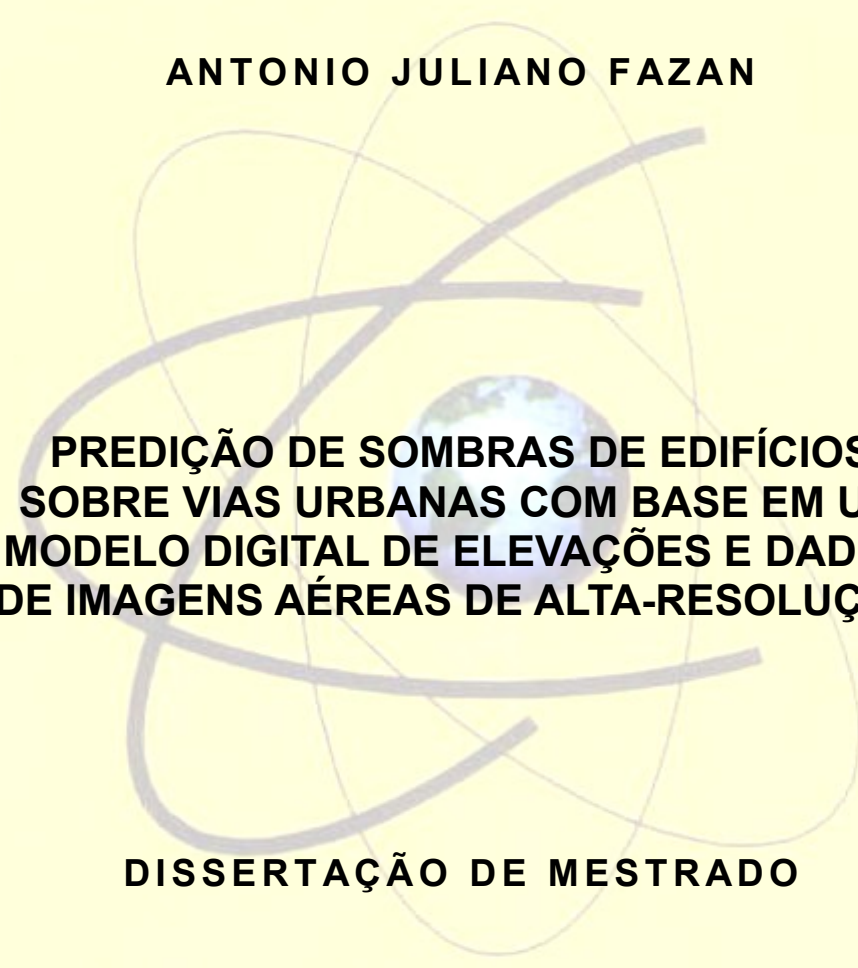


ANTONIO JULIANO FAZAN



**PREDIÇÃO DE SOMBRAS DE EDIFÍCIOS
SOBRE VIAS URBANAS COM BASE EM UM
MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÕES E DADOS
DE IMAGENS AÉREAS DE ALTA-RESOLUÇÃO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Presidente Prudente

2007

ANTONIO JULIANO FAZAN

**PREDIÇÃO DE SOMBRAS DE EDIFÍCIOS
SOBRE VIAS URBANAS COM BASE EM UM
MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÕES E DADOS
DE IMAGENS AÉREAS DE ALTA-RESOLUÇÃO**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNESP, para a obtenção do título de Mestre em Ciências Cartográficas.

Orientador: Prof. Dr. Aluir Porfírio Dal Poz

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Presidente Prudente

2007

F294p Fazan, Antonio Juliano
Predição de sombras de edifícios sobre vias urbanas com base em um modelo digital de elevações e dados de imagens aéreas de alta-resolução / Antonio Juliano Fazan. - Presidente Prudente : [s.n], 2007
xii, 100 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia
Orientador: Aluir Porfírio Dal Poz
Banca: Antonio Maria Garcia Tommaselli, Francisco Henrique de Oliveira
Inclui bibliografia

1. Fotogrametria. 2. Varredura a laser. 3. Sombras. I. Autor. II. Título. III. Presidente Prudente - Faculdade de Ciências e Tecnologia.

CDD(18.ed.) 623.73

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação – Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - UNESP, Campus de Presidente Prudente.

DEDICATÓRIA

A meus pais, irmãos e amigos.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho de pesquisa teve a colaboração direta e indireta de diversas pessoas a quem manifesto meus sinceros agradecimentos:

Ao meu orientador Prof. Dr. Aluir Porfírio Dal Poz, pelas contribuições que possibilitaram a evolução e a conclusão deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora, Prof. Dr. Maurício Galo e Prof. Dr. José Milton Arana, pelas valiosas sugestões dadas no exame de qualificação.

Aos professores do Departamento de Cartografia e Matemática, em especial aos do programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, pelo ensino e formação acadêmica.

Aos amigos da sala de permanência da Pós-Graduação em Ciências Cartográficas e do Laboratório de Ciências Cartográficas, pelo apoio e incentivo.

Aos funcionários da FCT/UNESP pelos auxílios prestados.

Ao CNPq pela concessão da bolsa de demanda social durante o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Prof. Dr. Edson A. Mitishita da Universidade Federal do Paraná e ao LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, pela cessão dos dados utilizados neste trabalho.

À Deus, pela vida, inteligência, força e presença constante em minha vida.

