



UNESP – UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE PRESIDENTE PRUDENTE
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

HENRIQUE CÂNDIDO DE OLIVEIRA

**DETECÇÃO DE ÁREAS DE OCLUSÃO PARA
GERAÇÃO DE ORTOIMAGEM VERDADEIRA
UTILIZANDO DADOS LASER**



**Presidente Prudente
2013**

HENRIQUE CÂNDIDO DE OLIVEIRA

**DETECÇÃO DE ÁREAS DE OCLUSÃO PARA
GERAÇÃO DE ORTOIMAGEM VERDADEIRA
UTILIZANDO DADOS LASER**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências e Tecnologia – Campus de Presidente Prudente, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências Cartográficas.

Orientador: Prof. Dr. **Mauricio Galo**

**Presidente Prudente
2013**

Oliveira, Henrique Cândido de.

S---- Detecção de áreas de oclusão para geração de ortoimagem verdadeira
utilizando dados LASER / Henrique Cândido de Oliveira. - Presidente
Prudente : [s.n], 2013

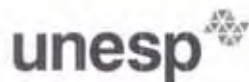
96 f.

Orientador: Mauricio Galo

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de
Ciências e Tecnologia

Inclui bibliografia

1. Detecção de Oclusão. 2. Ortoimagem Verdadeira. 3. LASER. I.
Oliveira, Henrique Cândido de. II. Universidade Estadual Paulista. Faculdade
de Ciências e Tecnologia. III. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Presidente Prudente

BANCA EXAMINADORA

PROF. DR. MAURICIO GALO
ORIENTADOR

PROF. DR. ANTONIO MARIA GARCIA TOMMASELLI
UNESP/FCT

PROF. DR. EDSON APARECIDO MITISHITA
UFPR

HENRIQUE CÂNDIDO DE OLIVEIRA

Presidente Prudente (SP), 22 de fevereiro de 2013.

RESULTADO: APROVADO

Dedicatória

Aos meus amados pais, Ana Maria e Wanderley.

Agradecimentos

A concretização deste projeto de mestrado só foi possível graças ao apoio de diversas pessoas. Em especial a todas estas citadas abaixo.

Aos meus pais, Ana Maria e Wanderley, por serem a minha base familiar, me auxiliando em todas as etapas já percorridas e alcançadas durante minha vida;

Ao meu orientador professor Dr. Mauricio Galo, por todo apoio e conhecimento concedido desde o período de graduação, com projetos de iniciação científica, ao curso de mestrado, pois este trabalho foi elaborado em conjunto com esforços mútuos;

A todos os professores do Departamento de Cartografia, sempre dispostos a auxiliar os alunos e transmitirem seus amplos conhecimentos;

Aos meus companheiros de pós-graduação, pois juntos formamos uma equipe multidisciplinar pronta a resolver os problemas de todos, tanto em relação aos projetos científicos quanto às questões pessoais;

Aos amigos/irmãos de república e graduação que convivem o tempo todo juntos, formando assim a nossa família quando estamos vivendo longe de casa.

Resumo

Atualmente, a utilização de ortoimagens em regiões urbanas é frequente. Sabe-se que estas áreas apresentam uma grande quantidade de altas edificações o que ocasiona o surgimento de diversas regiões de oclusão, devido à projeção perspectiva na qual é obtida a imagem e ao uso de modelos digitais que representam apenas o terreno para geração da ortoimagem. Esta dissertação tem por objetivo principal estudar e propor um procedimento alternativo para detecção de oclusão em imagens fotográficas aéreas, empregando dados LiDAR (*Light Detection And Ranging*) obtido a partir de sistemas de varredura a LASER (*Light Amplification by Estimulated Emission of Radiation*) aerotransportado para fins de geração de ortoimagens verdadeiras. Para tal, será apresentada uma revisão de conceitos relativos à ortorretificação e os resultados obtidos na aplicação deste método de detecção de oclusão. O método de detecção de oclusão em questão utiliza, em vez de modelos de edificações pré-definidos, apenas um modelo digital de superfície, que é a base para os cálculos de gradientes de altura, destinados à identificação das regiões de início e fim de oclusão - em direções radiais - essenciais para projeção destas áreas por completo na imagem. Para a avaliação do método proposto e implementado, foram utilizados dados simulados de uma área urbana ideal, sem ruídos, assim como um conjunto de dados reais composto por imagens aéreas e dados LiDAR, da região de Presidente Prudente/SP, cuja densidade aproximada é de oito pontos por m². Como resultado, foram obtidas imagens ortorretificadas, com as áreas de oclusão realçadas. Para a avaliação do método proposto, além de uma análise visual, realizou-se uma análise quantitativa por meio de índices de completeza e nível de acerto, para determinar parâmetros ideais inerentes ao método proposto para a detecção de áreas de oclusão.

Palavras-chave: Ortoimagem verdadeira. Gradientes de altura. Detecção de oclusão. LiDAR. LASER.

Abstract

Nowadays, the use of orthoimages in urban areas has become frequent. It is known that urban areas contain a great number of tall buildings which can cause several occlusion regions in aerial images. It happens due to perspective projection of the camera used to acquire the images and the digital models used as representative of the relief, that usually represents only the relief instead of the relief and all objects on the surface, used in the orthorectification process. The main aim of this master's thesis is to study and propose an alternative procedure for occlusion detection in aerial images, using LiDAR (*Light Detection And Ranging*) data by LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) scan system for true orthoimage generation. To achieve this, a review of the concepts related to orthorectification and results achieved by application of the proposed occlusion detection method will be shown. The proposed occlusion detection method uses only a digital surface model, which is the base for height gradient calculation, instead of the building model as used in some true orthophoto methods. The height gradient estimated for radial directions are applied for identification of the beginning of the occlusion and using this information it is possible to estimate the final limits of the occlusions, also in radial directions, which are essential to project these occlusion areas in the image. For evaluation of the proposed and implemented method, simulated data of an ideal urban area, without noise, and also a real data set composite by aerial images and LiDAR data, from Presidente Prudente/SP, was employed. This LiDAR data has a point density about eight points per m². As a result, orthorectified images, with highlighted occlusion areas, were obtained. To accomplish the evaluation of the proposed method, besides a visual analysis, a numerical evaluation was realized, using index of completeness and level of accuracy, aiming at the determination of ideal parameters related to the proposed method for occlusion area detection.

Keywords: True orthoimage. Heights gradients. Occlusion detection. LiDAR. LASER.

Lista de Figuras

Figura 1. Ângulos de atitude (ω – em torno do eixo x; ϕ – em torno do eixo y; κ – em torno do eixo z) da aeronave. Adaptado de Brito e Coelho (2002).	23
Figura 2. Componentes de um sistema LiDAR e suas relações geométricas. Adaptado de El-Sheimy et al. (2005).	24
Figura 3. Elementos do formato .LAS. Adaptado de Samberg (2007).	25
Figura 4. Representação das áreas sem informação, devido à presença de edificação alta.	26
Figura 5. Representação de área de sombra, mesmo com sobreposição de 50% entre as faixas de voo.	27
Figura 6. Representação dos modelos digitais de elevação (MDEs).	29
Figura 7. Representação de um MDT utilizando grade regular. Adaptado de Felgueiras (2012).	30
Figura 8. Representação da superfície pela triangulação de Delaunay. Adaptado de Felgueiras (2012).	31
Figura 9. Representação da variação longitudinal para se obter um deslocamento radial nulo. Modificado a partir de Andrade (1998).	34
Figura 10. Componentes da distorção radial em x e y. Adaptado de Wolf e Dewitt (2000). ..	35
Figura 11. Representação gráfica das componentes da distorção descentrada. Adaptado de Mikhail et al. (2001).	36
Figura 12. Deslocamentos causados pela refração atmosférica. Adaptado de Wolf e Dewitt (2000).	37
Figura 13. (A) Visada ortogonal. (B) Visada perspectiva.	39
Figura 14. Diferenciação entre os dados utilizados para geração de (a) ortoimagem convencional e (b) ortoimagem verdadeira.	41
Figura 15. Concorrência entre células e o efeito de duplo mapeamento. Adaptado de Habib et al. (2007)	42
Figura 16. Exemplo de edificação com duplo mapeamento. Fonte: Nielsen (2004).	43
Figura 17. Área de oclusão (imagem fantasma) detectada e preenchida com cor sólida. Fonte: Nielsen (2004).	43

Figura 18. Porção de uma ortoimagem verdadeira. Fonte: Nielsen (2004).	44
Figura 19. Princípio da geração do mapa de visibilidade utilizando o método <i>Z-buffer</i> . Adaptado de Habib et al. (2007).....	46
Figura 20. Representação da falha causada por estruturas altas e estreitas, no método <i>Z-buffer</i>	47
Figura 21. Representação do ângulo α , utilizado para detectar áreas de oclusão.....	48
Figura 22. Representação dos ângulos α para criação do mapa de visibilidade. Adaptado de Habib et al. (2007)	49
Figura 23. (a) Varredura na direção radial com mesma variação de azimuth para todo o MDS. (b) Varredura com mudança no valor da variação do azimuth. Adaptado de Habib et al. (2007).	50
Figura 24. Varredura em forma de um espiral, visando à diminuição do trabalho computacional. Adaptado de Habib et al. (2007).	50
Figura 25. Projeção das feições em um plano, para detecção de áreas de oclusão. Modificado a partir de Wang e Xie (2012).	51
Figura 26. Esquema gráfico para entendimento do método Z-Iterativo. Adaptado de Wang e Xie (2012).....	52
Figura 27. Estratégia para detecção de múltiplas oclusões. Adaptado de Wang e Xie (2012)	52
Figura 28. Representação de conjunto de pixels envolvidos na seleção dos elementos da reta que ligas os pontos A e F.	53
Figura 29. Alguns dos elementos utilizados no cálculo da completeza e nível de acerto: (a) Porção da imagem original, (b) Duplo mapeamento (c) Polígono de referência para oclusão – em vermelho, e (d) conjunto de pixels detectados como oclusos – em ciano.	56
Figura 30. Imagem aérea da cidade de Presidente Prudente, com apresentação dos detalhes com elemento de resolução no terreno (GSD) da ordem de 6 cm.	58
Figura 31. Imagem real e correspondente dados LiDAR.....	59
Figura 32. Direções envolvidas na varredura radial, utilizadas no algoritmo de Bresenham. .	61
Figura 33. (a) Representação das células referentes à direção radial. (b) Vetor contendo apenas os elementos detectados pelo algoritmo de Bresenham.	62
Figura 34. Perfil da direção radial com elemento ‘h’ e gradiente de altura.	63

Figura 35. Geometria utilizada para determinação do término da oclusão.	64
Figura 36. Representação dos gradientes positivos e negativos para $gap = 3m$ (a e b) e para $gap = 30m$ (c e d).	67
Figura 37. Representação de um perfil de edificação com os pontos LASER.	68
Figura 38. Configurações possíveis de ser encontradas em dados LASER de áreas urbanas, considerando os gradientes de altura.	69
Figura 39. Detecção da oclusão sem tratar os falsos gradientes – em destaque.	70
Figura 40. Representação gráfica do refinamento dos gradientes.	71
Figura 41. Resultados obtidos pela inserção dos parâmetros NV e σ_{NV}	72
Figura 42. Representação dos dados LiDAR simulados para testes.	74
Figura 43. Mapa de gradiente das alturas do MDS com a posição da projeção do CP (CP'). ..	74
Figura 44. Mapa de gradiente com os pixels referentes ao início (em vermelho) e fim da oclusão (em preto).	75
Figura 45. Mapa de visibilidade, com pixels visíveis em cinza claro e oclusos em cinza escuro.	75
Figura 46. Diferentes oclusões para diferentes alturas do CP.	76
Figura 47. Teste realizado com diferentes alturas do CP: (a) CP baixo e (b) CP alto.	76
Figura 48. Três configurações com ângulos de atitude do sensor diferentes de zero: (a) variação em ω , (b) variação em ϕ e (c) variação em ω , ϕ e κ	77
Figura 49. (a) e (b): Imagens originais mostrando duas edificações selecionadas. (c) e (d): Detalhes ampliados das edificações escolhidas.	78
Figura 50. (a) e (b) Representação tridimensional da grade regular gerada a partir da nuvem de pontos LASER para os edifícios da Figura 49 (c) e (d), respectivamente.	79
Figura 51. (a) Representação do edifício com os dados interpolados e sem a filtragem. (b) Representação dos mesmos dados com a filtragem.	80
Figura 52. Sequência de etapas para detecção de oclusão para o topo da edificação – Edifício da Figura 49 (c).	81
Figura 53. Sequência de etapas para detecção de oclusão para o topo da edificação – Edifício da Figura 49 (d).	82

Figura 54. Resultados para diferentes configurações de NV / σ_{NV} (Experimento 1).	84
Figura 55. Comportamento do índice de completeza e nível de acerto para $\sigma_{NV} = 0,2$	85
Figura 56. Comportamento do índice de completeza e nível de acerto para $\sigma_{NV} = 0,5$	85
Figura 57. Comportamento do índice de completeza e nível de acerto para $\sigma_{NV} = 1,0$	86
Figura 58. Resultados para diferentes configurações de NV / σ_{NV} (Experimento 2).	86
Figura 59. Comportamento do índice de completeza e nível de acerto para $\sigma_{NV} = 0,2$	87
Figura 60. Comportamento do índice de completeza e nível de acerto para $\sigma_{NV} = 0,5$	87
Figura 61. Comportamento do índice de completeza e nível de acerto para $\sigma_{NV} = 1,0$	88

Lista de Siglas

ALS	<i>Airborne Laser Scanner</i>
ASPRS	<i>American Society for Photogrammetry and Remote Sensing</i>
CCD	<i>Charge Coupled Device</i>
CP	<i>Centro Perspectivo</i>
DPW	<i>Digital Photogrammetric Workstation</i>
FCT	<i>Faculdade de Ciências e Tecnologia</i>
GIS	<i>Geographic Information System</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GSD	<i>Ground Sample Distance</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i>
INS	<i>Inertial Navigation System</i>
LAS	<i>LiDAR Exchange Format</i>
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
LiDAR	<i>Light Detection And Ranging</i>
LMS	<i>Laser Measurement System</i>
LPS	<i>Leica Photogrammetric Suite</i>
MDC	<i>Modelo Digital de Construção</i>
MDE	<i>Modelo Digital de Elevação</i>
MDS	<i>Modelo Digital de Superfície</i>
MDT	<i>Modelo Digital de Terreno</i>
MNE	<i>Modelo Numérico de Elevação</i>
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
TIN	<i>Triangular Irregular Network</i>
UNESP	<i>Universidade Estadual Paulista</i>
UTM	<i>Universal Transversa de Mercator</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	16
1.1	Objetivos	19
1.1.1	Objetivo geral	19
1.1.2	Objetivos específicos	19
1.2	Estrutura do trabalho	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	Sistema de varredura aerotransportado	21
2.1.1	Componentes do sistema LiDAR	22
2.1.2	Processamento	24
2.1.3	Dados do sistema LiDAR	25
2.2	Modelos digitais para representação de superfície	27
2.2.1	Modelo digital de terreno e de superfície	28
2.2.2	Representação da superfície	29
2.2.3	Influência dos métodos de interpolação	32
2.3	Ortorretificação	33
2.3.1	Refinamento de coordenadas	33
2.3.1.1	Distorção radial simétrica e distorção descentrada	33
2.3.1.2	Refração atmosférica	36
2.3.2	Ortoimagem	38
2.3.2.1	Ortoimagem convencional e verdadeira	40
2.3.2.2	Duplo mapeamento e áreas de oclusão	42
2.4	Métodos de detecção de oclusão para geração de ortomagens verdadeiras	44
2.4.1	Método Z-Buffer	45
2.4.2	Método angular	47
2.4.3	Método de Projeção	50
2.5	Algoritmo de Bresenham	53
2.6	Elementos para avaliação da qualidade	55
2.6.1	Completeza	56
2.6.2	Nível de acerto	57
3	MATERIAL E MÉTODO	58
3.1	Materiais	58

3.2	Método de detecção de oclusão baseado em gradientes de altura	60
3.2.1	Varredura	60
3.2.2	Métrica	61
3.2.3	Mapa de visibilidade	63
3.2.4	Parâmetros para filtragem dos gradientes de altura	65
3.2.4.1	<i>Gap</i>	66
3.2.4.2	NV e σ_{NV}	67
4	EXPERIMENTOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	73
4.1	Descrição dos experimentos	73
4.2	Experimentos com dados simulados	73
4.3	Experimentos com dados reais	77
4.3.5	Avaliação da qualidade	83
4.3.5.1	Completeza e nível de acerto	84
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	90
	REFERÊNCIAS	92

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Com o desenvolvimento atual do processamento digital de imagens, da tecnologia GIS (*Geographic Information System*), dos sensores de imageamento aerotransportados e orbitais e dos modernos sistemas fotogramétricos digitais, a utilização de produtos como ortoimagens digitais tem se tornado cada vez mais frequente. A busca por alta resolução em imagens cresce dia a dia e, conseqüentemente, ocorre o mesmo em relação às ortoimagens. Porém, as parcelas da imagem mais afastadas do centro da imagem apresentam algumas limitações, como a obstrução de vias, em áreas urbanas, devido a não correção dos elementos sobre a superfície (edificações, pontes, árvores, etc). Estes elementos podem provocar inconsistências geométricas, como a má junção de feições vetorizadas em diferentes ortoimagens de uma mesma base GIS, implicando na errônea localização de feições presentes nesta base e ocasionando problemas em algumas aplicações cartográficas (NIELSEN, 2004).

As imagens obtidas por sensores aerotransportados e orbitais usados em Sensoriamento Remoto e Fotogrametria são normalmente geradas em projeção perspectiva, na qual os raios são refletidos pelos objetos e passam pelo centro perspectivo do sensor de imageamento. Este tipo de projeção resulta em uma imagem com escala não uniforme devido à atitude do sensor e à variação do relevo. A geração de ortoimagem, de modo convencional, visa eliminar o efeito da inclinação do sensor e do deslocamento na imagem provocado pela variação do relevo. Como resultado, estas ortoimagens convencionais possuem escala uniforme e mostra o relevo, assim como os elementos em seu nível, em sua real localização geográfica. Segundo Wolf e Dewitt (2000), as ortoimagens são geometricamente equivalente a mapas convencionais planimétricos de linhas e símbolos uma vez que ambos mostram corretamente as posições das feições e o relevo em projeção ortogonal. Com isso, o usuário pode identificar posições de objetos, mensurar distâncias, calcular áreas, analisar mudanças espaciais e extrair diversas informações úteis para diferentes aplicações. Tais usos mostram a grande utilidade das ortoimagens em aplicações cartográficas e justificam o grande interesse por este tipo de produto.

A produção de ortoimagem digital convencional requer imagens analógicas ou digitais, um modelo digital de terreno, assim como parâmetros de orientação interior e exterior do sistema sensor (KRAUS, 1993). Com o aumento da adoção de câmaras digitais e dos sistemas LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) aerotransportados e unidades de georreferenciamento direto GNSS/INS (*Global Navigation Satellite System / Inertial Navigation System*), tem-se, a partir desses sistemas e alguns

refinamentos de seus dados, a geração de um modelo digital de terreno (MDT) e os elementos essenciais para produção de ortoimagem, como destacado por Habib et al. (2007).

Na criação de ortoimagens convencionais apenas modelos digitais de terreno e informações do sensor são utilizados para corrigir o deslocamento da imagem devido à variação de relevo. As alturas dos objetos acima da superfície do terreno, como edificações, porém, nem sempre são considerados na geração da ortoimagem. Como ressaltado por Chen et al. (2007), o produto gerado, nessas circunstâncias, apresenta distorção nas reais posições dos objetos presentes acima da superfície do terreno. Com a grande diferença de altitude de alguns objetos em relação à superfície do terreno, surgem áreas não visíveis nas imagens, quando vistas a partir do centro perspectivo (CP) da fotografia aérea utilizada. Essas áreas são denominadas áreas de oclusão (MENDONÇA JÚNIOR, 2010).

Os impactos gerados por problemas citados anteriormente, têm significante influência no uso de ortoimagens digitais em aplicações como planejamento urbano, conforme destacado por Xie e Zhou (2008).

Para a utilização em planejamento urbano, a ortoimagem deve representar as edificações existentes em projeção ortogonal, sem mostrar, por exemplo, faces laterais dos edifícios. Atualmente, esse tipo de produto tem sido denominado “ortoimagem verdadeira” ou “*true orthophoto*” ou, ainda, “*true ortho*” na literatura internacional, pois representa de forma real, ortogonal, as feições antrópicas presentes na área de interesse. O termo ortoimagem verdadeira pode ser observado em diversas referências da literatura, a exemplo de Nielsen (2004), Habib et al. (2007), Chen et al. (2007), Sheng (2007), Xie e Zhou (2008), Jensen (2009) e Mendonça Júnior (2010).

A identificação dessas áreas de oclusão é uma das etapas fundamentais do processo de geração de ortoimagem verdadeira. Nesse sentido, é necessário identificar áreas ocluídas por objetos (como edificações) que aparecem sobre as feições presentes nas imagens digitais, tais como vias, parques, residências, entre outros. As ortoimagens verdadeiras, portanto, consideram também objetos acima do solo, por meio de um modelo digital de superfície (MDS) sendo mais coerentes que as convencionais em determinadas regiões, como mencionado em Chen et al. (2007).

Embora tenha sido mencionado o uso de sistema LASER para a obtenção de MDTs, a nuvem de pontos originalmente obtida por estes sistemas se referem ao MDS, que após um processo de filtragem pode se reduzir ao MDT. Embora tenha sido mencionado o uso do MDS gerado por sistemas a LASER aerotransportados para a geração de ortoimagem

verdadeira pode-se também utilizar MDSs densos obtidos por outras técnicas, como discutido em Haala et al. (2010) e Rothermel e Haala (2012) por exemplo.

Ao gerar ortoimagens verdadeiras com a utilização de modelos que representam o terreno e as feições sobre superfície, surge um efeito, chamado duplo mapeamento ou “*ghost image*”, que vem a ser a repetição de um mesmo pixel (ou conjunto de pixels) da imagem original em locais distintos na ortoimagem gerada. Este efeito ocorre justamente nas áreas oclusas e sua causa é a “competição” de dois ou mais pixels na ortoimagem, por um mesmo pixel na imagem aérea.

Como mostrado por Nielsen (2004), para realizar a compensação das áreas de oclusão é necessária a utilização de imagens adjacentes tomadas de diferentes posições, permitindo com isso gerar o que se chama, ortoimagem verdadeira.

Ao observar trabalhos recentes como os de Habib et al. (2007) e Mendonça Júnior (2010), nota-se a preocupação com a adequação de métodos capazes de evitar a detecção de áreas de oclusão de maneira errônea, tais como falsa oclusão e falsa visibilidade, sendo esta última a principal a ser evitada. Essa adequação está relacionada, na maioria das vezes, ao refinamento dos dados LASER, referentes às bordas das edificações, bem como à otimização dos algoritmos. Com base nesta preocupação e na análise mais cuidadosa deste problema é possível perceber que as áreas de início da oclusão tem relação com regiões onde os gradientes de altura são negativos, o que dá margem para explorar este tipo de métrica no desenvolvimento de métodos alternativos para a solução deste problema.

Atualmente, como alternativa para a redução de alguns efeitos de oclusão, algumas empresas consideram uma maior sobreposição entre as faixas de voo, bem como utilizam câmaras com distância focal maiores e assim é possível, também, obter fotografias em uma maior altura de voo e conseqüentemente minimizar o efeito da deformação devido ao relevo bem como o efeito da oclusão. Além disso, algumas soluções, como as disponíveis em alguns sistemas fotogramétricos pressupõe que se tem disponível um produto vetorial composto pelas bordas de edificações para que estas feições possam ser retificadas corretamente.

Estes são alguns pontos considerados como gargalo na geração deste tipo de produto, sendo relevante destacar que nem todas as Estações Fotogramétricas Digitais (DPW – *Digital Photogrammetric Workstations*) atualmente disponíveis, possuem a ferramenta de geração automática de ortoimagens verdadeiras, como pode-se observar em Gim (2011). Com isso, é possível notar a relevância do tema tratado - detecção de áreas de oclusão, que visa contribuir para a geração de ortoimagens verdadeiras, que é importante em diversas aplicações, como mencionado. Deste modo, a proposição de métodos alternativos, que evitem alguns problemas

encontrados em métodos existentes é relevante, atual e importante para a geração de um produto de interesse prático. Assim, pode-se considerar que todos estes aspectos serviram como elementos motivadores ao desenvolvimento deste trabalho.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Com base na análise dos métodos atualmente disponíveis o propósito central deste trabalho consiste em propor um algoritmo alternativo, baseado em gradientes de altura, capaz de detectar áreas de oclusão, utilizando modelos digitais de superfície, como aqueles provindos de dados de varredura a LASER, ou equivalente, a fim de auxiliar na geração de ortoimagens verdadeiras.

1.1.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos, pretende-se:

- Organizar e manipular os dados de varredura a LASER para que seja possível sua utilização na detecção das áreas de oclusão – principalmente no que se refere à representação do MDS em grades regulares;
- Implementar a metodologia proposta para detecção de oclusão, com base em gradiente de altura, a partir de informação de altitude fornecida por MDS;
- Testar e experimentar a metodologia desenvolvida com dados teóricos e reais, assim como avaliar os resultados obtidos, de maneira visual e quantitativa.

1.2 Estrutura do trabalho

Esta dissertação segue uma estrutura composta por cinco capítulos e as referências. O primeiro fornece uma introdução do conteúdo abordado no projeto, englobando a justificativa para tal, assim como os objetivos: geral e específicos.

O Capítulo 2 trata de forma geral da fundamentação teórica, onde são abordados os seguintes tópicos: sistemas de varredura aerotransportado, LiDAR, modelos digitais de superfície, ortorretificação, métodos de detecção de oclusão, algoritmo de Bresenham e por fim são apresentados os índices usados na avaliação quantitativa, finalizando assim a fundamentação teórica.

No Capítulo 3 são apresentados os materiais utilizados, assim como suas características técnicas, fundamentais para o entendimento dos resultados, bem como os

softwares utilizados neste projeto. Ainda neste capítulo, formula-se o método de detecção de oclusão proposto.

Os resultados obtidos com o método proposto, tanto para dados simulados, utilizados para a validação do método, quanto para dados reais, são apresentados no Capítulo 4. Concluindo este capítulo são apresentadas algumas análises quantitativas dos resultados, definindo assim valores indicados para alguns parâmetros utilizados no método proposto.

Finalizando, têm-se no Capítulo 5 as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Sistema de varredura aerotransportado

O termo LiDAR (*Light Detection And Ranging*) é utilizado para identificar o sistema de varredura capaz de emitir e receber pulsos de luz. Na maioria dos sistemas essa luz é o LASER, podendo o sistema ser projetado com diferentes tecnologias e operar em distintos comprimentos de onda, como destacam (WEHR e LOHR, 1999) de forma detalhada. Independente da fonte geradora do LASER a ideia principal é calcular a distância entre o emissor/receptor do pulso e o objeto, que no caso aerotransportado corresponde à superfície terrestre. Este cálculo pode ser feito por dois métodos: tempo de propagação do pulso e diferença de fase da onda (WEHR e LOHR, 1999). Esse sistema pode ser acoplado a uma aeronave, podendo este sistema de varredura aerotransportado receber a denominação ALS (*Airborne Laser Scanner*).

