

Modelação de superfícies por correlação automática de imagens

> António Cavaca, Tenente-Coronel Art, Eng^o Geógrafo
acavaca@igeoe.pt

> Vasco António, Major Art, Eng^o Geógrafo
vantonio@igeoe.pt

> Luís Crispim, Major Art, Eng^o Geógrafo
lcrispim@igeoe.pt

> José Dias, 1SAR SGE, Fotogrametrista

No presente trabalho abordamos uma tecnologia que surgiu, há já alguns anos, associada à modelação da superfície terrestre, essencialmente relacionada com representações tridimensionais adoçadas, com o objectivo de sustentar a elaboração de produtos cartográficos. O IGeoE utiliza, de forma sistemática e eficaz, este tipo de modelação para aquisição de dados primários de superfície, seja para gerar automaticamente informação altimétrica vectorial, seja para produção de ortofotocartografia. Com o presente estudo pretendeu-se ir um pouco mais além, utilizando a referida tecnologia para modelar objectos mais angulosos, tentando inferir até que ponto os resultados se podem aproximar dos obtidos com tecnologias desenvolvidas especificamente para modelar este tipo de objectos, como é o caso das tecnologias de aquisição de informação tridimensional por telemetria Laser.

Introdução

Com a tomada de consciência, por um lado da dimensionalidade do espaço terrestre, e por outro da sua natureza finita, sentiu-se a necessidade crescente de gerir de forma racional a ocupação e utilização desse mesmo espaço.

Numa primeira fase, essa gestão assentou essencialmente na bidimensionalidade, no entanto, a saturação do espaço à superfície, associado a critérios de desenvolvimento, segurança e bem estar, passam a dar significativo relevo à integração da terceira dimensão na filosofia de gestão da envolvente.

Nos dias que correm, a representação através de modelos tridimensionais é, indiscutivelmente, uma valiosa ferramenta de apoio à decisão, com especial relevância no âmbito das tomadas de decisão que envolvam a reafecção do espaço em matéria de ocupação e utilização. O resultado, mais ou menos adequado, do processo da tomada da decisão é, em larga medida, condicionado pela maior ou menor veracidade dos dados e pela maior ou menor consistência dos factores influenciadores em análise.

Em matéria de gestão para utilização ou ocupação do espaço, as decisões terão de ser sustentadas pela análise de representações, dado que, a por vezes grande dimensão das realidades em análise, ou a sua inexistência real, impossibilitam a decisão baseada estritamente na observação do objecto. Desta forma, para que as decisões sejam ajustadas e adequadas, as representações de base utilizadas terão que traduzir, de forma real e inequívoca, a realidade espacial em jogo.

Do ponto de vista técnico, são várias e distintas as tecnologias e os métodos para adquirir dados e, conseqüentemente, produzir modelos tridimensionais de objectos. O presente estudo tem por base a aquisição de dados morfológicos através de imagens dos objectos, obtidas por sensores passivos de baixa altitude, operando na banda do visível.

Com este tipo de informação de base, são >

essencialmente duas as técnicas de produção de modelos tridimensionais de superfícies como realidades representando objectos, e cujas forma e disposição espacial definem a sua morfologia e caracterizam a superfície da terra.

Por um lado, a modelação por triangulação e interpolação geométrica das entidades gráficas que constituem a informação primária tridimensional vectorial extraída das imagens; por outro, a modelação por correlação automática entre matrizes de unidades elementares de imagem, que representam iguais objectos, ou regiões de fronteira de iguais objectos, em diferentes suportes.

É sobre esta última tecnologia que recai o desafio do presente trabalho.

Até onde se poderá ir na modelação por correlação, nomeadamente para o caso de objectos angulosos, é a questão de base que se coloca.

Enquadramento teórico

Um Modelo tridimensional de um objecto pode ser caracterizado como sendo uma representação numérica da sua superfície, baseada num conjunto de tripletos de coordenadas conhecidas e reportadas a um determinado referencial espacial, sendo o resultado final visível, um conjunto de pontos espaçados uniformemente, ou não, e formando uma malha regular ou irregular.