EPÍGRAFE

*Quando dedicamos todos os esforços na tarefa
atual, abre-se a porta do futuro.
(Seicho Taniguchi)*

RESUMO

Este trabalho apresenta uma metodologia para a predição de sombras projetadas por edifícios em vias urbanas usando imagens aéreas de alta-resolução e modelos digitais de elevações (MDE). Elementos de sombra podem ser usados na modelagem de informação contextual para, por exemplo, a extração semi-automática ou automática da malha viária a partir de imagens aéreas ou de satélite, principalmente em áreas urbanas densas. O contexto modela as relações entre os objetos numa imagem, como por exemplo, as relações entre edifícios e vias adjacentes. O uso de conhecimento contextual tem se tornado cada vez mais comum em processos de análise de imagem, principalmente em se tratando de cenas complexas. Este trabalho foi inspirado nas atuais possibilidades de se obter modelos digitais de elevações densos e acurados de áreas urbanas complexas a partir de dados de sistemas aerotransportados de varredura a laser. A metodologia proposta consiste de três etapas sequenciais. Primeiramente, os contornos de telhados de edifícios são extraídos manualmente a partir de uma imagem altimétrica obtida pela transformação do MDE/laser. De maneira similar, os contornos dos limites das vias são extraídos, agora a partir da imagem de intensidade de retorno do pulso laser. Na etapa seguinte, os polígonos dos contornos de telhado são projetados nas vias adjacentes através do uso da projeção paralela. A direção das retas de projeção paralela é calculada a partir de dados de efemérides solares e do instante de tomada da imagem aérea. Finalmente, as partes dos polígonos de sombra que estão livres de obstruções perspectivas de edifícios são determinadas a partir da separação das regiões afetadas pela perspectiva de tomada. Como estes polígonos estão visíveis na imagem aérea, eles são projetados para o espaço-imagem para verificação visual. Os resultados obtidos na avaliação experimental da metodologia mostraram que o método trabalha adequadamente, uma vez que possibilitou a predição de sombras em imagens de alta-resolução com suficiente acurácia e confiabilidade.

PALAVRAS-CHAVE: Projeção paralela. Sombras de edifícios. Efemérides solares. Imagens aéreas. Modelos digitais de elevações. Sistemas aerotransportados de varredura a laser.

ABSTRACT

This research presents a methodology for prediction of building shadows cast on urban roads using high-resolution aerial images and Digital Elevation Models (DEM). Shadow elements can be used in the modeling of contextual information, as e. g., in the semiautomatic or automatic road network extraction from satellite or aerial images, mainly in dense urban areas. Context models the relations among objects in an image, as e. g., the relations among buildings and adjacent roads. The use of contextual knowledge has become more common in image analysis processes, mainly if complex scenes are present. This research drew inspiration from the present possibilities of obtaining accurate and dense DEM from airborne laser scanning data of complex urban areas. The proposed methodology consists in three sequential steps. First, the building roof contours are manually extracted from an intensity image generated from the laser DEM. In similar way, the road side contours are extracted, now from the radiometric information of the laser scanning data. Second, the roof contour polygons are projected onto the adjacent roads by using the parallel projection. The direction of the parallel straight lines is computed from the solar ephemeris, which depends on the taken time of the aerial photograph. Finally, the parts of shadow polygons that are freed of building perspective obstructions are determined, given rise to new shadow polygons. As these polygons are visible in the image, they are projected into the image-space for visual verification. The results obtained in the experimental evaluation of the methodology showed that the method works properly, since it allowed the prediction of shadow in high-resolution images with sufficient accuracy and reliability.

KEYWORDS: *Parallel Projection; Building Shadows; Solar Ephemeris; Aerial Images; Digital Elevation Models; Airborne Laser Scanning Systems.*

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Sistema de varredura a laser em operação – (Fonte: http://www.toposys.com).....	21
Figura 2: Representação de uma imagem digital – Fonte: (KRAUS, 1993).....	23
Figura 3: Diferentes resoluções espaciais para a mesma imagem.	24
Figura 4: Imagem em diferentes níveis de quantização.	25
Figura 5: Três bandas (canais) de uma imagem multiespectral TM/LANDSAT 5.	25
Figura 6: Ângulos de rotação entre os referenciais 3D do espaço-objeto e do espaço-imagem.	26
Figura 7: Condição de colinearidade ideal.....	29
Figura 8: Translação entre o sistema fiducial e o fotogramétrico.....	33
Figura 9: Representação do efeito da distorção radial.	35
Figura 10: Referencial geodésico – Fonte: (LUGNANI, 1987).....	41
Figura 11: Referencial geodésico cartesiano – Fonte: (LUGNANI, 1987).....	42
Figura 12: Referencial cartesiano local – Fonte: (LUGNANI, 1987).....	43
Figura 13: Transformações de coordenadas entre referenciais do espaço-objeto.....	44
Figura 14: Sistema de coordenadas horizontais.	53
Figura 15: Sistema astronômico equatorial e sistema astronômico horário.....	55
Figura 16: Triângulo de posição.	56
Figura 17: Exemplos de sombras provocadas por edifícios obstruindo vias urbanas.....	60
Figura 18: Limites da imagem altimétrica a ser gerada.	63
Figura 19: Transformação de um MDE em uma imagem altimétrica digital.	65
Figura 20: Delimitação (a) de contornos de telhados de edifícios em uma imagem altimétrica obtida a partir de um MDE e (b) de limites de uma via urbana em uma imagem de intensidade de retorno do pulso laser.....	66
Figura 21: Transformações de coordenadas aplicadas aos pontos medidos na imagem de altimétrica obtida a partir do MDE.	67