Ao comparar os modelos digitais de superfície oriundos de levantamento a LASER aerotransportado com os obtidos por sensoriamento remoto tradicional, ou por técnicas fotogramétricas, verificam-se algumas vantagens, tais como a possível representação numérica da superfície de uma maneira mais completa e com maior riqueza de detalhes. Esta é provavelmente uma das razões pela qual a tecnologia LiDAR vem se tornando cada vez mais madura e avançada (SAMBERG, 2007) em diferentes aplicações.

Inicialmente, os levantamentos LiDAR eram realizados em uma única linha de varredura da aeronave. Essa linha gerava apenas um perfil do terreno, ao longo da linha de voo, sendo considerado um sistema limitado, uma vez que a maioria dos projetos necessitavam de modelos de superfície criados com alta densidade de pontos (MIKHAIL et al., 2001). Outro fator que limitava esse sistema era a forma com que se determinavam as posições da plataforma, ou seja, os equipamentos e métodos utilizados no posicionamento geodésico do sistema LiDAR, que serviam de base para o processamento dos dados (coordenadas tridimensionais do terreno). Porém, diferente de antigamente, os sistemas atuais possuem um complexo conjunto de equipamentos que auxiliam tanto na varredura dos pulsos, como na determinação de um posicionamento preciso para o sensor e consequentemente para a nuvem de pontos, referente à superfície levantada.

Segundo Kraus (2004), a tecnologia LiDAR, vem revolucionando tanto os mapeamentos topográficos, quanto os projetos que utilizam a mensuração de objetos em três dimensões a curta distância (*close range*). Além disso, trata-se de uma tecnologia com

características em comum com a Fotogrametria, como a determinação de modelos de representação de superfície, tanto de terreno como dos objetos presentes sobre a superfície.

O princípio de obtenção de dados por um sistema LiDAR consiste na emissão de pulsos de energia em direção ao solo, em curtos intervalos de tempo, e recepção destes pulsos por uma unidade de recepção. Esse processo de emissão e recepção permite o cálculo da distância do sistema LASER aos alvos, por meio da medição do tempo de propagação do sinal (WEHR e LOHR, 1999). O sistema ao utilizar seus diversos sensores, descritos nas próximas seções, possibilita a determinação da posição e orientação do sensor, além do ângulo de visada de cada ponto, que embasa, ao final do processo, a obtenção da real posição tridimensional de objetos situados na superfície terrestre. Como resultado, obtém-se um conjunto de pontos 3D, o que torna possível criar um modelo digital de superfície.

2.1.1 Componentes do sistema LiDAR

O sistema LiDAR possui alguns componentes fundamentais, que devem ser referenciados entre si e sincronizados corretamente, a fim de possibilitar a geração de dados tridimensionais com alta qualidade. Em Baltsavias (1999) são descritos os elementos fundamentais desse tipo de sistema:

- Sistema de emissão e recepção do pulso LASER: Contém o conjunto óptico de emissão e recepção do pulso LASER, detector de sinal, amplificador (necessário para emissão do pulso), sistema de contagem de tempo e outros componentes eletrônicos;
- Sistema operacional e software de controle do sistema LiDAR;
- Unidade de armazenamento para: LASER, GNSS, INS, *Scanner* e imagem (se necessário);
- Conjunto óptico: Após ser estimulado, o pulso LASER é direcionado ao espelho de varredura, que orienta o pulso à determinada direção. Ao ser enviado ao terreno (objetos) esse pulso interage com o objeto e retorna, onde ocorre a coleta desta informação por meio de um receptor de pulsos. Nessa etapa o sinal analógico observado é convertido para o digital e filtrado (eliminação de ruídos), antes de ser armazenado;
- Receptor GNSS: elemento responsável pela determinação de posições espaciais ($X_{0(t)}$, $Y_{0(t)}$, $Z_{0(t)}$), em intervalos de tempo pré-determinados, da plataforma em que se encontra o sistema LiDAR;

- IMU (*Inertial Measurement Unit*): mede as acelerações lineares e angulares do sistema, possibilitando a determinação da atitude da plataforma ($\kappa_{(t)}$, $\varphi_{(t)}$, $\omega_{(t)}$) durante a trajetória do levantamento (Figura 1). Essas posições não são coletadas ao mesmo tempo em que são determinadas as posições espaciais estimadas pelo sistema GNSS, logo existe a necessidade de um sincronismo entre os dados. A frequência da IMU é mais alta que a de coleta das observações do receptor GNSS.
- Estação GNSS de referência, para pós-processamento;
- Software para planejamento do levantamento, assim como sistema de navegação que possibilite o envio de correções em tempo real para a aeronave;
- Sensores opcionais, como câmaras de vídeo ou câmaras digitais de imageamento aéreo, câmaras termais, multiespectrais, entre outros.



Figura 1. Ângulos de atitude (ω – em torno do eixo x; φ – em torno do eixo y; κ – em torno do eixo z) da aeronave. Adaptado de Brito e Coelho (2002).

Durante a execução do voo é possível modificar uma grande variedade de parâmetros, tais como velocidade de voo, altura/altitude, ângulo de escaneamento, divergência do feixe, tipo de pulso a ser armazenado (*first/last/todos*), espaçamento entre os pontos, área a ser recoberta, entre outros. Esses parâmetros são adequados de melhor forma ao projeto em questão, o que permite uma grande flexibilidade e possibilidades de adaptação para diferentes exigências, conforme a aplicação. Deve-se ressaltar que a mudança destes parâmetros não é totalmente livre e depende de cada sistema. Existem restrições operacionais, tais como energia do LASER em conjunto com altura de voo, capacidade de armazenamento, etc (BALTSAVIAS, 1999).

2.1.2 Processamento

O objetivo principal do processamento dos dados LiDAR é a obtenção de um conjunto de coordenadas tridimensionais, referentes a pontos no terreno, que possibilite a geração de modelos digitais de superfície.

Autores como Baltsavias (1999), Wehr e Lohr (1999), Mikhail et al. (2001), Kraus (2004) e Centeno e Mitishita (2007) dão alta importância a um bom sincronismo entre os dados oriundos dos componentes do sistema LiDAR para a obtenção de dados posicionais (terreno) com boa qualidade. Este sincronismo é o principal gargalo no funcionamento de um ALS.

Os pontos tridimensionais obtidos por observações GNSS são referentes a posições que correspondem à trajetória da plataforma. Porém essas coordenadas não são necessariamente dos instantes em que foram emitidos/recebidos os pulsos LASER, assim como as observações do sistema inercial também não remetem necessariamente a estes instantes. Por esta razão é essencial que seja feito um sincronismo entre estes sistemas, para que todos os pontos da trajetória que tenham emitido/recebido pulso LASER possuam coordenadas e valores de atitudes relativos a sua real posição no instante de coleta. Em Reis (2009) são apresentados os fatores essenciais à realização deste sincronismo.

Além desse fator, os componentes do sistema LiDAR devem estar referenciados entre si, ou seja, deve ser feita uma calibração *a priori* das distâncias e ângulos entre eles. Assim, tem-se um ambiente pronto para a obtenção das coordenadas tridimensionais dos pontos amostrados do terreno. A Figura 2 apresenta a relação entre o receptor GNSS, IMU, LASER e ponto no terreno.

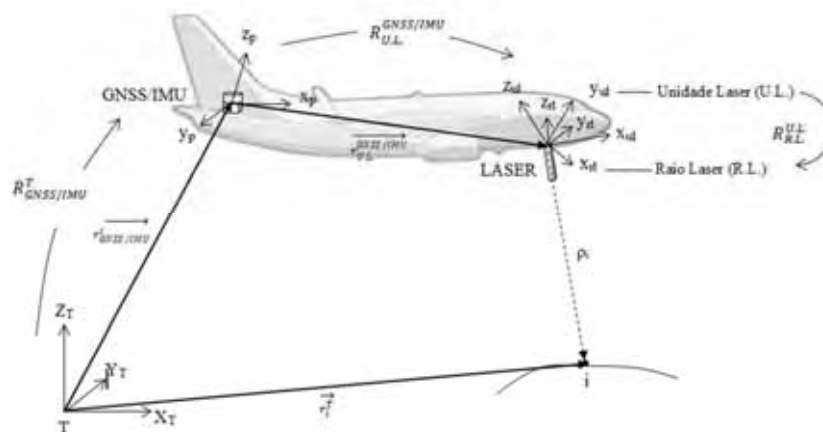


Figura 2. Componentes de um sistema LiDAR e suas relações geométricas. Adaptado de El-Sheimy et al. (2005).

Para o cálculo das coordenadas de um ponto genérico i do terreno é utilizada a seguinte formulação, conforme El-Sheimy et al. (2005):

$$\vec{r}_i^T = \vec{r}_{GNSS/IMU}^T + R_{GNSS/IMU}^T(t) \cdot R_{U.L.}^{GNSS/IMU} \cdot \vec{r}_{U.L.}^{GNSS/IMU} + R_{GNSS/IMU}^T(t) \cdot R_{U.L.}^{GNSS/IMU} \cdot R_{R.L.}^{U.L.} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\rho_i \end{bmatrix}$$

em que,

$\vec{r}_i^T$: coordenadas do ponto P no sistema de referência do terreno;

$\vec{r}_{GNSS/IMU}^T$: coordenadas do receptor GNSS/IMU no sistema de referência do terreno;

$\vec{r}_{U.L.}^{GNSS/IMU}$: distância entre receptor GNSS/ IMU e emissor/receptor do pulso LASER;

$R_{GNSS/IMU}^T$: matriz de rotação entre receptor GNS/IMUS e o sistema de referência do terreno;

$R_{R.L.}^{U.L.}$: matriz de rotação entre unidade LASER e raio LASER;

$R_{U.L.}^{GNSS/IMU}$: matriz de rotação entre receptor GNSS/IMU e unidade LASER;

ρ_i : medida de distância entre unidade LASER e o ponto i no terreno;

t : tempo a ser sincronizado com todas as coletas (IMU, GNSS, LASER).

2.1.3 Dados do sistema LiDAR

Com processamento das observações mencionadas anteriormente é possível determinar um conjunto de pontos tridimensionais sobre a área de interesse. Esse conjunto de coordenadas pode ser expresso em diversos formatos. A fim de padronizar a estrutura desses dados a ASPRS (*American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*) criou um formato denominado ASPRS LAS – (*Lidar Exchange Format*), formato este que possui a seguinte estrutura, conforme Samberg (2007).

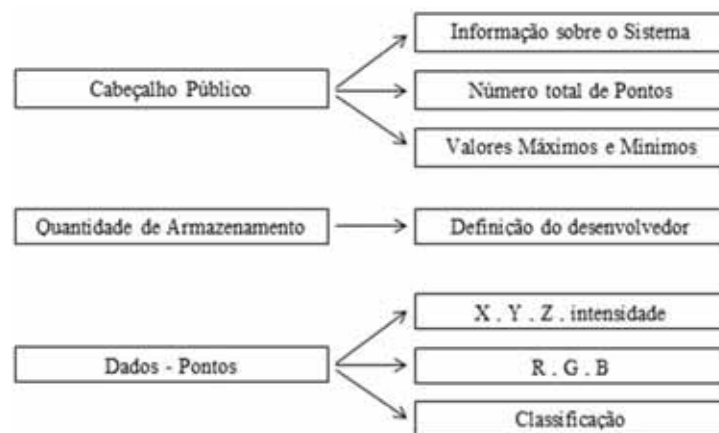


Figura 3. Elementos do formato .LAS. Adaptado de Samberg (2007).

A maioria dos softwares que tratam de dados LiDAR utilizam esse formato como padrão, pois tanto desenvolvedores de sistemas como usuários têm utilizado essa padronização. Como visto na Figura 3, o formato LAS apresenta informações de metadados (informação sobre o sistema, número total de pontos e valores de máximo e mínimo), informações relacionadas ao armazenamento e informações sobre os pontos (coordenadas tridimensionais, intensidade do retorno, tonalidades (caso haja sensor CCD – *Charge Coupled Device*) e classe).

Uma questão que deve ser levada em consideração na aquisição dos dados LiDAR, independente do formato dos dados, é a aplicação em que serão utilizados estes dados. No caso deste trabalho a aplicação se dá em áreas urbanas. Logo, alguns fatores devem ser levados em conta, como a influência de altas edificações na aquisição dos pontos na superfície.

Em áreas urbanas, geralmente compostas por altas edificações, os dados tridimensionais coletados sobre a superfície possuem regiões sem informação, devido às oclusões causadas por estas edificações. Como a varredura é feita de forma transversal às linhas de voo, algumas regiões não são alcançadas pelos feixes do LASER, como apresentado em vermelho na Figura 4.

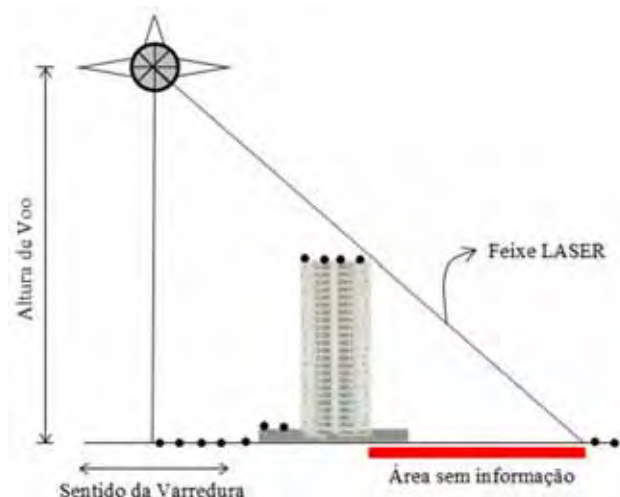


Figura 4. Representação das áreas sem informação, devido à presença de edificação alta.

Essas regiões sem informação podem ser minimizadas a partir de um planejamento de voo adequado. Isso é possível, aumentando, por exemplo, a altura de voo e/ou a sobreposição entre as faixas, reduzindo assim o problema de “sombreamento” do sinal gerado pelo sistema LASER. A rigor este problema nem sempre pode ser eliminado por completo mas sim minimizado, pois se houver duas edificações muito próximas uma da outra, nem

mesmo com uma sobreposição de 50% entre as faixas (ver Figura 5) ocorreria uma eliminação completa desta sombra, a não ser que a linha de voo fosse exatamente entre as duas edificações (SHIH e HUANG, 2009).

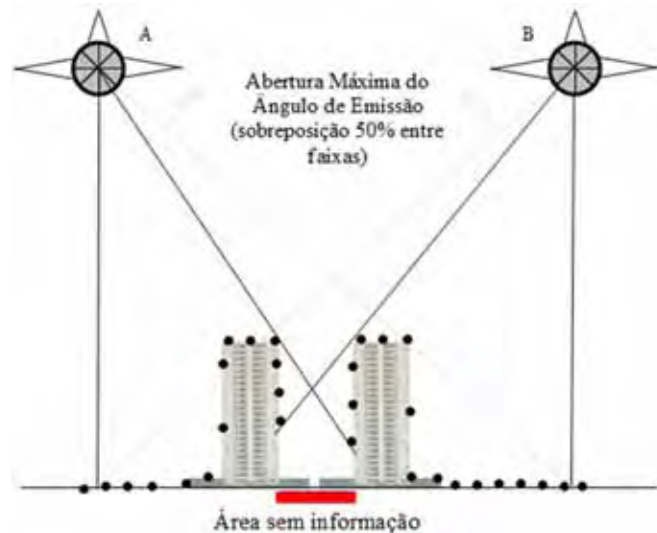


Figura 5. Representação de área de sombra, mesmo com sobreposição de 50% entre as faixas de voo.

Este tipo de problema é comumente encontrado ao se trabalhar com dados LiDAR em áreas urbanas. Outra forma de se tratar este problema é realizando uma interpolação dos dados, a fim de preencher as “áreas de sombra” (sem informação). Porém, deve-se utilizar interpoladores que atendam às necessidades da aplicação, pois as interpolações podem degradar informações de interesse, como regiões de borda das edificações. Neste trabalho não foi objeto de estudo a escolha do método de interpolação mais adequado, sendo utilizada a triangulação de Delaunay e posteriormente interpolada as altitudes por meio de interpolações lineares, em um grid.

2.2 Modelos digitais para representação de superfície

Como mencionado anteriormente, tem-se como objetivo geral neste trabalho a detecção de áreas de oclusão para geração de ortoimagens verdadeiras. O processo de geração da ortorretificação será abordado na Subseção 2.3, porém, para adiantar, ressalta-se a necessidade de utilização de um modelo digital de terreno ou de superfície para realizar este processo. O modelo deve representar a superfície em estudo, seja de uma maneira menos complexa (representação da superfície sem os elementos sobre o terreno – edificações, vegetação e pontes) ou mais complexa (representação da superfície contendo os elementos antrópicos, mencionados anteriormente).

Neste trabalho serão utilizadas algumas nomenclaturas relativas aos modelos que representam a superfície terrestre. Quando for tratado em um âmbito mais geral será utilizado o termo “modelo digital de elevação” (MDE), deixando, assim, a citação do modelo de representação de superfície mais abrangente.

Nota-se, ao estudar algumas referências, que diferentes nomenclaturas são utilizadas para uma mesma representação da superfície. A seguir serão apresentadas algumas considerações a respeito das nomenclaturas mais comuns e as definições consideradas neste trabalho, para que não exista divergência quanto ao modelo tratado, quais sejam: modelo digital de terreno e modelo digital de superfície; assim como sobre a influência dos métodos de interpolação.

2.2.1 Modelo digital de terreno e de superfície

Segundo Nielsen (2004), modelo digital de terreno corresponde à representação da superfície da Terra, sem considerar edificações e vegetação. É o modelo mais utilizado nos projetos em geral.

Para El-Sheimy et al. (2005), o MDT é o modelo que envolve não somente alturas e elevações como também feições utilizadas em SIGs, tais como rios e divisores d’água. Além disso, pode conter informações sobre o terreno, como inclinação e área de visibilidade. De maneira geral, o MDT é considerado como o modelo que inclui tanto dados planimétricos quanto altimétricos do relevo.

Uma definição clássica encontrada em diversas pesquisas é a apresentada por Miller e LaFlamme¹ (1958 *apud* EL-SHEIMY ET AL., 2005, p. 01) que descrevem o MDT como uma representação estatística da superfície contínua do terreno, por meio de um grande número de pontos selecionados, cujas coordenadas X, Y e Z são conhecidas, em um sistema de referência arbitrário.

Portanto, um MDT é uma representação da superfície física contínua da Terra, composta por um conjunto de pontos, com coordenadas tridimensionais conhecidas, não representando as vegetações nem os elementos antrópicos, podendo ou não apresentar algumas características específicas do terreno, tais como rios, divisores d’água, ponto mais alto e mais baixo da área (Figura 6).

O modelo utilizado neste projeto é o modelo digital de superfície (MDS) que, a exemplo do MDT, possui algumas definições. Para Amhar et al. (1998), o MDS é a

¹ MILLER, C.L.; LAFLAMME, R.A. The Digital Terrain Model - Theory and Application. **Photogrammetric Engineering**. Vol 24. p. 433-442. 1958.

representação completa da região observada/estudada, sendo a junção do MDT com um modelo de edificações, ou seja, são todas as características de um MDT em conjunto com representações de edificações, pontes e outros objetos, assim como de vegetação, em um único modelo. Para Nielsen (2004) o conceito de MDS embora seja formalmente um pouco diferente, na prática é equivalente ao apresentado por Amhar et al. (1998).

Deste modo, pode-se pensar em MDS como o modelo completo de representação da superfície, composto por um conjunto de pontos, referentes tanto ao terreno como à vegetação e feições antrópicas, cujas coordenadas tridimensionais são conhecidas (Figura 6).

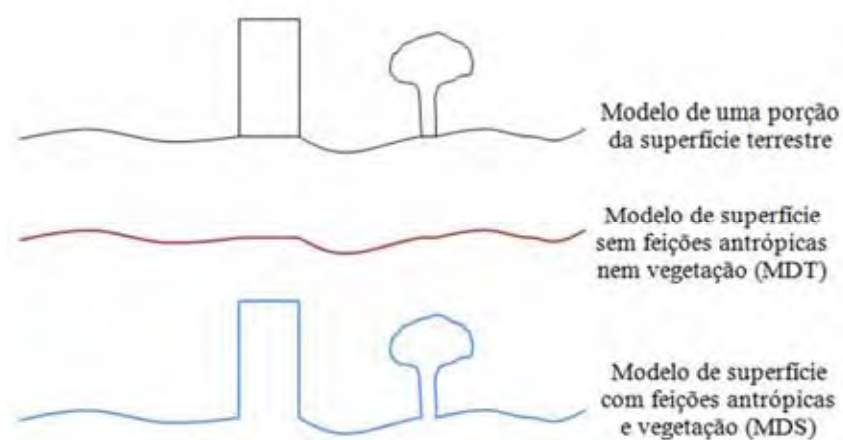


Figura 6. Representação dos modelos digitais de elevação (MDEs).

2.2.2 Representação da superfície

Existem diversas formas de representação da superfície terrestre. A mais comum se dá por meio das curvas de nível em um mapa, onde cada linha representa uma altitude constante no terreno (NIELSEN, 2004). A representação destes modelos pode ser realizada basicamente de duas formas, por pontos distribuídos regularmente ou irregularmente (WOLF e DEWITT, 2000).

El-Sheimy et al. (2005) apresentam as características dessas duas formas de representação, assim como vantagens e desvantagens.

A representação regular trabalha numa estrutura semelhante a uma matriz, armazenando-se as elevações de cada elemento (ponto), podendo até mesmo serem adicionadas demais informações, como atributos do ponto. Pelo fato de ser possível tratá-la como uma estrutura matricial já se verifica uma clara vantagem, uma vez que esta estrutura de dados é de uso muito frequente em inúmeros algoritmos computacionais. A acurácia dos valores interpolados em sua estrutura está relacionada ao conjunto de pontos de origem, assim

como a resolução espacial da grade. Quanto menos distantes as células estão entre si maior resolução espacial possui a grade. A Figura 7 apresenta uma superfície representada por uma grade regular.

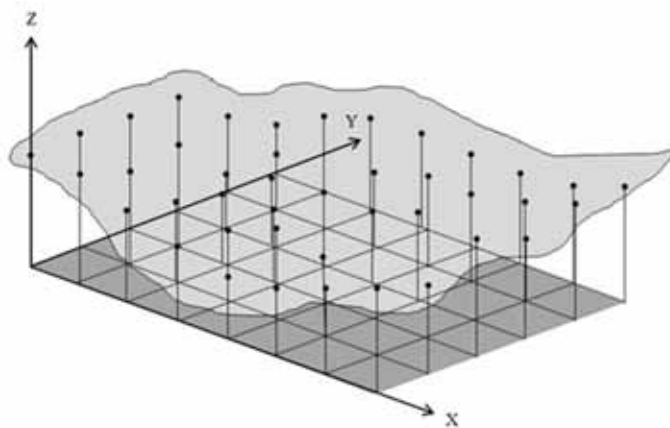


Figura 7. Representação de um MDT utilizando grade regular. Adaptado de Felgueiras (2012).

De acordo com Felgueiras (2012) a representação em grade regular possui algumas vantagens, como:

- Fácil armazenamento e manipulação;
- Fácil integração com base de dados *raster*;
- Aparência mais natural que as de curvas de nível.

Porém, como qualquer outra representação, traz consigo algumas desvantagens:

- Não é possível obter diferentes resoluções, ou seja, os espaçamentos entre as células são sempre os mesmos. Com isso, uma mesma região, com áreas complexas e menos complexas, é representada da mesma forma, ocasionando redundância de dados ou falta de informação;
- Pontos característicos da região em estudo dificilmente são representados, como ponto mais alto e mais baixo ou divisores d'água.

Outra forma de representação é por distribuição irregular dos pontos, em que, em geral, utiliza-se um método de triangulação denominado TIN (*Triangular Irregular Network*) (Figura 8). Apresenta-se como boa alternativa para representação de superfície, pois por possuir um conjunto de pontos irregularmente espaçados, podendo-se aumentar a densidade de amostras em áreas mais complexas, como regiões com grande variação do relevo, e coletar menos informações em áreas de relevo plano. Isso faz com que o problema de diferentes resoluções na grade regular seja eliminado. Logo, essa representação é mais eficiente para

armazenar a realidade física do terreno. Além disso, é possível inserir linhas de quebra em sua criação, fazendo com que feições, como rios e divisores d'água, ajudem na representação do relevo (EL-SHEIMY et al., 2005).

Essa representação é composta por triângulos, geralmente criados pelo método de Delaunay, na qual o seguinte critério é usado na geração dos triângulos: para cada triângulo de Delaunay, o círculo passante pelos três vértices não contém nenhum vértice de outro triângulo (WOLF e DEWITT, 2000).

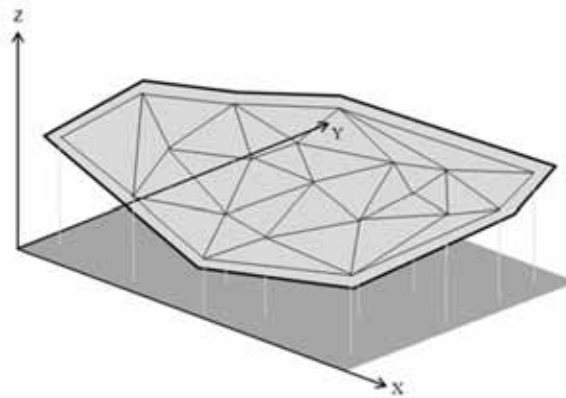


Figura 8. Representação da superfície pela triangulação de Delaunay. Adaptado de Felgueiras (2012).

Assim como a grade regular, são apresentadas as vantagens e desvantagem no uso da representação da superfície pela triangulação:

Vantagens:

- Possibilidade de representar a superfície em diferentes níveis de resolução;
- Diferentemente da grade regular nesta representação podem ser incluídos os pontos mais alto e mais baixo da amostra;
- Pode-se relacionar os triângulos a linhas de quebra – que representam feições conhecidas sobre o terreno, como cursos d'água e divisores de água, obtendo assim uma representação mais fiel da superfície.

Desvantagem:

- Em muitos casos, requer inspeção visual e controle manual da rede de triângulos, como um refinamento.

Neste trabalho em específico utiliza-se tanto conjunto de dados espaçados irregularmente, dados LiDAR, como também grades regulares, que representam o modelo digital de superfície em sua forma final.

2.2.3 Influência dos métodos de interpolação

Segundo El-Sheimy et al. (2005) a manipulação de MDT inclui os processos de edição, filtragem, junção e reamostragem de elevação. Este último é considerado o procedimento mais importante e o mais utilizado.

A qualidade do resultado de um processo de interpolação depende principalmente da amostra original dos pontos de referência, ou seja, de quão fiéis estes pontos representam o relevo / superfície. Para execução de tal tarefa não existe o melhor algoritmo de interpolação, aquele que é notoriamente superior a todos os outros e apropriado para todas as aplicações. O que existe são diferentes tipos de interpoladores que se adequam de melhor forma para cada aplicação e situação (EL-SHEIMY et al, 2005).

Os métodos de interpolação são classificados basicamente em métodos globais – aqueles que utilizam todas as amostras disponíveis, a fim de estimar a elevação em determinado ponto de interesse; e os métodos locais – que estimam uma elevação desconhecida utilizando apenas pontos de referência na vizinhança do ponto de interesse (Li et al., 2005).