No espaço do referencial terrestre, este conjunto de coordenadas reflecte a morfologia da superfície da terra e as variações na forma dos objectos que aí se encontram.

Para um projecto de elaboração de um modelo tridimensional de um objecto, o objectivo final é produzi-lo com o maior realismo possível, de preferência com economia de meios e de forma eficiente. Por outras palavras, realismo, custo e eficiência são os temas de maior importância quer para quem produz quer para quem utiliza.

O realismo associado ao modelo é condicionado por diversos factores, desde logo relacionados com as características do objecto ou da superfície, com os atributos dos dados primários

adquiridos e com o método utilizado para gerar a sua representação tridimensional.

Como já foi referido, existem vários métodos, sustentados por diferentes conjugações de algoritmos, que permitem a modelação.

No presente trabalho, a opção recaiu sobre um método que permite a geração automática de pontos de “elevação”, a partir de um plano de referência, onde são conhecidas intrinsecamente as coordenadas bidimensionais desses pontos. A terceira dimensão dos objectos será descrita matematicamente como sendo altitude em função da posição bidimensional, através de um processo de *sampling*, com o qual se obtém a terceira coordenada, a partir das duas coordenadas coplanares. O processo é sustentado por um conjunto de pontos notáveis da superfície terrestre, ou do objecto.

A correlação, no caso em estudo, é caracterizada pelo estabelecimento de correspondência entre duas ou mais imagens digitais, representando parte de uma mesma realidade tridimensional. Quanto maior for a densidade de pontos gerados através da correlação, maior poderá ser o rigor na forma e a precisão numérica do modelo, dada a maior redundância nas observações de pormenores idênticos em cada uma das vistas.

A superabundância de observações permite uma filtragem, por critérios de desvio ou outros, gerando um modelo mais rigoroso.

Obtém-se assim, por modelação, uma representação abstracta de um objecto, ou de parte dele, com tradução numérica através da localização espacial de um conjunto de pontos.

Como dados de entrada, o processo em questão requer um par de imagens em estereoscopia, com uma estrutura piramidal (várias vistas a diferentes resoluções) e os parâmetros das orientações internas e externas obtidos por orientação local do modelo ou por aerotriangulação.

Antes de iniciar o processo é ainda necessário ponderar, *a priori*, o factor de correlação utilizado, as tolerâncias e margens de erro aceitáveis, o peso da função de adoçamento, os índices de rugosidade e angulosidade dos objectos, entre outros.

Em matéria de correspondência, o ideal seria efectuá-la *pixel a pixel*, mas isso requereria uma capacidade computacional insustentável, pelo que surgiram varias estratégias para ultrapassar esta condicionante, uma das quais é a utilização do, já referido, modelo de correlação em estrutura piramidal.

É um método hierarquizado de correlação (Figura1). Em cada nível é efectuada uma correlação entre pormenores radiométricos homólogos da imagem calculando-se um modelo espacial inicial a partir desses pontos homólogos de correlação. O processo inicia-se a partir do plano horizontal, no primeiro nível, e prossegue para os níveis seguintes, de forma a que o modelo final de um determinado nível piramidal sirva de modelo inicial para a correlação do nível seguinte.

Como as imagens que utilizamos se baseiam no modelo geométrico da perspectiva central, é possível definir no processo uma geometria epipolar. Dadas duas imagens, define-se o plano epipolar para um ponto no espaço, à custa do plano que contém este ponto e os dois centros de projecção de ambas as imagens. Este plano intersecta ambas as imagens segundo duas linhas rectas, definidas como linhas epipolares.

Se a orientação relativa das imagens for conhecida, para um determinado ponto numa das imagens, é possível calcular a linha epipolar da outra imagem, encontrando-se assim o ponto correspondente sobre ela. O problema da correlação, em imagens com este tipo de geometria associada, é então facilitado, passando de um problema bidimensional para unidimensional, o que do ponto de vista computacional trás reconhecidas vantagens.