Figura 22: Princípio da projeção paralela.	68
Figura 23: Projeção da sombra de um edifício para o PMHLV.....	70
Figura 24: Obtenção da região da sombra projetada por um edifício sobre uma via urbana.	71
Figura 25: Obstrução perspectiva de um edifício ocultando parte da sombra produzida por outro edifício.	72
Figura 26: Esquema representando um caso particular de obstruções causadas por edifícios (sombras e obstruções perspectivas).....	73
Figura 27: Exemplo de registro na imagem aérea de uma sombra predita no referencial cartesiano local.	74
Figura 28: Visualização dos resultados obtidos no experimento 1:.....	81
Figura 29: Visualização dos resultados obtidos no experimento 2:.....	82
Figura 30: Visualização dos resultados obtidos no experimento 3:.....	83
Figura 31: Visualização dos resultados obtidos no experimento 4:.....	84
Figura 32: Visualização dos resultados obtidos no experimento 5:.....	86
Figura 33: Visualização dos resultados obtidos no experimento 6:.....	87
Figura 34: Região de uma imagem altimétrica gerada a partir de: (a) malha irregular de pontos obtidos por varredura a laser; (b) MDE produzido por interpolação da malha irregular.	88
Figura 35: Projeção na imagem aérea do contorno obtido a partir do MDE/laser representado o telhado do edifício avaliado no experimento 1.	89
Figura 36: Projeção na imagem aérea do contorno obtido a partir do MDE/laser representado o telhado do edifício avaliado no experimento 2.	89
Figura 37: Projeções na imagem aérea dos contornos obtidos a partir do MDE/laser representado os telhados dos edifícios avaliados no experimento 3.....	89
Figura 38: Projeções na imagem aérea dos contornos obtidos a partir do MDE/laser representado os telhados dos edifícios avaliados no experimento 4.....	90
Figura 39: Projeções na imagem aérea dos contornos obtidos a partir do MDE/laser representado os telhados dos edifícios avaliados no experimento 5.....	90
Figura 40: Projeções na imagem aérea dos contornos obtidos a partir do MDE/laser representado os telhados dos edifícios avaliados no experimento 6.....	90

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Resultados numéricos obtidos no experimento 1.	81
Tabela 2: Resultados numéricos obtidos no experimento 2.	82
Tabela 3: Resultados numéricos obtidos no experimento 3 para a sombra produzida pelo edifício 1.	83
Tabela 4: Resultados numéricos obtidos no experimento 3 para a sombra produzida pelo edifício 2.	83
Tabela 5: Resultados numéricos obtidos no experimento 4 para a sombra produzida pelo edifício 1.	85
Tabela 6: Resultados numéricos obtidos no experimento 4 para a sombra produzida pelo edifício 2.	85
Tabela 7: Resultados numéricos obtidos no experimento 5.	86
Tabela 8: Resultados numéricos obtidos no experimento 6.	87

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Considerações iniciais	14
1.2	Objetivos	17
1.3	Justificativa.....	17
1.4	Estrutura da dissertação.....	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1	Introdução.....	19
2.2	Noções sobre modelagem digital das elevações do terreno	19
2.2.1	Os sistemas de varredura a laser	20
2.2.2	Obtenção dos modelos digitais de elevações a partir dos dados laser	21
2.2.3	Perspectivas futuras para os sistemas de varredura a laser	22
2.3	Imagens digitais.....	23
2.4	Matrizes de rotação	26
2.5	Equações de colinearidade	28
2.5.1	Modelo clássico.....	29
2.5.2	Modelo inverso.....	30
2.6	Modelagem e correção dos erros sistemáticos envolvidos nos processos fotogramétricos.....	31
2.6.1	Correção da deformação do filme	32
2.6.2	Redução ao sistema fotogramétrico	32
2.6.3	Distorções das lentes	33
2.6.3.1	Distorção radial	34
2.6.3.2	Distorção descentrada	36
2.6.4	Refração fotogramétrica.....	36
2.7	Resseção espacial	38
2.8	Referenciais do espaço-objeto.....	41
2.8.1	Referencial geodésico	41

2.8.2	Referencial geodésico cartesiano	42
2.8.3	Referencial cartesiano local	43
2.8.4	Referencial híbrido	44
2.9	Transformação de coordenadas entre referenciais do espaço-objeto	44
2.9.1	Transformações de coordenadas entre o referencial híbrido e o referencial geodésico	45
2.9.2	Transformações de coordenadas entre o referencial geodésico e o referencial geodésico cartesiano	48
2.9.3	Transformações de coordenadas entre o referencial geodésico cartesiano e o referencial cartesiano local	49
2.10	Sistemas de coordenadas astronômicas	50
2.10.1	A esfera celeste	50
2.10.2	Sistema de coordenadas horizontais	52
2.10.3	Sistema de coordenadas equatoriais	54
2.10.4	Sistema de coordenadas horárias	55
2.11	Transformações de coordenadas entre sistemas astronômicos	56
2.11.1	Triângulo de posição	56
2.11.2	Transformação do sistema equatorial para o sistema horário	57
2.11.3	Transformação do sistema horário para o sistema horizontal	59
3	METODOLOGIA PARA A PREDIÇÃO DE REGIÕES AFETADAS POR SOMBRAS DE EDIFÍCIOS SOBRE VIAS URBANAS	60
3.1	Introdução	60
3.2	Principais etapas da metodologia para a predição de sombras de edifícios sobre vias urbanas	61
3.3	Extração dos contornos de telhados e limites de vias	62
3.3.1	Transformação do MDE em uma imagem altimétrica	62
3.3.2	Delimitação dos contornos de telhados de edifícios e limites de vias urbanas ...	65
3.3.3	Transformação dos telhados de edifícios e limites de vias urbanas para o referencial cartesiano local	66
3.4	Obtenção das sombras de edifícios visíveis no espaço-imagem	67
3.4.1	Obtenção das projeções de sombra dos edifícios sobre o PMHLV	67
3.4.2	Determinação das regiões de sombra sobre as vias urbanas	71
3.4.3	Seleção das partes das sombras visíveis na imagem aérea	71
3.5	Registro das sombras visíveis na imagem aérea	73

4	AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA METODOLOGIA DE PREDIÇÃO DE SOMBRAS	75
4.1	Introdução.....	75
4.2	Procedimentos metodológicos.....	75
4.2.1	Características dos dados utilizados.....	75
4.2.2	Desenvolvimento algorítmico e implementação computacional	75
4.2.3	Geração do MDE a partir dos dados de varredura a laser	77
4.2.4	Transformação do MDE gerado em imagem altimétrica	77
4.2.5	Registro da imagem de intensidade de retorno do pulso laser	78
4.2.6	Formas de análise dos resultados	79
4.3	Resultados experimentais	80
4.3.1	Experimento 1	80
4.3.2	Experimento 2	81
4.3.3	Experimento 3	82
4.3.4	Experimento 4	84
4.3.5	Experimento 5	86
4.3.6	Experimento 6	87
4.4	Discussão dos principais fatores que afetaram a qualidade dos resultados.....	88
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	93
5.1	Conclusões.....	93
5.2	Recomendações para trabalhos futuros	95
6	REFERÊNCIAS	97
7	BIBLIOGRAFIAS.....	100

