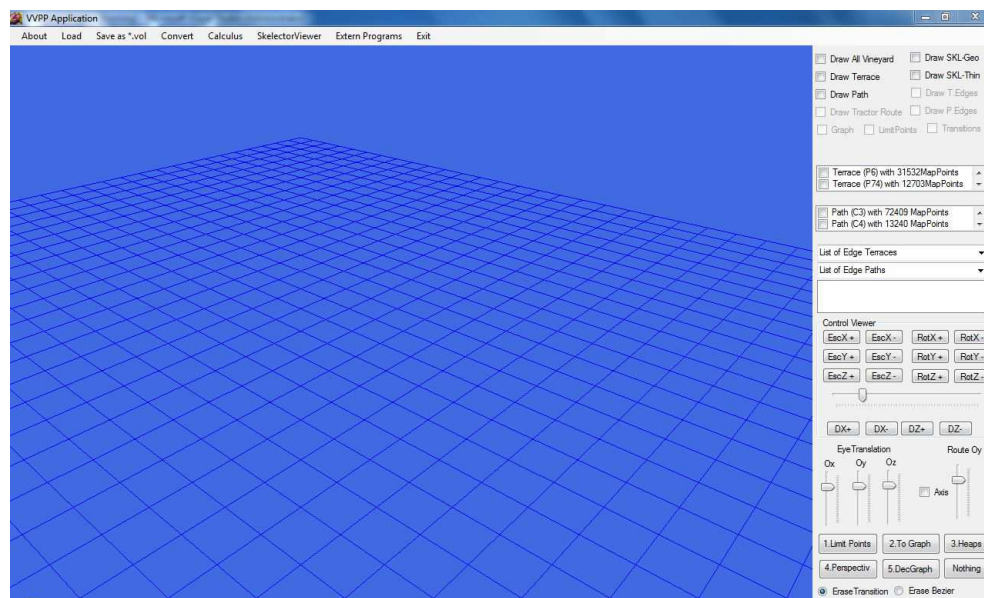


Figura 5.2 – Ambiente da aplicação VVPP.

Para a descrição detalhada das funcionalidades da VVPP e para conduzir o utilizador na sua utilização, foi desenvolvido um manual. Contudo, a apresentação da função de cada aplicativo é nesta secção explicada, dando especial atenção ao fluxo de informação entre os módulos da arquitetura da VVPP. Algumas das funcionalidades foram desenhadas para a vinha, realizando ações diretamente relacionadas com a determinação das linhas de condução e com o planeamento de trajetórias; outras, mais gerais, para a manipulação de objetos em ambiente gráfico, o armazenamento e conversão de dados e a abertura de janelas para comunicação com o utilizador. Podem ser utilizadas por recurso aos menus da VVPP, permitindo a apresentação de resultados nos módulos de visualização 3D, SV e VV. Alguns resultados associados ao planeamento de trajetórias, como o grafo do mapa da vinha, por exemplo, são apresentados no módulo 2D, GV. São descritas, nas subsecções seguintes, apenas as funcionalidades disponibilizadas nos menus da VVPP associadas à produção e demonstração de resultados.

5.2.1 Menu Principal Horizontal

As opções do Menu Principal são descritas pela ordem em que aparecem dispostas. Os resultados obtidos no decorrer do trabalho são mostrados nos ambientes de visualização VV, SV e GV. Alguns resultados intermédios são apresentados em janelas abertas para o efeito no ambiente da VVPP, sobre a VV ou no seu menu vertical que a seguir se descreve (subsecção 5.2.2).

About

A opção “About ”, ou Acerca, é disponibilizada para apresentar ao utilizador o âmbito em que esta versão da aplicação VVPP foi desenvolvida e identificar o seu autor (Figura 5.3).

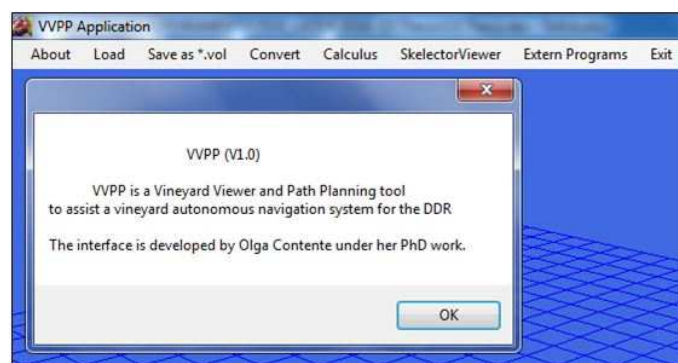


Figura 5.3 – Opção “About” do Menu Principal da VVPP.

Load

A opção “Load ”, ou Carregamento em memória, armazena em memória a informação dos ficheiros de extensão *.dat armazenados no sistema de subdiretorias da VVPP, anteriormente apresentado na Tabela 5.1.

Ao premir-se esta opção do menu principal da VVPP, uma janela em cascata é disponibilizada ao utilizador podendo este selecionar cada uma das quatro opções apresentadas (Figura 5.4).

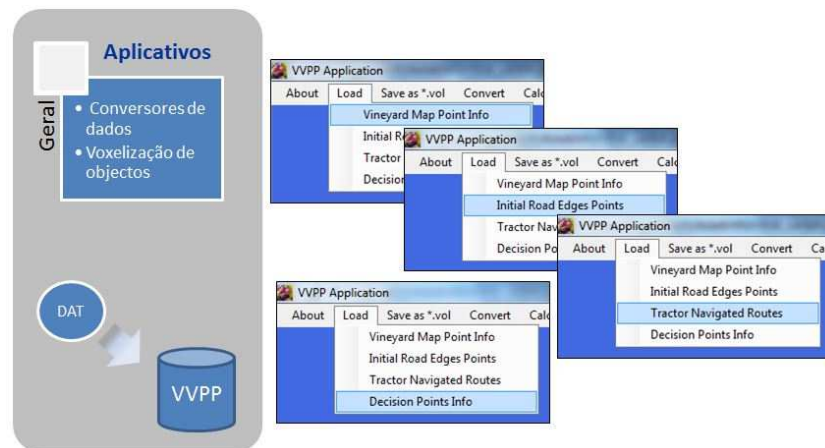


Figura 5.4 – Opção “Load” do Menu Principal da VVPP.

Nela se incluem, para carregamento em memória e por ordem descendente, os seguintes dados:

- o conjunto de pontos, e respetivos atributos, que definem o MDE da vinha e que resultaram do levantamento em tempo real RTK com GNSS de precisão, opção “Vineyard Map Points”.
- o conjunto de pontos, e respetivos atributos, que definem os limites das vias de circulação e que resultaram do primeiro levantamento com DGPS por satélite, opção “Initial Road Edges Points”.
- a rota do trator, efetuada durante a pulverização da vinha. Os pontos foram adquiridos recorrendo ao equipamento GNSS em modo dinâmico com correção em pós-processamento, opção “Tractor Navigation Routes”.
- o grafo de decisão, previamente guardado em formato binário, opção “Decision Points Info”, que poderá ser carregado em memória para planeamento de trajetórias na vinha ou para o teste dos algoritmos implementados, nomeadamente o Dijkstra, o A* e o Misto, através da opção “Calculus” (descrita adiante nesta secção). Esta opção, apesar de não se encontrar diretamente disponível, foi testada e é realizada internamente pela VVPP durante a etapa de planeamento de trajetórias.

Save as *.vol

A opção “Save as *.vol ”, ou Guarda como discretizado, discretiza individualmente cada patamar ou caminho que se encontra em memória, armazenando-o depois na diretoria ...\\VOL\\IN (Figura: 5.5). Estabelece o nome do ficheiro com base no número mínimo de voxels usados, em cada direção principal, para representar integralmente o patamar ou o caminho. Cria, de forma automática e sem notificar o utilizador, um ficheiro de texto com a referenciação individual do patamar ou do caminho no referencial global da vinha.

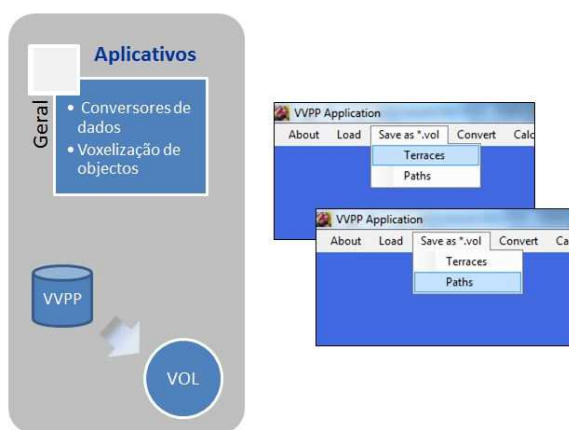


Figura 5.5 – Opção “Save as *.vol ” do Menu Principal da VVPP.

Convert

A opção “Convert”, ou Converte, converte o formato em que determinada informação é armazenada. A informação pode ser transferida (opções 1 e 3) ou alterada (opção 2).

Assim, quando selecionada, é apresentada ao utilizador uma janela em cascata com três novas opções (Figuras: 5.6 a 5.8).

- Opção: “xls to dat ”

Como a informação do MDE foi extraída do ARCGIS em formato Excel

(*XLS), houve a necessidade de implementar, na aplicação VVPP, a funcionalidade “xls to dat” que poderá ser acedida no menu principal, via opção “Convert”, para transformação de formatos, Figura 5.6. A funcionalidade acede diretamente à diretoria \XLS (sob a da raiz da VVPP) onde deverá estar o ficheiro que, após convertido, será colocado na diretoria \DAT (sob a da raiz da VVPP). Pode também ser aplicada à rota do trator ou ao conjunto de pontos que definem as linhas limite das vias de circulação na vinha.



Figura 5.6 – Opção “xls to dat” desencadeada por “Convert”.

Durante a implementação da VVPP houve ainda a necessidade de considerar troços distintos da totalidade da rota do trator, um para cada uma das diferentes vias de circulação na vinha (patamares e caminhos). Foi então, através de um processo manual, sobreposta a rota às vias de circulação, resultando do processo de interseção um conjunto de troços que, após armazenados no mesmo formato, foram identificados com a designação adotada para as vias de circulação: os caminhos com a letra C e os patamares com a letra P, ambas seguidas do respetivo número.

Para manter o mesmo critério na escolha do formato de dados a manipular pela VVPP, os troços podem ser convertidos para formato binário através da funcionalidade “Convert ”seguida da opção “xls to dat ”. Armazenados inicialmente na subdiretoria ... \XLS \TRACT, são convertidos e transferidos para a diretoria ... \DAT \TRACT.

- Opção: “LxMxN.vol to ”

Através desta opção é possível transformar qualquer volume discretizado, representado no formato VOL, rodando-o em torno dos seus eixos coordenados. Para isso, é necessário que o utilizador escolha qual a rotação que pretende. Admitindo o volume original orientado segundo as direções principais L, M e N, as rotações possíveis podem ser efetuadas por seleção individual de uma das opções disponibilizadas num menu de seleção, aberto em cascata para o efeito (Figura 5.7). Pode-se recorrer a esta opção quando escolhidos algoritmos de esqueletização sensíveis à orientação do objeto (funcionando melhor na direção de maior dimensão do objeto a esqueletizar), ou para avaliar essa influência. Esta funcionalidade foi desenvolvida quando, na fase inicial de implementação e teste dos algoritmos, houve necessidade de recorrer a objetos tridimensionais digitalizados que nem sempre foram encontrados na posição mais conveniente para futura análise do esqueleto e sua comparação com os resultados obtidos e publicados por outros autores.

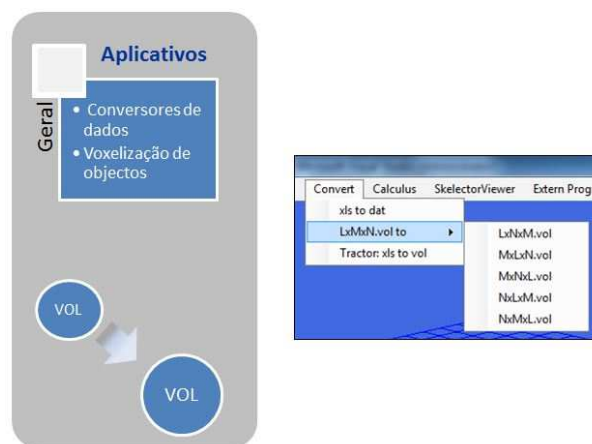


Figura 5.7 – Opção “LxMxN.vol to” desencadeada por “Convert”.

- Opção: “Tractor: xls to vol ”

Ao premir esta opção, Figura 5.8, o utilizador pode escolher o ficheiro do troço da rota do trator a discretizar (pelo processo de voxelização) que se encontra na subdiretoria ...\\XLS\\TRACT\\. A VVPP direciona o utilizador para essa diretoria para que escolha o ficheiro com a informação a voxelizar e após escolhido

cria, de forma automática, sem informar o utilizador, uma réplica do troço em formato binário, *.DAT (caso este ainda não exista em ...\\DAT\\TRACT). Guarda o troço em memória, discretiza-o usando como referência o tamanho do voxel definido para o respetivo patamar ou caminho (em formato *.TXT) e armazena-o na diretoria ...\\VOL\\TRACT, com a extensão *.VOL.