Uma das maneiras de se criar um MDS é por meio de dados de varredura a LASER, como mencionado anteriormente. Os pontos resultantes desta varredura são espaçados irregularmente e em alguns casos há a necessidade da geração de uma grade regular. Logo, surge a necessidade de procedimentos de interpolação (CENTENO e MITISHITA, 2007).

Quando se trata do uso de modelos, como MDS, que representam feições com variações abruptas de altura (tais como edificações) é interessante o uso de métodos de interpolação de caráter local, pois os pontos distantes da área de interesse pouco influenciam nessa região. Alguns dos métodos incluídos nessa categoria são: vizinho mais próximo, interpolação linear, interpolação bilinear, convolução cúbica e método do inverso da distância.

Ao se tratar de dados LiDAR, esses interpoladores são utilizados geralmente em duas situações: em regiões onde não houve a coleta de informação sobre a superfície (oclusões dos dados LiDAR); e em situações em que o levantamento foi efetuado com espaçamento maior, ou menor, que a resolução da grade pretendida.

No trabalho apresentado por Botelho et al. (2005) é feita uma comparação entre dois interpoladores, vizinho mais próximo e inverso da distância, no cálculo de volume a partir de dados de varredura a LASER. Neste trabalho os autores concluem que o interpolador vizinho mais próximo gerou um resultado (MNE – Modelo Numérico de Elevação) que melhor representou a edificação em questão, sendo esta a base para o cálculo do volume.

O interpolador vizinho mais próximo não estima um novo valor para o ponto a ser interpolado, e sim utiliza a elevação do ponto de referência mais próximo, ou seja, assegura que o valor interpolado seja um dos valores originais. Este método tem a vantagem de ser computacionalmente mais eficiente, porém, produz uma superfície descontínua (EL-SHEIMY et al, 2005).

Já o método do inverso da distância é considerado o que melhor representa a superfície do solo para geração de MDT, uma vez que esse possui a característica de suavizar a superfície em estudo.

2.3 Ortorretificação

Esta Seção apresenta conceitos e procedimentos relacionados à geração de ortoimagens (ortorretificação), com foco nas diferenciações e tratamentos relacionados à ortoimagem verdadeira. Todos os conceitos a seguir descritos fazem parte do método de detecção de oclusões apresentado, seja matematicamente em sua formulação e implementação ou como suporte teórico relativo aos métodos existentes.

2.3.1 Refinamento de coordenadas

A geração de imagens está relacionada ao armazenamento de informação radiométrica de uma onda eletromagnética, registrada por sensores, sejam eles analógicos ou digitais, em um determinado intervalo espectral. Inicialmente a formação de imagem era feita por câmaras denominadas *pinhole*, que é constituída por uma caixa onde a entrada de luz era feita por uma pequena abertura. A quantidade de luz que entrava nesse instrumento, no entanto, era muito baixa e não era armazenada muita informação. Com isso, foi inserido neste dispositivo um sistema de lentes, aumentando, assim, a quantidade de luz que entrava no sistema e permitindo o armazenamento de um número maior de informação. Porém, ao acoplar o sistema de lentes, foram também adicionadas aberrações e distorções nas imagens geradas (WOLF e DEWITT, 2000).

2.3.1.1 Distorção radial simétrica e distorção descentrada

Para Andrade (1998), a distorção radial simétrica é a parcela não desejável da refração sofrida por um raio de luz ao atravessar uma lente ou sistema de lentes. Esta parcela provoca, em um ponto imageado, um deslocamento radial em sua posição teoricamente correta, necessário, portanto, uma compensação deste deslocamento para que todas coordenadas fotogramétricas utilizadas sejam mais acuradas (MIKHAIL et al., 2001). Essa

distorção é causada por imprecisões no processo de fabricação das lentes (WOLF e DEWITT, 2000).

A correção dessa distorção pode ser feita de duas formas: por meio de valores tabelados para correção de acordo com a distância radial, ou por meio da modelagem de uma função polinomial que a represente. Ambos (valores tabelados e modelagem) são determinados por um processo de calibração, em que se determina uma distância focal na qual as distorções, tanto positivas quanto negativas, sejam equalizadas. (MIKHAIL et al., 2001).

Esse efeito pode ser observado na Figura 9, onde, inicialmente, um raio de luz incidente pelas lentes (ponto O), deveria projetar o ponto A, porém, devido a uma distorção radial simétrica positiva, é feita a projeção em A'. Nota-se o deslocamento δr entre a posição ideal A e a projetada A'. Este deslocamento está relacionado à distância focal 'f' e à variação $\Delta\alpha$. Para anular este deslocamento é possível mover o plano focal por um valor igual a δx , da posição 0 (focal = f) para posição 1 (focal = f'). Assim, é possível obter as coordenadas fotogramétricas, para o ponto em questão, sem o efeito do deslocamento radial simétrico.

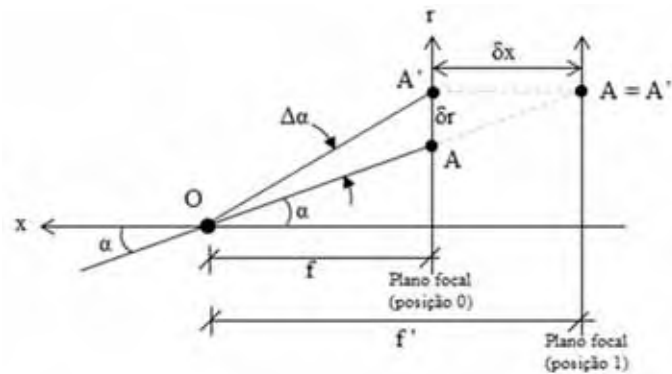


Figura 9. Representação da variação longitudinal para se obter um deslocamento radial nulo.

Modificado a partir de Andrade (1998).

De acordo com Mikhail (2001), a função polinomial para cálculo do deslocamento radial é dada por:

$$\delta_r = k_1 \cdot r^3 + k_2 \cdot r^5 + k_3 \cdot r^7 + \dots \quad (1)$$

em que,

k_i : coeficientes da função polinomial;

r: distância radial do ponto medido (x' , y'), e portanto sujeito às distorções, ao ponto principal (x_0 , y_0) dada por $r = \sqrt{(x' - x_0)^2 + (y' - y_0)^2}$.

Esses coeficientes são determinados no processo de calibração de câmaras como pode-se ver em Andrade e Olivas (1981) e Galo e Tommaselli (2011).

De acordo com a definição dada por Andrade (1998), o ponto principal de uma imagem é a projeção ortogonal do centro perspectivo (neste caso o ponto nodal posterior, ou interior) no plano focal, sendo este ponto a posição cujas distorções das lentes são nulas. Este ponto é considerado como a origem do sistema fotogramétrico (WOLF e DEWITT, 2000).

A distorção radial simétrica pode ser decomposta em duas parcelas: uma para o eixo das abcissas e outra para o das ordenadas (Equações 2 e 3), basicamente por relação de triângulos, como apresentado na Figura 10.

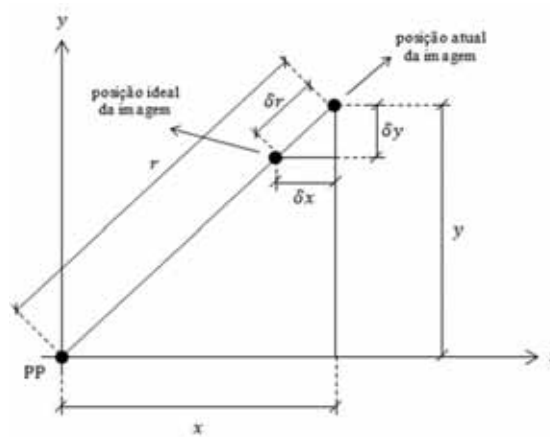


Figura 10. Componentes da distorção radial em x e y. Adaptado de Wolf e Dewitt (2000).

$$\frac{\delta_r}{r} = \frac{\delta_{x_radial}}{x} = \frac{\delta_{y_radial}}{y}$$

$$\delta_{x_radial} = (k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4 + k_3 \cdot r^6 + \dots) \cdot x \quad (2)$$

$$\delta_{y_radial} = (k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4 + k_3 \cdot r^6 + \dots) \cdot y \quad (3)$$

sendo, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, onde (x, y) são as coordenadas considerando a origem no ponto principal.

Além desta distorção, tem-se a distorção descentrada, que decorre da impossibilidade do fabricante em alinhar perfeitamente os eixos ópticos das lentes que compõem uma objetiva, provocando um deslocamento na imagem. Este deslocamento possui uma componente radial e outra tangencial (ANDRADE, 1998).

A Figura 11 revela a representação das duas componentes, tangencial e radial.

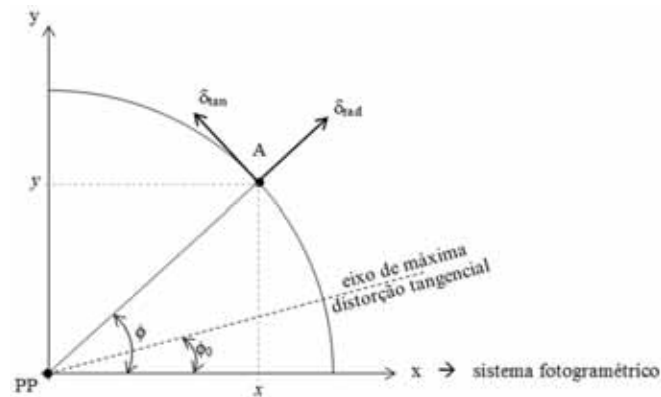


Figura 11. Representação gráfica das componentes da distorção descentrada. Adaptado de Mikhail et al. (2001).

Essas componentes variam de acordo com a posição do vetor entre o ponto principal e o ponto de interesse (A – no exemplo da Figura 11) em relação ao eixo de máxima distorção tangencial. Na posição em que o vetor é coincidente ao eixo de máxima distorção tangencial, a componente tangencial (δ_{tan}) é máxima e ortogonal, assim como a parcela radial (δ_{rad}) é nula. Já quando o vetor do ponto apresenta-se perpendicular a este eixo, a situação se inverte, sendo δ_{rad} máximo e δ_{tan} nulo (MIKHAIL et al., 2001).

Por meio de um agrupamento de parâmetros apresentado por Brown (1966) a distorção descentrada pode ser modelada por:

$$\delta_{x_descentrada} = [P_1 \cdot (r^2 + 2 \cdot x^2) + 2 \cdot P_2 \cdot x \cdot y] \quad (4)$$

$$\delta_{y_descentrada} = [2 \cdot P_1 \cdot x \cdot y + P_2 \cdot (r^2 + 2 \cdot y^2)] \quad (5)$$

em que,

P_i : coeficientes da distorção descentrada;

r : distância radial do ponto em questão ao ponto principal;

x, y : coordenadas fotogramétricas.

Nesta Subseção foram apresentadas as distorções radiais simétricas e descentradas. Para outras distorções e modelos sugere-se Galo e Tommaselli (2011).

2.3.1.2 Refração atmosférica

Raios de luz que passam por dois meios de diferentes índices de refração, são refratados de acordo com a lei de Snell. Esta lei relaciona o ângulo de incidência de um raio com o ângulo de refração, ao passar por meios de diferentes densidades e, conseqüentemente, diferentes índices de refração (MIKHAIL et al., 2001).

Como a densidade diminui conforme aumenta a altitude, o raio de luz não se propaga em linha reta pela atmosfera (WOLF e DEWITT, 2000). Ao observar a Figura 12 vê-se que o raio que parte do ponto A para o negativo forma o ângulo α (considerando o efeito da refração – ponto a). Se não fosse considerado o índice de refração, α corresponderia ao ponto a' ao invés de a . Logo, esse deslocamento entre a e a' deve ser compensado pelo cálculo da refração atmosférica. Novamente, partindo-se do ponto A, em linha reta, para o negativo, tem-se o ponto a' , sendo a distorção no ângulo de incidência α igual a $\Delta\alpha$ e a linear (no plano imagem) igual a Δr ($\Delta r = r - r'$).

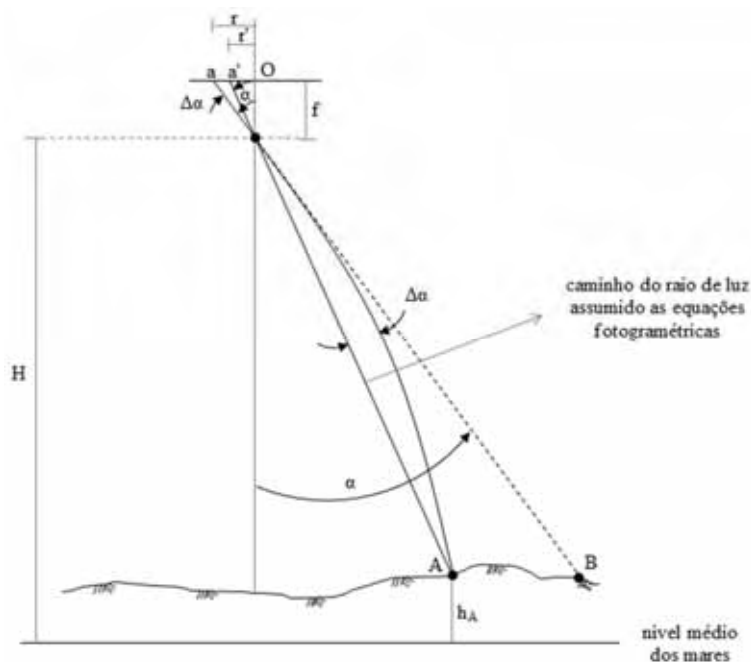


Figura 12. Deslocamentos causados pela refração atmosférica. Adaptado de Wolf e Dewitt (2000).

Para realizar o cálculo do deslocamento devido à refração atmosférica, inicialmente deve-se determinar a variação angular ($\Delta\alpha$), por meio da seguinte formulação (WOLF e DEWITT, 2000):

$$\Delta\alpha = K.tg(\alpha) = K.tg(r/f) \quad (6)$$

em que,

K: coeficiente que representa a refração na atmosfera envolvida no levantamento;

α : ângulo formado entre a vertical e o raio de luz;

r: distância radial;

f: distância focal do sistema de lentes.

Existem algumas formulações para o cálculo de K. Wolf e Dewitt (2000) apresentam este assunto com a equação da *American Society of Photogrammetry*. Já Mikhail et al. (2001) utilizam a formulação da ARDC (*Air Research Development Command*). Alguns autores utilizam uma atmosfera padrão determinada para os Estados Unidos a fim de calcular a distorção devido à refração atmosférica. Na sequência será apresentada a formulação utilizada por Mikhail et al. (2001), em que K possui a unidade micro radianos e a altitudes de voo (H) e altitude média do terreno (h) possuem a unidade quilômetros.

$$K = \frac{2410 \cdot H}{H^2 - 6 \cdot H + 250} - \left(\frac{2410 \cdot h}{h^2 - 6 \cdot h - 250} \right) \cdot \frac{h}{H} \quad (7)$$

Com esses elementos é possível a determinação de $\Delta\alpha$ e, por fim, o cálculo de r' e as parcelas de correção para x e y ($\delta_{x_atmosfera}$ e $\delta_{y_atmosfera}$) por relação de triângulos, assim como nas Equações 10 e 11.

$$r' = f \cdot \text{tg}(\alpha - \Delta\alpha) \quad (8)$$

$$\Delta r = r - r' \quad (9)$$

$$\delta_{x_atmosfera} = \frac{\Delta r}{r'} \cdot x \quad (10)$$

$$\delta_{y_atmosfera} = \frac{\Delta r}{r'} \cdot y \quad (11)$$

Para o refinamento das coordenadas, em relação à distorção radial simétrica, à distorção descentrada, ao deslocamento do ponto principal e à refração atmosférica, observa-se a seguinte formulação:

$$x_{corrigido} = x - \delta_{x_atmosfera} - \delta_{x_radial} - \delta_{x_descentrada} \quad (12)$$

$$y_{corrigido} = y - \delta_{y_atmosfera} - \delta_{y_radial} - \delta_{y_descentrada} \quad (13)$$

onde,

x e y: são as coordenadas fotogramétricas reduzidas ao ponto principal.

2.3.2 Ortoimagem

Uma fotografia é a projeção de elementos do mundo real em um plano, tomada em uma visão perspectiva central. Por se tratar de uma projeção perspectiva, elementos situados em uma mesma posição (planimétrica), porém em diferentes altitudes, são projetados em diferentes posições na imagem, como apresentado na Figura 13 (B). Isso faz com que a escala da imagem varie de um ponto para outro, dependendo da posição dos objetos/relevo.

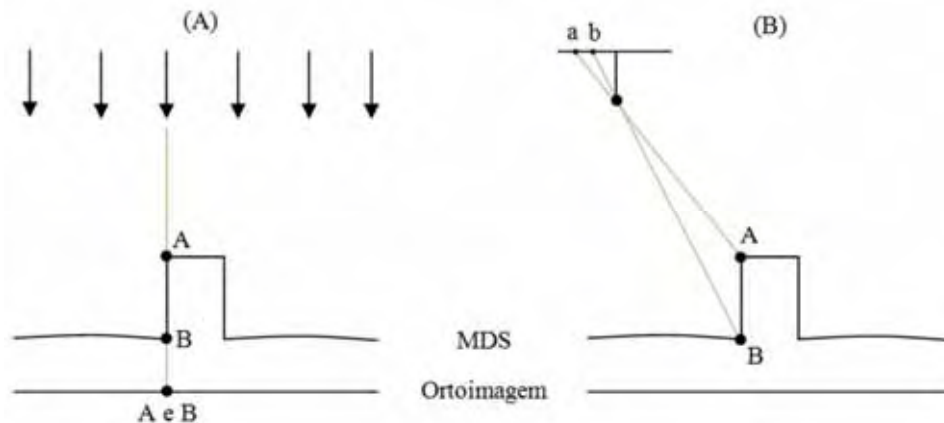


Figura 13. (A) Visada ortogonal. (B) Visada perspectiva.

O mesmo não ocorre com a projeção ortogonal, Figura 13 (A), pois todos os elementos da superfície são vistos e localizados em projeção ortogonal, não ocorrendo o deslocamento na imagem devido à variação de altura dos objetos. Portanto, ao corrigir a distorção provocada pela projeção central da câmara e pela variação do relevo pode-se manter uma escala única na imagem, processo este denominado ortorretificação de imagens (MIKHAIL et al., 2001).

A criação de uma ortoimagem digital se dá pela mudança de projeção, ou seja, a imagem deixa de ter uma visão perspectiva e passa a ser ortogonal, fazendo com que todos os elementos sejam apresentados ortogonalmente num plano de referência, como nos mapas. Utilizam-se, para este processo, informações de altitude referentes à superfície do terreno e os elementos presentes na mesma, bem como os parâmetros de orientação interior e exterior do sensor utilizado na aquisição das imagens. O modelo digital de elevação é empregado para eliminar o deslocamento causado pela variação do relevo e permitir que a nova imagem seja reprojeta de forma totalmente ortogonal (NIELSEN, 2004). O processo de ortorretificação pode ser realizado de forma direta ou indireta, conforme apresentado por Mikhail et al. (2001):

- **Processo direto:** nesse método os pixels presentes na imagem (perspectiva central) são relacionados às células do MDE, utilizando as informações do CP por meio da equação de colinearidade na forma inversa. Com isso, para cada pixel da imagem é possível determinar suas respectivas coordenadas no sistema de referência terrestre e na imagem de saída, ortorretificada. Deste modo é possível atribuir os valores de brilho (ou valores de ND – Nível Digital) presentes na imagem original para a imagem ortorretificada, após um processo de interpolação, para saber em qual pixel da ortoimagem essa tonalidade será atribuída.

- **Processo indireto:** Inicialmente, cada pixel da imagem de saída (ortoimagem), a princípio vazia, é relacionado a um elemento do MDE. Nesse instante têm-se as coordenadas no terreno desse ponto, juntamente com os parâmetros de orientação exterior, sendo, assim, possível determinar o valor correspondente na imagem – coluna/linha (perspectiva central), por meio da equação de colinearidade. Tais valores são então utilizados para fazer a interpolação do valor de brilho que será atribuído ao pixel correspondente na ortoimagem que está sendo gerada.

Vale ressaltar que a correção destas distorções é realizada de maneira distinta entre as equações de colinearidade direta e inversa. Pode-se observar nas Equações 17 e 18 (colinearidade direta) que as coordenadas fotogramétricas presentes no primeiro membro são as coordenadas corrigidas de todos os erros sistemáticos. Ao utilizar a colinearidade na forma inversa, ou seja, a determinação de coordenada planimétrica no referencial do terreno, deve-se utilizar o processo de refinamento mencionado na Subseção 2.3.1. Já ao aplicar a colinearidade direta, determinação das coordenadas fotogramétricas, o valor obtido será para as coordenadas livre de distorções. Deste modo, ao estimar as coordenadas de imagem pela equação de colinearidade e tentar identificar esses pontos na imagem original (com distorção) é necessária a utilização de um método numérico iterativo, como pode ser visto em Machado et al. (2004).

2.3.2.1 Ortoimagem convencional e verdadeira

A diferenciação de alguns termos, como por exemplo ortoimagem e ortoimagem verdadeira, pode ser observada na literatura. Embora esta diferenciação não seja aceita de forma unânime, percebe-se que após a criação do produto ortoimagem verdadeira, alguns autores consideraram como necessário a mudança nos termos, não necessariamente significando que a ortoimagem convencional seja um produto falso ou irreal. Esta mudança iniciou-se, ao que tudo indica, com o trabalho de Amhar et al. (1998).

Basicamente, a diferença entre os dois produtos é a utilização ou não de um modelo digital de superfície. Segundo Mikhail et al. (2001), uma ortoimagem convencional é uma representação fotográfica com correção do efeito do deslocamento devido ao relevo, com a mesma característica geométrica do mapa topográfico tradicional, uma vez que ambos os produtos, os objetos são projetados ortogonalmente. Para Habib et al. (2007), uma ortoimagem convencional é um produto caracterizado por ter uma escala uniforme e que mostra os objetos, no nível do terreno, em sua real posição geográfica. Em outras palavras, a ortoimagem convencional tem a mesma característica geométrica de um mapa, pensando no

nível do terreno. Para Wolf e Dewitt (2000) uma ortoimagem é uma fotografia que apresenta os objetos, no nível do terreno, em sua posição ortográfica verdadeira, sendo geometricamente equivalente aos mapas planimétricos. Kraus (2004), por sua vez, descreve uma ortoimagem como uma fotografia geometricamente correta, ou seja, transformada de uma perspectiva central para ortogonal, utilizando um modelo digital de terreno. Assim como em Wolf e Dewitt (2000), a definição encontrada em Mendonça Júnior (2010), é a de que uma ortoimagem convencional teve sua projeção central retificada para ortogonal, eliminando as distorções decorrentes da tomada da própria fotografia e da variação do relevo.

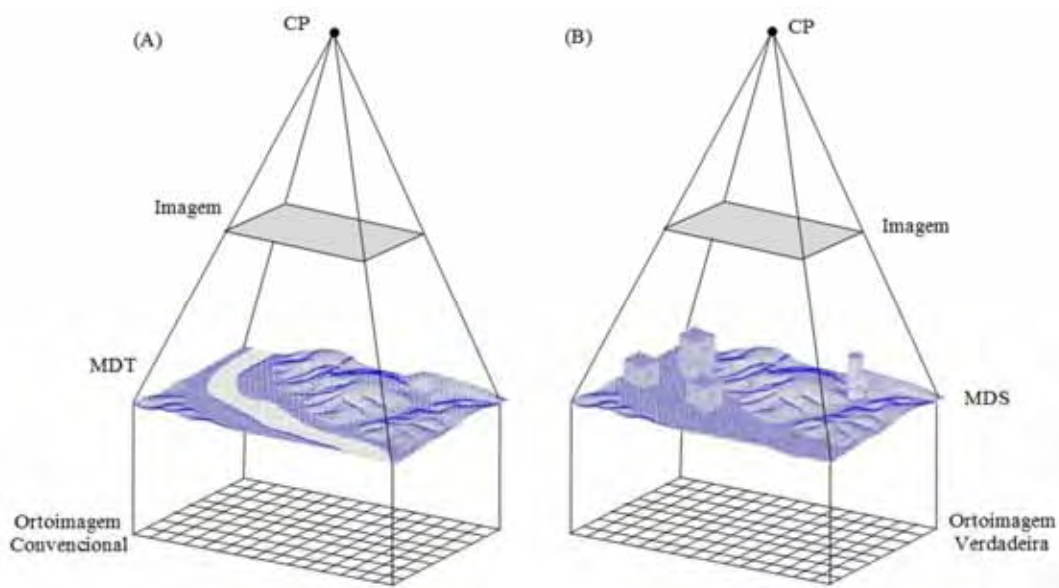


Figura 14. Diferenciação entre os dados utilizados para geração de (a) ortoimagem convencional e (b) ortoimagem verdadeira.

A ortorretificação que utiliza um MDT gera a ortoimagem convencional, corrigindo os efeitos da inclinação da imagem e da distorção devido ao relevo. Já a ortoimagem verdadeira é elaborada utilizando um MDS no processo de ortorretificação. Porém, o simples fato de mudar o modelo digital de elevação não garante uma imagem com todas as feições sobre o terreno, perfeitamente retificadas, ou seja, com as áreas oclusas identificadas e reprojetaadas com as tonalidades corretas.

A utilização de um MDS em vez do MDT produz, nas regiões de oclusão, o efeito conhecido como duplo mapeamento (ou imagem fantasma), cuja aparência deve ser corrigida pela detecção das áreas de oclusão e posterior realocação de pixels da imagem, para que assim se obtenha um produto completamente ortogonal e sem oclusões.

A Figura 14 apresenta a relação entre o centro perspectivo (CP), imagem, modelo digital de terreno ou superfície e ortoimagem, independente do processo de produção (direto ou indireto).

2.3.2.2 Duplo mapeamento e áreas de oclusão

Ao realizar o processo de ortorretificação com a utilização de um modelo digital de superfície, sobre uma região urbana, onde ocorrem muitas variações abruptas de altitude (nas edificações, por exemplo), surge um efeito denominado duplo mapeamento, devido às áreas de oclusões causadas por essas edificações. Esse efeito decorre da concorrência de células do MDS por um mesmo pixel da imagem. A Figura 15 apresenta a concorrência das células F, E e D com C, B e A (relativas ao telhado), respectivamente, onde apenas os pontos C, B e A, deveriam naturalmente ser associados aos pixels c, b e a, respectivamente, presentes na imagem.