1 INTRODUÇÃO

1.1 *Considerações iniciais*

Um dos aspectos fundamentais para as metodologias de extração automática da malha viária é o tipo de cena envolvida. Os principais tipos de cena que podem estar presentes em imagens para aplicações cartográficas são a rural, a suburbana e a urbana, sendo que a diferença fundamental no tratamento destas imagens é a relevância das informações contextuais, que são as relações espaciais existentes entre o objeto de interesse e os demais presentes na cena. Exemplos de objetos no contexto das vias urbanas (ruas, avenidas, alamedas etc.) são aqueles que de alguma forma provocam alterações nas suas projeções numa imagem, como é o caso dos edifícios, árvores e veículos. Em particular, os edifícios (que são feições antrópicas) interagem de duas formas diferentes com as vias. A primeira delas é através das projeções perspectivas e a segunda por meio das projeções de sombra. Esta última depende fundamentalmente da orientação solar no instante de tomada da imagem. Já a projeção perspectiva depende da posição e da atitude do sensor no instante do imageamento, da distância focal da câmara e do relevo do terreno. Em ambos os casos, essas projeções podem provocar obstruções nas vias urbanas, que dependem, além dos fatores mencionados, da altura dos edifícios.

De um modo geral, as projeções de sombras são regiões muito comuns em imagens aéreas ou orbitais de alta-resolução, principalmente em cenas urbanas complexas. Os efeitos negativos das sombras degradam a qualidade visual das imagens, modificando a resposta espectral das regiões afetadas pelo sombreamento e causando perturbações severas na análise dessas imagens. As superfícies sob as sombras podem ser confundidas com outros tipos de objetos que possuem resposta espectral semelhante. Esse fato possui duas consequências principais: a primeira delas é a classificação errônea dos objetos presentes na cena e a segunda é uma interferência no desempenho das técnicas tradicionais de extração de informação a partir de imagens. As sombras dificultam tarefas como, por exemplo, a correspondência de imagens para a extração de elevações, a detecção de alterações cadastrais, a extração automática de edifícios e da malha viária etc. (LI *et al.*; MADHAVAN *et al.*; MASSALABI *et al.*, 2004). A principal razão para a ocorrência das sombras é o bloqueio direto da luz solar por objetos altos como edifícios e árvores. As superfícies afetadas por

sombras são fracamente iluminadas e aparecem escuras nas imagens. A forma e o tamanho de uma sombra dependem geometricamente da altura e da forma do objeto que a produz, além da posição do sensor e da altura solar no instante de imageamento (MASSALABI *et al.*, 2004).

Na literatura especializada é possível encontrar diversos métodos para detectar regiões de sombras e compensar seus efeitos negativos em imagens para aplicações cartográficas e de Sensoriamento Remoto. Esses métodos podem ser classificados em dois grandes grupos, de acordo com o tipo de dado utilizado para se atingir o objetivo desejado. O primeiro grupo emprega basicamente dados de imagem em conjunto com técnicas convencionais de análise (limiarização, segmentação etc.), explorando principalmente propriedades radiométricas para tratar o problema das sombras. Por exemplo, Gwinner e Schaale (1997) utilizaram limiarização do histograma para detectar as regiões de sombra presentes em uma imagem. Alternativamente, outras propriedades podem ser exploradas para melhorar a detecção das sombras ou validar os resultados obtidos. As características mais comumente exploradas em análise de imagem para detectar regiões de sombras ou compensar seus efeitos negativos são (MASSALABI *et al.*, 2004):

- Sombras são regiões formadas por *pixels* com baixo valor de intensidade;
- A forma de uma sombra é função da forma do objeto que a produz;
- Uma ou mais extremidades de uma região sombreada são orientadas na direção do azimute solar (para o instante de tomada da imagem);
- A área de uma sombra depende da altura solar (para o instante de tomada da imagem) e da altura do objeto que a produz;
- A projeção de uma sombra não modifica a saturação da cor de um objeto;
- A textura de uma superfície praticamente não é afetada por sombreamento;
- As sombras têm três componentes principais: a sombra projetada pelo objeto; a região sombreada que representa uma parte do objeto e a penumbra, localizada na periferia da sombra projetada pelo objeto.

Massalabi *et al.* (2004) propõe um método para a detecção de sombras baseado em uma análise hierárquica de propriedades radiométricas, geométricas, contextuais e de textura, a partir de uma imagem previamente obtida por segmentação contendo regiões candidatas a sombras. Em outra estratégia, Salvador *et al.* (2001) utilizaram propriedades

invariantes de cores como a saturação para discriminar as regiões sombreadas presentes em imagens digitais coloridas. Madhavan *et al.* (2004) utilizam um método para a extração de sombras existentes em imagens aéreas de alta-resolução baseado em filtragem, segmentação e análise da média móvel.

No que se refere ao segundo grupo de metodologias, são empregados dados de imagens combinados com outras fontes de informação para se obter as regiões de sombras presentes em uma imagem. A estratégia adotada é semelhante em todos os métodos encontrados na literatura: as regiões de sombras são determinadas através de uma simulação (predição) empregando dados de elevações, geralmente derivados de um modelo digital de superfície (MDS) e dados de posição solar (azimute e altura) estimados para o instante do imageamento. Um exemplo é o método proposto por Eckstein e Steger (1996): as regiões de sombra presentes em uma imagem são inicialmente preditas a partir de dados de um MDS e de informações solares, sendo refinadas na sequência através de segmentação, limiarização e crescimento de regiões. O método tratado neste trabalho também se enquadra nesse grupo.