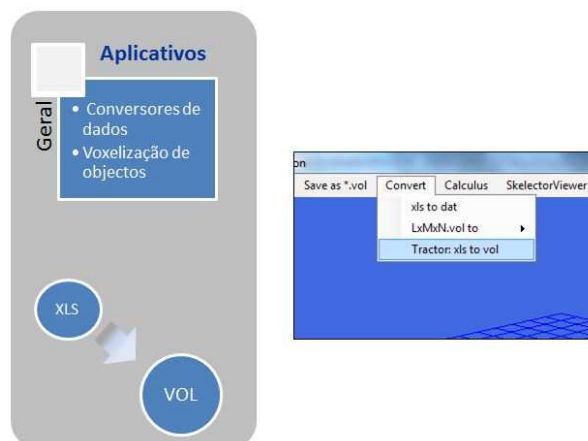


Figura 5.8 – Opção “Tractor: xls to vol” desencadeada por “Convert”.

Calculus

A opção “Calculus”, ou Cálculo, permite, entre outras opções, a determinação das rotas de navegação ótimas, nelas incluindo os percursos de aproximação e de cobertura. O menu vertical, entretanto aberto em cascata, disponibiliza ao utilizador a seleção das seguintes opções:

- “Road Edges”, ou Limite das vias, está em desenvolvimento com o objetivo de determinar de forma automática as linhas de fronteira do volume das superfícies 3D de circulação na vinha. A sua comparação com as linhas levantadas durante a realização de diferentes operações culturais ao longo do ano, onde o afastamento do trator ao talude e à vegetação do bardo é medido por sensores selecionados para o efeito, permitirá avaliar a expansão vegetativa das videiras ou da erva daninha nas laterais das vias de circulação e ajustar a dimensão das últimas para o planeamento de trajetórias.

- “Road Skeleton”, ou Esqueleto das vias, permite executar um conjunto de algoritmos de esqueletização, apresentados na janela em cascata entretanto disponibilizada, Figura 5.9. Pela seleção de uma das opções, é possível esqueletizar pelo método escolhido um volume discretizado (em formato *.VOL), contido na subdiretoria ...\\VOL\\IN\\. O resultado é colocado na subdiretoria correspondente ao método, de acordo com o sistema de diretorias da VVPP referenciado anteriormente na Tabela 5.1.

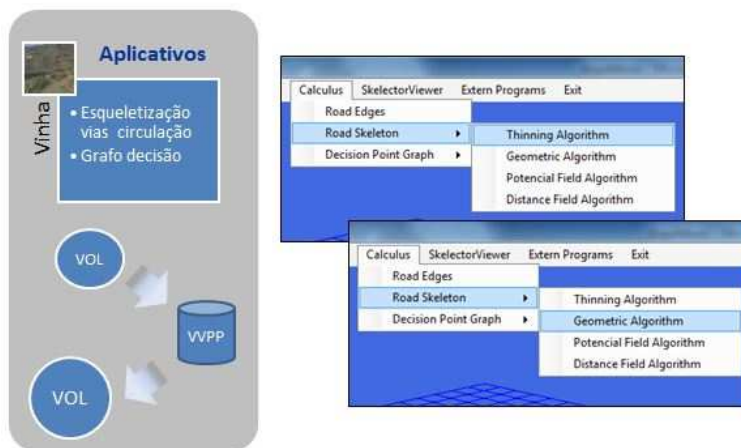


Figura 5.9 – Opção “Road Skeleton” desencadeada em “Calculus”.

- “Decision Graph”, ou Grafo de decisão, permite o teste dos algoritmos *Dijkstra* e *A** ou uma solução diferente identificada pela opção “Combined” num grafo previamente definido para o efeito e carregado em memória, Figura 5.10. Para que o grafo seja visível e o utilizador possa autorizar a execução do processo de otimização, de acordo com a heurística pré-estabelecida, surge o GV e o respetivo menu de comandos (que será explicado na secção 5.3.3) sobre a VVPP.

SkeletorViewer

A opção “SkeletorViewer”, ou Visualizador de Esqueletos (SV), permite o acesso direto ao ambiente gráfico 3D do SV após ter sido selecionado da diretoria ...\\VOL\\IN\\ o patamar ou o caminho discretizado, a analisar. No SV é possível a visualização

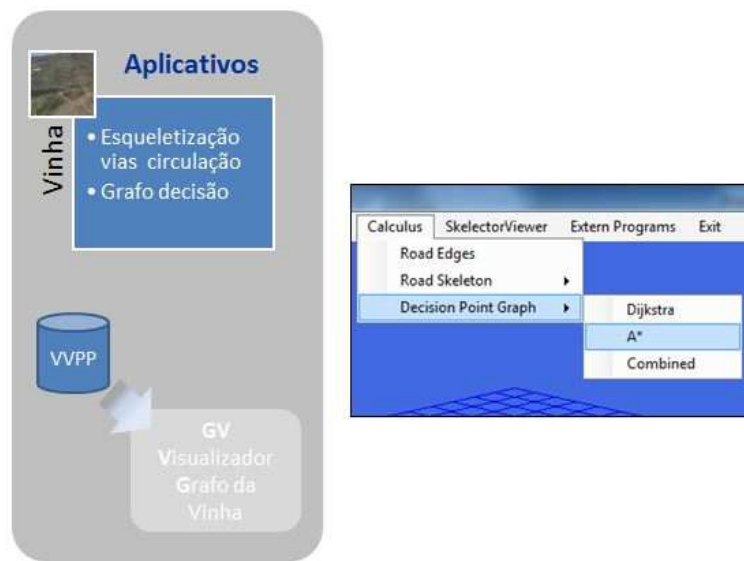


Figura 5.10 – Opção “Decision Graph” desencadeada em “Calculus”.

do conjunto de voxels que constituem essa via de circulação e os esqueletos entretanto determinados. A inspeção visual qualitativa pode ser efetuada no SV por observação da posição relativa dos esqueletos no interior das vias. Pode também fazer-se uma análise quantitativa, pela medição da função distância média adotada para a validação dos algoritmos. Este cálculo é despoletado pelo utilizador no menu vertical do SV. O ambiente SV é descrito mais à frente, na secção 5.3.2, onde são apresentados alguns resultados que conduziram à validação do algoritmo *Geometric*.

Extern programs

A opção “Extern programs”, ou Programas Externos, permite a execução de programas teste, por recurso às seguintes sub-opções:

- “Vol to txt”, ou Vol para txt, faz a decodificação do ficheiro *.VOL e cria a versão *.TXT com identificação dos parâmetros usados no processo de voxelização (número de voxels por direção principal, dimensão do voxel, posicionamento dos voxels de referência, entre outros). A subdiretoria inicial de pesquisa é:...\VOL\IN.

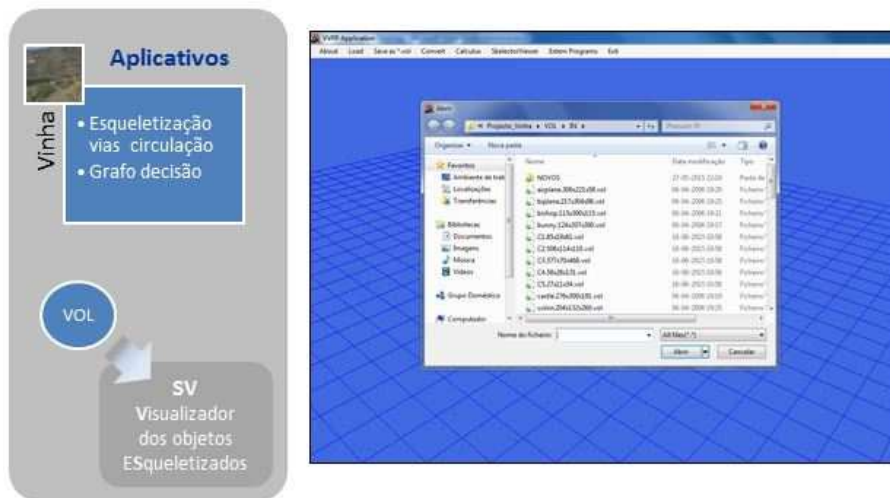


Figura 5.11 – Opção “SkeletorViewer” desencadeada no Menu Principal da VVPP.

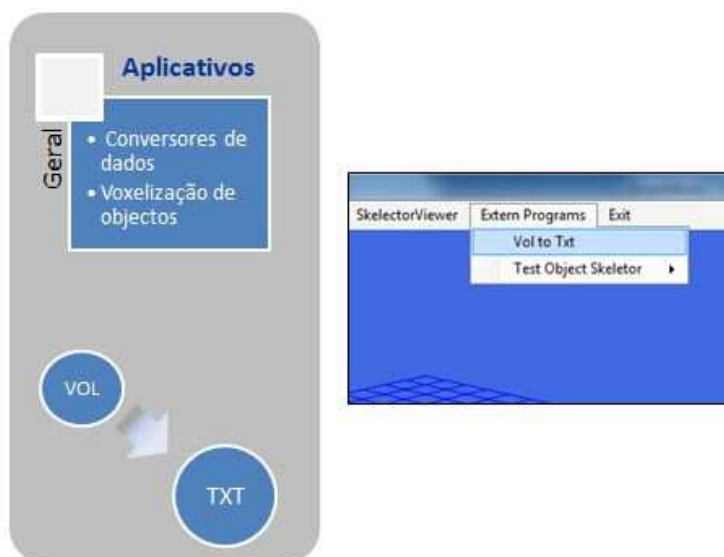


Figura 5.12 – Opção “Vol to txt” desencadeada no menu vertical “Test Programs”.

- “Test Object Skeletor”, ou Teste ao esqueletizador de objetos, permite testar os algoritmos de esqueletização adotados, desenvolvidos em C++, cuja versão executável é chamada aquando da seleção de uma das opções do menu vertical apresentado na Figura 5.13.

O objeto a esqueletizar, que é pesquisado na subdiretoria ...\\VOL\\IN\\ pode

não ser um patamar ou caminho da vinha pelo que o seu processo de referência não é executado. Os resultados são colocados na subdiretoria (da diretoria ...\\VOL\\OUT\\) cujo nome está associado ao algoritmo usado.



Figura 5.13 – Opção “Extern Programs ” desencadeada no Menu Principal da VVPP.

Exit

A opção “Exit ”, ou Saída, permite abandonar a aplicação VVPP.

5.2.2 Menu vertical

O menu vertical da aplicação VVPP é constituído por quatro grupos de opções, numerados pela ordem descendente (Figuras: 5.14 a 5.17) . Os três superiores estão associados à apresentação e manipulação de grandezas no ambiente gráfico 3D da VV e o inferior está associado às opções de planeamento de trajetórias. Deste modo, enquadraram-se os três primeiros grupos nas opções de manipulação gráfica e o último nas opções de planeamento de trajetórias.

Opções de manipulação gráfica

- No primeiro grupo, ou grupo do topo do menu vertical, Figura 5.14, incluem-se as opções que permitem apresentar ou esconder o MDE da vinha, os seus patamares ou caminhos individualmente, as linhas de condução, entre outros, no VV, previamente carregadas em memória. Apresentar se, ao ser seleccionada a caixa de selecção com o rato, nela for inserido um visto (✓) e esconder, em caso contrário. Como o VV aparece no centro da VVPP, não se sobrepondo aos seus menus horizontal e vertical, o utilizador pode simultaneamente seleccionar as caixas de validação do menu vertical da VVPP e visualizar no VV o resultado da sua ação.

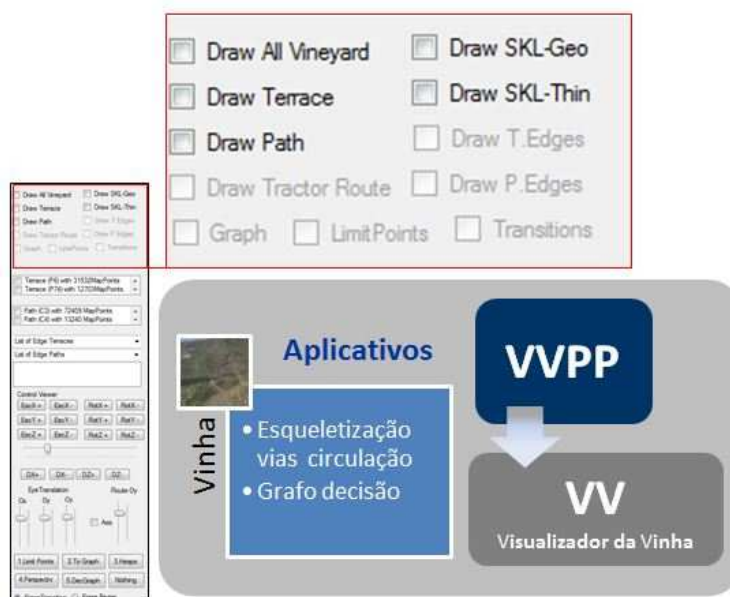


Figura 5.14 – Grupo de opções do topo, do menu vertical da VVPP.