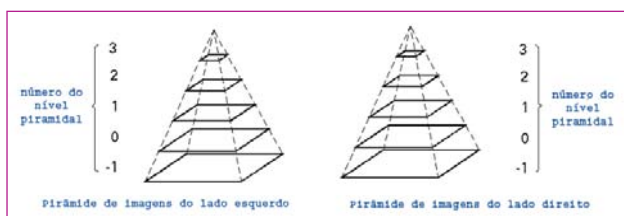


Figura 1 – Estrutura piramidal

Modelação de superfícies adoçadas

À semelhança das modernas cadeias de produção de informação geográfica georeferenciada, baseadas em sensores aéreos da banda fotográfica, no IGeoE, o módulo de produção de informação primária de superfície é sustentado, em regra, pela modelação baseada em algoritmos de correlação, embora sem prejuízo da verificação tridimensional do processo de correlação, numa perspectiva de adequabilidade aos objectivos do processo e de controlo de qualidade.

O método clássico, baseado em informação primária vectorial, apenas é utilizado em complemento, quando se pretender obter um modelo topográfico e não um modelo de superfície, ou em áreas de má correlação por existência de manchas extensas com homogeneidade de valor do *pixel*, onde, a correlação se muito restritiva, do ponto de vista dos parâmetros *a priori*, produz uma solução de pontos pouco abundante, e se muito permissiva, na perspectiva da liberdade de acção concedida ao algoritmo, embora superabundante em pontos, produz uma solução pouco realista.

A componente de modelação do processo de produção e actualização cartográfica do IGeoE, está testada, implementada e estabilizada (Figura 2), nomeadamente para gerar automaticamente informação vectorial primária altimétrica, para produzir ortofotocartografia e para dar a necessária tridimensionalidade à informação vectorial adicional com valor cartográfico.

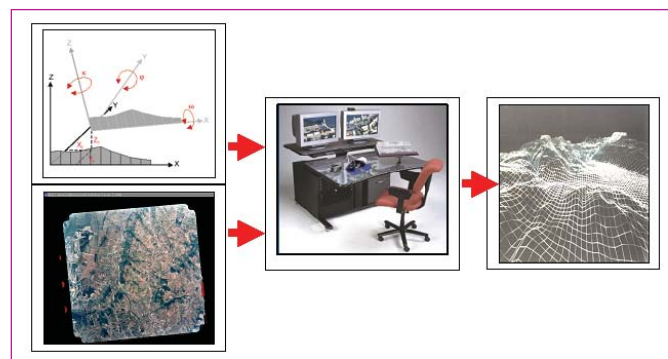


Figura 2 – Processo de modelação

Embora os trabalhos de representação a grandes escalas, não se integrem nos objectivos de produção do Instituto, a vontade de tecnicamente se ir mais além, levou um grupo de técnicos a debruçarem-se sobre a utilização da tecnologia de correlação na modelação de superfícies, em concreto, para objectos angulosos.

A ideia força não teve por base objectivos de produção, mas sim um propósito de estudar e experimentar diferentes formas de representação, utilizando a tecnologia em questão.

Modelação de superfícies angulosas

Embora a tecnologia de modelação por correlação pura tenha sido concebida para gerar modelos adoçados, pensou-se que explorando diferentes cenários e optimizando parâmetros, se poderia ir um pouco mais longe ao nível da modelação de objectos mais angulosos, a grande escala.

O conhecimento nesta área leva-nos a admitir, sem reservas, que a tecnologia mais eficiente e eficaz para este tipo de trabalho, nomeadamente na representação das chamadas “cidades virtuais” por modelação é, sem dúvida, a tecnologia baseada em telemetria Laser.

Não se pretende neste trabalho comparar as duas tecnologias, no entanto, na ausência do mais adequado e mais vocacionado para a referida modelação, o IGeoE levou por diante um conjunto de experiências, com vista a testar a tecnologia de que dispõe, no tipo de modelação em questão.