As regiões de sombra presentes em uma imagem podem ser utilizadas, por exemplo, na modelagem de informações de contexto para metodologias de extração automática da malha viária. O uso de conhecimento contextual tem se tornado cada vez mais comum no desenvolvimento dessas metodologias, principalmente em se tratando de imagens de cenas urbanas. Por exemplo, Hinz e Baumgartner (2000, 2002) e Hinz *et al.* (2001) utilizaram informações contextuais para localizar partes de uma imagem onde é mais fácil extrair segmentos de ruas em cenas urbanas complexas. Nesses casos, as regiões de sombra presentes nas imagens são derivadas através do método de Eckstein e Steger (1996) apresentado anteriormente. Outro exemplo de uso de informações de contexto é encontrado em Price (2000), onde para definir os limites de vias urbanas, é utilizado o conhecimento prévio de que objetos altos (tais como edifícios e árvores) as margeiam. Como mostra Baumgartner *et al.* (1999), as informações de contexto também podem ser úteis para extrair a malha viária presente em imagens de cenas rurais. As informações contextuais foram utilizadas neste último trabalho para verificar hipóteses de conexão entre segmentos de rodovias previamente extraídos. Enquanto que nesse caso o conhecimento contextual é uma opção para complementar a extração da malha viária, em imagens de cenas urbanas as informações contextuais possuem importância fundamental.

Este trabalho de pesquisa tem por motivação a breve discussão apresentada acima sobre uso de contexto na extração automática da malha viária urbana. O que se propõe neste trabalho não é a modelagem de contexto da malha viária, nem tampouco seu uso no processo mencionado, mas sim uma metodologia para a predição semi-automática de sombras projetadas por edifícios sobre vias urbanas, visíveis em imagens aéreas de alta-resolução e que poderão ser úteis na modelagem do contexto da malha viária.

1.2 *Objetivos*

O objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento de uma metodologia para a predição de regiões existentes em imagens aéreas de alta-resolução afetadas pela projeção de sombras de edifícios. A metodologia utilizará dados de sistemas aerotransportados de varredura a laser em conjunto com dados de efemérides solares e informações de orientação do sensor para determinar as partes das sombras de edifícios projetadas sobre as vias urbanas que estarão visíveis na imagem aérea. Dessa forma, os objetivos específicos deste trabalho são:

- Desenvolver algoritmicamente e implementar computacionalmente as etapas necessárias à metodologia, quais sejam:
 - Extração manual dos contornos de telhados e limites das vias urbanas;
 - Predição das sombras dos edifícios em um referencial cartesiano local;
 - Registro das sombras preditas na imagem aérea.
- Avaliar experimentalmente a metodologia desenvolvida utilizando dados reais.

1.3 *Justificativa*

Este trabalho está relacionado aos procedimentos de extração automática da malha viária, mais especificamente com a conexão automática entre segmentos de rodovia previamente extraídos. Como uma das formas de detectar desconexões entre segmentos de rodovia é através do uso de conhecimento contextual, propõe-se nesta pesquisa o desenvolvimento de uma metodologia para a obtenção de um elemento contextual bastante

comum em imagens aéreas de alta-resolução, tratando-se de obstruções causadas pela projeção de sombras de edifícios sobre as vias em cenas urbanas.

As informações derivadas poderão ser úteis na modelagem de contexto para novas metodologias de extração automática da malha viária em áreas urbanas densas e também para o aperfeiçoamento de métodos existentes. Outro aspecto importante é que os modelos digitais de elevações, obtidos a partir de dados coletados por sistemas aerotransportados de varredura a laser, podem ser utilizados em conjunto com outras fontes de dados para auxiliar na predição de regiões de sombras, principalmente daquelas produzidas por feições antrópicas, como é o caso dos edifícios.

1.4 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está estruturada em cinco capítulos. O Capítulo 2 traz uma revisão bibliográfica contendo conceitos essenciais explorados no decorrer do desenvolvimento da metodologia proposta neste trabalho. Nesse capítulo são apresentadas noções sobre modelagem de elevações do terreno e sobre sistemas aerotransportados de varredura a laser, imagens digitais e alguns tópicos clássicos da Fotogrametria, como por exemplo, as equações de colinearidade, a modelagem e correção de erros sistemáticos, a resseção espacial e as transformações de coordenadas entre referenciais do espaço-objeto. Também é apresentada uma revisão sobre os sistemas astronômicos e as transformações de coordenadas entre eles. No Capítulo 3 é descrita a metodologia para a predição de regiões afetadas pela projeção de sombras de edifícios sobre vias urbanas em imagens aéreas de alta-resolução. O Capítulo 4 apresenta os procedimentos metodológicos e os resultados obtidos na avaliação experimental da metodologia desenvolvida neste trabalho. O Capítulo 5 traz as principais conclusões a respeito dos resultados obtidos nos experimentos realizados e algumas recomendações para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 *Introdução*

Este capítulo apresenta a revisão teórica fundamental para o desenvolvimento do método proposto no Capítulo 3. Na Seção 2.2 são apresentadas noções sobre modelagem digital das elevações do terreno a partir de dados coletados por sistemas de varredura a laser aerotransportado. A Seção 2.3 traz o conceito e as formas de obtenção de uma imagem digital. As Seções 2.4 a 2.7 tratam de tópicos clássicos da Fotogrametria como matrizes de rotação, equações de colinearidade (clássica e inversa), modelagem e correção de erros sistemáticos e orientação exterior de uma imagem aérea por resseção espacial. Na Seção 2.8 são apresentados os referenciais do espaço-objeto usualmente utilizados em Fotogrametria. A Seção 2.9 trata das transformações de coordenadas entre esses referenciais. Na Seção 2.10 é apresentada uma revisão teórica sobre os principais sistemas de coordenadas astronômicos utilizados para fornecer a posição de um astro na esfera celeste. A Seção 2.11 traz as relações existentes entre esses sistemas, bem como algumas transformações de coordenadas que são empregadas na estimação da posição (orientação) do Sol em um instante de tempo qualquer.