Incluem-se no primeiro grupo as opções:

- “Draw All Vineyard”, Desenho da totalidade da vinha, que permite a visualização do MDE da vinha no VV, se previamente em memória, i.e., quando a caixa de validação puder ser picada e o seu nome aparecer escrito a negrito;

- “Draw Terrace”, Desenho dos patamares e “Draw Path”, Desenho dos caminhos, que permitem a representação no VV dos patamares e caminhos selecionados no grupo 2 das opções do menu da VVPP (descritas na subsecção 5.2.1), quando carregados em memória (através da opção “xls to dat”);
- “Draw T. Edges”, Desenho dos limites dos patamares e “Draw P. Edges”, Desenho dos limites dos caminhos, que permitem a representação no VV desses limites, previamente carregados em memória, através da opção “xls to dat” e selecionados no segundo grupo (descritas na subsecção 5.2.1);
- “Draw Tractor Route”, Desenho da rota do trator, que permite a apresentação da rota do trator sobre a vinha, se previamente carregada em memória, i.e., aquando da sua determinação através da opção “xls to dat” e quando a caixa de validação puder ser picada e o seu nome aparecer escrito a negrito;;
- “Draw SKL-Geo”, Desenho do esqueleto *Geometric* e “Draw SKL-Thin”, Desenho do esqueleto *Thinning*, que permitem a representação no VV dos esqueletos obtidos pelos algoritmos especificados, previamente carregados em memória, aquando da sua determinação através das opções “Calculus” ou “Extern programs”, respetivamente;
- “Graph”, Grafo, que desenha na vinha os pontos extremos dos esqueletos das vias de circulação, considerados como vértices no grafo do mapa da vinha. Uma vez que esta opção e as duas opções que se referem de seguida estão associadas diretamente ao planeamento de trajetórias e só estão disponíveis após seleção das do quarto grupo (opções do menu vertical da VVPP), apenas são descritas adiante na subsecção 5.3.3.
- “Limit Points”, Pontos limite do esqueleto e “Transitions”, Transições, que permitem, quando validadas, representar sobre a vinha os pontos limite dos esqueletos das vias de circulação e as transições, previamente determinados e carregados em memória, no VV.

- No segundo grupo, ou grupo acima do meio do menu vertical da VVPP, Figura 5.15, incluem-se as opções que, quando selecionadas, permitem a visualização dos patamares ou caminhos, a cor diferente para destaque, sobre o MDE da vinha apresentado no VV. Incluem-se no segundo grupo quatro menus dinâmicos de seleção, os dois em cima com caixas de validação e os dois em baixo sem estas e apenas com a identificação do número de pontos que as representam.

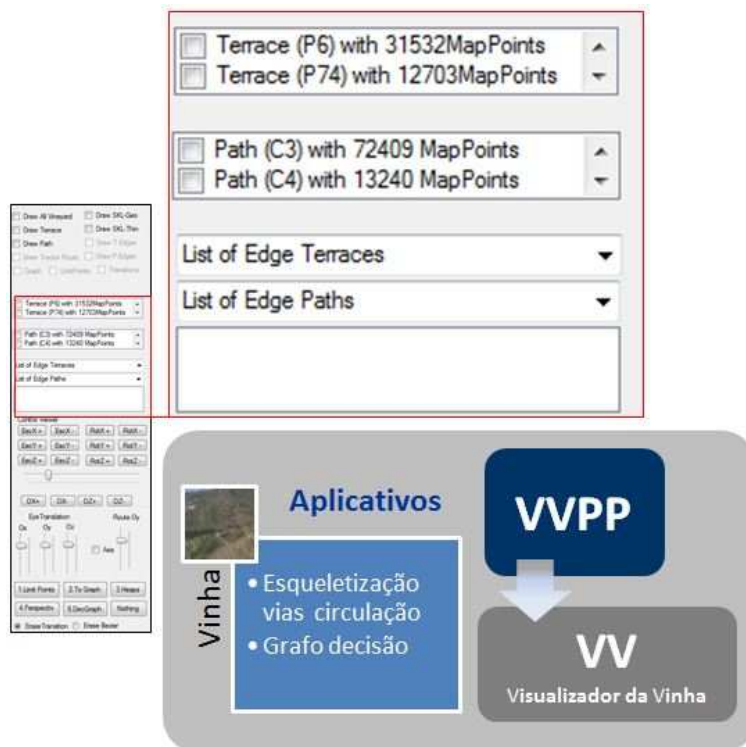


Figura 5.15 – Grupo de opções acima do meio, do menu vertical da VVPP.

- No terceiro grupo, ou grupo abaixo do meio do menu vertical, identificado por “Control Viewer”, Figura 5.16, incluem-se as opções que permitem controlar a perspetiva de visualização da imagem que é apresentada no VV. Apenas é visível o efeito da seleção de cada uma das opções quando a vinha tiver sido desenhada.

Incluem-se no terceiro grupo as opções:

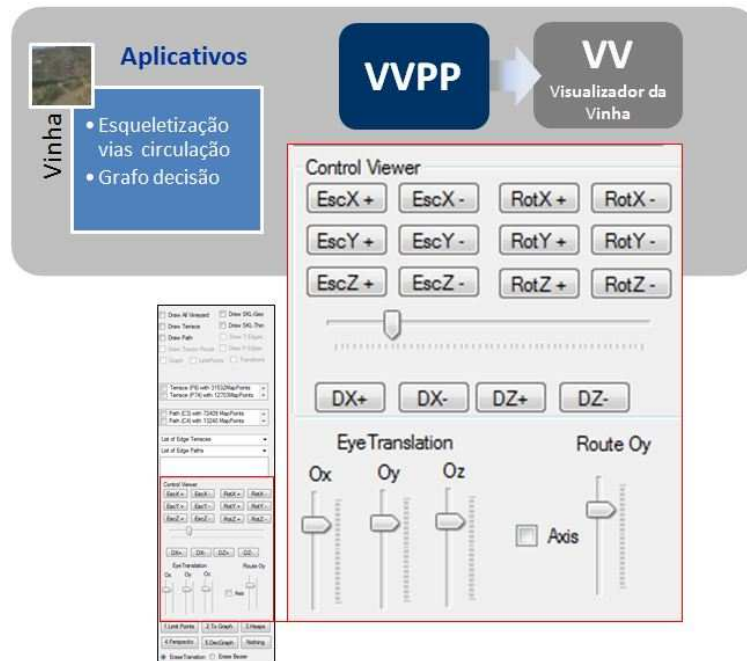


Figura 5.16 – Grupo de opções abaixo do meio no menu vertical da VVPP.

- “EscX+”, “EscX-”, “EscY+”, “EscY-”, “EscZ+” e “EscZ-” que aumentam (+) ou diminuem (-) a escala de cada um dos eixos principais (X, Y, Z) desenhados no VV quando a caixa de validação da opção “Axis”, mais abaixo neste grupo, se encontra ativa. Em relação ao referencial global da vinha as direções principais X, Y e Z coincidem com as direções este, norte e altura, respetivamente.
- “RotX+”, “RotX-”, “RotY+”, “RotY-”, “RotZ+” e “RotZ-” que permitem rodar a vinha desenhada no VV, no sentido horário (+) ou anti-horário (-) em torno de cada um dos seus eixos principais (X, Y, Z) posicionados no centro do paralelepípedo que a envolve (Figura 5.21).
- Régua horizontal que permite ampliar ou reduzir a imagem da vinha no VV, por deslocação do seu marcador de posição para a direita ou esquerda.
- “DX+”, “DX-”, “DZ+” e “DZ-” que permitem efetuar a translação da origem do sistema de eixos principais da vinha, em relação à posição atual: segundo as direções X ou Z; DX+ para a direita, DX- para a

esquerda, DZ+ para cima e DZ- para baixo.

- Régua verticals “Ox”, “Oy” e “Oz” que permitem efetuar a translação do ponto de observação (olho). A movimentação para cima e para baixo do marcador da posição em cada uma das régua equivale a afastar ou aproximar, respetivamente, o olhos nas direções principais (X,Y,Z).
- Régua vertical, “Route Oy”, que permite subir ou descer a posição relativa do conjunto de pontos que definem a rota do trator.

Opções de planeamento de trajetórias

No âmbito do planeamento de trajetórias, para seleccionar os troços da vinha a usar como ilhas de cobertura e para definir os pontos de origem e de destino do trator, são disponibilizadas no menu vertical da aplicação VVPP um conjunto de opções, numeradas e identificadas segundo a designação da função que desempenham, Figura 5.17. Estas, incluídas no quarto grupo de opções do menu vertical da VVPP, só deverão ser seleccionadas após apresentada a vinha no VV e determinados os troços esqueleto que representam as linhas de condução em cada troço da vinha.



Figura 5.17 – Grupo de opções do fundo, no menu vertical da VVPP.

As opções, que devem ser utilizadas segundo a sua numeração, são:

- “1. Limit Points”, que determina de forma automática o conjunto das transições da vinha. O processo consiste na determinação das seguintes grandezas que caracterizam uma transição:
 - das vias de circulação vizinhas (avaliando se existe passagem entre a via de circulação do esqueleto e as restantes vias), para todos os esqueletos e para cada ponto extremo;
 - dos pontos limite (neles se incluem, em cada transição, o extremo do esqueleto (P_0) e os pontos E_1 e E_2 de interseção da curva esqueleto da transição vizinha com a circunferência definida pelos seguintes parâmetros: raio, igual à menor distância entre o ponto extremo e a curva esqueleto da via de circulação vizinha; origem, ponto médio da menor distância (P_{Med}));
 - das curvas de *Bézier* e do troço do esqueleto interior aos pontos limite E_1 e E_2 (sendo estas as novas linhas de condução para transposição da transição entre patamares vizinhos), representados na Figura 5.18.

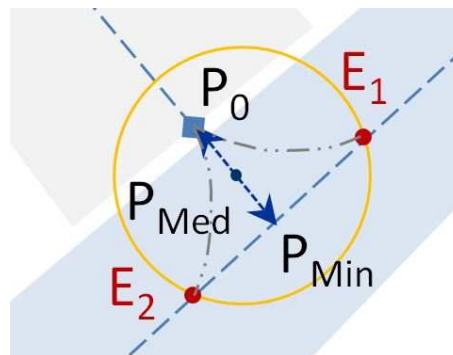


Figura 5.18 – Parâmetros da Transição.

Após executada esta opção, passam a estar ativas as opções “Limit Point”, “Transition” e “Graph” do primeiro grupo de opções do menu vertical da VVPP, anteriormente referidas.

- “2. To Graph”, que permite transferir para o grafo do mapa da vinha as posições dos pontos limite que identificam todas as transições da vinha e que são considerados pontos de tomada de decisão no planeamento de trajetórias.

Esta opção só deverá ser ativada após selecionada a opção “1. Limit Points”. Apresenta de seguida, no visualizador 2D do Grafo do Mapa da Vinha, o referido grafo cujos vértices são as posições dos pontos limite determinados e os arestas o conjunto de troços entre pontos limite, nestes incluindo os esqueletos determinados pelo método adotado, suas partições (caso tenham sido subdivididos) e as curvas de *Bézier*. Na subsecção 5.3.3 apresenta-se uma descrição sobre a forma como a informação do grafo é disponibilizada no visualizador GV.

- “3. Heaps”, que permite gerar o conjunto de todas as permutações possíveis de um conjunto de patamares ou caminhos selecionados para cobertura, por recurso a um algoritmo (Heap, 1963). Após seleção da opção “4. Perspectiv”, que se descreve em seguida, é apresentado o resultado da permutação via algoritmo *Heap*.
- “4. Perspectiv”, que permite a apresentação no VV de uma vista de topo da vinha com os patamares e caminhos selecionados para cobertura, Figura 5.19. A seleção foi previamente efetuada picando o rato sobre os patamares, os caminhos ou troços destes, identificados no VV por semirretas limitadas pelos pontos extremo após definidas as transições. Esta opção altera o aspeto do menu vertical da VVPP, nele inserindo mais uma janela de visualização e dois botões para seleção dos pontos de partida e chegada, definidos para o problema de planeamento de trajetórias. Na Figura 5.20 é visível o conjunto de permutações gerado aquando da seleção dos patamares P7, P8 e P9. Como os movimentos se podem efetuar nos dois sentidos em cada patamar, as permutações têm de considerar essa situação, pelo que foi escolhida a designação P8A para movimento no sentido A e P8B para o movimento no sentido B.
- “5. DecGraph”, que permite gerar de forma automática a estrutura de decisão para planeamento de trajetórias, tendo como resultado o trajeto ótimo para a navegação usando a heurística e o algoritmo especificados no capítulo 4. Uma análise comparativa dos resultados é descrita nesse capítulo bem como, de uma forma mais formal, o modo o algoritmo é aplicado.