Utilizou-se para o efeito uma cobertura aérea analógica a baixa altitude, correspondente a uma escala média de voo de 1:8000.

Escolheu-se, num modelo estereoscópico, uma área que simultaneamente fosse rica em objectos angulosos e apresentasse uma radiometria equilibrada e uma textura de imagem com boa definição e contraste (Figura 3).

Orientou-se localmente o modelo com pontos de apoio de campo, obtendo-se a minimização

das paralaxes residuais e os dados para georeferenciação posterior de cada unidade elementar de imagem.

Como já foi referido no enquadramento teórico, um factor importante para se ter uma maior margem de manobra e mais controlo sobre o processo, é, desde logo, privilegiar, nos parâmetros *a priori*, uma superabundância em pontos de correlação, ou seja, usar uma malha tão estreita quanto possível.

Utilizou-se uma malha quadrangular regular de um metro e, através de uma linha quebrada e fechada, balizou-se o trabalho ao algoritmo, através da definição da fronteira exterior de correlação (Figura 4).

Na impossibilidade de se escolher no *setup* da aplicação a modelação de zonas edificadas, (por não existir essa possibilidade) escolheu-se terreno montanhoso e atribui-se peso mínimo à função de adoçamento, de modo a que, na filtragem da malha de correlação para gerar o modelo, as quebras de superfície pudessem ser respeitadas ao máximo.

Do ponto de vista estatístico, impuseram-se ao algoritmo tolerâncias bastante restritivas, em matéria de desvios em relação aos valores esperados.

Feito o primeiro processamento, obteve-se um modelo de superfície pouco vincado, onde apa-



Figura 3 – Área de trabalho



Figura 4 – Malha de pontos e fronteira de correlação

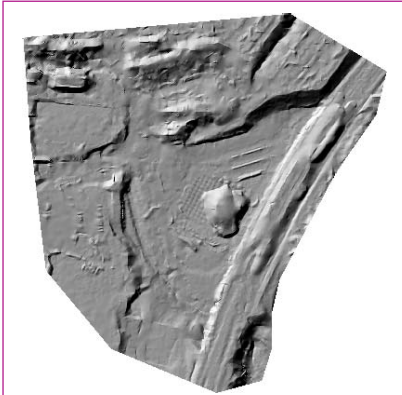


Figura 5 – Modelo resultante da correlação "livre"

reciam volumes destacados nas áreas onde se encontram os edifícios, no entanto, com muitas semelhanças com a morfologia adoçada, característica da superfície topográfica (Figura 5). Tal como era expectável, a dificuldade do sistema em definir planos ou superfícies tendencialmente planas, cresce à medida que a orientação espacial dos mesmos se aproxima da verticalidade, o que dificulta a definição rigorosa de objectos paralelepípedicos, com quebras de superfície em ângulo recto.

Era fundamental condicionar o resultado da correlação, forçando as quebras angulosas no modelo.

Em estereoscopia, restituíram-se então os limites dos telhados dos edifícios, delimitaram-se os arruamentos, os pátios, as pontes, de modo a fornecer ao algoritmo referências espaciais que materializariam de forma estruturante as fronteiras de quebra (Figura 6).

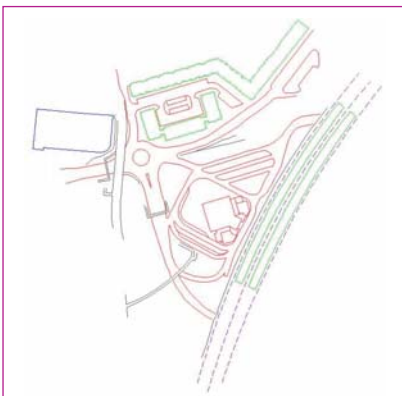


Figura 6 – Linhas estruturantes

Dado que a função de adoçamento necessita de continuidade na malha resultante da correlação, para ser eficaz na construção adoçada do modelo, tentou-se contrariar este desiderato, definindo-se uma zona de não correlação, o equivalente a uma área de descontinuidade geométrica com 1m para cada lado das linhas de quebra (Figura 7), o que permitiu inibir localmente a função de

adoçamento, possibilitando a passagem dos pontos de correlação dos limites dos telhados, directamente para o solo, junto às fachadas dos edifícios, sem ser ao longo de uma superfície tendencialmente oblíqua.