2.2 *Noções sobre modelagem digital das elevações do terreno*

O avanço da tecnologia vem permitindo o desenvolvimento de ferramentas para mapeamento direto da superfície terrestre, por meio da representação digital da superfície do terreno e de objetos (árvores, edificações etc.) que nela se encontram. A representação digital das elevações do terreno e dos objetos existentes sobre sua superfície pode ser obtida através da geração de um modelo digital de elevações (MDE). Esses modelos são muito úteis em diversas aplicações como planejamento urbano e ambiental, manejo florestal, telecomunicações etc.

Assim como os modelos digitais de terreno (MDT), os MDE podem ser obtidos convencionalmente a partir de estereopares de imagens aéreas. Entretanto, os efeitos perspectivos causados pela geometria dessas imagens, além de outros, como deslocamentos devido ao relevo e obstruções provocadas por sombras, são problemas críticos na obtenção de

produtos confiáveis para aplicações em áreas urbanas. Isto ocorre porque os pontos representativos dos objetos existentes sobre a superfície do terreno, obtidos através de algoritmos convencionais de correspondência automática de imagens, não permitem modelar de forma confiável e direta a superfície desses objetos (DALMOLIN e SANTOS, 2004).

2.2.1 Os sistemas de varredura a laser

Visando superar as deficiências na modelagem das elevações dos objetos sobre a superfície terrestre, foram desenvolvidos os sistemas aerotransportados de varredura a laser. Tais sistemas permitem adquirir, em um período de tempo relativamente curto, uma grande quantidade de pontos tridimensionais com elevada precisão, que podem ser aplicados, por exemplo, na produção de MDE (DALMOLIN e SANTOS, 2004).

Os sistemas aerotransportados de varredura a laser são instalados em aeronaves com características semelhantes às das utilizadas em levantamentos aerofotogramétricos convencionais, sendo posicionados sobre a mesma abertura onde é instalada a câmara aerofotogramétrica. Esses sistemas são constituídos por um equipamento de varredura óptico-mecânico, um sistema de posicionamento DGPS e uma unidade de medição inercial (IMU). Durante o levantamento, o emissor de feixes do equipamento de varredura óptico-mecânico gera e emite pulsos laser numa frequência elevada, que são direcionados para a superfície do objeto a ser levantado através de um espelho de varredura. Os pulsos atingem o objeto de interesse, interagindo com sua superfície, e parte de sua energia retorna ao sistema, sendo captada por um receptor eletro-óptico. O ângulo de inclinação de cada feixe (em relação à vertical local) é medido através de um codificador. O tempo entre a transmissão e a recepção de cada pulso é estimado por um contador de tempo, sendo que o resultado é utilizado para calcular a distância entre o sensor e o objeto iluminado. As distâncias calculadas são utilizadas em conjunto com os demais dados e com as informações fornecidas pelo DGPS e pela IMU, a fim de calcular as coordenadas tridimensionais dos pontos amostrados durante o levantamento, em um sistema geodésico de referência bem definido (geralmente o WGS84-G1150). A Figura 1 ilustra um sistema de varredura a laser aerotransportado em operação (WEHR e LOHR, 1999; WOLF e DEWITT, 2000).

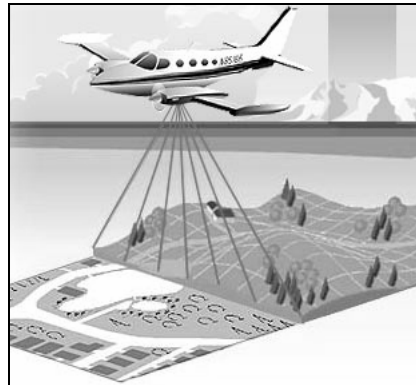


Figura 1: Sistema de varredura a laser em operação – (Fonte: <http://www.toposys.com>).

Posteriormente, a malha de pontos coletada passa por um processamento a fim de transformá-la em um modelo tridimensional de superfície. O modelo produzido pode tanto apresentar uma estrutura irregular, geralmente na forma de um TIN (*Triangular Irregular Network*), ou regular, produzido a partir da interpolação da malha de pontos para uma grade. A partir dessas superfícies podem ser obtidos modelos digitais de elevações, como por exemplo, modelos digitais de terreno (MDT) e modelos digitais de superfície (MDS).

Uma característica marcante dos sistemas de varredura a laser é a medição de diferentes ecos de um mesmo pulso, que são refletidos por diferentes objetos ao longo da projeção do feixe na superfície sendo levantada. Existem também sistemas que podem registrar a forma inteira do sinal retornado. Isso permite obter, além da altura, as informações relacionadas à resposta espectral dos objetos iluminados durante o levantamento.

2.2.2 Obtenção dos modelos digitais de elevações a partir dos dados laser

Após um levantamento aéreo com um sistema de varredura a laser, basicamente dois conjuntos de dados estão disponíveis: os dados de posição e orientação e as distâncias registradas entre o sensor laser e os pontos na superfície levantada, com os respectivos ângulos de varredura instantâneos. A partir desses dados, são calculadas as coordenadas tridimensionais dos pontos representando a superfície levantada em um sistema de referência terrestre fixo (por exemplo, um sistema geodésico cartesiano ou um sistema híbrido, como o UTM com altitude geométrica). O resultado do processamento é uma malha irregular de pontos com coordenadas tridimensionais. A distribuição dos pontos depende do modelo de varredura adotado pelo sistema laser empregado no levantamento (WEHR e LOHR, 1999).

Para calcular as coordenadas tridimensionais dos pontos, além dos dados obtidos no levantamento com o sistema de varredura a laser, são necessários alguns parâmetros adicionais. Alguns desses parâmetros são os ângulos de rotação do sensor de varredura a laser (*roll, pitch, yaw*) em relação ao sistema de coordenadas fixo à plataforma, cuja origem geralmente se encontra na unidade de medição inercial (IMU), que fornece a orientação do sistema de varredura. Outros parâmetros a serem considerados são as posições do sensor de varredura a laser em relação à IMU e da IMU em relação ao GPS. Esses parâmetros de calibração podem ser estimados a partir dos dados obtidos em levantamentos com o sistema de varredura a laser em certas áreas de referência (terrenos planos, áreas urbanas densas etc.), sobrevoadas em diferentes direções (WEHR e LOHR, 1999).