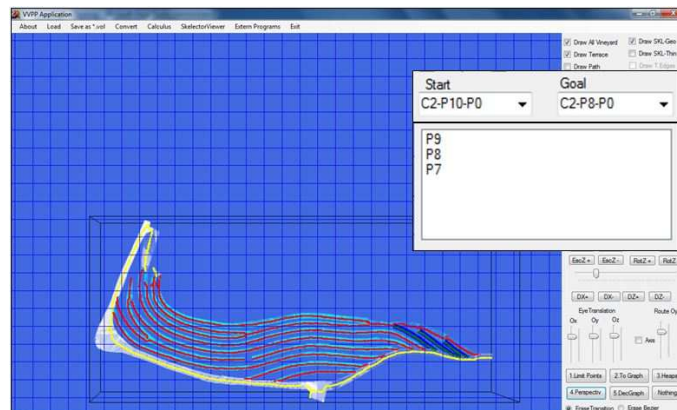


Figura 5.19 – Perspetiva da vinha com a seleção dos patamares para cobertura.

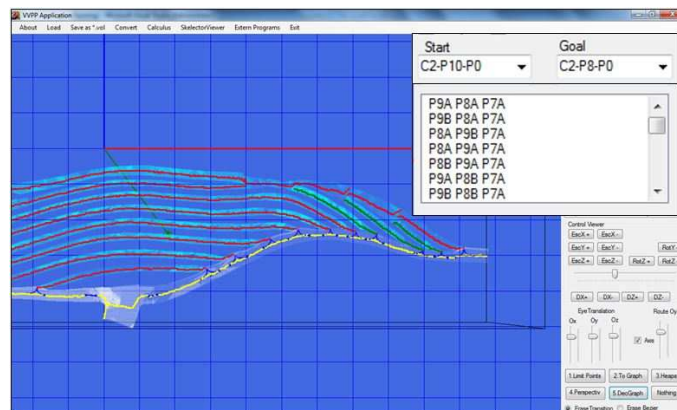


Figura 5.20 – Seleção dos pontos de partida e chegada e permutações dos patamares para cobertura.

- “Nothing”, que apenas foi colocada para facilitar a ativação futura de outro método.
- “Erase Transition” e “Erase Bezier”, que permitem eliminar manualmente uma transição ou curva de *Bézier* apresentada na imagem e previamente selecionada pela sua referência através do botão esquerdo do rato.

5.3 Resultados nos ambientes gráficos

Com o objetivo de apresentar os resultados das diferentes fases do trabalho e a aplicação do algoritmo combinado de planeamento de trajetórias, é proposta nesta secção a resolução de um problema de cobertura de três patamares consecutivos na vinha. Para avaliação da eficiência do algoritmo a solução encontrada é comparada, gráfica e quantitativamente, com a rota do trator efetuada por um perito, numa operação de destroçamento de vimes. Aproveita-se o caso em estudo para apresentar algumas funcionalidades da VVPP (já descritas anteriormente na secção 5.2) e os ambientes gráficos em que estas se desenvolvem.

5.3.1 Visualizador da Vinha (VV)

Para que o MDE da vinha seja apresentado no VV, e nele destacados os patamares para cobertura, é necessário que o utilizador execute, inicialmente, os seguintes procedimentos:

- Converta para formato binário a informação dos levantamentos (o que compreende o MDE da vinha e o percurso efetuado pelo trator). Estas ações são realizadas pela seleção da opção “Convert” do Menu Principal da VVPP, seguida da opção “xls do dat” e a identificação, nas diretorias sugeridas pela aplicação, do nome dos ficheiros a converter (do formato *.EXE para *.DAT).
- Carregue em memória (pela seleção da opção “Load” seguida da “Vineyard Map Points”, no caso do MDE da vinha; ou da mesma opção seguida da “Tractor Navigation Routes”, no caso da rota do trator) os ficheiro convertidos (em formato *.DAT) previamente colocados, pela VVPP, nas respetivas diretorias. Estes mantêm-se guardados em memória enquanto o utilizador não sair da aplicação (opção “Exit”, subsecção 5.2.1).
- Ative as caixas de seleção (com ✓) das opções “Draw All Vineyard” e “Draw Terrace”, ambas disponíveis no menu vertical da VVPP; a última após especificados os patamares a representar de cor diferente da dos restantes.

- Ative a caixa de seleção (com ✓) da opção "Axis" no menu vertical da VVPP, caso pretenda ver o sistema de eixos de referência.

Como resultado, é possível reconhecer no VV: os patamares, a cor cian; os caminhos, a branco; e os patamares selecionados, a azul. Os patamares P7, P8 e P9 foram selecionados por terem sido estes os escolhidos para cobertura. A vinha encontra-se envolta num paralelepípedo transparente de arestas pretas, no centro do qual se posiciona e orienta o sistema de eixos coordenados este (a vermelho), norte (a azul) e altura (a verde), Figura 5.21.

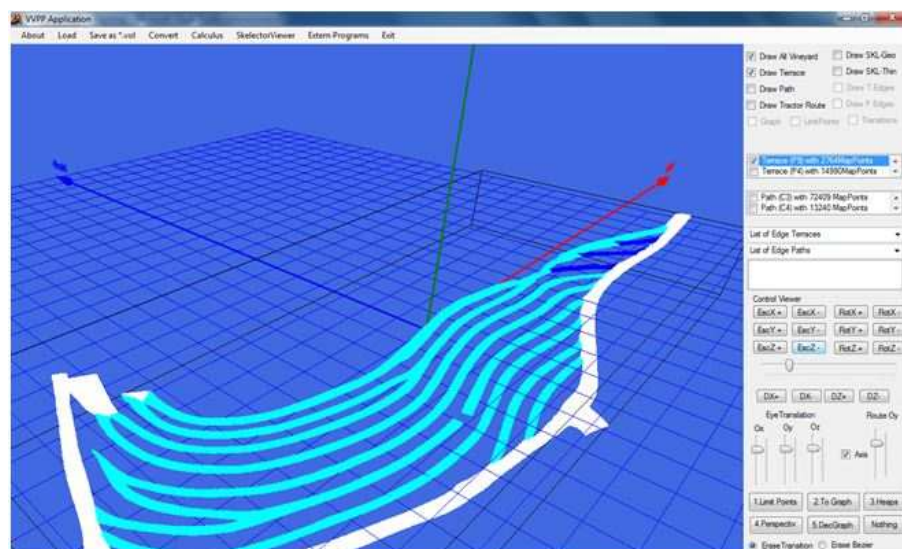


Figura 5.21 – Visualizador da Vinha na VVPP.

O observador pode colocar-se noutra posição; o sistema de eixos pode ser deslocado para que o MDE seja integralmente visível no VV; a vinha pode ser rodada em torno de um dos seus eixos; entre outras ações para alterar a sua perspetiva. Em relação ao referencial da vinha, na vista 1 o observador encontra-se numa posição a noroeste; na vista 2, a nordeste num ponto mais afastado; e na vista 3, um pouco mais a nordeste do que na vista 2, mas com uma visão ampliada, Figura 5.22.

No VV podem ser representadas as linhas de condução determinadas pelos métodos de esqueletização. Assim, após terem sido obtidas pela seleção de uma sequencia de opções do menu principal da VVPP ("Calculus" seguida de "Road Skeleton" e da

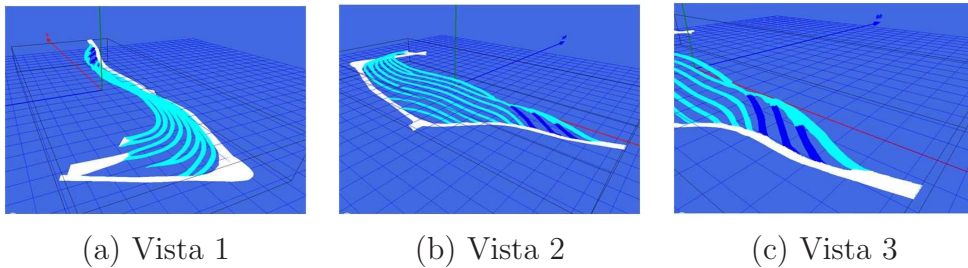


Figura 5.22 – Vistas da vinha no VV em diferentes perspectivas.

especificação de um dos métodos), os esqueletos podem ser apresentados no VV, a diferente cor (vermelho, SKL-Geo e laranja, SKL-Thin) (com ou sem representação a preto dos seus extremos) desde que selecionado o método, por validação na respetiva caixa (com ✓), no menu vertical da VVPP, Figuras 5.23 e 5.24.

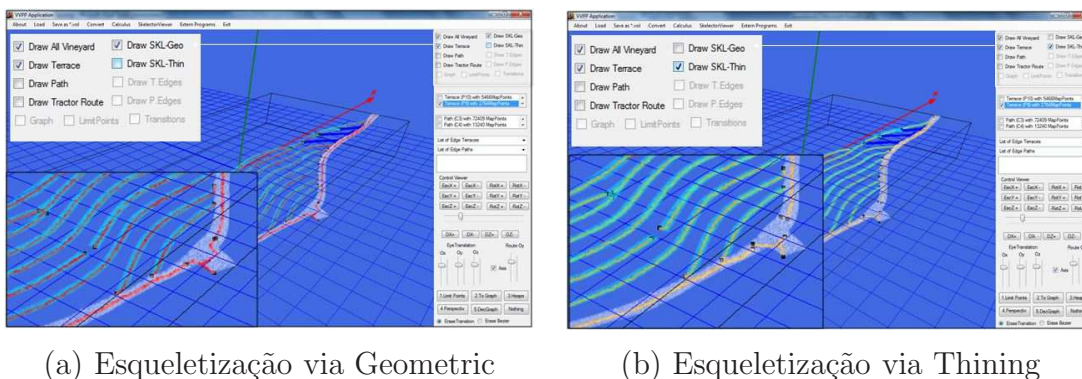


Figura 5.23 – Vistas do VV em duas situações distintas com sobreposição de pormenores ampliados (parte menu vertical da VVPP e uma zona da imagem).

5.3.2 Visualizador de Esqueletos

O visualizador de esqueletos (SV) pode ser ativado pela opção “Skeletor Viewer”, como referido na subsecção 5.2.1. Permite mostrar, num ambiente gráfico 3D, um patamar ou um caminho previamente selecionado, os respetivos esqueletos, obtidos por diferentes métodos de esqueletização, e o troço da rota do trator usado como referência para comparação dos métodos de esqueletização. Para que a sobreposição de imagens seja efetuada corretamente, os ficheiros têm que estar nas diretorias

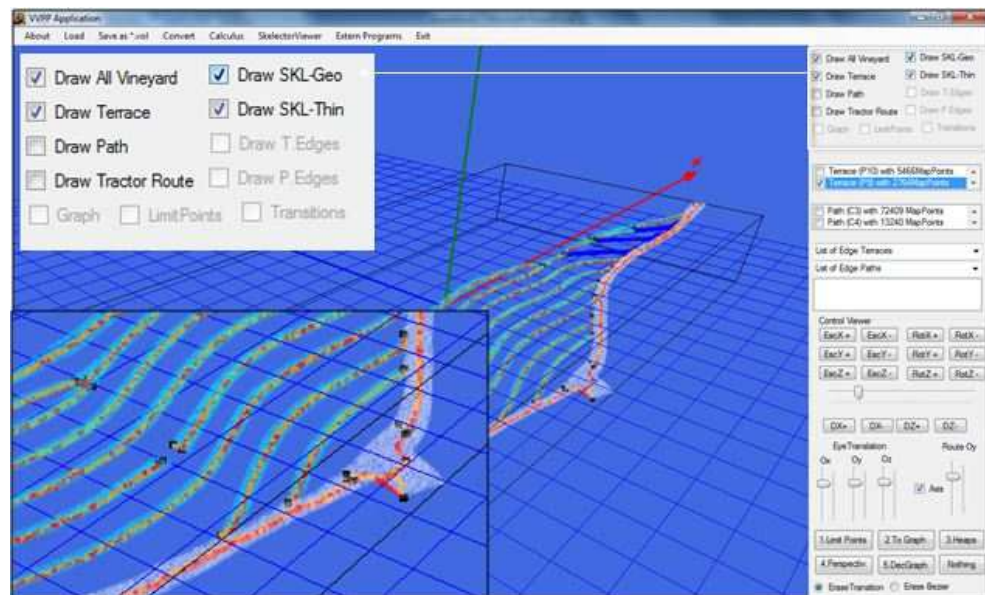


Figura 5.24 – Vista do VV com apresentação conjunta de dois tipos de esqueletos. Imagem alterada para identificação dos pormenores ampliados.

adequadas e terem sido guardados pela VVPP durante os processos de esqueletização e de discretização do troço da rota do trator associada ao respetivo patamar ou caminho. Só assim se garante que o processo de voxelização foi conduzido da mesma forma e usando o mesmo sistema de referenciação. O ambiente do SV é semelhante ao da VVPP, uma vez que possui uma parte central para representação gráfica dos objetos selecionados e um menu vertical no lado direito, estendendo-se em altura do cimo ao fundo do SV. Não dispõe de menu horizontal (Figura 5.25).

O menu vertical do SV é constituído por dois grupos de opções. O primeiro contém as opções que permitem manipular a imagem e o segundo aquelas que possibilitam a seleção dos elementos a desenhar e as que determinam a média da função distância no plano (2D) e no espaço (3D) entre os esqueletos e a rota do trator.