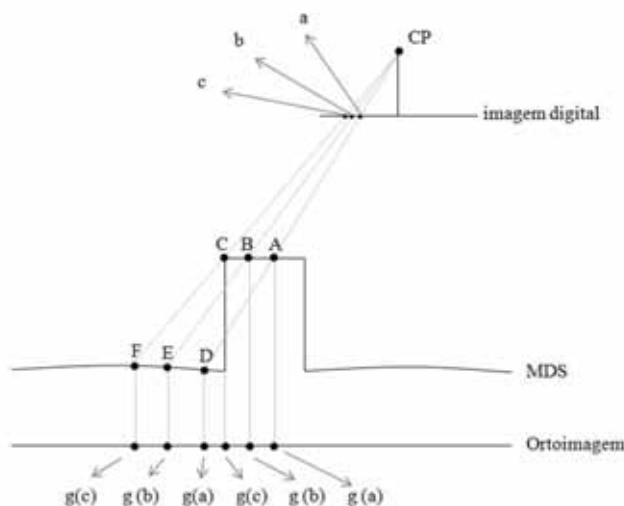


Figura 15. Concorrência entre células e o efeito de duplo mapeamento. Adaptado de Habib et al. (2007)

O principal fator a ser considerado na solução deste problema é a resolução da ambiguidade decorrente da presença de mais de um ponto no espaço objeto para um mesmo pixel na imagem. Com base na Figura 15 percebe-se que tanto os pontos localizados no telhado de um edifício (A, B ou C) quanto os pontos no terreno (D, E ou F) possuem, respectivamente, os mesmos correspondentes no espaço imagem (a, b ou c). Esta ambiguidade pode ser observada pela repetição dos tons de cinza na ortoimagem: g(a), g(b) e g(c).

O duplo mapeamento pode ser observado na imagem da Figura 16. A edificação em questão possui uma duplicação da imagem em uma das laterais, sendo possível notar claramente este efeito.



Figura 16. Exemplo de edificação com duplo mapeamento. Fonte: Nielsen (2004).

Ao considerar uma projeção ortogonal, todos os pontos localizados no nível da superfície são visualizados em sua correta posição – sem o deslocamento devido a variação de altura, da mesma forma como pode ser observado em mapas. Essa característica é aplicada na geração da ortoimagem verdadeira que, apesar de ser criada através de imagens obtidas de uma visão perspectiva, possui tal semelhança geométrica com os mapas.

As áreas duplicadas, fora da posição ortogonal, na verdade, correspondem às áreas de oclusão, cuja detecção é o objetivo principal deste trabalho. Ao aplicar um método de detecção de oclusão, os tons de cinza da área duplicada podem ser convertidos em uma cor sólida, podendo assim identificar visualmente essa parcela da imagem (Figura 17).

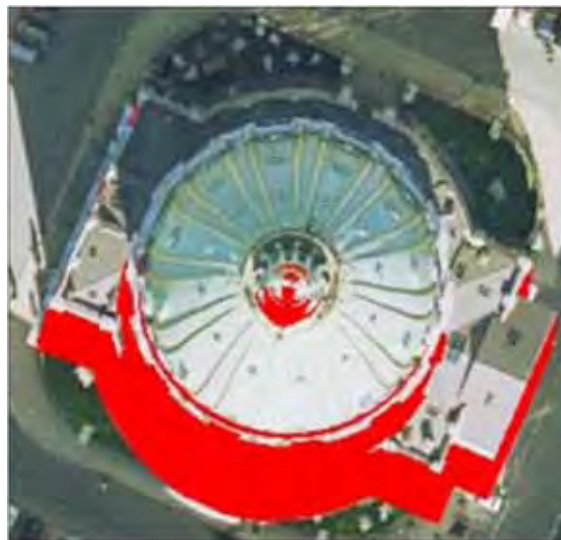


Figura 17. Área de oclusão (imagem fantasma) detectada e preenchida com cor sólida. Fonte: Nielsen (2004).

Depois de serem identificadas as áreas de oclusão de uma imagem, faz-se o mesmo procedimento de identificação para as imagens adjacentes (vizinhas). Com isso, obtém-se, para uma determinada área, um conjunto de imagens com suas respectivas áreas de oclusão identificadas. Deste modo é possível, para uma dada imagem, fazer a atribuição dos valores de intensidade (tons de cinza) da região de oclusão por valores de intensidade dos pixels visíveis, relativos aos oclusos, em alguma imagem vizinha, onde esta região não aparece como oclusa.

Como resultado final, após a reposição de tons de cinza, tem-se a obtenção de uma imagem com todos os elementos projetados ortogonalmente, ou seja, uma imagem corrigida tanto do relevo quanto dos elementos presentes sobre a superfície (Figura 18) e sem o efeito do duplo mapeamento.



Figura 18. Porção de uma ortoimagem verdadeira. Fonte: Nielsen (2004).

2.4 Métodos de detecção de oclusão para geração de ortoimagens verdadeiras

Assim como descrito nos itens anteriores, para geração de ortoimagem verdadeira é essencial a aplicação do processo de detecção de oclusão. Na literatura são encontradas algumas maneiras de se identificar essas regiões. A geração da ortoimagem verdadeira faz com que uma imagem obtida em visão perspectiva seja transformada em uma projeção ortogonal, utilizando dados altimétricos do terreno, e que as áreas de oclusão identificadas possam ser preenchidas com as respectivas informações presentes em imagens adjacentes, onde estas áreas não são oclusas.

Nesta Subseção serão revistos três métodos de detecção de áreas de oclusão. Um dos métodos, *Z-buffer*, é muito utilizado em computação gráfica e o primeiro a ser utilizado para a tarefa de detecção e oclusão na geração de ortoimagens verdadeiras (AMHAR et al., 1998). O outro, baseado em ângulos, foi uma alternativa encontrada por Habib et al. (2007), para evitar alguns problemas de imprecisões resultantes do *Z-buffer*. Outro método, proposto por Volotão (2001) e apresentado por Wang e Xie (2012), utiliza a projeção de bordas de edificações para identificação das células de oclusão.

Os métodos de detecção de oclusão mencionados, e discutidos na sequência, são aqueles que têm sido observados com mais frequência nos trabalhos ligados a este tema. No entanto outras abordagens também podem ser encontradas, como por exemplo a detecção de oclusão baseada em redes Bayesianas como apresentado em Brito (1997).

2.4.1 Método *Z-Buffer*

Segundo Watt (2000) o método *Z-buffer*, utilizado para remoção de áreas oclusas no campo de computação gráfica, é o mais comum. O objetivo geral deste método é resolver a ambiguidade dos pontos localizados nas áreas oclusas. A distância entre o centro perspectivo da câmara e o ponto localizado no espaço objeto (MDS) é a métrica utilizada por este método, sendo esta métrica aplicada na análise da concorrência entre os pixels (XIE e ZHOU, 2008).

Este método utiliza como dado auxiliar um modelo digital de superfície que possui como informação, além do relevo, as informações de alturas de todos os objetos presentes sobre este, tais como árvores, edifícios, casas, etc. Em sua aplicação são empregadas três matrizes e um mapa de visibilidade, todos com mesma dimensão da imagem de entrada (HABIB et al., 2007).

As três matrizes são denominadas “matrizes *Z-buffer*”. As duas primeiras armazenam as coordenadas X e Y da célula do MDS que é projetada no pixel da imagem. A última matriz armazena a distância euclidiana entre cada ponto do espaço objeto (MDS) ao centro perspectivo da câmara. O mapa de visibilidade, citado anteriormente, indica as células do MDS que estão oclusas ou visíveis, ou seja, pertencentes ou não à área de oclusão, respectivamente (HABIB et al., 2007).

Analisando a Figura 19 é possível entender como são identificadas as áreas de oclusão por este método. O algoritmo inicia a varredura do MDS, na direção radial, e em determinado instante localiza-se na célula B, projetando-a na imagem inicial. O valor correspondente às coordenadas da célula B (X_B, Y_B), assim como a distância entre B e o centro perspectivo (d_B) são armazenadas nas matrizes *Z-buffer*. Como a célula B é a primeira a ser

relacionada a este pixel da imagem, o mapa de visibilidade a identifica e rotula como sendo visível. No decorrer da varredura a célula A é identificada e ao projetar A na imagem inicial, o algoritmo deve detectar que esta célula já possui uma associação (célula B), portanto as distâncias d_A e d_B devem ser analisadas, a fim de definir qual é a célula ocluída. Pela Figura 19 nota-se que d_B é maior que d_A , portanto os valores X_B , Y_B e d_B armazenados nas matrizes *Z-buffer* são substituídos por X_A , Y_A e d_A e, no mapa de visibilidade, o pixel referente à A recebe o atributo “visível” enquanto o atributo relacionado à célula B é modificado para “invisível”. Este procedimento é repetido para todo o domínio de interesse. Com o término da varredura, os valores atribuídos às matrizes *Z-buffer* auxiliam na transferência dos tons de cinza da imagem inicial para a ortoimagem verdadeira e o mapa de visibilidade possibilita a identificação das áreas de oclusão, conforme descrito por Habib et al. (2007).

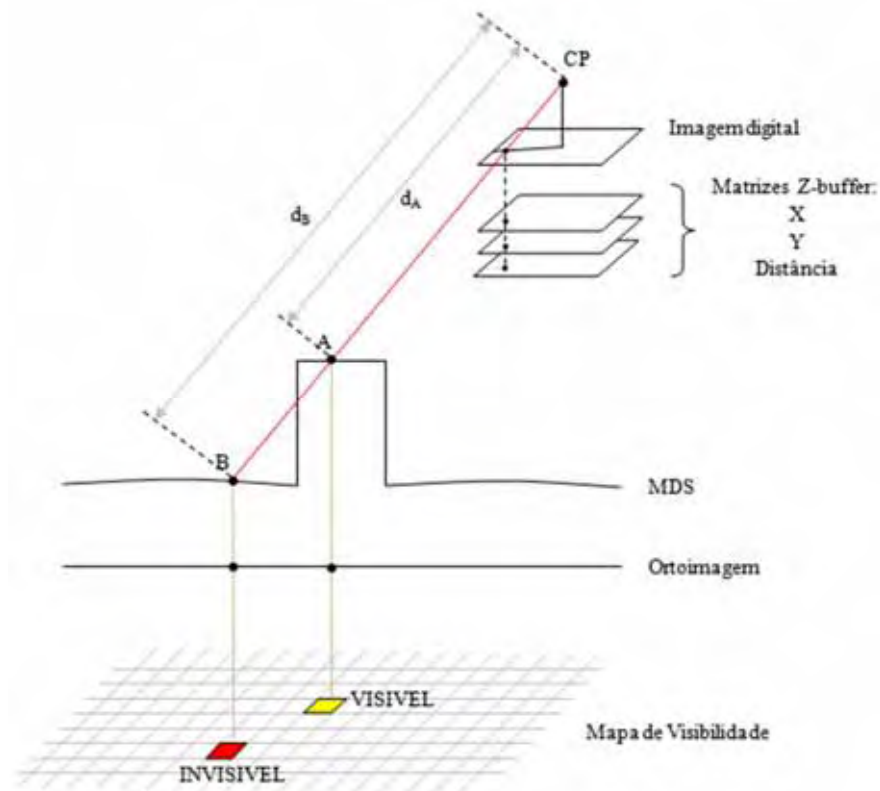


Figura 19. Princípio da geração do mapa de visibilidade utilizando o método *Z-buffer*.

Adaptado de Habib et al. (2007).

Testes realizados por Habib et al. (2007) apontaram dois problemas claros do método *Z-buffer* no processo de detecção de áreas de oclusão. O primeiro deles refere-se à relação entre o GSD (*Ground Sample Distance*) e o tamanho da célula do MDS. Em situações em que o tamanho da célula do MDS for menor que o tamanho do elemento amostral no terreno

(GSD) para a imagem em questão, são verificadas falsas oclusões nos resultados. Isto ocorre devido à concorrência de mais de uma célula do MDS por um mesmo pixel na imagem. Essa concorrência faz com que apenas uma célula do MDS faça parte da rotulação do pixel (ocluso ou visível), não considerando as demais, podendo assim, em alguns casos, utilizar uma célula que não represente de forma correta o pixel, criando uma falsa oclusão. Em áreas urbanas, porém, mesmo que essa relação fosse equivalente haveria problemas, devido a não compatibilidade do tamanho do pixel presente no topo das edificações e no terreno, decorrente da variação de escala.

Outro aspecto a se considerar é a rotulação de falsa visibilidade, criada em áreas que estão presentes estruturas altas e estreitas. Isso ocorre, pois a distância entre o CP e determinada célula do MDS, em alguns pixels, não apresentam concorrência (edificação x terreno), conforme se verifica na Figura 20. Observa-se, também, que os pixels considerados visíveis tiveram a atribuição de rótulos de forma errônea, em função da falta de informação sobre as paredes das edificações.

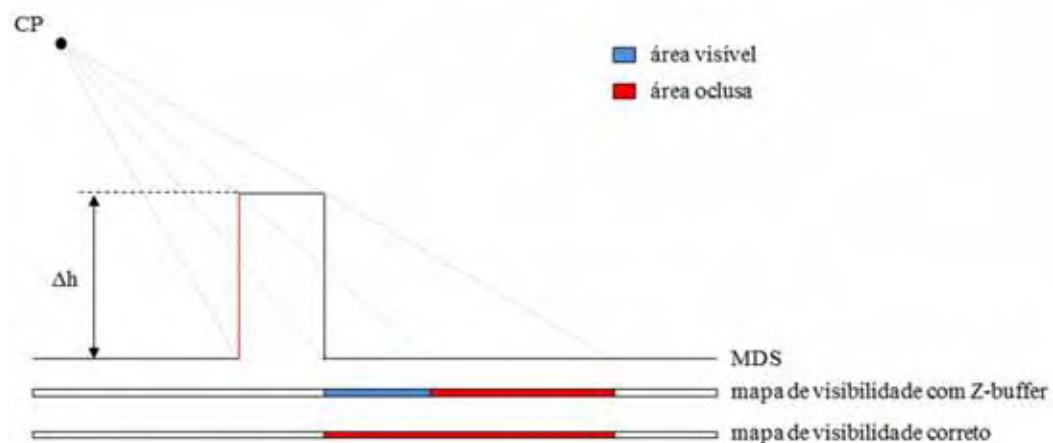


Figura 20. Representação da falha causada por estruturas altas e estreitas, no método *Z-buffer*.

O trabalho apresentado por Mendonça Júnior (2010) utiliza uma variação do método *Z-buffer*, denominada *H-buffer*. Esta metodologia utiliza o MDT juntamente com o MDS para detectar as áreas de oclusão e evitar a chamada “PORÇÃO M”, parcela da imagem referente à falsa visibilidade apresentada na Figura 20.

2.4.2 Método angular

Assim como no método *Z-buffer*, outras métricas podem ser utilizadas para identificação das oclusões. Um método baseado em ângulos foi proposto por Habib et al (2007). Esses autores sugerem a comparação dos ângulos formados pelo centro perspectivo

(CP), célula do modelo digital de superfície (MDS) e o alinhamento vertical em relação ao CP. Diferentemente do método anterior, por este método são comparados ângulos, ao invés da métrica distância.

Ao considerar a distorção na imagem causada pela projeção perspectiva – ao se afastar do PP, é possível identificar a variação de altitude dos objetos presentes sobre a superfície por meio desses ângulos. Este ângulo, α , é definido entre a vertical passante pelo CP e o raio que une o CP ao ponto no MDS (Figura 21). Pode-se notar que a variação da altitude tem ligação com o ângulo descrito e está relacionada com as áreas de oclusões. A característica básica deste ângulo é a de que, em uma superfície plana, ele se mantém em forma crescente ao se deslocar na direção radial. Isso implica, em determinado momento, que ocorre decréscimo do ângulo ao se deparar com uma edificação, indicando, então, a presença de uma região de oclusão.

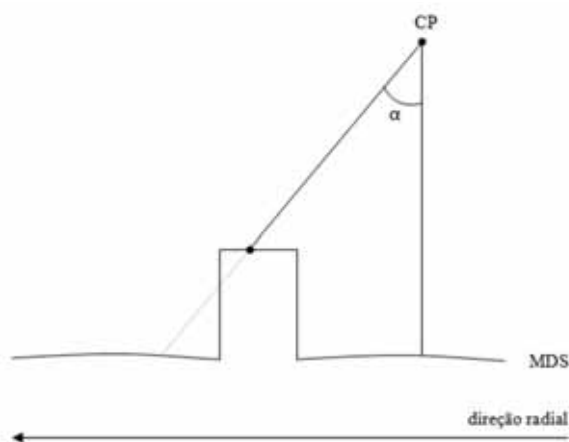


Figura 21. Representação do ângulo α , utilizado para detectar áreas de oclusão.

Ao realizar uma varredura sobre as células do MDS, na direção radial, é possível comparar o ângulo α determinado a partir de células consecutivas, como mostra a Figura 22 para os pontos A, B, C, D, E e F. O primeiro ponto (A) é rotulado inicialmente como visível (letra V no mapa de visibilidade da Figura 22). Na sequência, o ponto B é observado, e nota-se que α_B é maior que α_A , portanto, o ponto B também é definido como visível, o mesmo ocorre com a célula C em relação à B. Ao analisar o ângulo α_D nota-se que este possui um valor menor que α_C , logo ocorre um decréscimo do valor do ângulo, indicando a sua não visibilidade (D rotulado como invisível). Partindo para o ponto E, o seu valor de α (α_E) é comparado com ângulo do último ponto visível, neste caso α_C . Como seu valor é maior que este, o ponto E também é acatado por visível e este passa a ser o ponto utilizado para comparação da célula seguinte, e assim sucessivamente.

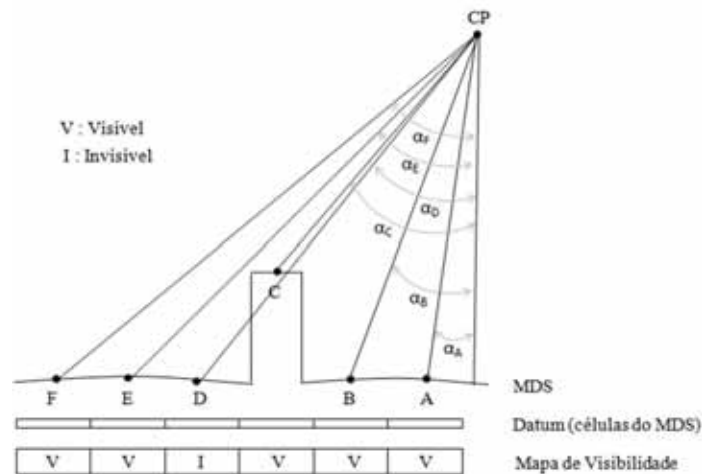


Figura 22. Representação dos ângulos α para criação do mapa de visibilidade. Adaptado de Habib et al. (2007)

Esse é o princípio básico para a identificação de áreas oclusas para o método baseado em ângulos, que possui algumas variações em relação à forma de varredura do MDS. Habib et al. (2007) apresentam duas maneiras de realizar tal varredura: *Adaptive Radial Sweep Method* e *Spiral Sweep Method*.

Como visto na descrição do método *Z-buffer*, este possui alguns problemas relacionados à sensibilidade em relação ao tamanho da célula do MDS e ao GSD da imagem. Além disso, tem-se certa limitação na detecção de oclusão quando se analisam edificações altas e estreitas, muito comum em áreas urbanas. Por isso, Habib et al. (2007) propuseram as duas formas de varredura.

A primeira varredura, *Adaptive Radial Sweep Method*, é realizada a partir do CP até as extremidades do MDS com o uso de um azimuth inicial (θ), conforme Figura 23(a). Após varrer todas as células de uma determinada linha é acrescido um $\Delta\theta$, no azimuth inicial, para que todo o MDS possa ser verificado. Porém, ao se distanciar do CP é possível que algumas células do MDS não sejam analisadas, a exemplo das células em branco apontadas na Figura 23(a), cujo $\Delta\theta$ é de 45° . Nota-se que no centro da imagem todos os pixels são preenchidos, porém não nas extremidades. Isto indica que deve-se considerar diferentes valores a serem acrescidos no azimuth inicial, a fim de evitar a redundância ou a falta de pixels analisados. Este problema pode ser solucionado por meio da criação de setores circulares que definem valores diferentes de $\Delta\theta$, para intervalos de distâncias entre CP e cada célula no MDS. Isso faz com que todo o modelo seja visitado (Figura 23 (b)) e cada setor circular possua um valor distinto de $\Delta\theta$, permitindo a análise de todas as células.

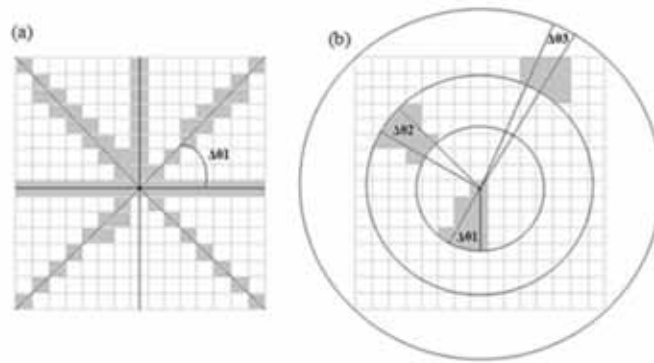


Figura 23. (a) Varredura na direção radial com mesma variação de azimuth para todo o MDS.

(b) Varredura com mudança no valor da variação do azimuth. Adaptado de Habib et al.

(2007).

A segunda forma de varredura, *Spiral Sweep Method*, percorre todo o MDS na forma de um espiral, como ilustrado na Figura 24. Esta varredura foi criada porque, dependendo da resolução da imagem, vários setores circulares devem ser escolhidos, o que provoca maior esforço computacional. Ao varrer na forma de espiral, porém, não é necessária a determinação de secções com diferentes valores de $\Delta\theta$, como mostrado anteriormente.

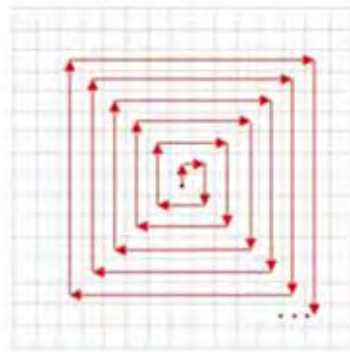


Figura 24. Varredura em forma de um espiral, visando à diminuição do trabalho computacional. Adaptado de Habib et al. (2007).

Para a utilização desse método (baseado em ângulos) juntamente com a varredura em espiral é necessário que o MDS e o mapa de visibilidade possuam as mesmas dimensões.

2.4.3 Método de Projeção

Outra metodologia recentemente apresentada por Wang e Xie (2012) e também proposta por Volotão (2001) aborda a detecção de áreas de oclusão por meio da projeção das edificações, utilizando uma modelagem das edificações presentes sobre a superfície. Essa projeção, como apresentada na Figura 25, é realizada por meio das equações de colinearidade.

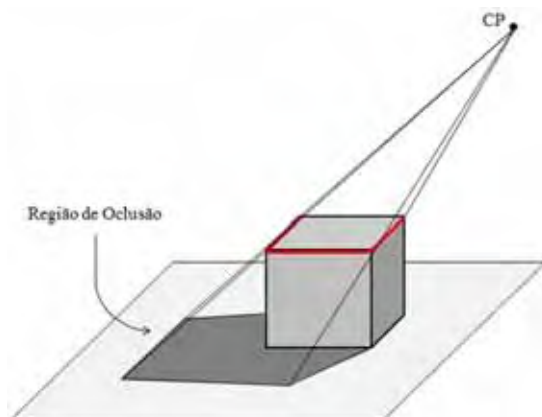


Figura 25. Projeção das feições em um plano, para detecção de áreas de oclusão. Modificado a partir de Wang e Xie (2012).

Nessa metodologia e assim como os trabalhos de Biasion (2004), Zhou et al. (2005), Zhou e Xie (2006) e Chen et al. (2007), para detectar as regiões de oclusão, é necessário, inicialmente, gerar um modelo digital das construções (MDC), ou seja, criar um modelo que represente as edificações encontradas na superfície, com um alto grau de detalhamento, identificando cada plano das edificações e seus atributos: parede ou telhado. Essa rotulação dos planos (polígonos) permite a determinação de quais pontos serão projetados, possibilitando, assim, a detecção da região de oclusão.

A utilização de um MDC garante alta consistência dos dados, porém é um modelo que demanda certo tempo e trabalho para criá-lo. Para a projeção dos pontos do MDC no plano, é necessário atender à condição de que o ponto seja projetado e que este seja a interseção entre um polígono rotulado como parede e outro referente ao telhado. Isso garante que todos os pontos projetados como limite das áreas de oclusão sejam realmente uma representação do topo da edificação (como se tivessem sido vetorizados). Atualmente, uma das maneiras utilizadas para se retificar corretamente as bordas das edificações e fornecer informações para detecção de oclusão é por meio de uma vetorização de todas as edificações presentes na imagem a ser ortorretificada, utilizando um MDS.

Como o plano em que se está sendo feita a projeção não é necessariamente coincidente ao terreno, é necessário determinar as coordenadas projetadas de acordo com a variação de altitude do terreno. Isso é feito por meio de um método denominado Z-Iterativo. Este processo é o mesmo utilizado no procedimento de monorrestituição, como apresentado por Radwan e Makarovic (1980). Ao observar a Figura 26, é possível entender melhor este processo. O ponto referente à borda do telhado (S) é projetado no plano (Z_{MIN}) e identificado como B, porém a posição correta para a projeção de S é em M. Logo, adequa-se a informação

altimétrica, presente no MDC, do ponto B, obtendo-se B' e aplica-se novamente essa informação na equação de colinearidade, resultando no ponto M. Neste exemplo, a posição M foi obtida com apenas uma iteração, mas pode ser necessário um número maior de iterações. O processo é finalizado no instante em que a diferença entre as altitudes consecutivas dos pontos determinados é menor que determinado limiar predefinido. No trabalho de Wang e Xie (2012), por exemplo, o limiar adotado é de 5 cm.

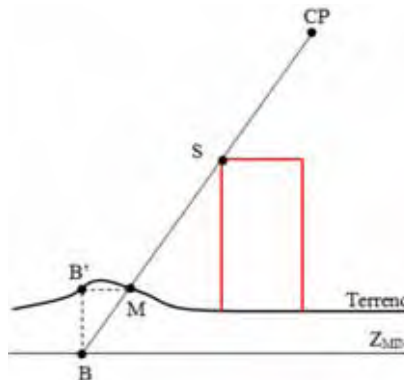


Figura 26. Esquema gráfico para entendimento do método Z-Iterativo. Adaptado de Wang e Xie (2012)

Outra abordagem feita por Wang e Xie (2012), necessária quando se aplica projeção dos pontos presentes no topo da edificação, é a identificação de oclusões causadas por edificações mais altas, ou seja, quando um edifício esconde parcialmente outro edifício menor. A Figura 27 mostra o princípio da estratégia para tal detecção. A ideia, basicamente, é mover um plano, desde a menor altitude até a maior, e identificar quais pontos interceptam o MDS e a reta entre o ponto em questão (M) e o CP. Estes pontos permitem identificar as regiões de oclusão, mesmo quando uma edificação “sobrepõe” parcialmente outra.

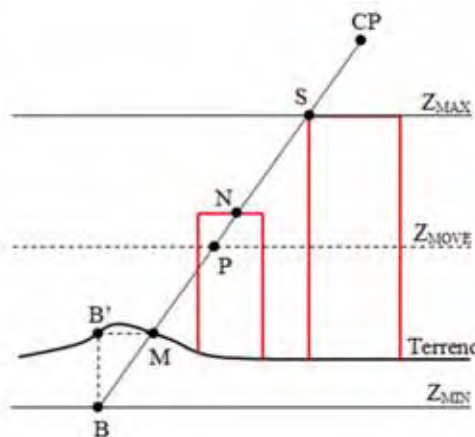


Figura 27. Estratégia para detecção de múltiplas oclusões. Adaptado de Wang e Xie (2012)

2.5 Algoritmo de Bresenham

Como visto anteriormente, o deslocamento em imagens obtidas por uma projeção central ocorre sempre na direção radial, portanto, está também relacionado à direção em que as oclusões ocorrem. Com isso, os métodos de detecção de oclusão, sem exceção, são aplicados na direção radial, independente da forma de varredura.