Para a produção de modelos digitais de elevação, primeiramente a malha irregular de pontos é transformada para um sistema de coordenadas de projeção cartográfica desejado. Em seguida, os dados altimétricos são ordenados em relação às suas posições planimétricas. Por último, a malha irregular de pontos resultante da ordenação é interpolada para uma grade regular, a fim de obter o modelo de elevação requerido (MIKHAIL *et al.*, 2001).

2.2.3 *Perspectivas futuras para os sistemas de varredura a laser*

Os sistemas de varredura a laser têm um alto potencial a ser explorado. É uma tecnologia recente com grandes perspectivas para desenvolvimentos, especialmente nos algoritmos de geração dos modelos digitais e nos componentes do sistema, para proporcionar maior capacidade de varredura e melhorar a identificação e a classificação de objetos. Também existem estudos para o desenvolvimento de ferramentas de extração semi-automática e automática de feições, baseadas nas características dos modelos derivados dos sistemas de varredura a laser. Em alguns casos, algoritmos convencionais de extração de feições podem ser utilizados em imagens obtidas a partir da normalização desses modelos.

Os sistemas de varredura a laser permitem que as tarefas mais demoradas e onerosas, como a modelagem do terreno, sejam realizadas com mais eficiência e rapidez. Contudo, a varredura a laser não substitui a Fotogrametria convencional: a imagem aérea ainda é um elemento essencial na geração de produtos fotogramétricos.

2.3 *Imagens digitais*

Uma imagem digital é uma representação computacional discreta de um sinal analógico contínuo. Essa representação é feita por meio de uma grade de elementos pictoriais denominados *pixels*. De fato, uma imagem digital consiste numa matriz bidimensional de números inteiros positivos, normalmente referidos como números digitais (NDs), que representam o atributo (nível de cinza ou valor de brilho) associado a um elemento particular, com posição dada pelos índices de linha e coluna. Quando uma imagem digital é visualizada num dispositivo de saída (analógico) utilizando milhares ou milhões de *pixels*, sua aparência passa a ser de uma imagem contínua.

O sistema de coordenadas da imagem digital, ilustrado pela Figura 2, tem origem no canto superior esquerdo, sendo que a contagem de linhas (índice L) é crescente para baixo e a das colunas (índice C) é crescente para a direita.

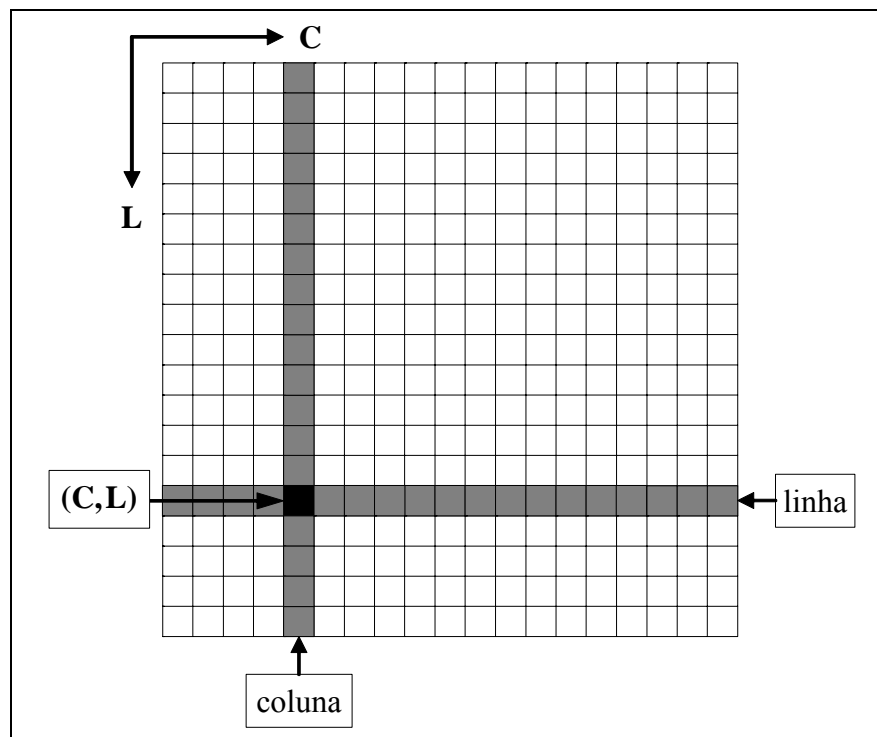


Figura 2: Representação de uma imagem digital – Fonte: (KRAUS, 1993).

As imagens digitais são produzidas através de um processo conhecido por amostragem discreta. Neste processo, uma pequena área da imagem (um *pixel*) é utilizada para representar a quantidade de energia eletromagnética proveniente de uma porção correspondente de um objeto da superfície imageada. O processo de amostragem discreta de uma imagem possui duas características fundamentais: a resolução geométrica e a resolução

radiométrica. A resolução geométrica (ou espacial) refere-se ao tamanho que um *pixel* individual representa no mundo real. Dessa forma, tamanhos menores de *pixel* correspondem a resoluções espaciais maiores (WOLF e DEWITT, 2000).

A Figura 3 mostra duas imagens digitais representando a mesma região da superfície terrestre em diferentes resoluções espaciais. Nestas imagens é possível verificar a presença de rodovias (faixas estreitas e alongadas com aparência homogênea na imagem de maior resolução): à medida que diminui a resolução espacial da imagem, as rodovias tendem a se manifestar como linhas, em vez de faixas estreitas e alongadas com aparência homogênea.