Como se pode verificar pela observação da Figura 5.25, no SV apresenta-se um patamar, que dificilmente se reconhece como o patamar P7. As opções do primeiro grupo permitem aproximar e rodar o patamar para que nele sejam reconhecidos os esqueletos sobrepostos ou o troço da rota do trator, quando selecionados.

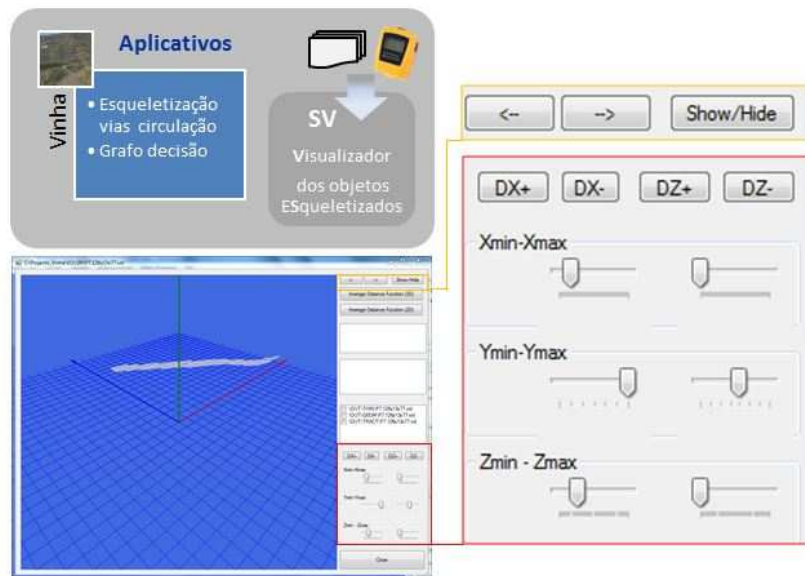


Figura 5.25 – Opções de manipulação da imagem no menu vertical do SV.

Incluem-se no primeiro grupo as opções:

- “←” , roda no sentido anti horário o ponto de observação da imagem sobre o eixo Y (ou altura, representado a cor verde);
- “→” , roda no sentido horário o ponto de observação da imagem sobre o eixo Y (ou altura, representado a cor verde);
- “Show/Hide”, ou Esconde/Mostra, esconde ou mostra a imagem no SV (não retira o referencial);
- “DX+”, e “DX-”, deslocam a imagem e o referencial que a acompanha, segundo a direção 0X (este, representado a cor vermelha), no sentido positivo e negativo, respetivamente;
- “DZ+”, e “DZ-”, deslocam a imagem e o referencial que a acompanha, segundo a direção 0Z (norte, representado a cor azul), no sentido positivo e negativo, respetivamente;
- “Xmin–Xmax”, faz um corte perpendicular ao eixo X, limitando o número

de voxels apresentados, apenas mostrando a imagem entre os voxels X_{min} e X_{max} ;

- “ $Y_{min}-Y_{max}$ ”, faz um corte perpendicular ao eixo Y, limitando o número de voxels apresentados, apenas mostrando a imagem entre os voxels Y_{min} e Y_{max} ;
- “ $Z_{min}-Z_{max}$ ”, faz um corte perpendicular ao eixo Z, limitando o número de voxels apresentados, apenas mostrando a imagem entre os voxels Z_{min} e Z_{max} ;

Incluem-se no segundo grupo de opções do menu vertical do SV duas opções no topo, seguidas de duas caixas de saída e de uma janela para seleção por caixa de validação (com ✓), e ainda uma opção que permite fechar o SV, Figura 5.26. A figura apresenta o segundo grupo de opções ampliado, para o caso em estudo, aquando da ativação do SV através da seleção do patamar P7. Simultaneamente, é iniciada a procura em todo o sistema de diretorias da VVPP de ficheiros com o mesmo nome. O processo termina com a apresentação na janela inferior do menu de um conjunto de opções (sob a forma de caixa de validação). Estas permitem a representação, no referencial adotado, dos objetos contidos em cada um dos ficheiros validados. Como o nome das diretorias sugere, de acordo com o sistema de diretorias da VVPP anteriormente explicado, Tabela 5.1, e o nome dos ficheiros identifica, os objetos neste caso não ocupam mais do que um volume de $126 \times 13 \times 77$ voxels. Contêm no seu interior, respetivamente, numa leitura de cima para baixo, os esqueletos do patamar P7 obtidos pelos algoritmos *Thinnig* e *Geometric* e o troço da rota do trator ao circular nesse patamar.

As opções de cálculo da média da distância entre cada patamar e o troço da rota do trator nesse patamar são: “*Average Distance Function (2D)*”, Média da função distância (2D), e “*Average Distance Function (3D)*”, Média da função distância (3D). Permitem o cálculo do valor médio da função que determina a distância entre os pontos que definem o esqueleto e aqueles que definem o troço da rota do trator em cada patamar, recorrendo apenas às suas coordenadas planimétricas (norte e este, no caso 2D) ou às suas três coordenadas (norte, este e altura, no caso 3D).

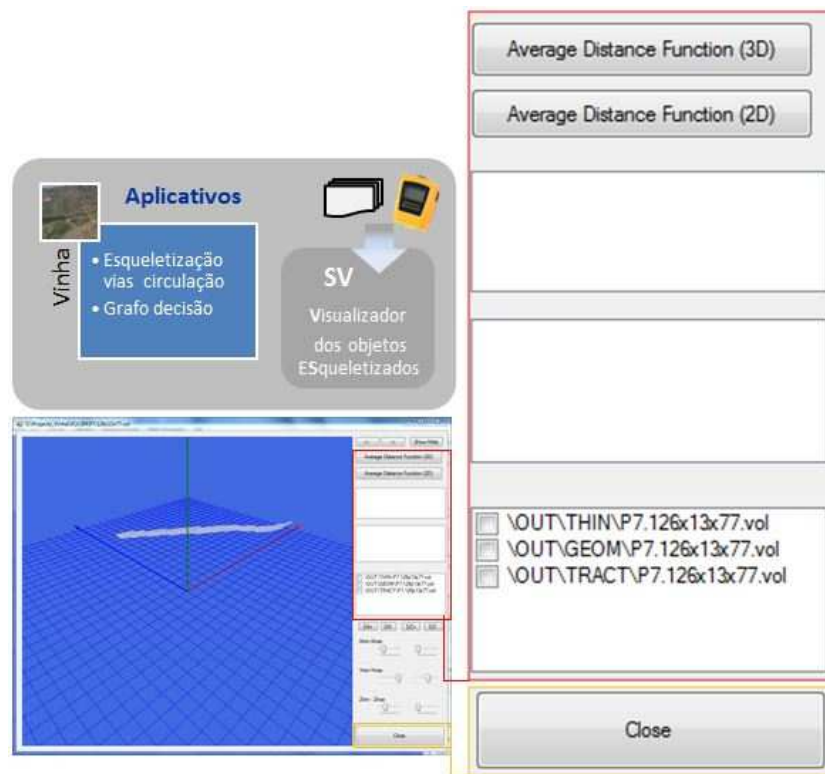


Figura 5.26 – Outras funcionalidades no menu vertical do SV.

Na Figura 5.27 apresentam-se ampliados os pontos da rota do trator e dos esqueletos determinados pelos métodos de esqueletização selecionados, sobre o patamar P7. No menu vertical do SV são apresentados os valores médios das distâncias (2D e 3D), métrica adotada e explicada no capítulo 3.4.2. Como se pode observar estes valores são menores para o algoritmo *Geometric*, motivo pelo qual foi o adotado uma vez verificado que esta tendência se mantinha para a totalidade dos patamares da vinha.

5.3.3 Visualizador do Grafo do Mapa da Vinha

O Visualizador do Grafo do mapa da vinha, o GV (**G**raph **V**iewer), reserva um espaço central para a representação do grafo (previamente carregado em memória) e um espaço para duas funcionalidades específicas: uma para sair do GV e outra para iniciar a aplicação do algoritmo combinado desenvolvido. Este servirá para resolver o problema da procura do caminho ótimo numa árvore de decisão. Como

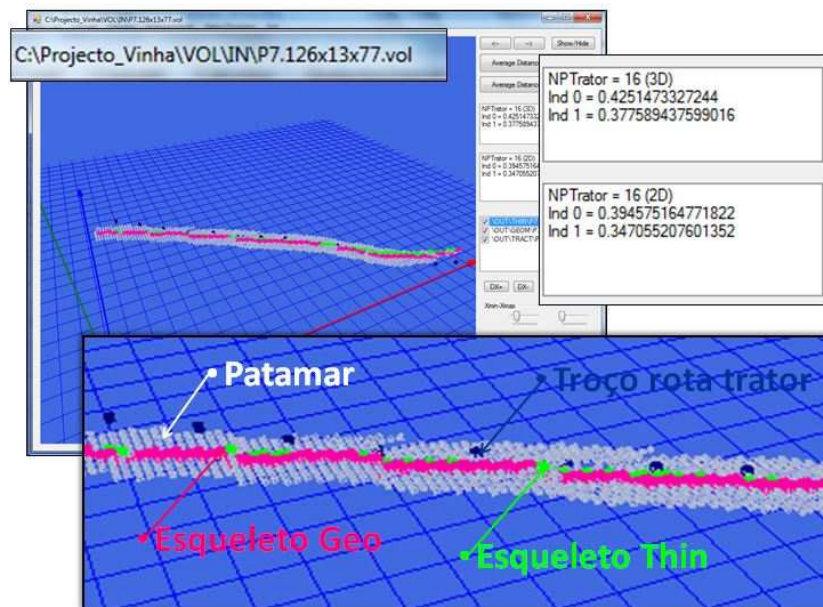


Figura 5.27 – Representação gráfica e analítica da distância para o patamar P7.

referido no capítulo 4, cada tronco representa a soma dos percursos desde um ponto de partida a cada sequência diferente de percursos possíveis (determinados por permutação dos patamares ou caminhos selecionados para cobertura) e do ponto final dessa sequência, ao ponto de chegada. Os pontos de partida e de chegada foram previamente estipulados.

Na Figura 5.28 encontra-se representado o conjunto de vértices e de arestas que constituem o mapa do topológico da vinha. O conjunto da informação encontra-se formatado (como explicado no capítulo 4) de acordo com a nomenclatura definida para as transições (subsecção 5.2.2, opção “1. Limit Points”).

Para tornar o visualizador mais apelativo, pode considerar-se a representação gráfica 2D do grafo do mapa da vinha. Contudo, dado o número de vértices que um grafo deste tipo apresenta, terão de ser implementadas outras funcionalidades: uma lupa dinâmica, onde qualquer zona possa ser visualizada em pormenor, uma janela de informação para apresentação dos pesos associados a cada vértice e a cada aresta do grafo, ou um menu para a alteração do tipo de algoritmo ou heurística a adotar.

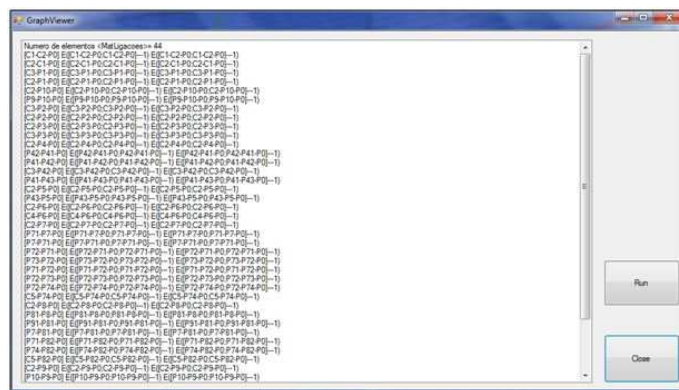


Figura 5.28 – Visualizador do grafo do mapa da vinha.

5.4 Desenvolvimentos na VVPP

Nesta secção são indicadas as limitações encontradas e sugerem-se caminhos para desenvolvimentos futuros.

O número de opções e a ordem pela qual são apresentadas ao utilizador devem ser alterados quando criada uma versão final da VVPP. O número de opções deve ser diminuído, na medida em que muitas foram implementadas na fase de teste e validação dos métodos que se foram desenvolvendo. Uma vez testado o seu funcionamento, pela apresentação dos resultados intermédios, e efetuada a sua validação, podem deixar de figurar na interface (a não ser que sejam interessantes do ponto de vista didático ou para esclarecer o utilizador na tomada de decisão subsequente). A ordem pela qual são apresentadas deve consequentemente ser alterada, uma vez que a importância relativa das funcionalidades é modificada quando se deixa de pensar num produto em desenvolvimento e se passa a considerar um produto final, com objetivos últimos mais precisos.

Algumas das funcionalidades podem também ser melhoradas, nomeadamente explorando aspetos associados ao planeamento de trajetórias, abrindo a possibilidade de recurso a novas heurísticas, ou mesmo alterando o tipo de abordagem utilizada, mantendo embora o tipo de problema e a utilização da procura do caminho ótimo numa árvore de decisão baseada no grafo do mapa da vinha.