O algoritmo de Bresenham foi desenvolvido, a princípio, para ser utilizado em impressoras digitais e posteriormente utilizado em diversas aplicações e dispositivos *raster* (matricial), tal como a criação de linhas em aplicativos de desenho, onde são fornecidas as coordenadas da origem e término de um determinado segmento de reta, numa estrutura *raster*. Portanto, seu objetivo principal é a determinação de um conjunto de pixels que melhor represente uma linha reta. Os dados inseridos neste algoritmo são basicamente as coordenadas de início e fim da reta, (c_0 e l_0) e (c_f e l_f) respectivamente (ROGERS, 1985).

O algoritmo funciona da seguinte forma (Figura 28): inicialmente são fornecidas as coordenadas iniciais (ponto A) e finais (ponto F) da reta. Projetando-se a reta que deve ser representada é definida a direção em que serão feitas as análises. Neste exemplo, a partir do canto inferior esquerdo em direção ao canto superior direito.

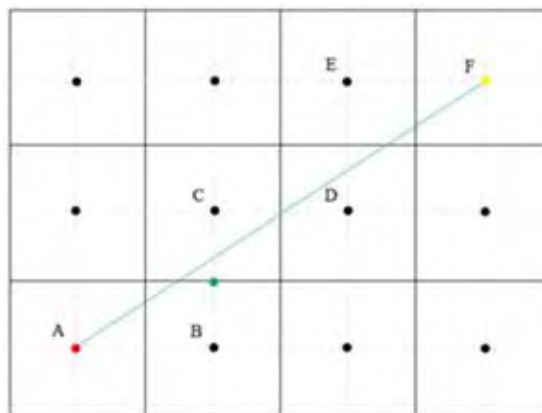


Figura 28. Representação de conjunto de pixels envolvidos na seleção dos elementos da reta que ligas os pontos A e F.

Ao observar a Figura 28, têm-se o ponto inicial A(0,0) e o ponto final F(3,2). A decisão sobre o pixel que representará a reta em questão é feita utilizando um limiar. Esse limiar é a metade da distância entre dois centros de pixel, cujo valor é considerado como $\frac{1}{2}$ (pois se trabalha com as coordenadas de máquina – coluna/linha, ou seja, números inteiros). Neste caso, partindo-se de B, este valor corresponde ao ponto médio entre B e C (verde na Figura 28). Para que a escolha entre os pixels B e C seja feita, é necessário avaliar se a reta, neste alinhamento B-C, está acima ou abaixo do limiar. Ao observar a Figura 28, nota-se que

a intersecção entre a reta e o alinhamento B-C está acima do limiar, logo C é considerado como pertencente à representação da reta.

Com o pixel C determinado parte-se para o pixel seguinte. Nesta etapa os pixels a serem avaliados são D e E. De maneira análoga nota-se que o pixel D está mais próximo do ponto de intersecção, ou seja, a reta está abaixo do limiar, tornando-se, assim, elemento representativo da reta. Esse processo é executado até que todos os elementos sejam identificados, ou seja, é concluído quando o algoritmo chega ao ponto final (F neste caso).

O algoritmo de Bresenham foi desenvolvido inicialmente para um octante (primeira metade do primeiro quadrante). Em Rogers (1985) é descrito a generalização para os demais octantes, considerando a simetria do problema, permitindo assim a aplicação para todas as direções. Esta adaptação é feita por meio de incrementos - positivos e negativos - e inversão de coordenadas de início e fim do segmento de reta.

O Algoritmo de Bresenham, para valores inteiros, é apresentado no pseudocódigo a seguir (ROGERS,1985):

Algoritmo para todos os octantes. Considerações:

- Os pontos extremos da reta são (x_1, y_1) e (x_2, y_2) , considerados sempre como diferente;
- Todas variáveis são inteiras.
- A função **Sinal** retorna -1, 0 e 1 quando o argumento for <0 , $=0$ ou >0 , respectivamente.

Variáveis de inicialização,

```
x = x1
y = y1
Δx = módulo(x2 - x1)
Δy = módulo(y2 - y1)
S1 = Sinal(x2 - x1)
S2 = Sinal(y2 - y1)
```

Para considerar todos os octantes é criada a variável “Mudança”, que inverte os valores de Δx e Δy de acordo com a inclinação da reta a ser representada,

```
se Δy > Δx então
    Tempo = Δx
    Δx = Δy
    Δy = Tempo
    Mudança = 1
senão
    Mudança = 0
fim do se
```

Inicialização do termo “e” que compensa uma não intersecção exata do centro do pixel. Auxilia na identificação da posição da reta em relação ao ponto médio entre os pixels em análise,

```
e = 2 * Δy - Δx
```

```
laço principal
for i = 1 até Δx
    imprima(x, y)
    enquanto (e ≥ 0)
        se Mudança = 1 então
            x = x + S1
        senão
            y = y + S2
        fim do se
        e = e - 2 * Δx
    fim do enquanto
    se Mudança = 1 então
        y = y + S2
    senão
        x = x + S1
    fim do se
    e = e + 2 * Δy
próximo i
FIM
```

Ao finalizar o processo de identificação dos pixels, é possível utilizar esse conjunto de pontos para aplicar o método de detecção de oclusão, apresentado no decorrer do Capítulo 3.

2.6 Elementos para avaliação da qualidade

Como o objetivo principal deste trabalho é a detecção de áreas de oclusão a partir do MDS disponível, visando à geração de ortoimagem verdadeira, devem ser feitas avaliações das áreas de oclusão detectadas pelo método proposto. Duas formas de avaliação podem ser realizadas, qualitativa e quantitativa.

A avaliação qualitativa pode ser feita por uma análise visual e de forma intuitiva, pois visa basicamente uma análise da coerência do resultado. Essa análise serve como validação de resultados durante a execução do método, servindo como apoio para alterações na implementação do método proposto, por exemplo. A ideia dessa avaliação é identificar se a área rotulada como oclusa realmente corresponde a uma área de oclusão, área esta que aparece como um fantasma na imagem (área duplicada), como mostrado na Subseção 2.3.2.2.

Já a avaliação quantitativa deve fornecer algum indicador relacionado com a qualidade ou à maior ou menor coerência das áreas detectadas como oclusas, em relação ao que se considera como referência. Serão considerados dois elementos para que seja feita essa análise, apresentada na discussão dos resultados: a completeza e o nível de acerto. Esses elementos são apresentados por Wiedemann et al. (1998), que os utiliza para avaliação da extração automática de eixos de vias em imagens aéreas.

Para utilização desses dois índices são necessários dois conjuntos de dados: o polígono da área de oclusão utilizado como referência (criado manualmente, por exemplo) e o conjunto de pixels detectados como oclusos pelo algoritmo considerado, como mostra a Figura 29, como exemplo.

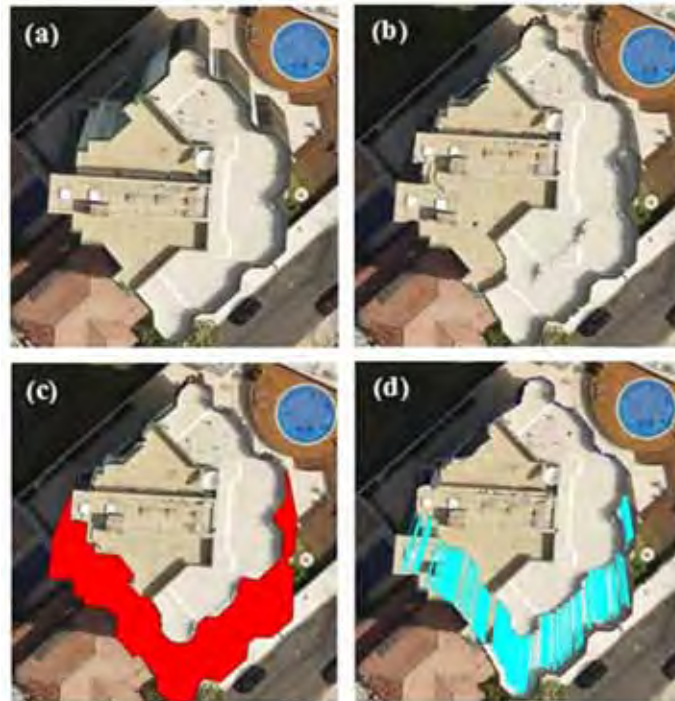


Figura 29. Alguns dos elementos utilizados no cálculo da completeza e nível de acerto: (a) Porção da imagem original, (b) Duplo mapeamento (c) Polígono de referência para oclusão – em vermelho, e (d) conjunto de pixels detectados como oclusos – em ciano.

2.6.1 Completeza

A completeza é o índice que mede a porcentagem da área de referência para oclusão (polígono extraído manualmente - vermelho), detectada também como oclusa por meio do método proposto (pixel em ciano). O valor ideal esperado para completeza é igual a 1, o que indica uma total coerência do resultado da oclusão.

$$Completeza = \frac{n^{\circ} \text{ de pixels detectados como oclusos, internos ao polígono referência}}{n^{\circ} \text{ de pixels que formam o polígono de referência}}$$

$Completeza \in [0; 1]$, que corresponde a $[0, 100\%]$

2.6.2 Nível de acerto

Nível de acerto é o índice que apresenta a porcentagem dos pixels detectados como oclusos, que realmente estão localizados dentro do polígono de referência, ou seja, a quantidade do resultado que foi rotulada corretamente. Resultado igual a 1 indica que todo o conjunto de pixels identificados como oclusos está dentro da área de oclusão.

$$\text{Nível de acerto} = \frac{n^{\circ} \text{ de pixels detectados como oclusos, internos ao polígono referência}}{n^{\circ} \text{ de pixels detectados como oclusos}}$$

Nível de acerto $\in [0; 1]$, que corresponde a $[0, 100\%]$

3 MATERIAL E MÉTODO

Esta Seção apresenta os materiais utilizados no desenvolvimento deste trabalho, assim como o método de detecção de oclusão proposto, em detalhe.

3.1 Materiais

Os dados utilizados neste projeto, para detecção das áreas de oclusão, foram fornecidos pelo Departamento de Cartografia da Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT) da Universidade Estadual Paulista (UNESP) – Campus de Presidente Prudente/SP. Esses dados são referentes à cidade de Presidente Prudente/SP e contêm tanto imagens aéreas como dados LiDAR.

As imagens utilizadas foram tomadas pela empresa Engemap, com uma câmara digital Hasselblad, com distância focal nominal de 50 mm, a uma altitude média de 950 m, sendo a altitude média de Presidente Prudente de 450m. Portanto, a escala média das imagens é de 1:10.000 e o elemento de resolução no terreno (GSD) é de aproximadamente 6 cm. Essas imagens foram disponibilizadas em duas formas: as imagens adquiridas e portanto sujeitas à distorção bem como a corrigidas dos erros sistemáticos. Deste modo, optou-se por utilizar as imagens corrigidas dos efeitos sistemáticos, não sendo realizado o refinamento das coordenadas medidas na implementação realizada. A Figura 30 mostra uma das imagens adquiridas neste levantamento, juntamente com um detalhe ampliado, permitindo ter uma ideia do grau de detalhamento da imagem original.



Figura 30. Imagem aérea da cidade de Presidente Prudente, com apresentação dos detalhes com elemento de resolução no terreno (GSD) da ordem de 6 cm.

Assim como as imagens ópticas, os dados LiDAR referem-se à área de Presidente Prudente, possuindo uma densidade média de oito pontos por metro quadrado (8pts/m²). O sistema de varredura utilizado é da marca RIEGL modelo LMS – Q680i (*Laser Measurement System*), que possui as seguintes características:

- Frequência máxima de emissão do pulso: 400kHz;
- Comprimento de onda: 1550 nm;
- Ângulo de divergência: < 0.5 mrad;
- Frequência de varredura: 10 – 200 linhas/s;
- Número de retornos: 6 pulsos.

A Figura 31 apresenta parte desses dados LiDAR juntamente com a imagem real da feição, sendo possível notar o alto grau de detalhamento dos dados LIDAR.



Figura 31. Imagem real e correspondente dados LiDAR.

Os softwares utilizados neste projeto são destinados tanto à visualização dos dados LiDAR disponíveis, quanto para a realização da proposta central que é a determinação das oclusões. Os algoritmos criados foram implementados em linguagem C, utilizando-se como IDE (*Integrated Development Environment*) o software Code::Blocks.

Para realização de alguns processamentos com os dados LiDAR foi utilizada a biblioteca *LasTools*, disponível em Isenburg (2012). Esta biblioteca possui diversas funções, tais como interpolações, recortes/união de arquivos, conversões de formatos, entre várias outras. Além disso, apresenta grande vantagem por permitir o uso e a conversão de dados no formato “.LAS”, padrão para armazenamento de dados LiDAR em diversos sistemas que manipulam e processam estes tipo de informação.

Para a visualização foram utilizados os seguintes softwares: LASEdit (grupo *CloudPeak*), *lasview* (aplicativo da biblioteca *LasTools*) e *PointVueLE* (*GeoCue*).

3.2 Método de detecção de oclusão baseado em gradientes de altura

Esta Subseção apresenta a ideia geral da técnica proposta neste projeto. A técnica utiliza a variação de altitude das feições no terreno (gradientes de altura) como métrica para detecção das áreas de oclusão, para a geração de ortoimagens verdadeiras. Uma vez que a determinação dos gradientes de altura deve ser realizada na direção radial, primeiramente é feita a descrição do modo de varredura, seguida da métrica e demais detalhes.

3.2.1 Varredura

Para aplicação da metodologia, o MDS correspondente ao domínio (ou área) de interesse foi dividido em 4 parcelas triangulares, onde cada lateral do MDS é a base de um triângulo (ver Figura 32). Para cada elemento (célula) das quatro laterais (célula amarela na Figura 32), é identificado o conjunto de células, que representa a reta entre este elemento (em amarelo) e a célula do MDS correspondente à projeção do centro perspectivo (CP) no MDS, denominada CP' (célula vermelha na Figura 32). Deste modo, ao fixar a célula CP' e percorrer as laterais, têm-se todas as direções radiais possíveis neste domínio. Para cada direção radial, obtém-se o conjunto de células, e pixels correspondentes (elementos em cinza na Figura 32), utilizados para análise dos gradientes e identificação das áreas de oclusão. A determinação das células que representam dada direção radial é feita pelo algoritmo de Bresenham, como apresentado anteriormente, na Subseção 2.5.

A Figura 32 apresenta destacada (em cinza) uma das direções radiais. Dessa maneira, é possível definir os pontos que serão utilizados no cálculo dos gradientes bem como as coordenadas de início e fim das áreas de oclusão.

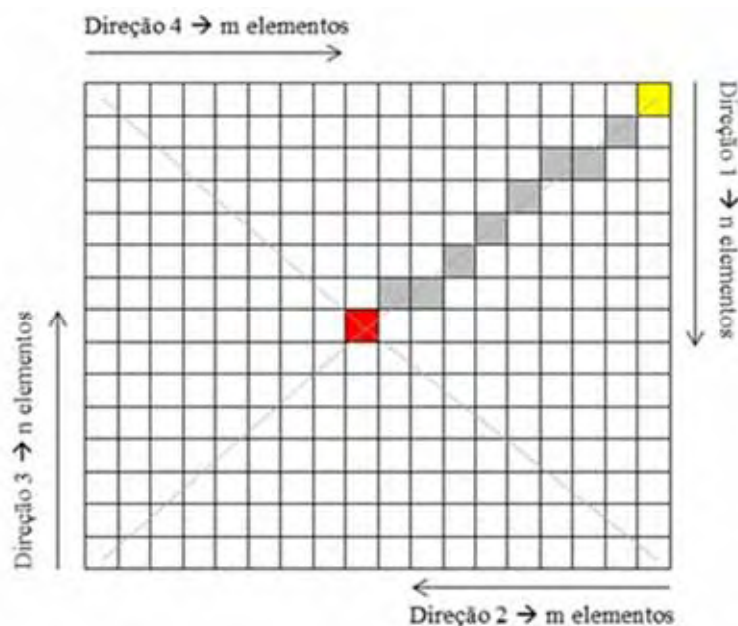


Figura 32. Direções envolvidas na varredura radial, utilizadas no algoritmo de Bresenham.

Como se nota na Figura 32, a varredura é feita utilizando-se, como ponto inicial, o CP' (fixo, em vermelho) e, o último elemento de determinada direção radial (em amarelo no exemplo apresentado). Com isso, o algoritmo é executado $2.(m + n - 2)$ vezes, sendo m e n o número de células das laterais do MDS. Com esta varredura realizada, deve-se avaliar o octante em que se encontra a direção radial em estudo - questão esta tratada no próprio algoritmo de Bresenham (ROGERS, 1985).

Pelo fato dos dados LASER brutos disponíveis serem compostos por pontos irregularmente espaçados, faz-se necessário o uso de interpoladores para a geração da malha regular do MDS que será usado na determinação dos gradientes e geração da ortoimagens. Para esta interpolação, foi utilizada a biblioteca *LasTool*, que possui código aberto e diversas funções para manipulação e visualização de dados LASER (.LAS), como mencionado. Esta biblioteca, em sua interpolação, cria uma rede triangular irregular (TIN) dos pontos LASER, utilizando o método de Delaunay. O valor de elevação de cada triângulo é projetado para o centro de célula da grade regular (cujo espaçamento foi definido com o valor do GSD da imagem original), utilizando interpolações lineares sobre os triângulos.

3.2.2 Métrica

Como citado anteriormente, os cálculos são iniciados com base nos gradientes de altitude. Parte-se do pressuposto de que se tem a direção radial definida e os elementos desta “linha” identificados, juntamente com suas coordenadas tridimensionais no terreno (X, Y e

Z), provenientes do MDS, armazenados na forma de uma grade regular. A Figura 33 destaca um conjunto de pixels na direção radial, com elemento central (CP') em vermelho e final em amarelo. Os elementos em cinza, com os dois pontos extremos citados, formam o conjunto de pixels necessários para aplicação do método. Cada elemento deste possui suas respectivas componentes X, Y e Z.

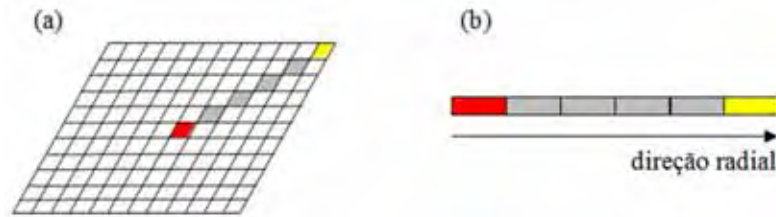


Figura 33. (a) Representação das células referentes à direção radial. (b) Vetor contendo apenas os elementos detectados pelo algoritmo de Bresenham.

Ao obter a direção radial a ser analisada, utiliza-se o perfil da mesma, de acordo com o atributo “Z” presente na célula do MDS. Assumindo que esse perfil é composto por n células onde cada célula possui altitude Z_i , com $i=\{1, 2, \dots, n-1, n\}$, pode-se fazer a determinação dos gradientes de altitude $\frac{\partial Z}{\partial r}$ na direção radial desse conjunto de células da seguinte forma:

$$\text{Se } i = 1, \quad \frac{\partial Z}{\partial r_i} \cong \frac{Z_2 - Z_1}{r_2 - r_1}; \quad (14)$$

$$\text{Se } 1 < i < n, \quad \frac{\partial Z}{\partial r_i} \cong \frac{Z_{i+1} - Z_i}{r_{i+1} - r_i}; \quad (15)$$

$$\text{Se } i = n, \quad \frac{\partial Z}{\partial r_i} \cong \frac{Z_n - Z_{n-1}}{r_n - r_{n-1}}; \quad (16)$$

onde, r_i é a posição da célula i no vetor obtido pelo algoritmo de Bresenham.

A Figura 34 representa um perfil hipotético e o respectivo vetor de gradientes, no qual se tem, na direção radial, apenas uma edificação. Nesta mesma figura é mostrado o sinal do gradiente, onde azul corresponde a um gradiente positivo (aumento do Z na direção radial) e vermelho a um gradiente negativo (decréscimo do valor).

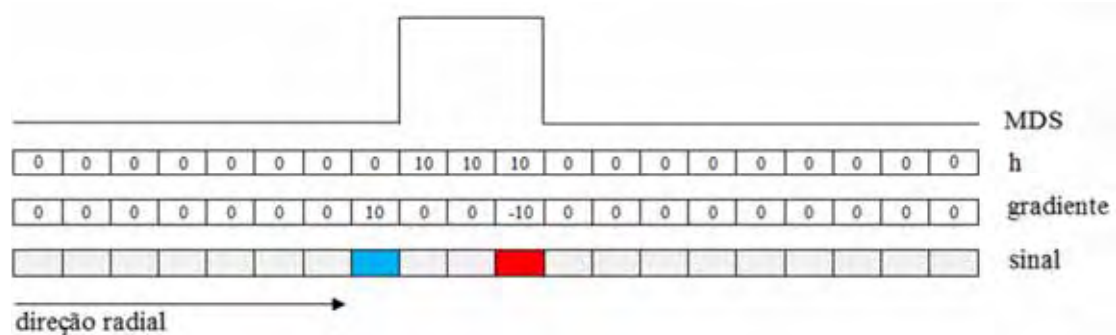


Figura 34. Perfil da direção radial com elemento 'h' e gradiente de altura.

É importante notar que justamente os pontos de gradiente negativo, correspondem ao início da área de oclusão, como será discutido na sequência.

Dados referentes à área urbana, onde se tem uma alta densidade de edificações, e que passam pelo processo de interpolação, podem gerar modelos com alguns efeitos indesejáveis, tais como a degradação da informação de gradientes de altura, ou seja, uma suavização das bordas das edificações, surgindo pontos que representem as paredes das edificações (interpolados entre os pontos no topo e na base da edificação). Essa geração de novos pontos faz com que a característica de variação de altura dessas feições seja minimizada. Este aspecto, principalmente neste trabalho, pode ocasionar problemas, pois a informação de elevação é utilizada como métrica para identificação de áreas de oclusão. Portanto, um interpolador que mantém os valores de altura dos pontos de referência é ideal para esta aplicação.

3.2.3 Mapa de visibilidade

Uma vez obtido o vetor contendo os sinais do gradiente, é possível iniciar a determinação de área de oclusão, pois o elemento com gradiente negativo indica o início de uma dessas áreas (vermelho), como pode-se ver na Figura 35. Juntamente com estes dados (MDS e vetor gradiente), bem como a partir da posição e atitude do sensor no momento da obtenção da fotografia, pode-se determinar a posição (x_a e y_a), no espaço imagem que corresponde à célula do MDS que se refere ao início da oclusão, em dada direção radial. Com esta posição conhecida pode-se determinar a posição no MDS relativa ao final da área de oclusão (em amarelo – Figura 35), por meio da subtração do gradiente na altura (altura da edificação) do ponto de início da oclusão, supondo que o terreno seja plano. A Figura 35 apresenta os elementos necessários para este desenvolvimento.

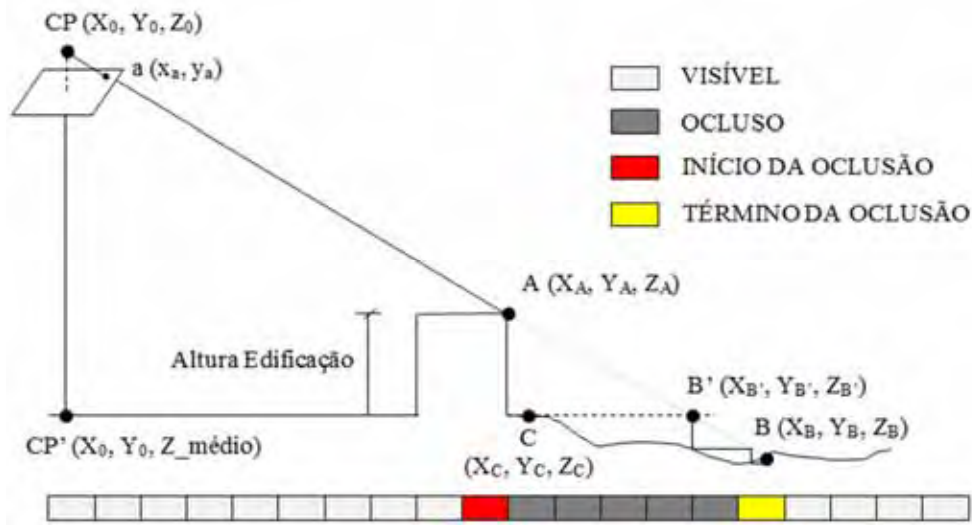


Figura 35. Geometria utilizada para determinação do término da oclusão.

Inicialmente, determinam-se as coordenadas fotogramétricas do ponto A, por meio da equação de colinearidade direta, em que M (Matriz de rotação) é obtida em função dos ângulos de rotação do sensor no instante da tomada da fotografia, ou seja:

$$x_A = -f * \left[\frac{m_{11} * (X_A - X_0) + m_{12} * (Y_A - Y_0) + m_{13} * (Z_A - Z_0)}{m_{31} * (X_A - X_0) + m_{32} * (Y_A - Y_0) + m_{33} * (Z_A - Z_0)} \right] \quad (17)$$

$$y_A = -f * \left[\frac{m_{21} * (X_A - X_0) + m_{22} * (Y_A - Y_0) + m_{23} * (Z_A - Z_0)}{m_{31} * (X_A - X_0) + m_{32} * (Y_A - Y_0) + m_{33} * (Z_A - Z_0)} \right] \quad (18)$$

em que,

x_A e y_A : são as coordenadas fotogramétricas do ponto A, corrigidas dos efeitos sistemáticos;

f : é a distância focal da câmara utilizada;

m_{xx} : são os elementos da matriz de rotação (M) do sistema sensor;

X_A, Y_A e Z_A : são as coordenadas tridimensionais do ponto no MDS;

X_0, Y_0 e Z_0 : são as coordenadas tridimensionais do CP.