A primeira visualização do resultado da correlação em modelo a cheio, deu desde logo boas indicações quanto ao realismo em termos de recorte dos objectos (Figura 8).

Por não existirem ferramentas de pós-processamento associadas às soluções comerciais que incorporam a tecnologia em questão (em contraposição com a riqueza das mesmas noutras tecnologias) foi necessário passar a informação espacial resultante da correlação para um ambiente simultâneo de estereoscopia e CAD 3D, e aí refinar o modelo. Utilizaram-se, também para o efeito, ferramentas semi-automáticas de validação de modelos desenvolvidas no Instituto, no âmbito da cadeia de produção (Figura 9).

Refinado o modelo, optou-se por dar-lhe mais >



Figura 7 – Linhas estruturantes com zonas de descontinuidade

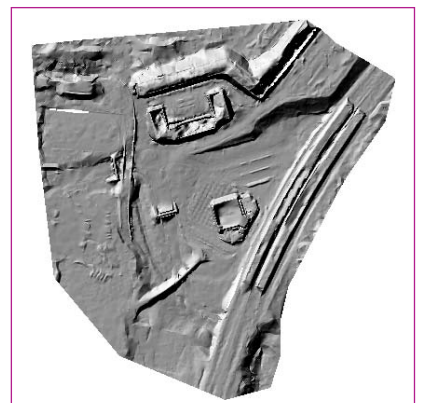


Figura 8 – Modelo resultante da correlação "condicionada"

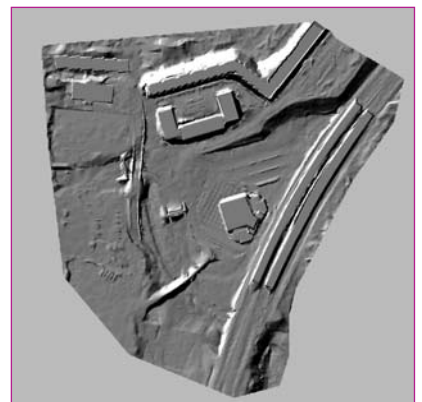


Figura 9 – Modelo refinado em CAD 3D

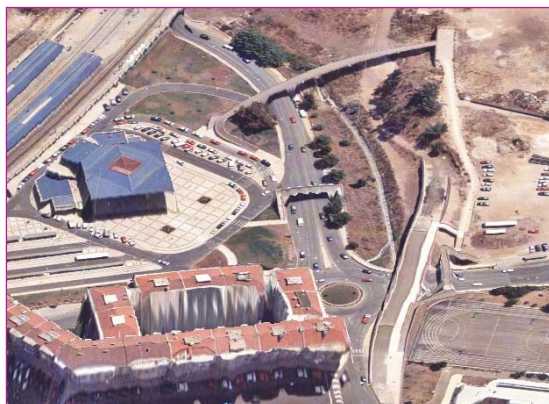


Figura 10 – Vista aérea 3D da área de trabalho

realismo e dinamismo. Numa primeira fase construiu-se um mosaico de imagens da área e ortorectificou-se, em seguida usou-se a imagem ortorectificada, para, de forma automática, “forrar” o modelo, através de uma projecção ortogonal, “rasgando” tanto mais a imagem, quanto mais verticais fossem as áreas a “forrar”.

Obteve-se um modelo anguloso bastante interessante e realista, do qual foi possível obter diversas vistas e sobre o qual foi possível executar pequenos voos programados.