6

Conclusão

Neste capítulo, é efetuada uma análise do trabalho na sua globalidade, retirando as devidas conclusões. São apontadas as contribuições relevantes e efetuada a sua discussão crítica. É ainda avaliada a forma como o trabalho poderá ser complementado ou servir de incentivo para trabalhos futuros.

6.1 Contribuições

Com a realização deste trabalho foram dados contributos em quatro áreas distintas:

- Em termos de levantamento de dados georeferenciados para criar um MDE num SIG, foi criada uma nova técnica, direcionada para as vinhas em patamares ([Contente et al., 2013](#)).

Através de um levantamento **estático** de pontos, com correção diferencial em modo tempo real cinemático (RTK) através da rede SERVIR, foi especificamente determinado o MDE da parcela da vinha em estudo, com uma precisão média de 10 cm, através da utilização do conjunto de procedimentos que constituem uma nova técnica. Esta, apresentada em pormenor, poderá servir para levantamento de outras vinhas da Região Demarcada do Douro (RDD).

Esta técnica permitiu criar um mapa altimétrico detalhado e preciso das vias de circulação na vinha e recolher, em diferentes posições, informação variada e independente numa estrutura de dados criada para o efeito e que num sistema SIG é armazenada em camadas temáticas independentes sendo relacionáveis, de forma rápida e simples, por sobreposição.

- Em termos de navegação, foram dados dois contributos para a condução de um veículo móvel na vinha:
 - um, na validação de um equipamento GNSS diferencial, MobileMapper 100 (Astech, France), de duas frequências, com sistema modem integrado (GSM/GPRS), software dedicado e equipamento associado, como referido na subsecção 3.3.1 (Contente et al., 2015a);
 - e outro, na verificação da possibilidade de usar algoritmos de esqueletização para obter linhas de condução de forma semiautomática. A aplicação de dois algoritmos distintos: um, de adelgaçamento (Palágyi e Kuba, 1999) e outro, geométrico (Cornea et al., 2007) apresentou bons resultados, com um erro de distância médio inferior a quarenta centímetros entre a rota efetuada e o esqueleto (Contente et al., 2015b).

A validação do equipamento GNSS foi efetuada com recurso a um levantamento **dinâmico** durante a pulverização automatizada da vinha, com um trator de médio porte conduzido por um tratorista experiente, que depois foi corrigido em pós-processamento, via rede SERVIR. Consistiu na verificação de que as rotas caíam no interior das superfícies de circulação determinadas no MDE da vinha, resultante de levantamento estático com o mesmo equipamento (subsecção 3.3.3).

Os algoritmos de esqueletização foram aplicados à totalidade dos troços cobertos pela rota do trator e o erro de distância foi calculado segundo uma métrica especificada na subsecção 3.4.2 para cada ponto do troço da rota do trator em relação à linha que define o esqueleto do troço (subsecção 3.4.3).

- Em termos de planeamento de trajetórias, foi desenvolvido um algoritmo combinado para determinação do trajeto ótimo de aproximação e cobertura de

ilhas dispersas da vinha. Este, utilizando simultaneamente os algoritmos A* e Dijkstra, permitiu determinar a sequência ótima de troços das linhas de condução (Contente et al., 2016).

O sistema de decisão, implementado sob a forma de árvore, foi suportado por um grafo contendo a informação do Modelo Digital de Elevação (MDE) da vinha. O critério de escolha do trajeto ótimo foi determinado por minimização de uma função ponderada dependente da distância, do custo e do tempo. A solução testada apenas considerou o parâmetro distância; contudo, evidenciou a importância do planeamento de trajetórias, uma vez que a sequência de troços planeados diminuiu em aproximadamente 40% a distância percorrida pelo tratorista. Implicitamente, a abordagem contemplou a determinação dos pontos ótimos para iniciar e terminar cada área de cobertura dispersa na vinha.

- Um contributo não menos importante foi dado na criação e desenvolvimento de uma aplicação gráfica de apoio à navegação, onde foi possível testar e validar as contribuições anteriores. A aplicação gráfica de visualização e de planeamento de trajetórias desenvolvida possibilitou a representação do MDE da vinha e a visualização dos seus pormenores num ambiente gráfico com características OpenGL. Usando a aplicação, podem ser observadas diferentes projeções da vinha bem como os pontos limite dos patamares e dos seus caminhos de acesso, as linhas da trajetória efetuada pelo trator em diferentes operações de cultivo e manutenção e as linhas esqueleto. A aplicação permite ainda a seleção e a execução dos diferentes métodos de esqueletização e o planeamento de trajetórias implementados no decorrer deste trabalho. Por ter sido estruturada de forma modular, deixa em aberto a possibilidade de ser expandida a sua função inicial para incluir ferramentas de condução a aplicar diretamente no trator para que o perito possa testar as suas funcionalidades.

6.2 Discussão crítica

A escolha do GPS revelou ser uma tarefa muito importante na medida em que inicialmente se tinha previsto usar um equipamento de baixo custo pensando ser

suficiente a sua precisão para os objetivos pretendidos. Contudo, dadas as características do terreno, verificou-se a necessidade de adquirir um equipamento com precisão centimétrica. Esta só foi alcançada com equipamento gentilmente cedido para o efeito pelo Departamento de Geologia da UTAD, tendo também sido usados gratuitamente a estação total, o software de GIS e as licenças para receber dados do SERVIR.

Só foi possível validar este equipamento, em modo de funcionamento com correção em pós-processamento, no planeamento de trajetórias.

Em termos gerais, o custo do levantamento pode ser estimado num valor superior a quinze mil euros, recursos financeiros elevados de que nem sempre um proprietário pode dispor.

Para a navegação recomenda-se a aquisição de um equipamento GPS que funcione, com uma precisão igual ou superior, em modo de levantamento dinâmico com correção diferencial em tempo real da rede SERVIR ou com recurso a estação local.

A aplicação de algoritmos de esqueletização às vias de circulação revelou-se muito importante para a determinação das linhas de condução. Neste trabalho apenas foram aplicados com resultados satisfatórios dois algoritmos, tendo sido validado aquele que minimizou o erro quadrático médio entre a curva esqueleto e a rota do veículo. Foi verificado que ambos podiam ser utilizados, dependendo da forma como as vias de circulação se orientavam preferencialmente numa direção. A validação do algoritmo com um erro médio de aproximadamente quarenta centímetros só se justifica quando se admite que o trator não circulou efetivamente sobre a linha central da superfície que no MDE foi determinada como via de circulação. Isto é, como a operação cultural foi efetuada quando a expansão vegetativa da planta estava próxima do seu valor máximo e apesar de o trator ter tendência para se aproximar da planta, o rasto deixado por operações anteriores levou a linha de condução mais para o lado do talude, num valor que se estima de vinte a trinta centímetros, em zonas onde não existe planta e nas zonas a pulverizar, respetivamente.

Nos seus extremos e sobre as zonas de transição, ou nos caminhos com configuração

menos uniforme que não se desenvolvem segundo uma direção privilegiada, os resultados da aplicação de algoritmos de esqueletização diferiram do troço da rota efetuada pelo trator. Analisada a situação, duas causas foram identificadas: número insuficiente de pontos do troço da rota e troço da rota afastado da linha central da transição. Deste modo, abandonou-se a ideia inicial da determinação automática das linhas de condução e optou-se pela semiautomática. Assim, nas zonas de transição, na definição do percurso para a sua transposição recorreu-se a curvas de *Bézier* para unir os extremos das vias de circulação vizinhas, definidas pelos respetivos esqueletos. Contudo, como os processos de esqueletização são geralmente mais sensíveis à alteração da forma da sua fronteira, nem sempre os extremos dos esqueletos das vias de circulação se encontraram nas posições mais adequadas para a representação em curvas de *Bézier*.

Em termos de planeamento de trajetórias, não foi efetuada nenhuma análise:

- que determine uma estimativa para os parâmetros no critério de otimização e a sua importância relativa para cada operação cultural.
- de avaliação do custo das funções individuais consideradas no critério de otimização; por exemplo, a compra e manutenção dos equipamentos, o tempo máximo para realizar uma operação cultural, entre outras.
- sobre a influência de outros fatores nas funções individuais considerada no critério de otimização; por exemplo, a influência do declive das vias de circulação e as condições que provocam a mudança de velocidade, em termos do combustível.

A aplicação VVPP permitiu demonstrar os resultados dos desenvolvimentos descritos na tese. Deve ser encarada como uma mais valia, pois funciona como plataforma de condução do trabalho tendo sido construída de forma modular. A aplicação é robusta e versátil. Em termos informáticos, abrange temáticas que vão desde a manipulação de informação sob diferentes formatos, a sua representação tridimensional e a manipulação dinâmica, à estruturação do programa em classes e desenvolvimento dos seus métodos. Houve um cuidado especial na apresentação e organização

da informação fornecida ao utilizador sob forma de menus (verticais, horizontais e em cascata), caixas de variados tipos (validação, escolha múltipla, de texto, entre outras), disponíveis quando necessário.

6.3 Trabalho futuro

Foi integralmente cumprida a tarefa de determinar o MDE da vinha que se adequa ao planeamento de trajetórias e que poderá ser usado para a navegação, uma vez que não é necessária uma maior precisão. Este poderá vir a ser atualizado sempre que necessário, através da inclusão de informação georreferenciada. A atualização do MDE pode fazer-se: após levantamento, diretamente segundo a tabela de atributos especificada, com conversão de dados para o formato Excel, sendo necessária a conversão para binário na fase posterior de planeamento de trajetórias; ou, em tempo real, por exemplo durante a navegação, em qualquer um dos formatos, num processo simultâneo de recolha e armazenamento de dados. Neste caso, é necessária a alteração do processo da sua colocação em memória, para que sejam automaticamente apresentados no mapa 3D da vinha.

Como ferramenta de apoio no desenvolvimento e no teste das técnicas de esqueletização de formas tridimensionais, a aplicação VVPP será útil na medida em que possui um módulo para o efeito, implementado numa primeira fase apenas numa abordagem volumétrica. As suas capacidades podem ser expandidas para incluir as abordagens de superfície ou de nuvem de pontos.

Em termos de planeamento de trajetórias, sugere-se o teste exaustivo do algoritmo combinado para a cobertura total e parcial da vinha, iniciando e terminando em diferentes pontos, mas cobrindo um conjunto de patamares de acesso contínuo (patamares vizinhos), e ainda, para a cobertura de ilhas dispersas em diferentes localizações e com tamanhos diferentes. Localizações diferentes entendidas como possuindo características distintas, incluindo, ou não, patamares mancos.

Como apenas a função distância foi considerada para a validação do algoritmo combinado, não houve necessidade de implementar uma funcionalidade específica para

introdução dos parâmetros de ponderação das funções individuais consideradas no critério de otimização. Assim, para validação mais efetiva do algoritmo, essa funcionalidade deverá necessariamente ser desenvolvida. O que implicará também a implementação do mecanismo de introdução das restantes funções individuais, pelo utilizador da VVPP, de forma fácil e amigável.

As funcionalidades de visualização do funcionamento do algoritmo combinado, nomeadamente o grafo do mapa da vinha e a árvore de decisão, podem ser expandidas, para uma versão didática de aprendizagem do método de planeamento de trajetórias, pela representação gráfica animada dos elementos que compõem as referidas estruturas, durante a determinação do percurso ótimo para execução de uma determinada tarefa.