Com essas coordenadas obtidas (fotogramétricas), determinam-se as coordenadas no espaço objeto do ponto B' ($X_{B'}$, $Y_{B'}$), por meio da colinearidade inversa (Equações 19 e 20), utilizando-se como dado de entrada inicial a altura Z_C . Esta altura é determinada por: $Z_C = Z_A + \frac{\partial Z}{\partial r_A} \cdot (r_c - r_A)$, sendo Z_A a altura do ponto referente ao início da oclusão e $\frac{\partial Z}{\partial r_A}$, o gradiente referente ao ponto A. Com isso, encontram-se as coordenadas planimétricas da

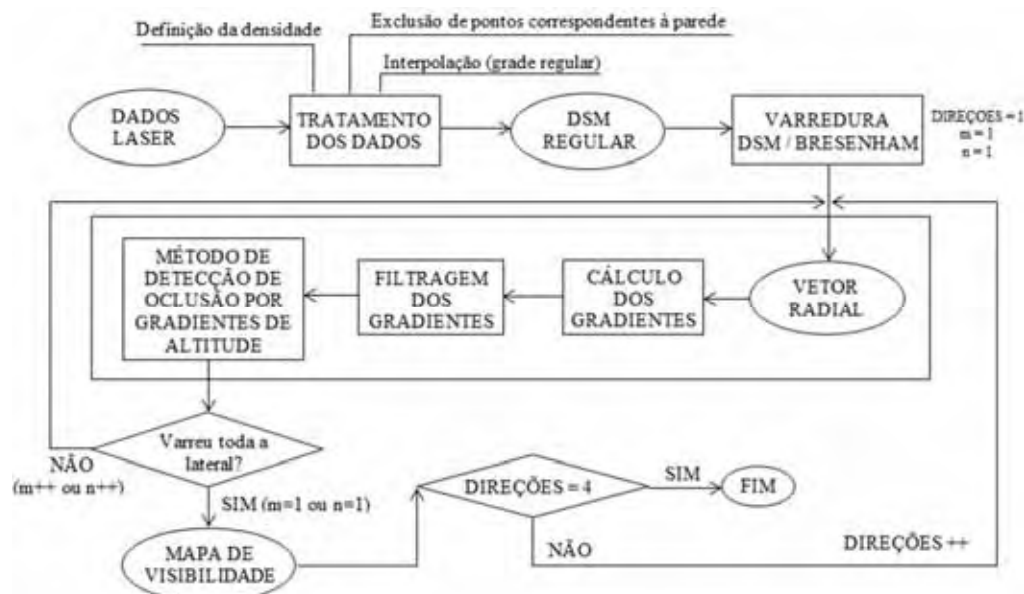
célula B', presente na mesma linha radial do elemento A, porém com altitude diferente ($Z_{B'}$) do final da oclusão (Z_B). As coordenadas então são ajustadas por método iterativo, do mesmo modo como utilizado no processo de monorrestituição (RADWAN e MAKAROVIC, 1980), e determinada a posição planialtimétrica de B – fim da oclusão.

$$X_B = X_0 + (Z_C - Z_0) * \left[\frac{m_{11} * x_A + m_{21} * y_A - m_{31} * f}{m_{13} * x_A + m_{23} * y_A - m_{33} * f} \right] \quad (19)$$

$$Y_B = Y_0 + (Z_C - Z_0) * \left[\frac{m_{12} * x_A + m_{22} * y_A - m_{32} * f}{m_{13} * x_A + m_{23} * y_A - m_{33} * f} \right] \quad (20)$$

Determinados, portanto, o início e o fim da área de oclusão, as células presentes entre os dois elementos são encontradas e armazenadas no mapa de visibilidade como células correspondentes a área de oclusão.

Todo este processo pode ser entendido em síntese pelo Fluxograma 1 mostrado na sequência. O elemento “DIREÇÕES” está relacionado ao modo como é feita a varredura do MDS, percorrendo os quatro lados do modelo (1 a 4), como observado na Figura 32.



Fluxograma 1. Resumo das etapas necessárias para criação do mapa de visibilidade.

3.2.4 Parâmetros para filtragem dos gradientes de altura

Como se sabe, os dados LiDAR possuem certo nível de ruído, principalmente em regiões de borda de edificações. Isso ocorre uma vez que o feixe LASER possui um ângulo de divergência e pode-se ter em regiões de bordas, reflexões que correspondem a regiões que não se referem a uma parcela do telhado (apenas) ou ao solo, por exemplo, podendo-se ainda ter reflexões em outros objetos ao longo do trajeto do feixe. Independente destes fatos outro fator

que causa erro nos dados LiDAR é a própria acurácia posicional destes pontos tridimensionais.

Devido a estes problemas provindos dos dados LiDAR foram criados três parâmetros com o propósito de selecionar as informações de interesse sobre as edificações. Dois deles, NV e σ_{NV} , estão relacionados ao refinamento das regiões de borda, e basicamente servem para filtrar os gradientes de altura, de maneira que o método utilize apenas aqueles gradientes que realmente apresentam informações fiéis sobre a variação de altura das edificações, evitando o surgimento de falsos gradientes positivo e negativo. O terceiro parâmetro, *gap*, está relacionado às edificações cujas oclusões serão detectadas e avaliadas, de acordo com sua altura, fazendo com que o método implementado necessite de menos operações computacionais.

3.2.4.1 *Gap*

A ideia principal do parâmetro *gap* é restringir as áreas de detecção de oclusão, ou seja, aplicar o método proposto apenas para feições com alturas elevadas (prédios com mais de 50 m de altura, por exemplo). Essas edificações mais altas são responsáveis pela maior parte das áreas de oclusão em uma imagem aérea e os arruamentos são uma das principais feições oclusas por estas altas edificações, diferentemente das construções térreas (baixa altura). Outro aspecto a ser considerado é de que ao utilizar o *gap*, apenas o telhado de uma edificação alta é tratado, não sendo consideradas as múltiplas oclusões, tema este não abordado neste trabalho.

Como explicitado na Seção referente ao método proposto, a métrica utilizada para identificação do início das áreas de oclusão é o gradiente de altura. O parâmetro *gap* é aplicado em conjunto com a métrica, de maneira que os gradientes rotulados como positivos ou negativos devem obedecer a seguinte condição:

Gradiente considerado positivo quando $\frac{\partial Z}{\partial r_i} > gap$;

Gradiente considerado negativo quando $\frac{\partial Z}{\partial r_i} < -gap$;

Com isso, são identificados os pixels (na imagem) e células (no MDS) cujos gradientes são maiores que *gap*, ou menores que $-gap$. Isso faz com que sejam identificados os gradientes negativos (início das oclusões) e positivos, apenas de edificações elevadas.

Ao observar a Figura 36 (a) e (c) nota-se a presença do duplo mapeamento (duplicação do telhado da edificação) e os gradientes positivos (em azul) e negativos (em

vermelho). Ao comparar as Figuras 36 (b) e (d) nota-se uma diminuição na quantidade de gradientes identificados. Isso ocorre ao se aplicar o parâmetro *gap*, que faz com que se restrinja os gradientes a serem identificados. A Figura 36 (b) apresenta o resultado para um *gap* de 3m, ou seja, todas variações de altura maiores que 3m seriam identificadas. Já a Figura 36 (d) faz o mesmo porém para um *gap* de 30m.

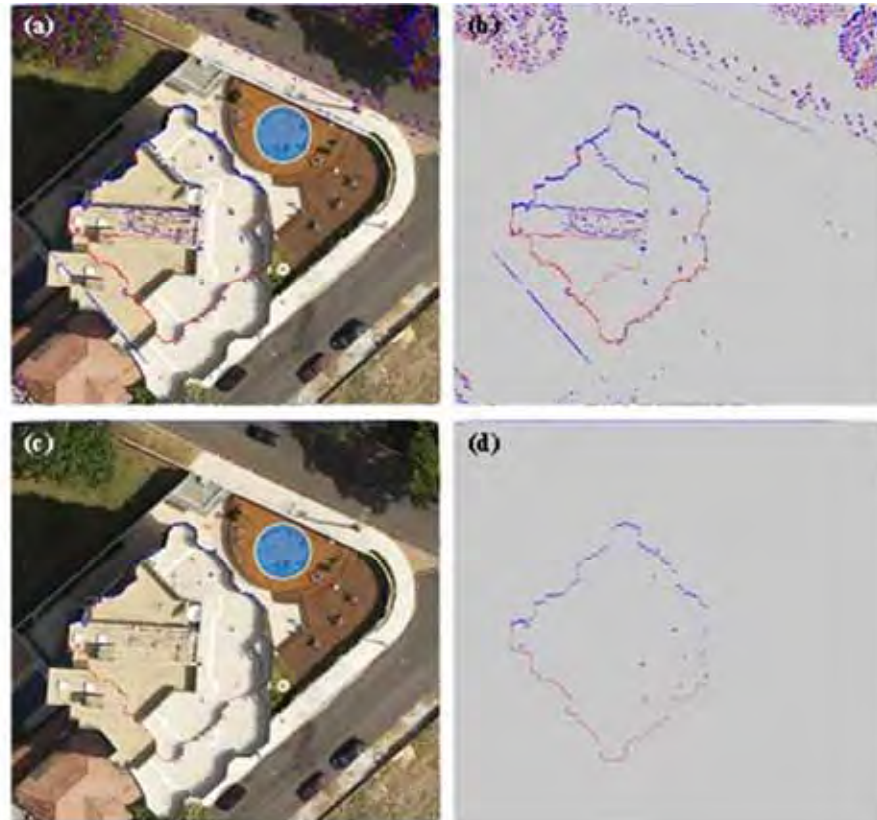


Figura 36. Representação dos gradientes positivos e negativos para *gap* = 3m (a e b) e para *gap* = 30m (c e d).

Nota-se que é mais fácil avaliar os resultados obtidos apenas referentes ao topo da edificação, ao invés de todos os gradientes da cena, como árvores, muros, fios de alta-tensão, etc. Vale ressaltar que para a geração de ortoimagem verdadeira, deve-se considerar todas as construções e elementos sobre a superfície, não somente as mais altas, apesar destas serem as que causam a maior parte das oclusões da imagem.

3.2.4.2 NV e σ_{NV}

Como mencionado na Subseção anterior, mesmo ao restringir as feições que terão as áreas de oclusões detectadas, ainda assim surgem alguns problemas relacionados com a identificação dos gradientes, tais como a rotulação de gradientes de forma errônea, ou seja,

geração de falsos gradientes positivos e negativos. Os falsos gradientes positivos podem deixar de identificar uma área de oclusão, rotulando determinada região como visível. Já os falsos gradientes negativos identificam uma área visível como sendo oclusa, fazendo com que uma região, que realmente aparece na imagem, seja rotulada de maneira errônea.

A Figura 36 (c e d) apresenta o resultado dos gradientes para uma edificação, com $gap = 30m$. Nota-se que mesmo assim aparecem alguns gradientes positivos e negativos no interior da delimitação da borda do telhado, assim como alguns gradientes positivos na borda inferior, onde, na verdade, iniciam-se as áreas de oclusão, portanto gradientes estes considerados falso positivos.

Os gradientes no interior da edificação surgem devido a ruídos presentes nos dados LASER. Já os falsos gradientes positivos, nas bordas, ocorrem devido à acurácia posicional dos dados de varredura a LASER, cujos valores são da ordem de 50 cm em planimetria e 20 cm em altimetria, como apresentado por Baltsavias (1999) e Centeno e Mitishita (2007). Estes valores estão relacionados tanto ao sistema de varredura quanto à altura de voo, dentre outros fatores. Os parâmetros NV e σ_{NV} visam eliminar esses falsos gradientes, deixando assim, os resultados mais coerentes. Basicamente, estes parâmetros tem a seguinte descrição:

- NV : (número de vizinhos) refere-se à quantidade de células de determinado conjunto;
- e
- σ_{NV} : desvio padrão em altimetria deste conjunto de células.

Ao supor um perfil de varredura a LASER, como na Figura 37, é possível identificar algumas dificuldades encontradas para aplicação do método. Primeiramente não será encontrada uma posição, em nenhuma das laterais da edificação, em que o gradiente tenha uma variação ' $> gap$ ' ou ' $< - gap$ ', que neste exemplo corresponde a 20m. Isso não é possível devido ao fato de existirem pontos referentes às paredes da edificação (para este perfil), o que elimina a chance de identificar uma variação abrupta de altura de 20m, por exemplo.



Figura 37. Representação de um perfil de edificação com os pontos LASER.

Outra hipótese é de que mesmo que os pontos que representem as paredes sejam eliminados ou não considerados ao aplicar o método, o erro planimétrico pode ocasionar a rotulação de falsos gradientes positivos ou negativos, como descritos anteriormente. A Figura 38 apresenta uma configuração ideal (situação 1) da nuvem de pontos e os gradientes (situação 2), assim como situações em que podem ocorrer os erros de falsa rotulação (situações 3 e 4).

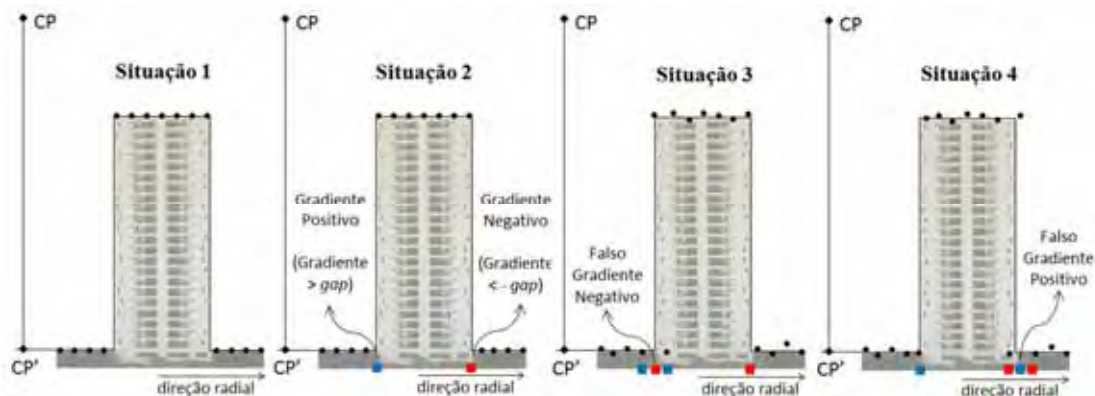


Figura 38. Configurações possíveis de ser encontradas em dados LASER de áreas urbanas, considerando os gradientes de altura.

Como é possível notar a situação 1 apresenta um perfil ideal, onde se tem o contorno de uma edificação e os pontos, da nuvem LASER, localizados exatamente sobre a edificação e o solo, sendo estes pontos igualmente espaçados (grade regular – MDS). Avaliando essa cena é possível na situação 2 identificar a exata posição que se encontram os gradientes positivos e negativos desse perfil, sendo o gradiente negativo – início da oclusão – corretamente identificado.

As situações 3 e 4 apresentam a mesma superfície das situações anteriores, com os pontos em grade regular, porém com erros em altimetria, podendo ocasionar assim uma inversão dos gradientes das bordas, e consequentemente a geração de falsos positivos e negativos. O surgimento de falsos gradientes negativos, por exemplo, pode ser verificado se o ponto que está situado na base da edificação (solo) sofrer um deslocamento, devido ao erro altimétrico. Esse erro em altimetria é decorrente do erro em planimetria dos dados LASER, que ao serem interpolados em uma grade regular o ocasionam, assim como por problemas de multicaminhamento do pulso LASER. Logo, a variação de altura na direção radial deixa de ser positiva, tornando-se negativa, ou seja, ocorre a inversão dos gradientes, em alguns casos.

Inicialmente o gradiente é calculado por diferenças pontais de altura – célula a célula – como apresentado na Subseção 3.2.2. Porém, ao aplicar o método aos dados reais, notou-se

o surgimento de erros, causados pelo erro planimétrico, e consequentemente altimétrico, da grade regular formada pelos dados LASER, como os destacados na Figura 39.



Figura 39. Detecção da oclusão sem tratar os falsos gradientes – em destaque.

Devido às situações apresentadas anteriormente, foram inseridos os dois parâmetros (NV e σ_{NV}) que auxiliam no refinamento destes gradientes. A ideia desse refinamento é identificar quais gradientes, positivos ou negativos, foram formados por regiões de característica plana, ou seja, por uma variação de altura entre telhado (plano 1) e solo (plano 2), ao invés de ser uma resposta pontual, provocada por problemas de ruídos ao serem comparadas células vizinhas.

Esse refinamento é realizado da seguinte forma: A varredura é feita de maneira radial, como já descrito, e para cada célula observada (em azul na Figura 40), são armazenados os valores de H de um conjunto de células antes (em verde na Figura 40) e depois (em laranja na Figura 40) da célula observada. Essa quantidade de células contidas no conjunto refere-se ao parâmetro NV – neste exemplo sendo igual a 3 células.

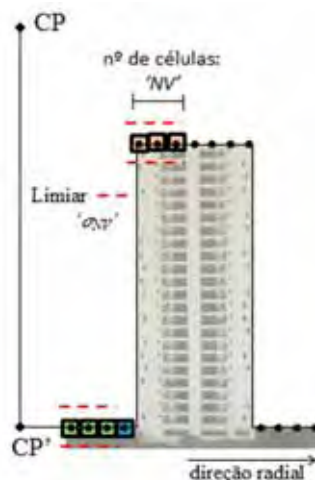


Figura 40. Representação gráfica do refinamento dos gradientes.

Para restringir a utilização de gradientes formados por planos, telhados (laranja – Figura 40) e solo (verde – Figura 40), é calculado o desvio-padrão das altitudes para cada conjunto de células, posterior (em laranja – Figura 40) e anterior (verde – Figura 40), sendo verificado se estes desvios estão dentro de um limiar pré-estabelecido (parâmetro σ_{NV}). Se estes desvios forem isoladamente menores que o limiar adotado, pode-se considerar que as superfícies comparadas são planas e não ruidosas, e assim o gradiente estimado pode ser considerado correto.

A quantidade de células que formam cada um dos conjuntos, posterior e anterior, portanto, corresponde ao parâmetro NV e o limiar dado ao desvio-padrão do conjunto é o parâmetro σ_{NV} . A rigor o uso destes parâmetros em conjunto é equivalente a realizar um processo de suavização (*Smoothing*) nos gradientes de altura estimados.

A Figura 41 apresenta um refinamento obtido ao utilizar esses dois parâmetros, apenas no topo da edificação ($gap = 30$). No resultado apresentado na Figura 41 (a) o telhado não recebe nenhum refinamento relacionado a estes dois parâmetros. Já a Figura 41 (b) é mostrado o resultado da utilização de $NV = 5$ células e $\sigma_{NV} = 0,2m$. Nota-se a exclusão de diversos gradientes, tanto positivos quanto negativos, porém ainda existem diversas representações no interior do telhado (falsas). E por fim, Figura 41 (c), utilizou-se 20 células no parâmetro NV , e foi mantido o erro aproximado em altimetria para os dados à LASER no parâmetro σ_{NV} (0,2m). Neste resultado é perceptível a mudança em relação ao resultado sem refinamento, o que permite a detecção de áreas de oclusão de maneira mais coerente com a realidade.

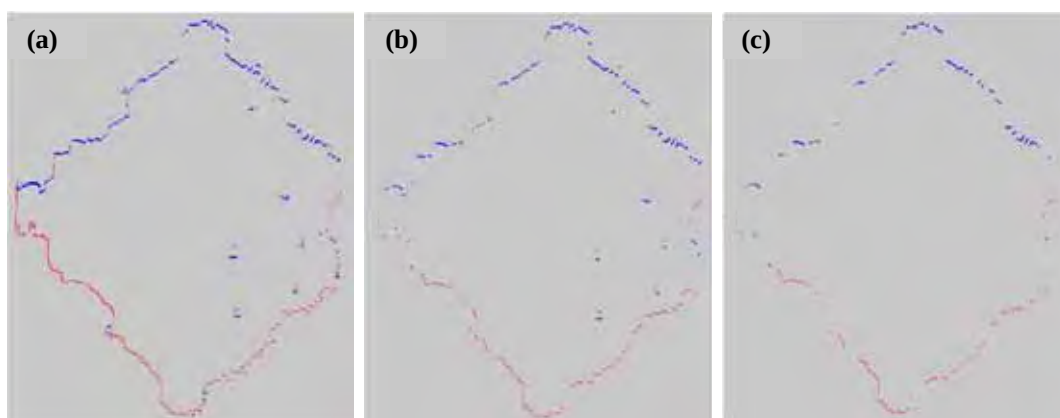


Figura 41. Resultados obtidos pela inserção dos parâmetros NV e σ_{NV} .

No capítulo seguinte são apresentados os resultados, discussões e análises da aplicação do método proposto, considerando diferentes configurações e edificações.

4 EXPERIMENTOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Esta Secção apresenta os resultados obtidos e as análises da aplicação do método proposto, com a utilização de dados simulados, bem como com imagens ópticas e dados LiDAR referentes à região de Presidente Prudente – SP (dados reais).

4.1 Descrição dos experimentos

A seguir serão descritos os experimentos realizados:

- O primeiro utiliza dados simulados de uma região plana, composta por 9 edificações, distribuídas em diferentes direções radiais e considerando diferentes ângulos de orientação da imagem;
- O segundo considera dados LiDAR bem como imagens digitais da região de Presidente Prudente, sendo realizados os processamentos com duas edificações em específico. Deve-se destacar que nestes processamentos a orientação exterior utilizada foi obtida a partir da triangulação de um bloco de imagens no sistema Erdas / LPS – *Leica Photogrammetric Suite*. O bloco utilizado é composto por 9 imagens, sendo utilizados 13 pontos de controle e 5 pontos de verificação. Nos pontos de verificação os RMSEs (*Root Mean Square Error*) obtidos foram: 0,25m em X, 0,26m em Y e 0,18m em Z.

Ambos os experimentos produziram uma imagem contendo a área de oclusão detectada pelo algoritmo proposto. Somente uma avaliação visual foi realizada com os resultados referentes aos dados simulados. Já os obtidos com os dados reais terão, além da análise visual, uma análise quantitativa, utilizando os parâmetros de completeza e nível de acerto. Essa avaliação permitiu indicar os valores ideais para os parâmetros de NV e σ_{NV} , apresentados no capítulo anterior.

4.2 Experimentos com dados simulados

Para a validação do método foi gerada uma grade regular com 1.000.000 (um milhão) de pontos, com resolução de 1m, contendo 9 edificações, sobre uma área plana. Como uma das finalidades destes experimentos é a de validar a implementação feita, optou-se por definir edificações mais simples, onde a cobertura tem a forma de quadrados. A Figura 42 mostra o cenário simulado.

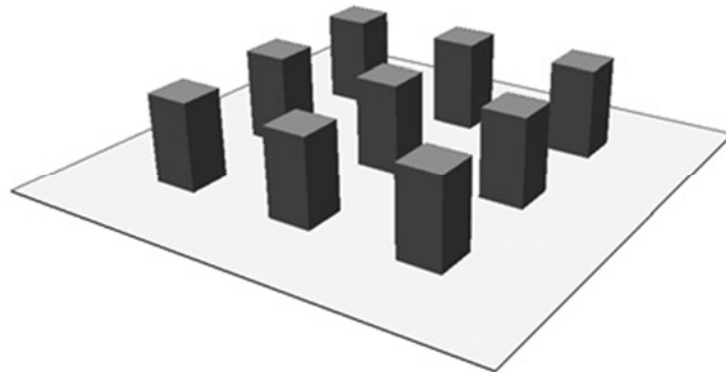


Figura 42. Representação dos dados LiDAR simulados para testes.

Para a execução do método, o Centro Perspectivo (CP) foi posicionado no centro do conjunto de dados (CP'), como pode-se ver na Figura 43. Com isso, foi possível determinar os gradientes de altitude, por meio de cada direção radial, ou seja: para cada linha que liga a projeção do CP (CP') a uma célula na borda do MDS simulado, foi estabelecido um vetor contendo os gradientes de altura em cada célula. O resultado obtido é um mapa contendo os gradientes positivos e negativos, o que permite identificar a posição do início da área de oclusão (gradientes negativos). A Figura 43 apresenta o mapa de gradientes obtido, sendo os elementos em vermelho referentes aos gradientes negativos (início da oclusão) e os azuis - gradientes positivos.

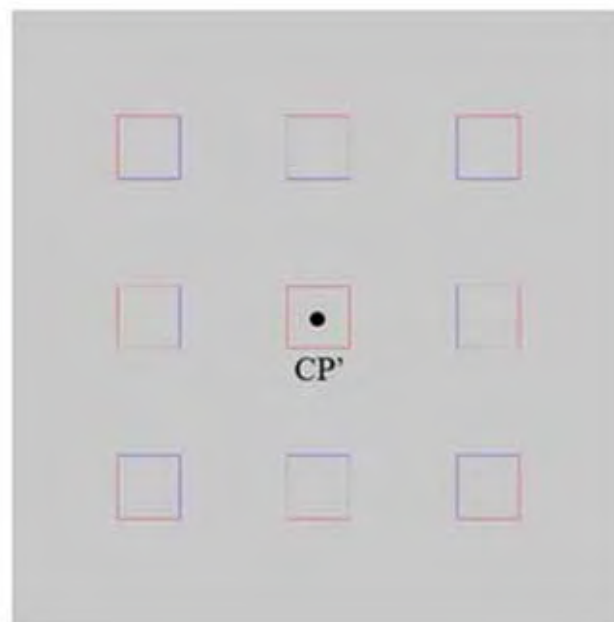


Figura 43. Mapa de gradiente das alturas do MDS com a posição da projeção do CP (CP').

Com a identificação do início da oclusão é possível prosseguir com o método e determinar o seu término, delimitando, assim, a área de oclusão e rotulando os pixels presentes neste intervalo como oclusos. A Figura 44 mostra a posição dos pixels que definem o fim da área de oclusão, para cada direção radial – utilizando a projeção por meio da equação de colinearidade, como detalhado no Capítulo 3. A Figura 45, por sua vez, apresenta o mapa de visibilidade, ou seja, a representação dos pixels visíveis e os oclusos.

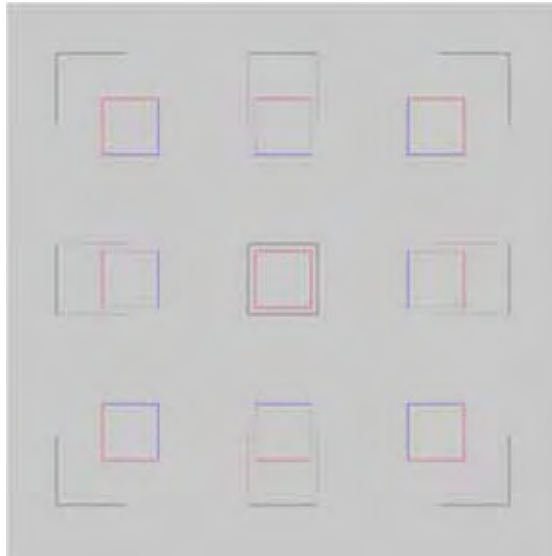


Figura 44. Mapa de gradiente com os pixels referentes ao início (em vermelho) e fim da oclusão (em preto).

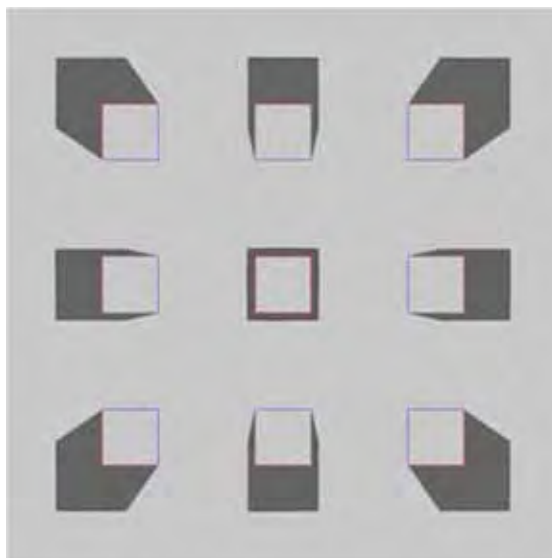


Figura 45. Mapa de visibilidade, com pixels visíveis em cinza claro e oclusos em cinza escuro.

Ao analisar os dados de entrada e o resultado, mapa de visibilidade, é possível notar a coerência das áreas de oclusão determinadas de modo automático.