Em seguida escolheu-se um objecto, no sentido de se avaliar o rigor dos dados tridimensionais, para a definição espacial da macroestrutura de edifícios. Para o efeito isolou-se da malha de pontos de correlação, o edifício da estação ferroviária e a respectiva plataforma em que o mesmo assenta (Figuras 11 e 12).

Projectaram-se os vértices dos vários telhados no plano da plataforma e obteve-se uma boa aproximação à macroestrutura tridimensional do edifício.



Figura 11 – Edifício escolhido

Embora não sendo objectivo do presente trabalho, poder-se-ia agora fotografar as fachadas do edifício, individualmente, compensar as distorções, fruto da obliquidade dos feixes

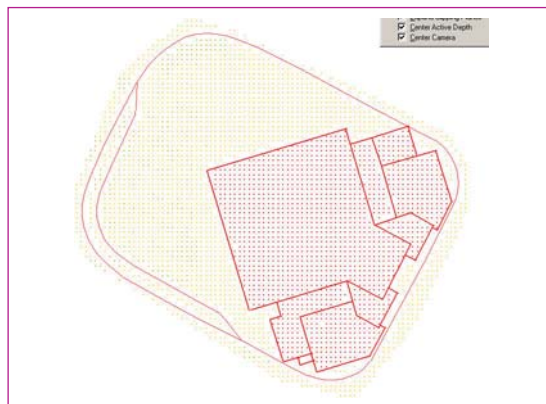


Figura 12 – Modelo vectorial do edifício

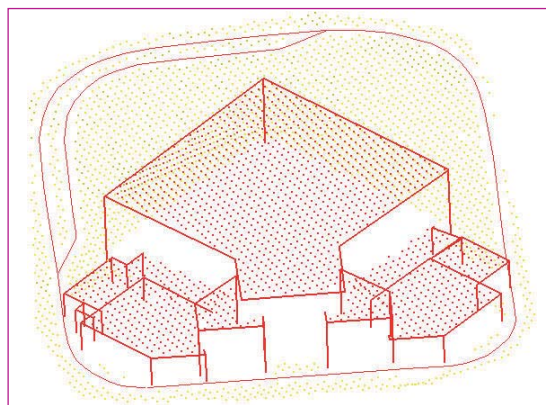


Figura 13 – Vista isométrica da macroestrutura do edifício

de aquisição e inserir as imagens, georeferenciadas ou não, na macroestrutura vectorial.

Conclusões

Não sendo a tecnologia de modelação por correlação, vocacionada para modelar objectos angulosos, é no entanto possível utilizá-la neste domínio. Optando por uma malha de pontos suficientemente fina, utilizando informação vectorial estruturante e inibindo, nos limites de quebra, a função de adoçamento, é possível chegar-se a uma boa aproximação à forma real dos objectos. Com algum trabalho posterior de edição e processamento, pode chegar-se a representações bastante próximas da realidade tridimensional.

Não se pretendeu com este trabalho fazer

comparações valorativas ou publicitar o que quer que seja, mas apenas explorar uma tecnologia disponível.

Bibliografia

ImageStation Automatic Elevations (ISAE) – *User's Guide*, Intergraph Corporation DOC 00210-007, SFT00308 (04.02), May 2003

Ackermann F.: *"Some Considerations About Feature Matching for the Automatic Generation of Digital Elevation Models"* INPHO GmbH, Stuttgart,

In Internet: http://phot.epfl.ch/workshop/wks96/art_3_4.html

Dupéret, Alain: *"Automatic derivation of a DTM to produce contour lines"* Unité Pilote BDTopo Service de l'Information Topographique; Institut Géographique National, BP 68,

In Internet: http://phot.epfl.ch/workshop/wks96/art_3_2.html

Heipke, Christian: *"Overview of Image Matching Techniques"*, Lehrstuhl für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität München,

In Internet: http://phot.epfl.ch/workshop/wks96/art_3_1.html