Referências bibliográficas

- Cartografia da susceptibilidade a movimentos de vertente na Região Demarcada do Douro. [7](#)
- DGTerritório - PT-TM06/ETRS89 - European Terrestrial Reference System 1989. [84](#)
- DGTerritório - ReNEP. [28](#)
- Official New Holland online parts store and online parts catalog for New Holland and Ford tractors. [91](#)
- Programa de desenvolvimento rural do continente para 2014-2020, Medida 3. [9](#)
- S. João da Pesqueira - Carta Militar. [61](#)
- Sistema de Estações de Referência GPS VIRTuais (SERVIR). [29](#), [84](#)
- Agrawal, M., Konolige, K., e Bolles, R. C. (2007). Localization and mapping for autonomous navigation in outdoor terrains: A stereo vision approach. In *Proc. - IEEE Work. Appl. Comput. Vision, WACV 2007*. [5](#)
- Anderson, J. M., Kalra, N., Stanley, K. D., Sorensen, P., Samaras, C., e Oluwatola, O. A. (2014). *Autonomous vehicle technology - A guide for policymakers*. [2](#)

- Andresen, T., Bianchi, F., e Curado, M. (2004). The Alto Douro wine region greenway. *Landscape and Urban Planning*, 68(2-3):289 – 303. International Greenway Planning. [8](#)
- Anil, P. e Natarajan, S. (2010). Automatic road extraction from high resolution imagery based on statistical region merging and skeletonization. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2(3):165–171. [37](#)
- Arguenon, V., Bergues-Lagarde, A., Bro, P., Rosenberger, C., e Smari, W. (2006). Multi-agent based prototyping of agriculture robots. *Proc. 2006 Int. Symp. Collab. Technol. Syst. CTS 2006*, 2006:282–288. [6](#)
- Auat Cheein, F., Steiner, G., Perez Paina, G., e Carelli, R. (2011). Optimized EIF-SLAM algorithm for precision agriculture mapping based on stems detection. *Comput. Electron. Agric.*, 78(2):195–207. [5](#)
- Augusto, P. J., Tenente, M., Engel, C., Tasso, J., De, B., e Engenheiro, S. (2009). O programa de investigação e tecnologia em veículos aéreos autónomos não-tripulados da Academia da Força Aérea. [2](#)
- Babaali, K. O., Zigh, E., e Djebbouri, P. M. (2014). Survey of some new road extraction methods. *Int. J. Eng. Sci.*, 3(2014):28–33. [36](#)
- Bak, T. e Jakobsen, H. (2004). Agricultural robotic platform with four wheel steering for weed detection. *Biosyst. Eng.*, 87(2):125–136. [6](#)
- Bakhtiari, A., Navid, H., Mehri, J., Berruto, R., e Bochtis, D. D. (2013). Operations planning for agricultural harvesters using ant colony optimization. *Spanish J. Agric. Res.*, 11(3):652. [46](#)
- Barrientos, A., Colorado, J., Cerro, J. D., Martinez, A., Rossi, C., Sanz, D., e Valente, J. (2011). Aerial remote sensing in agriculture: A practical approach to area coverage and path planning for fleets of mini aerial robots. *J. F. Robot.*, 28(5):667–689. [62](#)

- Benavent, E., Carrota, A., Corberán, A., Sanchis, J. M., e Vigo, D. (2007). Lower bounds and heuristics for the Windy Rural Postman Problem. *Eur. J. Oper. Res.*, 176(2):855–869. 119
- Bevilacqua, V., Notarnicola, M., Cortellino, M., Scarpa, A., Taurino, D., e Mastro-nardi, G. (2009). Relevant measurements for polyps in 3D virtual colonoscopy. In *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, volume 5754 LNCS, páginas 984–993. Springer Berlin Heidelberg. 39
- Bochtis, D. Planning and control of a fleet of agricultural machines for optimal management of field operations. 45
- Bochtis, D. e Sørensen, C. (2009). The vehicle routing problem in field logistics, Part I. *Biosystems Engineering*, 104(4):447–457. 10, 47
- Bochtis, D. e Vougioukas, S. (2008a). Minimising the non-working distance travelled by machines operating in a headland field pattern. *Biosyst. Eng.*, 101(1):1–12. 11
- Bochtis, D. e Vougioukas, S. (2008b). Minimising the non-working distance travelled by machines operating in a headland field pattern. *Biosyst. Eng.*, 101(1):1–12. 46
- Bonadies, S., Lefcourt, A., e Gadsden, S. A. (2016). A survey of unmanned ground vehicles with applications to agricultural and environmental sensing. In Valasek, J. e Thomasson, J. A., editors, *SPIE Commer. Sci. Sens. Imaging*, página 98660Q. International Society for Optics and Photonics. 2
- Braga, R. (2009). Inovação e tecnologia na formação agrícola. AJAP - Assoc. dos Jovens Agric. Port. Consultado em 8 de Outubro de 2010, Disponível em http://agrinov.ajap.pt/diapositos/viticprecisao_final/Viticultura/Diapositivos_Viticultura_de_Precisao.pdf. 21
- Bühler, K., Felkel, P., e La Cruz, A. (2004). Geometric methods for vessel visualization and quantification – A Survey. In Brunnett, G., Hamann, B., Müller, H., e Linsen, L., editors, *Geometric Modeling for Scientific Visualization*, Mathematics and Visualization, páginas 399–419. Springer Berlin Heidelberg. 41

- Cao, C. e Sun, Y. (2014). Automatic road centerline extraction from imagery using road GPS data. *Remote Sens.*, 6(9):9014–9033. [35](#), [38](#)
- Cao, J., Tagliasacchi, A., Olson, M., Zhang, H., e Su, Z. (2010). Point cloud skeletons via Laplacian based contraction. In *Proceedings of the 2010 Shape Modeling International Conference*, SMI '10, páginas 187–197, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society. [42](#)
- Casaca, J. M., de Matos, J. L., e Dias, J. M. B. (2005). *Topografia geral*. [22](#)
- CB Insights (2016). 30 Corporations working on autonomous vehicles. [2](#)
- Choset, H. (2001). Coverage for robotics: A survey of recent results. *Ann. Math. Artif. Intell.*, páginas 113–126. [44](#)
- Choset, H. M., Lynch, K., Hutchinson, S., Kantor, G., Burgard, W., e Kavraki, L. (2005). *Principles of robot motion: Theory, algorithms and implementations*. MIT Press, the mit pr edition. [6](#), [49](#)
- Clingeffer, P. (2000). Mechanization of wine and raisin production in australian vineyards. In *Proceedings of the ASEV 50th anniversary annual meeting*. [7](#)
- Conesa-Munoz, J., Bengochea-Guevara, J. M., Andujar, D., e Ribeiro, A. (2015). Efficient Distribution of a Fleet of Heterogeneous Vehicles in Agriculture: A Practical Approach to Multi-path Planning. *2015 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions*, páginas 56–61. [47](#)
- Contente, O., Aranha, J., Martinho, J., Morgado, J., Reis, M., Ferreira, P. J., Morais, R., e Lau, N. (2015a). 3D Map and DGPS validation for a vineyard autonomous navigation system. In Moreira, A., Matos, A., e Veiga, G., editors, *Control. Proc. 11th Port. Conf. Autom. Control*, volume 321 of *Lecture Notes in Electrical Engineering*, capítulo X, páginas 617–625. Springer International Publishing. [14](#), [172](#)
- Contente, O., Aranha, J., Martinho, J., Santos, F., e Reis, M. (2013). 3D Digital maps for vineyard autonomous robot navigation. In Luís Correia, Luis Paulo Reís, José Cascalho, Luís Mendes Gomes, Hélia Guerra, P. C., editor, *Adv. Artif.*

- Intell. Proc.*, páginas 234–245, Angra do Heroísmo, Azores, Portugal. Centre for Applied Mathematics and Information Technology, Department of Mathematics, University of Azores. [14](#), [171](#)
- Contente, O., Lau, J., Morgado, J. F., e dos Santos, R. M. (2015b). Vineyard skeletonization for autonomous robot navigation. In *2015 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions*, páginas 50–55. IEEE. [14](#), [172](#)
- Contente, O., Lau, N., Morgado, F., e Morais, R. (2016). A path planning application for a mountain vineyard autonomous robot. In *Advances in Intelligent Systems and Computing*, volume 417, capítulo Robot 2015, páginas 347–358. [14](#), [135](#), [173](#)
- Cornea, N. D., Silver, D., e Min, P. (2007). Curve-skeleton properties, application and algorithms. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 13(3):530–548. [39](#), [104](#), [172](#)
- Cornea, N. D., Silver, D., Yuan, X., e Balasubramanian, R. (2005). Computing hierarchical curve-skeletons of 3D objects. *The Visual Computer*, 21(11):945–955. [41](#)
- Cruz, A., C., P., A., C., Rodrigues, A., e Castro, R. (2010). Mechanical pruning on a vertical shoot positioning system in Dão Region. *17th Int. Symp. GiESCO 2011, Asti, p. 575-577.*, 1(1):575–577. [7](#)
- Cunha, C., Peres, E., Morais, R., Oliveira, A., Matos, S., Fernandes, M., Ferreira, P., e Reis, M. (2010). The use of mobile devices with multi-tag technologies for an overall contextualized vineyard management. *Comput. Electron. Agric.*, 73(2):154–164. [11](#)
- D. D. Bochtis, S. G. Vougioukas, H. W. G. (2009). A mission planner for an autonomous tractor. [46](#)
- Delling, D., Goldberg, A., Werneck, R., e Pajor, T. (2014). Route planning in transportation networks. [44](#)

- Desai, V. P. e Vala, H. (2014). Survey on methods of road extraction using satellite image. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 3(11):1422–1424. [36](#)
- Diago, M. P., Rovira-Mas, F., Blasco, J., Saiz-Rubio, V., Faenzi, E., Sébastien Évains, Labails, S., Stoll, M., Scheidweiler, M., Millot, C., Campos-Gomez, E., e Tardauila, J. (2015). Vinerobot: On-the-go vineyard monitoring with non-invasive sensors. *Prog. Agric. Vitic.*, páginas 1–4. [3](#)
- Dijkstra, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1(1):269–271. [44](#)
- Dow, J. M., Neilan, R. E., e Rizos, C. (2009). The international GNSS service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems. *J. Geod.*, 83(3-4):191–198. [25](#)
- Edmonds, J. (1973). Matching, Euler Tours and Chinese Postman. *Math. Program.*, 5:88–124. [48](#)
- Eiselt, H. A., Gendreau, M., e Laporte, G. (1995). Arc Routing Problems, Part II: The Rural Postman Problem. *Operations Research*, 43(3):399–414. [48](#)
- Emmi, L., Gonzalez-de Soto, M., Pajares, G., e Gonzalez-de Santos, P. (2014). New trends in robotics for agriculture: integration and assessment of a real fleet of robots. *ScientificWorldJournal.*, 2014:404059. [2](#)
- Ferguson, D., Likhachev, M., e Stentz, A. (2005). A guide to heuristic-based path planning. *Proceedings of the International Workshop on Planning under Uncertainty for Autonomous Systems, International Conference on Automated Planning and Scheduling (ICAPS)*, páginas 1 – 10. [6](#)
- Fernandes, M., Matos, S., Peres, E., Cunha, C., López, J., Ferreira, P., Reis, M., e Morais, R. (2013). A framework for wireless sensor networks management for precision viticulture and agriculture based on IEEE 1451 Standard. *Comput. Electron. Agric.*, 95:19–30. [11](#)

- Gagvani, N. e Silver, D. (1999). Parameter-controlled volume thinning. *Graphical Models and Image Processing*, 61(3):149 – 164. [104](#)
- Galceran, E., Campos, R., Palomeras, N., Ribas, D., Carreras, M., e Ridao, P. (2015). Coverage path planning with real-time replanning and surface reconstruction for inspection of three-dimensional underwater structures using autonomous underwater vehicles. *J. F. Robot.*, 32(7):952–983. [2](#)
- Galceran, E. e Carreras, M. (2013). A survey on coverage path planning for robotics. *Robotics and Autonomous Systems*, 61(12):1258–1276. [11](#), [44](#)
- Garcia, M. P., Montiel, O., Castillo, O., Sepúlveda, R., e Melin, P. (2009). Path elanning for autonomous mobile robot navigation with ant colony optimization and fuzzy cost function Evaluation. *Appl. Soft Comput.*, 9(3):1102–1110. [6](#), [45](#)
- García-Pérez, L., García-Alegre, M. C., Ribeiro, a., e Guinea, D. (2008). An agent of behaviour architecture for unmanned control of a farming vehicle. *Comput. Electron. Agric.*, 60(1):39–48. [6](#), [45](#)
- Gomes Negreiros, M. J., Coelho Júnior, W. R., Palhano, A. W. d. C., Coutinho, E. F., de Castro, G. A., Gomes, F. J. N., Barcellos, G. C., Rezende, B. F., e Pereira, L. W. L. (2009). O Problema do Carteiro Chinês, algoritmos exatos e um ambiente MVI para análise de suas instâncias: Sistema XNÊS. *Pesquisa Operacional*, 29(2):323–363. [119](#)
- Gonzalez-de Santos, P. (2014). Integrating sensory/actuation systems in agricultural vehicles. *Sensors (Basel)*., 14(3):4014–4049. [4](#)
- Gülgen, F. e Gökgöz, T. (2004). Automatic extraction of terrain skeleton lines from digital elevation models. *Comm. III, WG III/4*, página 6. [38](#)
- Gupta, S. e Singh, G. (2014). A new technique for road extraction using mathematical morphology, fuzzy and genetic algorithm. *Int. J. Eng. Res. Appl.*, 4(2):341–346. [37](#)
- Hague, T., Marchant, J. A., e Tillett, N. D. (2000). Ground based sensing systems for autonomous agricultural vehicles. *Comput. Electron. Agric.*, 25(1-2):11–28. [6](#)

- Hameed, I. a. (2014). Intelligent coverage path planning for agricultural robots and autonomous machines on three-dimensional terrain. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, 74(3-4):965–983. 45
- Hameed, I. a., Bochtis, D., e Sørensen, C. a. (2013). An optimized field coverage planning approach for navigation of agricultural robots in fields involving obstacle areas. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 10. 45
- Hameed, I. A. F. A. (2012). *Intelligent behavior of autonomous vehicles in outdoor environment*. 45
- Heap, B. R. (1963). Permutations by interchanges. *The Computer Journal*, 6(3):293–298. 121, 124, 160
- Heraud, J. e Lange, A. (2009). Agricultural automatic vehicle guidance from horses to GPS: How we got here, and where we are going. *ASABE Disting. Lect. Ser. - Agric. Autom. Veh. Guid. from Horses to GPS How We Got Here, Where We are Going*, (913):1–67. 3
- Honorato C., M. S. (2001). Portugal vai ter uma rede diferencial GPS. *Hidromar*. 28
- IVDP (2010). Douro: região. Consultado em 8 de Outubro de 2010, Disponível em <http://www.ivdp.pt/pagina.asp?codPag=16&codSeccao=4&idioma=0>. 9
- Jaime, A., Afonso, G., Alberto, R., Coelho, F., e Francisco, R. (2006). 7th International symposium on Sspatial accuracy assessment in natural resources and environmental sciences. In *IgeoE Positional Qual. Control with Differ. rtk position methods*, número April 2006, páginas 840–846. 28
- Jensen, K., Larsen, M., Nielsen, S., Larsen, L., Olsen, K., e Jørgensen, R. (2014). Towards an open software platform for field robots in precision agriculture. *Robotics*, 3(2):207–234. 7
- Jiang, G. e Gu, L. (2005). An automatic and fast centerline extraction algorithm for virtual colonoscopy. *Conference proceedings : Annual International Conference*