Outro experimento realizado com este conjunto de dados simulados foi a variação da altura do CP. Sabe-se que para diferentes alturas de voo, uma mesma superfície (edificação) apresenta diferentes áreas de oclusão, devido à geometria formada, como apresentada na Figura 46. O resultado obtido nesta situação é mostrado na Figura 47, cuja imagem revela total coerência dos resultados.

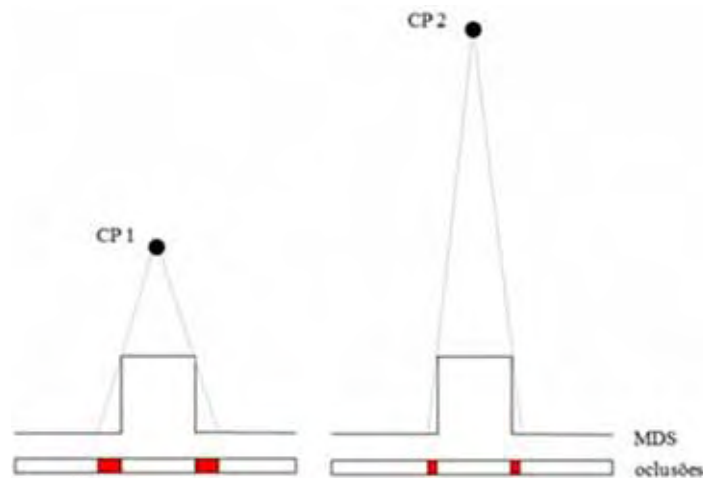


Figura 46. Diferentes oclusões para diferentes alturas do CP.

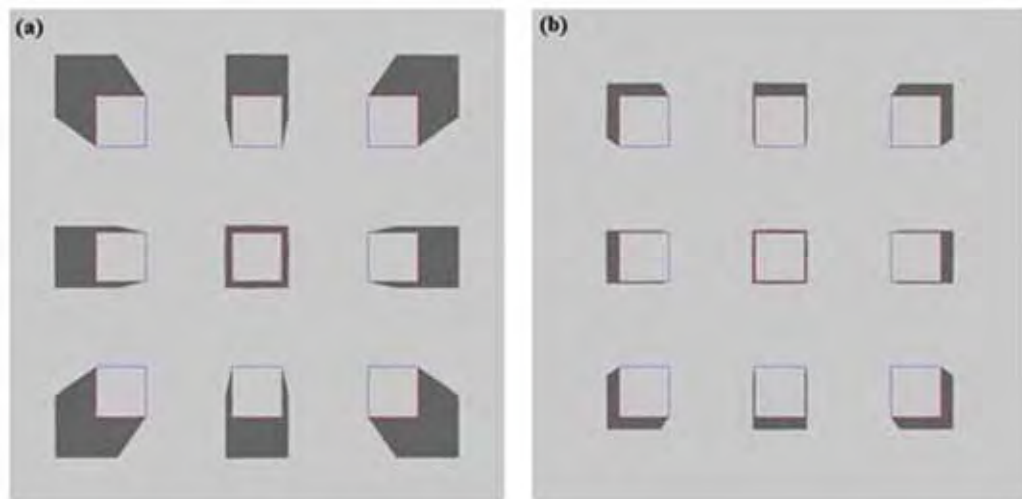


Figura 47. Teste realizado com diferentes alturas do CP: (a) CP baixo e (b) CP alto.

Como validação do método implementado, foi realizado, por último, um teste com diferentes ângulos de atitude no sistema sensor. A Figura 48 indica a variação angular em torno do eixo x (ângulo ω), em torno do eixo y (ângulo ϕ) e em torno dos três eixos, k , ϕ e ω , respectivamente, nas Figuras 48 (a), (b) e (c).

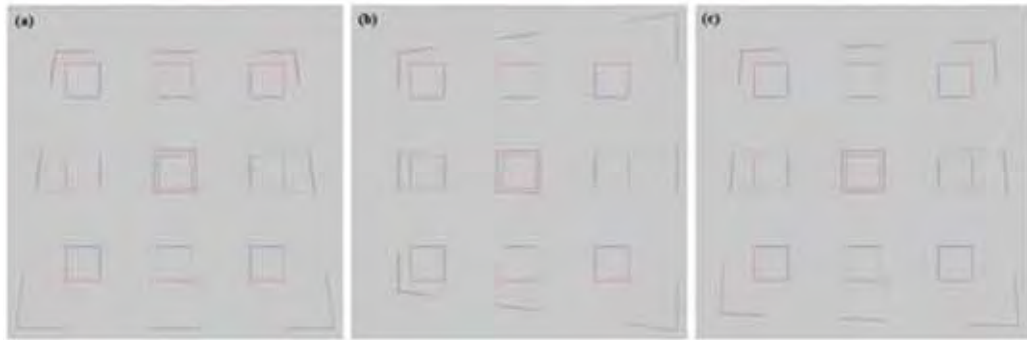


Figura 48. Três configurações com ângulos de atitude do sensor diferentes de zero: (a) variação em ω , (b) variação em ϕ e (c) variação em ω , ϕ e κ .

O uso do conjunto de dados simulados e a realização destes experimentos foram fundamentais para o trabalho e mesmo para o desenvolvimento do método, uma vez que apenas após a total depuração da implementação, com base nos resultados com dados simulados, deu-se o início dos experimentos com dados reais. Deste modo, a ideia é que sejam eliminados todos os possíveis problemas inerentes à implementação antes do processamento com dados reais, que podem conter erros de diferentes natureza, como por exemplo aqueles inerentes aos sistemas de varredura LASER, dentre outros. Deste modo, após a obtenção de resultados coerentes com dados simulados passou-se para a aplicação do método proposto com dados reais.

4.3 Experimentos com dados reais

Assim como realizado com os dados simulados, realizaram-se alguns experimentos com dados reais. Esses dados foram apresentados no Capítulo 3. Para a execução dos experimentos foram selecionadas duas edificações, em imagens e direções radiais distintas (Figura 49). Antes de mostrar os resultados com os dados reais é importante destacar que os edifícios escolhidos para as análises são bem mais complexos do que os edifícios simulados, justamente para que o método seja testado e avaliado em situações mais críticas.



Figura 49. (a) e (b): Imagens originais mostrando duas edificações selecionadas. (c) e (d): Detalhes ampliados das edificações escolhidas.

Como se pode notar pelas edificações mostradas na Figura 49, cada edificação analisada (presente em imagens diferentes) possui uma área de oclusão em sentido distinto, possibilitando, assim, um teste do método elaborado, para diferentes direções. As edificações selecionadas possuem aproximadamente 55 m de altura.

A Figura 50 apresenta uma visualização em três dimensões dos edifícios da Figura 49, a partir da nuvem de pontos LiDAR.

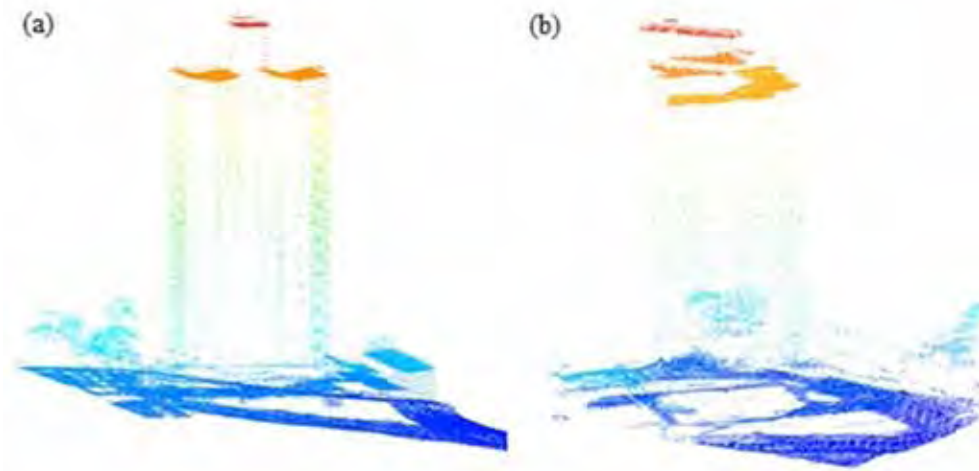


Figura 50. (a) e (b) Representação tridimensional da grade regular gerada a partir da nuvem de pontos LASER para os edifícios da Figura 49 (c) e (d), respectivamente.

Os dados do sistema LiDAR são compostos por pontos de coordenadas tridimensionais espaçados irregularmente. Para gerar um MDS, deve-se, portanto, regularizar esta nuvem de pontos, criando, com isso, uma grade regular de pontos. Esta tarefa é realizada por meio de interpolações. Neste caso foi utilizado a biblioteca *LasTools* que aplica a triangulação de Delaunay e posteriormente faz a projeção para a grade regular por meio de interpolações lineares sobre os triângulos, sendo neste trabalho adotado como espaçamento o mesmo valor do elemento de resolução da imagem óptica, que é de aproximadamente 6 cm.

Ao interpolar tais dados em uma grade regular densa (com pequeno espaçamento entre os pontos) diversos pontos são criados, portanto, densificando a amostra. Surge então um problema. Para que o método seja aplicado corretamente não deve haver pontos nas laterais dos edifícios, mas sim, nos topos e no solo. Uma vez que os dados LASER possuem muito ruído em bordas de edificações, principalmente nos casos dos edifícios mostrados que possuem sacada, é necessário um tratamento desses dados, para eliminar os pontos que representam as paredes laterais da edificação. Esta filtragem foi realizada com a eliminação dos pontos entre cotas conhecidas (telhado e solo), ou seja, todos os pontos presentes dentro de um polígono (contorno da edificação) tiveram seu valor altimétrico alterado para a altitude do solo, de maneira semiautomática. Na Figura 51 é apresentado o MDS com a informação das paredes e vegetação, e também, sem a informação referente às paredes.

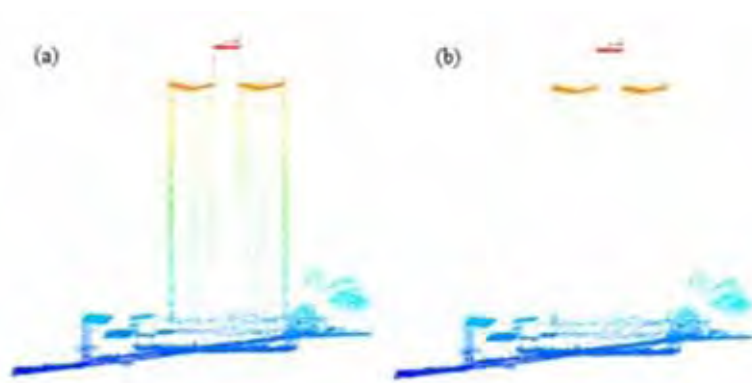


Figura 51. (a) Representação do edifício com os dados interpolados e sem a filtragem.

(b) Representação dos mesmos dados com a filtragem.

Outra modificação realizada nos dados refere-se a uma translação planimétrica, em razão de um erro de sincronismo entre o sistema LiDAR e a plataforma inercial, o que ocasionou uma variação de cerca de 4 m em E e 50 cm em N (coordenadas UTM). A determinação desses valores foi feita ao comparar as coordenadas E e N de pontos em um projeto fotogramétrico, realizado no software Erdas/LPS, com os respectivos pontos nos dados LASER. Estes valores foram determinados a partir da média das diferenças entre esses pontos, medidos em fontes de dados distintas (aerotriangulação e nuvem de pontos LASER).

Com os dados referentes às edificações, após a eliminação dos pontos referentes às paredes, e compensação do erro de sincronismo detectado, inerente ao conjunto de dados utilizado e disponível, foi possível iniciar os experimentos com dados reais. Basicamente, as etapas realizadas foram as mesmas dos dados simulados – diferenciando apenas no refinamento dos gradientes de altura, devido ao ruído presente nas bordas das edificações (Figuras 52 e 53) e a avaliação da qualidade.

As imagens utilizadas são de um mesmo voo, com pontos de vista diferentes. A partir destes dados as seguintes etapas foram realizadas, de acordo com o Fluxograma 1:

- a) Ortorectificação da imagem utilizando o MDS, sem o tratamento da oclusão.
Inicialmente pode-se notar que este processo gera a chamada imagem fantasma – duplo mapeamento;
- b) Cálculo dos gradientes de altura utilizando os dados do sistema LiDAR, por uma varredura radial, pelo método de Bresenham. Foram obtidos os gradientes positivo e negativos (azul e vermelho, respectivamente), este último sendo considerado como início da área de oclusão, para cada direção radial;
- c) Na Subseção 3.2.4 foi apresentada uma formulação para eliminação dos falsos positivos e negativos, a fim de permitir uma melhor representação dos gradientes

- neste experimento foram utilizados os seguintes valores para os parâmetros: $NV = 20$ e $\sigma_{NV} = 0,2$;
- d) Com os gradientes refinados, foi aplicado o método de detecção do fim da oclusão, obtendo a posição dos pixels finais da área de oclusão (em preto nas Figuras 52(d) e 53(d)), por meio da metodologia proposta;
- e) Para conclusão desses resultados foram preenchidos os pixels localizados entre o início da oclusão (gradiente negativo – vermelho) e o fim da oclusão (em preto), obtendo-se assim uma detecção da oclusão;
- f) Por fim, foi criado um polígono, cujos vértices são os pontos correspondentes aos gradientes negativos e seu respectivo final da oclusão. Ou seja, para cada direção radial foi obtido dois vértices do polígono. Com todos os vértices identificados foi feito um arranjo de forma que estes pontos estivessem sequenciados em sentido horário, automaticamente, possibilitando a criação do polígono e também o preenchimento de seu interior (área de oclusão – em ciano).

As Figuras 52 e 53 mostram os resultados para os dois edifícios selecionados, onde (a), (b), (c), (d), (e) e (f) correspondem a cada uma das etapas descritas anteriormente.

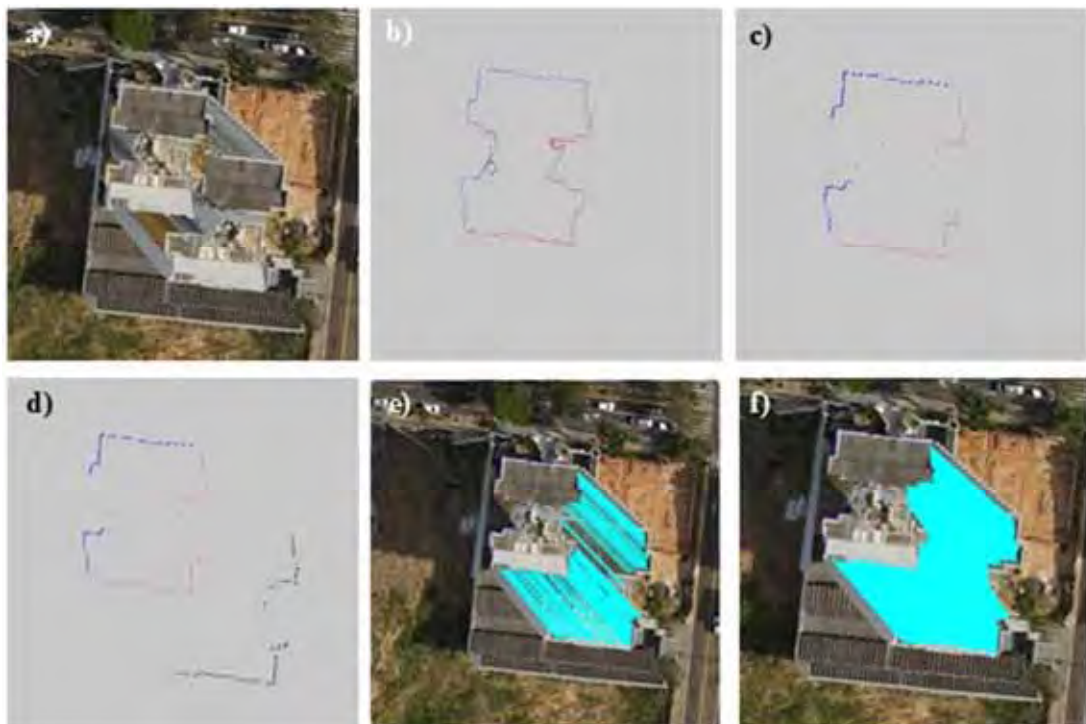


Figura 52. Sequência de etapas para detecção de oclusão para o topo da edificação – Edifício da Figura 49 (c).

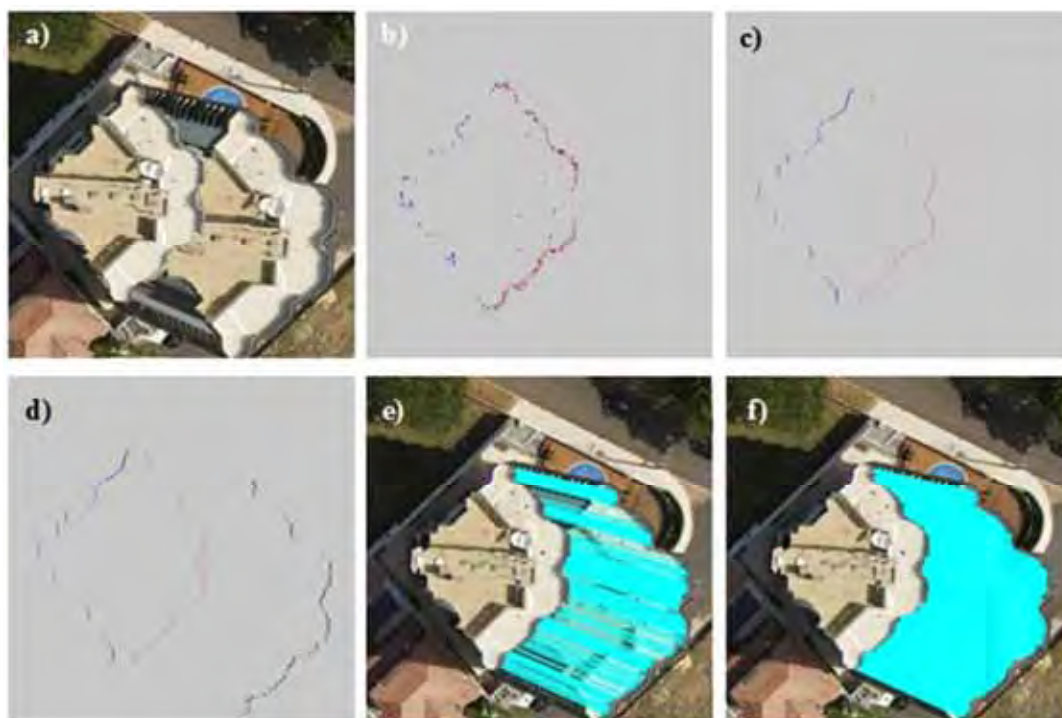


Figura 53. Sequência de etapas para detecção de oclusão para o topo da edificação – Edifício da Figura 49 (d).

Basicamente serão feitas duas considerações quanto aos resultados: a primeira refere-se ao duplo mapeamento (Figura 52(a) e 53(a)), onde o topo da edificação não é representado em sua correta posição ortogonal; a segunda se refere ao refinamento dos falsos negativos e positivos (Figura 52(c) e 53(c)), que possuem falhas nos gradientes devido a problemas nas bordas – minimizadas pela geração do polígono (Figura 52(f) e 53(f)), porém o resultado apresenta falhas no final e lateral da área de oclusão.

Ao considerar a imagem fantasma gerada, a não duplicação perfeita do topo do edifício se dá, inicialmente, pelos problemas nos dados originais, como descrito no início desta Subseção, cujas coordenadas foram transladadas. Mesmo realizando esta translação, o problema não foi solucionado por completo e sim minimizado, devido à acurácia dos dados disponíveis. Vale ressaltar que essa foi a alternativa encontrada para prosseguir o estudo utilizando os dados disponíveis, não sendo a opção mais adequada, que seria um reprocessamento dos dados LASER ou realizar o apoio da imagem utilizando a própria nuvem LASER.

Outro fator que pode contribuir para esta falha na duplicação do topo é a diferença entre a resolução espacial do MDS (grade regular) e a da imagem. Como a posição do topo possui uma escala diferente (o GSD para o topo é menor que para a base), os dados do MDS

não são compatíveis ao topo, logo o valor de altura em um pixel, referente à borda do telhado, pode apresentar valor de altura referente ao solo, e com isso ocasionar deslocamentos e falhas na ortoimagem.

Outra questão é a densidade dos pontos LASER e a separação entre os pontos amostrais, cujo ideal é que sejam de mesma dimensão da resolução espacial da imagem. Como neste trabalho os dados LiDAR possuem densidade de aproximadamente 8 pontos/m², o que equivaleria a ter um elemento de resolução espacial de 35 cm, deve-se realizar um processo de interpolação para que sejam compatíveis a resolução do MDS com a imagem. Outra possibilidade seria a redução do tamanho do pixel da imagem (reamostragem) para 35 cm. Neste trabalho, optou-se por densificar os dados LASER (interpolação) a degradar a imagem.

Já o refinamento dos gradientes de altura cria falhas nas bordas, que definem o início da área de oclusão, criando, por isso, áreas não completamente preenchidas, gerando um conjunto de linhas de oclusão na direção radial e vazios na área de oclusão (Figura 52 (c) e (e); Figura 53 (c) e (e)). Uma alternativa, para completar este padrão de linhas de oclusão gerado, seria agrupar os pixels referentes às bordas de gradiente negativo, formando um contorno (correspondente ao início da oclusão). Assim, a área seria preenchida de uma forma mais completa (Figura 52 (e) e (f); Figura 53 (e) e (f)).

Outra maneira seria a aplicação de um algoritmo que identifique o maior polígono possível formado pelos pontos de gradiente negativo e elementos que representam o fim da oclusão, gerando assim a detecção mais completa das áreas de oclusão - como foi realizado.

Por último, nota-se que as linhas preenchidas como oclusas não chegam ao fim da imagem fantasma, ou seja, a projeção do ponto correspondente ao final da oclusão não cobre toda a imagem fantasma. Dentre as possíveis causas deste problema pode-se considerar as hipóteses: a diferença de escala entre base e topo da edificação; problemas relacionados aos valores de orientação exterior; má definição das bordas das edificações ao se empregar dados LASER scanner; assim como os problemas mencionados relacionados ao sincronismo.

4.3.5 Avaliação da qualidade

Como apresentado, apesar de alguns problemas indevidos, o resultado obtido pelo método proposto é visivelmente coerente. Porém, além de uma análise visual, é necessária uma análise quantitativa desse resultado. Nota-se que a etapa (c) apresentada na Subseção anterior, utiliza para os parâmetros NV e σ_{NV} os seguintes valores: 20 pixels e 0,2 m,

respectivamente. Porém, para se estabelecer estes valores foram efetuados alguns testes para empiricamente obter os valores ideais para esses parâmetros.

Para isso, foram determinados a completeza e nível de acerto para diferentes combinações de parâmetros, como apresentado a seguir.

4.3.5.1 Completeza e nível de acerto

Para a avaliação dos parâmetros foram considerados diversos valores, tanto para NV quanto para σ_{NV} . Os dados – imagem e LiDAR – aplicados foram os mesmos utilizados anteriormente. Para cada configuração, NV / σ_{NV} , foram calculados o nível de acerto e a completeza. O polígono de referência para essas análises foi criado manualmente sobre a imagem duplicada, após o processo de ortorretificação utilizando o MDS.

Na Figura 54 são apresentados os resultados obtidos para diferentes valores dos parâmetros NV e σ_{NV} , conforme mostra a Tabela 1.

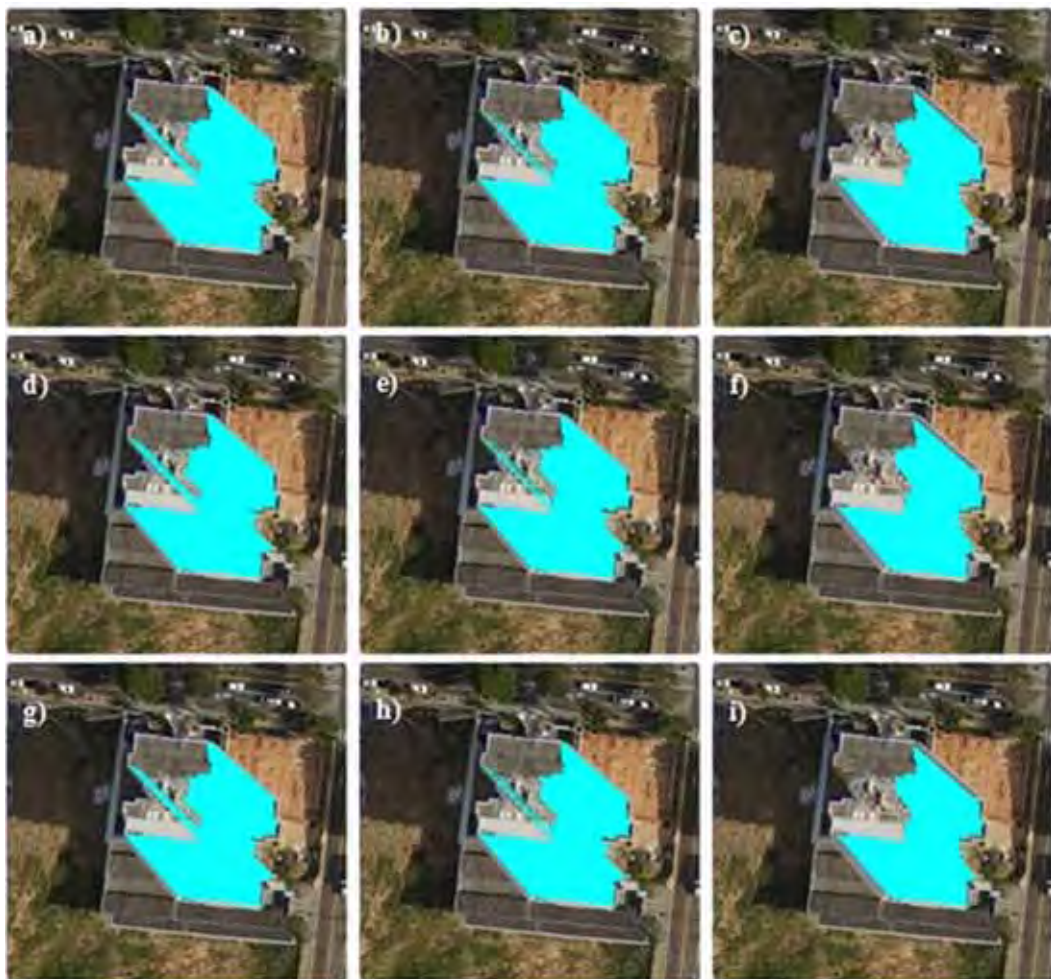


Figura 54. Resultados para diferentes configurações de NV / σ_{NV} (Experimento 1).

Tabela 1. Valores de completeza e nível de acerto em diferentes configurações.

Figura	σ_{NV} (m)	NV (pixel)	Completeza (%)	Nível de Acerto (%)
54.a	0,2	05	86,11	93,87
54.b	0,2	10	84,95	95,46
54.c	0,2	20	79,32	99,42
54.d	0,5	05	86,11	93,87
54.e	0,5	10	84,95	95,46
54.f	0,5	20	79,32	99,42
54.g	1,0	05	86,11	93,87
54.h	1,0	10	84,95	95,46
54.i	1,0	20	79,32	99,42

A seguir são apresentados os comportamentos para os índices de completeza e nível de acerto do experimento 1, com diferentes limiares σ_{NV} .