- of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Conference*, 5:5149–5152. [39](#)
- Karsky, D. (2004). Comparing four methods of correcting GPS data: DGPS, WAAS, L-Band, and Postprocessing. *United States Dep. Agric. For. Serv. Technol. Dev. Program, Eng. Tech. Tips*, páginas 1–6. [25](#)
- Kaur, S. (2013). Automatic road detection of satellite images – A survey. *Int. J. Adv. Res. Sci. Technol.*, 3(2):59–62. [36](#)
- Kong, T. e Rosenfeld, A. (1989). Digital topology: Introduction and survey. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 48(3):357 – 393. [105](#)
- Landau, H., Vollath, U., e Chen, X. (2002). Virtual reference station systems. *J. Glob. Position. Syst.*, 1(2):137–143. [30](#)
- LaValle, S. M. (2006). Planning algorithms. [6](#), [43](#)
- Lenstra, J. K. e Kan, A. H. G. R. (1981). Complexity of Vehicle Routing and Scheduling Problems. *Networks*, 11(2):221–227. [119](#)
- Li, M., Imou, K., Wakabayashi, K., e Yokoyama, S. (2009). Review of research on agricultural vehicle autonomous guidance. *Int. J. Agric. Biol. Eng.*, 2(3):1–16. [6](#)
- Li, Y. e Briggs, R. (2009). Automatic extraction of roads from high resolution aerial and satellite images with heavy noise. *World Acad. Sci. Eng. Technol.*, 54:416–422. [37](#)
- Ma, C. e Sonka, M. (1996). A fully parallel 3D thinning algorithm and its applications . *Computer Vision and Image Understanding*, 64(3):420 – 433. [41](#)
- Magalhães, N. (2012). *Manual de boas práticas na Região Demarcada do Douro*. Instituto dos Vinhos do Douro e do Porto, I.P. [8](#), [19](#)
- Manduchi, R., Castano, A., Talukder, A., e Matthies, L. (2005). Obstacle detection and terrain classification for autonomous off-road navigation. *Auton. Robots*, 18(1):81–102. [4](#)

- Masehian, E. e Sedighizadeh, D. (2007). Classic and heuristic approaches in robot motion planning – A chronological review. *World Acad. Sci. Eng. Technol.*, 29(5):101–106. [6](#)
- Matese, A. e Di Gennaro, S. F. (2015). Technology in precision viticulture: A state of the art review. [3](#)
- Matos, J. L. (2001). *Fundamentos de informação geográfica*. [21](#), [62](#)
- Mena, J. e Malpica, J. (2005). An automatic method for road extraction in rural and semi-urban areas starting from high resolution satellite imagery. *Pattern Recognit. Lett.*, 26(9):1201–1220. [35](#), [40](#)
- Mena, J. B. (2003). State of the art on automatic road extraction for GIS update: A novel classification. *Pattern Recognit. Lett.*, 24(16):3037–3058. [35](#)
- Miao, Z., Wang, B., Shi, W., e Zhang, H. (2014). A semi-automatic method for road centerline extraction from VHR images. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, 11(11):1856–1860. [36](#), [37](#)
- Misa, T. J. e Frana, P. L. (2010). An interview with Edsger W. Dijkstra. *Communications of the ACM*, 53(8):41. [50](#)
- Morales Pinzón, A., Hernández Hoyos, M., Richard, J. C., Flórez-Valencia, L., e Orkisz, M. (2017). A tree-matching algorithm: application to airways in CT images of subjects with the acute respiratory distress syndrome. *Medical Image Analysis*, 35:101–115. [39](#)
- Morris, J. (2007). Development and commercialization of a complete vineyard mechanization system. *Horttechnology*. [7](#)
- Mousazadeh, H. (2013). A technical review on navigation systems of agricultural autonomous off-road vehicles. *J. Terramechanics*, 50(3):211–232. [2](#), [6](#)
- Mulla, D. J. (2013). Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: key advances and remaining knowledge gaps. *Biosyst. Eng.*, 114(4):358–371. [3](#)

- N. L. Cappeli, C. K. Umezu, A. C. S. A. P. G. (2006). Desempenho comparativo entre receptores GPS. *Revista Brasileira de Agroinformática*, 8(1):63–77. [32](#)
- Nascimento, T. P., Costa, P., Costa, P. G., Moreira, A. P., e Conceição, A. G. S. (2012). A set of novel modifications to improve algorithms from the A* family applied in mobile robotics. *Journal of the Brazilian Computer Society*, 19(2):167–179. [52](#), [124](#)
- Nikon. *DTM-350 Model DTM-330, Instruction Manual*. [84](#)
- Nilsson, N. (1982). Principles of artificial intelligence. [44](#)
- Noguchi, N. e Terao, H. (1997). Path planning of an agricultural mobile robot by neural network and genetic algorithm. *Computers and Electronics in Agriculture*, 18(2-3):187–204. [45](#)
- NovAtel, C. (2015). Receiver survey 2016. [32](#)
- Oksanen, T. e Visala, a. (2007). Path planning algorithms for agricultural machines. *Agricultural Engineering International the CIGR Ejournal*, IX:1–19. [46](#)
- Oksanen, T. e Visala, A. (2009). Coverage path planning algorithms for agricultural field machines. *Journal of Field Robotics*, 26(8):651–668. [46](#)
- Palágyi, K. e Kuba, A. (1999). A parallel 3D 12-subiteration thinning algorithm. *Graphical Models and Image Processing*, 61(4):199 – 221. [104](#), [172](#)
- Pantuwong, N. e Sugimoto, M. (2013). Skeleton growing: An algorithm to extract a curve skeleton from a pseudonormal vector field. *Vis. Comput.*, 29(3):203–216. [41](#)
- Peres, E., Fernandes, M., Morais, R., Cunha, C., López, J., Matos, S., Ferreira, P., e Reis, M. (2011). An autonomous intelligent gateway infrastructure for in-field processing in precision viticulture. *Comput. Electron. Agric.*, 78(2):176–187. [11](#)
- Platform, H. *Astech MobileMapper 100 Gettings Started Manual*, volume 200. [84](#)

- Qiong, W., Dengyun, Y., e Yang, J. (2015). Research progress and future development on mission planning technologies of planetary rover. *Procedia Eng.*, 99:1137–1145. [2](#)
- Rasmussen, V. (2005). High-end DGPS and RTK systems. Relatório técnico, USU/-NASA Space Grant/Land Grant. [26](#)
- Reid, J., Zhang, Q., Noguchi, N., e Dickson, M. (2000). Agricultural automatic guidance research in North America. *Comput. Electron. Agric.*, 25(1-2):155–167. [2](#)
- Reis, M., Morais, R., Pereira, C., Contente, O., Bacelar, M., Soares, S., Valente, A., Baptista, J., Ferreira, P., e Bulas-Cruz, J. (2011). A low-cost system to detect bunches of grapes in natural environment from color images. In Blanc-Talon, J., Kleihorst, R., Philips, W., Popescu, D., e Scheunders, P., editors, *Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems*, volume 6915 of *Lecture Notes in Computer Science*, páginas 92–102. Springer Berlin Heidelberg. [12](#)
- Reis, M., Morais, R., Peres, E., Pereira, C., Contente, O., Soares, S., Valente, A., Baptista, J., Ferreira, P., e Bulas Cruz, J. (2012). Automatic detection of bunches of grapes in natural environment from color images. *J. Appl. Log.*, 10(4):285–290. [12](#)
- Rovira-Más, F. (2010). Sensor architecture and task classification for agricultural vehicles and environments. *Sensors*, 10(12):11226–11247. [4](#)
- Ryerson, a. E. F. e Zhang, Q. (2007). Vehicle path planning for complete field coverage using genetic algorithms. *Agric. Eng.*, IX:1–11. [45](#)
- Samet, R., Askerbeyli, A. I. N., e Varol, C. (2010). An implementation of automatic contour line extraction from scanned digital topographic maps. *Appl. Comput. Math.*, 9(1):116–127. [35](#)
- Santos, F. (2000a). Projecto AGRO nº 613 - Mecanização das vinhas da Região Demarcada do Douro. Relatório técnico. [8](#)

- Santos, F. (2000b). Projecto nº - 6121 - Mecanização das vinhas tradicionais da Região Demarcada do Douro. Relatório técnico. [8](#)
- Santos, F., Monteiro, A., Félix, R., Azevedo, A., e Pina, A. (1998). Utilização de equipamentos de despona na cultura da vinha. [8](#), [13](#)
- Santos, F., Sobreira, H., Campos, D., Morais, R., Moreira, A., e Contente, O. (2015). Towards a reliable monitoring robot for mountain vineyards. In *2015 IEEE Int. Conf. Auton. Robot Syst. Compet.*, páginas 37–43. IEEE. [5](#), [12](#)
- Shalal, N., Low, T., McCarthy, C., e Hancock, N. A review of autonomous navigation systems in agricultural environments. In *Innovative Agricultural Technologies for a Sustainable Future*. [6](#)
- Sharf, A., Lewiner, T., Shamir, A., e Kobbelt, L. (2007). On-the-fly curve-skeleton computation for 3D shapes. *Computer Graphics Forum*, 26(3):323–328. [39](#)
- Sørensen, C., Bak, T., e Jørgensen, R. (2004). Mission planner for agricultural robotics. *Proc. AgEng*, (2004/9/12):894–895. [10](#)
- SXBlue-II, T. R. (2008). *SXBlue II GPS*, volume 2008. [70](#)
- Tagliasacchi, A., Zhang, H., e Cohen-Or, D. (2009). Curve skeleton extraction from incomplete point cloud. *ACM Trans. Graph.*, 28(3):71:1–71:9. [42](#)
- Tian, L. e Kamata, S. I. (2007). Diffusion geodesic path: A common feature for automatic image-map registration. *Sixth IEEE Int. Symp. Signal Process. Inf. Technol. ISSPIT*, páginas 944–949. [36](#)
- Tierny, J., Vandeborre, J. P., e Daoudi, M. (2008). Fast and precise kinematic skeleton extraction of 3D dynamic meshes. *2008 19th International Conference on Pattern Recognition, (Icpr)*:1–4. [39](#)
- Tsogas, M., Floudas, N., Lytrivis, P., Amditis, A., e Polychronopoulos, A. (2011). Combined lane and road attributes extraction by fusing data from digital map, laser scanner and camera. *Inf. Fusion*, 12(1):28–36. [5](#)

- Wan, M., Dachille, F., e Kaufman, A. (2001). Distance-field based skeletons for virtual navigation. In *Proceedings of the Conference on Visualization '01*, VIS '01, páginas 239–246, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society. [41](#)
- Wang, S., Wu, J., Wei, M., e Ma, X. (2012). Robust curve skeleton extraction for vascular structures. In *Graphical Models*, volume 74, páginas 109–120. [39](#), [42](#)
- Wang, T. e Basu, A. (2007). A note on – A fully parallel 3D thinning algorithm and its applications. [41](#)
- Wang, W., Shen, M., Xu, J., Zhou, W., e Liu, J. (2009). Visual traversability analysis for micro planetary rover. In *2009 IEEE Int. Conf. Robot. Biomimetics*, páginas 907–912. IEEE. [2](#)
- Xu, B., Chen, J., e Yao, M. (2016). Identification of contour lines from average-quality scanned topographic maps. *Math. Probl. Eng.*, 2016(29):1–14. [38](#)
- Xu, L. (2011). *Graph planning for environmental coverage*. PhD thesis. [119](#)
- Yao, L., Li, L., Zhang, M., e Minzan, L. (2005). Automatic guidance of agricultural vehicles based on global positioning system. *Artif. Intell. Appl. Innov. - IFIP TC12 WG12.5 - 2nd IFIP Conf. Artif. Intell. Appl. Innov. AIAI 2005*, páginas 617–624. [6](#)
- Zeng, Z., Lian, L., Sammut, K., He, F., Tang, Y., e Lammas, A. (2015). A survey on path planning for persistent autonomy of autonomous underwater vehicles. 110, Part A:303 – 313. [2](#)
- Zhou, K., Leck Jensen, A., Sørensen, C. G., Busato, P., e Bothtis, D. D. (2014). Agricultural operations planning in fields with multiple obstacle areas. *Comput. Electron. Agric.*, 109:12–22. [45](#), [46](#)