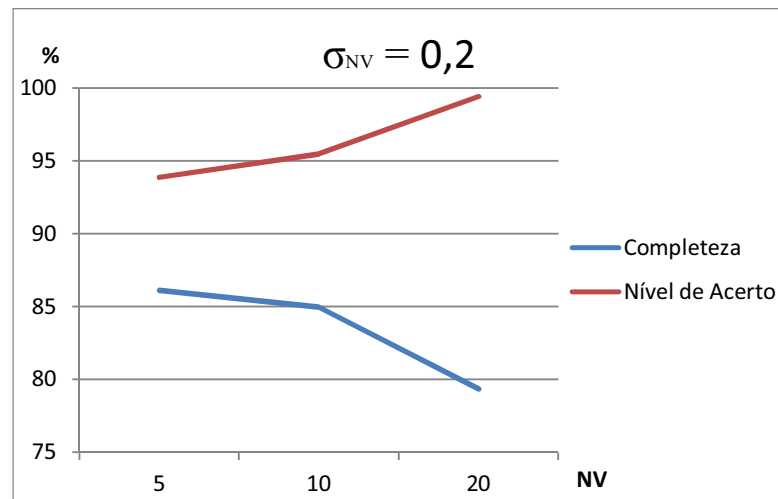


Figura 55. Comportamento do índice de completeza e nível de acerto para $\sigma_{NV} = 0,2$.

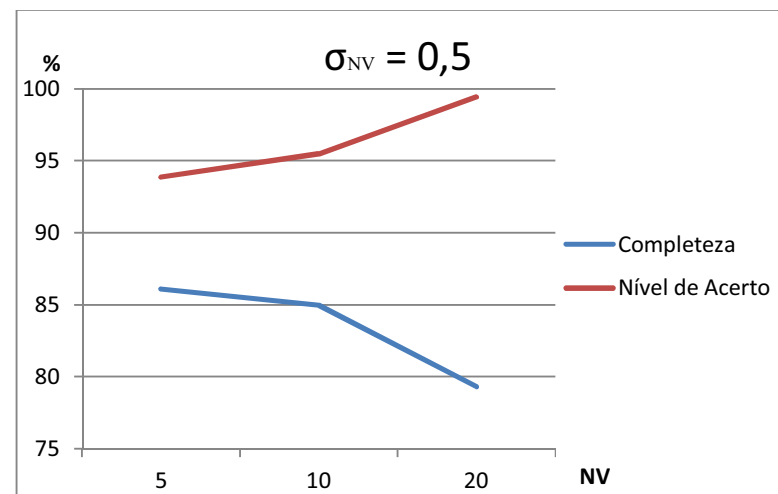


Figura 56. Comportamento do índice de completeza e nível de acerto para $\sigma_{NV} = 0,5$.

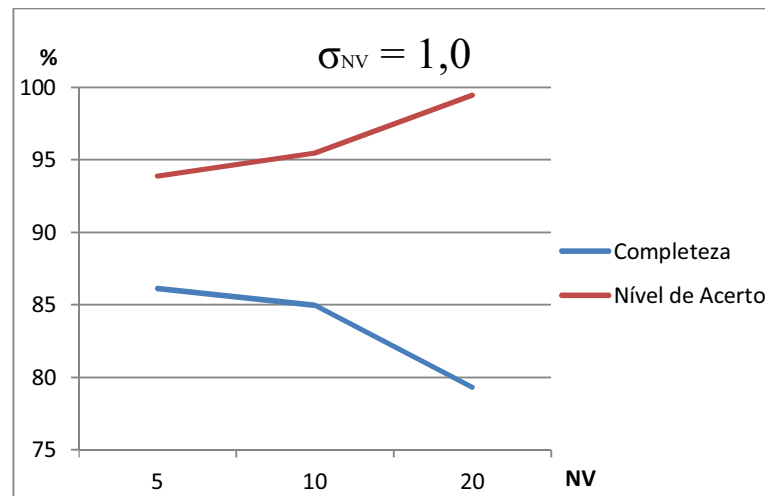


Figura 57. Comportamento do índice de completeza e nível de acerto para $\sigma_{NV} = 1,0$.

Processamento análogo foi feito para o outro edifício, como mostrado na Figura 58, conforme parâmetros mostrados na Tabela 2.

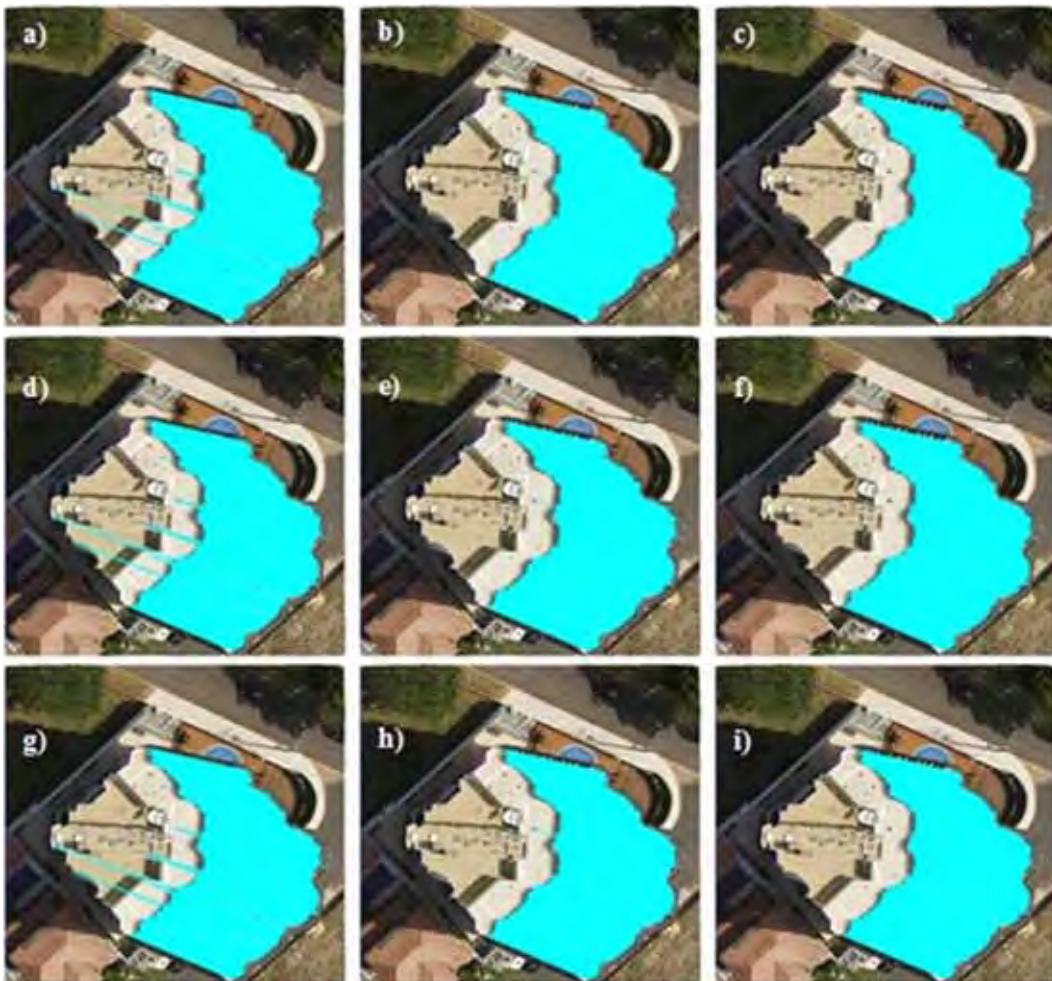


Figura 58. Resultados para diferentes configurações de NV / σ_{NV} (Experimento 2).

Tabela 2. Valores de completeza e nível de acerto em diferentes configurações.

Figura	σ_{NV} (m)	NV (pixel)	Completeza (%)	Nível de Acerto (%)
55.a	0,2	05	85,82	96,79
55.b	0,2	10	85,70	99,58
55.c	0,2	20	84,96	99,63
55.d	0,5	05	85,92	96,34
55.e	0,5	10	85,66	99,68
55.f	0,5	20	84,96	99,63
55.g	1,0	05	85,92	96,34
55.h	1,0	10	85,66	99,68
55.i	1,0	20	84,96	99,63

Assim como no experimento anterior, são apresentados os comportamentos para os índices de completeza e nível de acerto do experimento 2, com diferentes limiares σ_{NV} .

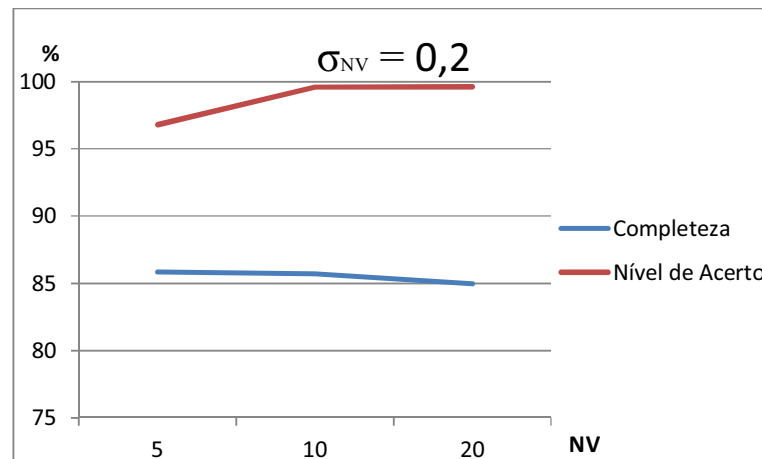


Figura 59. Comportamento do índice de completeza e nível de acerto para $\sigma_{NV} = 0,2$.

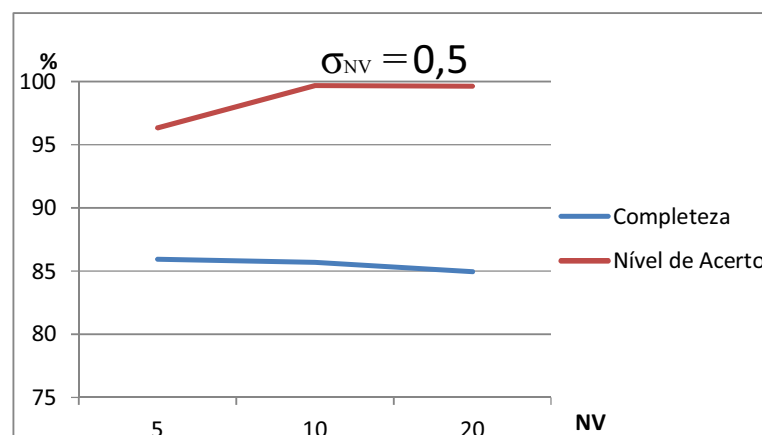


Figura 60. Comportamento do índice de completeza e nível de acerto para $\sigma_{NV} = 0,5$.

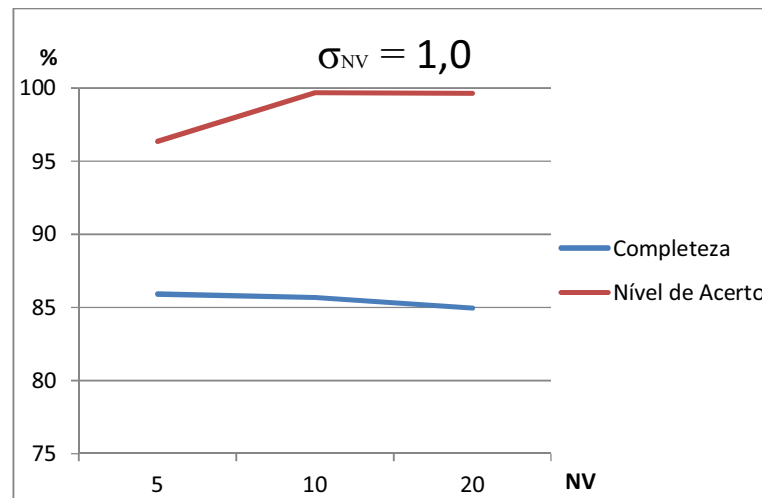


Figura 61. Comportamento do índice de completeza e nível de acerto para $\sigma_{NV} = 1,0$.

Ao analisar os valores obtidos para completeza e nível de acerto, para diferentes configurações de NV e σ_{NV} , percebe-se que σ_{NV} não possui tanta influência, porém o parâmetro NV deve receber uma atenção maior. Isso se deve ao fato de que NV provoca a mudança nos valores de completeza e nível de acerto, de modo mais significativo. Outros teste, com σ_{NV} , fora do intervalo entre $[0,2 ; 1,0]$ foram efetuados sendo notado que a variação é praticamente nula em relação aos resultados mostrados nas Tabelas 1 e 2.

Já em relação ao parâmetro NV , quanto maior a quantidade de pixels considerados, menor a quantidade de falsos gradientes, tanto positivos quanto negativos – sendo maior o nível de acerto. Porém, quanto maior o valor de NV , menores são os limites detectados da área de oclusão (laterais radiais das áreas de oclusão), como pode ser observado na Figura 54 (a) e (i), assim como na Figura 58 (a) e (i).

Como a ideia da geração de uma ortoimagem verdadeira é identificar as áreas de oclusão e buscar em imagens adjacentes as informações espectrais referentes a estas áreas, quanto mais completa (maior a completeza), melhor será a geração da ortoimagem verdadeira, mesmo que o nível de acerto seja menor. Com isso, mesmo que tenham pixels visíveis rotulados como oclusos, estes terão suas tonalidades obtidas a partir de imagens adjacentes, quando da geração da ortoimagem verdadeira. Logo, é melhor que a detecção de oclusão seja mais completa e com menor nível de acerto, do que menos completa e com maior nível de acerto.

Com isso, indica-se o uso de σ_{NV} no intervalo entre 0,2 e 1,0, sem variação considerável, e NV na ordem de 5 pixels. Estes valores correspondem à situação em que a área de oclusão é menos acurada (menor o nível de acerto) e mais completa (maior a completeza).

Em edificações com diferentes alturas estes valores para os parâmetros também são indicados, desde que o valor para o *gap* permita a detecção de oclusão apenas para o telhado, evitando as múltiplas oclusões.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O método proposto neste trabalho visa a detecção de áreas de oclusão, utilizando-se a análise de gradientes de altura, calculados a partir de dados LiDAR obtido por um sistema de varredura a LASER, como métrica. Os gradientes de altura estimados permitem a identificação do início das áreas de oclusão, sendo possível a determinação do final da área de oclusão por meio da projeção do topo da edificação no solo. A principal utilidade da identificação das áreas de oclusão é na geração de ortoimagens verdadeiras.

Em relação aos resultados com dados simulados o método mostrou-se eficiente, pois detectou corretamente as áreas de oclusão. Ao se tratar de dados reais, neste caso provindos de um sistema LiDAR – que possuem imprecisões na definição dos pontos pertencentes às bordas das edificações, e onde os edifícios utilizados são mais complexos que os dados simulados, observa-se que as bordas dos telhados das edificações não são fielmente representados, em função deste problema das bordas nos dados LiDAR. Esse fator faz com que exista uma maior dificuldade na determinação dos gradientes e consequentemente na detecção de oclusão, por meio do método proposto. Os resultados obtidos são consistentes, mas ainda passíveis de melhorias, tais como aquelas que levam a correção dos problemas apresentados no Capítulo 4.

A ideia de propor esse método como uma alternativa para detecção de áreas de oclusão visa impedir o surgimento de alguns problemas encontrados em outros métodos existentes, como a não detecção de áreas de oclusão próximas à base de altas edificações, no método Z-buffer (Porção-M). Outra ideia é criar uma métrica que evite a análise de todas as células do MDS, como no método baseado em ângulos, pois no método proposto é feita uma projeção destas áreas de oclusão e não observada célula a célula.

Juntamente com o método proposto, três parâmetros foram utilizados e aplicados, visando, não eliminar, mas sim, minimizar os problemas oriundos das inconsistências em regiões de bordas e identificação de falsos gradientes. Os resultados obtidos, com a utilização destes três parâmetros, foram avaliados numericamente por meio de índices como completeza e nível de acerto, sendo possível estimar valores ideais para os parâmetros em questão, aplicados a dois edifícios, cuja estrutura é comum em áreas urbanas.

Os problemas descritos anteriormente fazem com que os índices de completeza e nível de acerto, para os dados reais, não sejam igual a 100%, diferentemente dos dados simulados, que se aplicados estes índices os valores obtidos seriam máximos. Nota-se nos valores apresentados para as edificações reais, que o valor da completeza (índice de maior importância para a geração de ortoimagem verdadeira) se encontra na faixa de 86% para as

duas edificações avaliadas, o que permite concluir que os problemas descritos afetam de maneira similar as edificações utilizadas nos experimentos. Nestes, os níveis de acerto também foram elevados, sendo os valores obtidos no intervalo 93,8% a 99,7%.

Como foco principal para continuação deste trabalho, deve-se buscar uma metodologia que identifique as bordas da edificação, referentes ao início da oclusão, com auxílio dos gradientes. Isso é colocado uma vez que eventuais erros na identificação destes pontos irão provocar falhas nos resultados, não obtendo assim completamente as áreas oclusas, que é o propósito central do método proposto. Atualmente, esse problema é solucionado (por empresas que criam estes produtos) inserindo essas informações de maneira manual, utilizando vetores das edificações.

Como recomendação para trabalhos futuros, sugere-se um estudo sobre os métodos de interpolação mais eficientes, focando na densificação de modelos digitais de superfície, de maneira que estes não suavizem os dados, mantendo a característica original da nuvem LASER. Essa característica permite o cálculo correto dos gradientes de altura. A não suavização evitaria tratamentos preliminares dos dados LASER, como a retirada dos pontos referentes às paredes das edificações. Ainda em relação aos pontos que representam as paredes, pode-se estudar um método que faça uma eliminação automática destes pontos, ou então, não os utilizem para o cálculo dos gradientes.

Outro fator a ser explorado se refere ao uso de técnicas de processamento digital de imagens, como por exemplo, as baseadas em operações morfológicas (dilatação e erosão), visando a melhor delimitação das áreas de oclusão. Nota-se, ao observar os resultados, que a região limítrofe das áreas de oclusão não é identificada, podendo ser estudada uma maneira de preenchê-las com essas técnicas.

Além disso, um aspecto que não foi abordado neste trabalho, e ainda pouco explorado na literatura, se refere ao tratamento de múltiplas oclusões, que não é trivial, principalmente para edifícios mais complexos, como os considerados nos processamentos com dados reais. A múltipla oclusão ocorre em locais onde edificações escondem outras edificações, comumente encontradas em áreas urbanas.

Como recomendações finais sugere-se a aplicação do método proposto utilizando outros conjuntos de dados (imagens e dados LASER) bem como dados onde o modelo digital de superfície seja obtido por outra técnica, como por exemplo a correspondência fotogramétrica, usando as próprias imagens do bloco.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY. **Manual of Photogrammetry**. Virgínia: ASP. 1980.

AMHAR, F.; JANSÁ, J.; RIES, C., The generation of true orthophotos using a 3D building model in conjunction with a conventional DTM. In: **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 32, p.16-22, 1998.

ANDRADE, J. B.; OLIVAS, M. A. A. Calibração de Câmaras Aerofotogramétricas. **Boletim da Universidade Federal do Paraná**, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Geodésia no. 26, Curitiba, 1981.

ANDRADE, J. B.; **Fotogrametria**. Curitiba. SBEE. 1998. 258 p.

BALTSAVIAS, E.P. Airborne laser scanning: existing systems and firms and other resources. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 54 (2 - 3), p. 164-198, 1999.

BIASION, A.; DEQUAL, S.; LINGUA, A. A new procedure for the automatic production of true orthophotos. In: **Proceedings of IAPRSSIS**, v. 35, p. 538-543. 2004.

BOTELHO, M. F.; SILVA, C. R.; SCHOENINGER, E. R.; CENTENO, J. A. S. Comparação dos resultados de interpoladores “Vizinho mais próximo” e “Inverso de uma distância” no cálculo de volume a partir de dados laser scanner. In: **Anais do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Goiânia, INPE, p. 731-736, 2005.

BRITO, J. L. N. S. **Precision of digital orthoimages: assessment and application to the occlusion detection problem**. Doctoral Dissertation. The Ohio State University, Graduate Program in Geodetic Sciences and Surveying. 186 p. 1997.

BRITO, J.; COELHO, L. **Fotogrametria Digital**, edição 1 [s.n.] – Instituto Militar de Engenharia (ime). Rio de Janeiro, 2002.

BROWN, D. C. Decentering distortion of lens. **Photogrammetric Engineering**, v. 32, n. 3, p. 444-462, 1966.

CENTENO, J. A. S.; MITISHITA, E. A. Laser scanner aerotransportado no estudo de áreas urbanas: A experiência da UFPR. In: **Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Florianópolis, INPE, p. 3645-3652, 2007.

CHEN, L.; TEO, T.; WEN, J.; RAU, J. Occlusion-Compensated True Orthorectification For High-Resolution Satellite Images. **The Photogrammetric Record**. v. 22, n. 117, p. 39-52. 2007.

CONRADY, A. E. Decentred lens-systems. **Royal Astronomical Society**, vol.79, p. 384 – 390, 1919.

EL-SHEIMY, N.; VALEO, C.; HABIB, A. **Digital Terrain Modeling: acquisition, manipulation and applications**. London: Artech House, 2005. 526 p.

FELGUEIRAS, C. A.; Modelagem numérica de terrenos. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. **Introdução à ciência da geoinformação**. São José dos Campos: INPE. cap 7, 2001. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/intro>>. Acesso em: 01 maio 2012.

GALO, M.; TOMMASELLI, A. M. G. Calibração de Câmaras. In: Piteri, Marco A.; Rodrigues, José C.. (Org.). **Fundamentos de visão computacional**. Presidente Prudente: Faculdade de Ciências e Tecnologia - UNESP, 2011, p. 53-112. ISBN: 9788560554041.

GIM INTERNATIONAL. Product Survey: **Digital Photogrammetric Workstations**. 2011. Disponível em: <http://www.gim-international.com/productsurvey/id48-Digital_Photogrammetric_Workstations,_December.html>. Acesso em: 01 de out. 2012.

HAALA, N; CRAMER, M.; JACOBSEN, K. The german camera evaluation project - results from the Geometry group. In: ISPRS, Calgary. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**. Calgary: ISPRS, 2010, v. XXXVIII.

HABIB, A. F.; KIM, E.; KIM, C. New Methodologies for True Orthophoto Generation. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**. v.73, n. 1, p. 25–36. 2007.

ISENBURG, M. **LASTOOLS: Software for rapid converting, filtering, viewing, gridding, and compressing of LIDAR**. Disponível em: <<http://www.cs.unc.edu/~isenburg/lastools/>>. Acesso em 27 julho 2012.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres**. 2 edição. São José dos Campos: Parêntese editora. 2009. 597 p.

KRAUS, K. **Photogrammetry - Fundamentals and Standard Processes**. v. 1, Bonn: Ferd. Dümmler Verlag. 1993. 397 p.

KRAUS, K. **Photogrammetry – Geometry from Images and Laser Scans**. 2 Edition. Berlin: Walter de Gruyter. 2004. 448 p.

LI, Z.; ZHU, Q.; GOLD, C. **Digital terrain modeling – principles and methodology**, CRC Press, 323 p. 2005.

MACHADO, A. M. L.; MITISHITA, E. A.; SANTOS JÚNIOR, R. L. Estudo de caso: correção de erros sistemático em câmaras digitais não métricas. In.: **Anais do I Simpósio em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**, Recife, CTG/UFPE, 2004.

MENDONÇA JÚNIOR, M. G. **Reconstrução de edificações para geração de ortoimagens verdadeiras com empregos de dados LIDAR**. Tese de Doutorado apresentada ao curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná – Curitiba – Fevereiro de 2010.

MIKHAIL, E. M.; BETHEL, J. S.; McGLONE, J. C. **Introduction to Modern Photogrammetry**. Nova Iorque: John Wiley & Sons, Inc. 2001. 479 p.

NIELSEN, M. O. **True Orthophoto Generation**. Master Thesis. Universidade Técnica da Dinamarca. Informatics and Mathematical Modelling. Kgs. Lyngby. 2004.

RADWAN, M.; MAKAROVIC, B. Digital mono-ploting system-improvements and tests. **ITC Journal**, p. 510-533, 1980.

REIS, T. T. **Estudo e implementação de técnicas de sincronismo de dispositivos para o georreferenciamento de imagens digitais**. Dissertação de Mestrado apresentada ao curso de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Universidade Estadual Paulista – Presidente Prudente – 2009.

ROGERS, D. F. **Procedural Elements for Computer Graphics**. New York: McGraw-Hill International Editions. 1985. 422 p.

ROTHERMEL, M.; HAALA, N. Potential of Dense Matching for the Generation of High Quality Digital Elevation models. In: **ISPRS Workshop High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information**, 2011, Hannover. Disponível em: < <http://www.ipi.uni-hannover.de/418.html> >. Acesso em: 20 jul. 2012.

SAMBERG, A. An Implementation of the ASPRS LAS Standard. In.: **ISPRS Workshop on Laser Scanning and SilviLaser**. p. 363-372. Finland, 2007.

SHENG, Y., Minimising Algorithm-Induced Artefacts in True Ortho-Image Generation: A Direct Method Implemented in The Vector Domain. **The Photogrammetric Record**. v. 22, n. 118, p. 116–198. 2007.

SHIH, P. T. Y.; HUANG, C. M. The building shadow problem of airborne lidar. **The Photogrammetric Record**, v. 24, n. 128, p. 372-385, 2009.

VOLOTÃO, C. F. S. **Geração de Ortoimagens para aplicações urbanas: desenvolvimento das equações e protótipo experimental**. Dissertação. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). São José dos Campos. 2001.

WANG, X.; XIE, J. A method for true orthophoto generation based on projection and iteration strategy. **ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Volume I-4, Melbourne, Australia. 2012.

WATT, A. H. **3D Computer Graphics**. Terceira edição. Harlow: Addison-Wesley. 2000. 570 p.

WEHR, A.; LOHR, U. Airborne laser scanning – an introduction and overview. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 54, n. 2-3, p. 68-82, 1999.

WIEDEMANN, C.; HEIPKE, C.; MAYER, H.; JAMET, O. Empirical evaluation of automatically extracted road axes. In: **Empirical Evaluation Methods in Computer Vision**, Ed. Bowyer. IEEE Computer Society Press, p. 172-187. 1998.

WOLF, P. R.; DEWITT, B. A. **Elements of Photogrammetry – with applications in GIS**. 3 Edition. USA: McGraw-Hill, 2000. 608 p.

XIE, W.; ZHOU, G. Experimental Realization of Urban Large-Scale True Orthoimage Generation. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**. v. 37. Part B1. Beijing, 2008.

ZHOU, G.; XIE, W. Accuracy improvement of urban true orthoimage generation using 3D R-tree-based urban model. In: **7th Annual International Conference on Digital Government Research**, San Diego, 2006.

ZHOU, G.; CHEN, W.; KELMELIS, J. A.; ZHANG, D. A comprehensive study on urban true orthorectification. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 43, n. 9, p. 2138-2147, 2005.