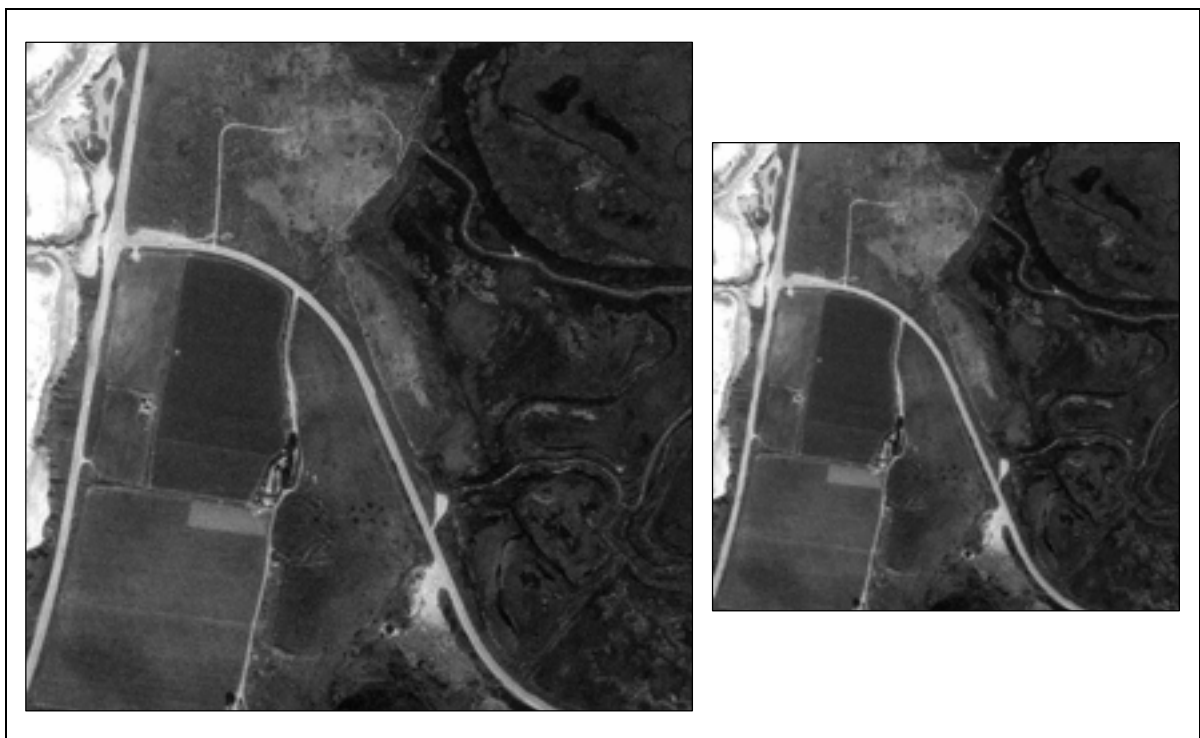


Figura 3: Diferentes resoluções espaciais para a mesma imagem.

Outra característica fundamental das imagens digitais é a resolução radiométrica, que é uma função do nível de quantização e da resolução espectral. A quantização refere-se ao número inteiro de valores que são utilizados para converter a amplitude da energia eletromagnética original (sinal analógico) em sinal digital. Quanto maior for o nível de quantização, mais acurada será a representação digital do sinal analógico original (WOLF e DEWITT, 2000). Na Figura 4 é mostrada a mesma imagem representada em diferentes níveis de quantização. Nesse caso, o nível de quantização aumenta da esquerda para a direita.

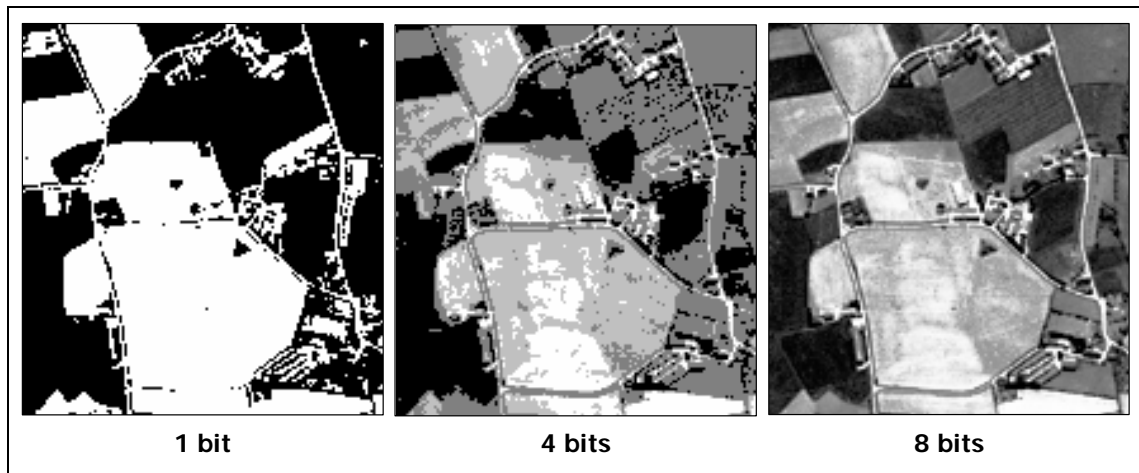


Figura 4: Imagem em diferentes níveis de quantização.

A resolução espectral é outro aspecto da resolução radiométrica. Sabe-se que o espectro eletromagnético abrange um intervalo contínuo de comprimentos de onda. Numa imagem, amostras da energia eletromagnética normalmente são percebidas somente dentro de uma faixa estreita desse espectro. Um exemplo é o filme colorido para fotografia, que utiliza três emulsões, cada uma sensível a uma faixa do espectro visível, correspondentes às cores azul, verde e vermelho. A resolução espectral do filme colorido corresponde a três canais ou bandas espectrais. Outros exemplos são os sensores do tipo CCD e CMOS, utilizados em câmaras fotográficas digitais e os sensores instalados a bordo de plataformas orbitais (como os satélites LANDSAT, SPOT, IKONOS etc.) que geralmente adquirem imagens em várias bandas do espectro eletromagnético. Na Figura 5 é mostrado um exemplo de uma imagem adquirida pelo sensor TM (*Thematic Mapper*) instalado a bordo do satélite LANDSAT 5. Imagens como essas são denominadas de imagens multiespectrais.

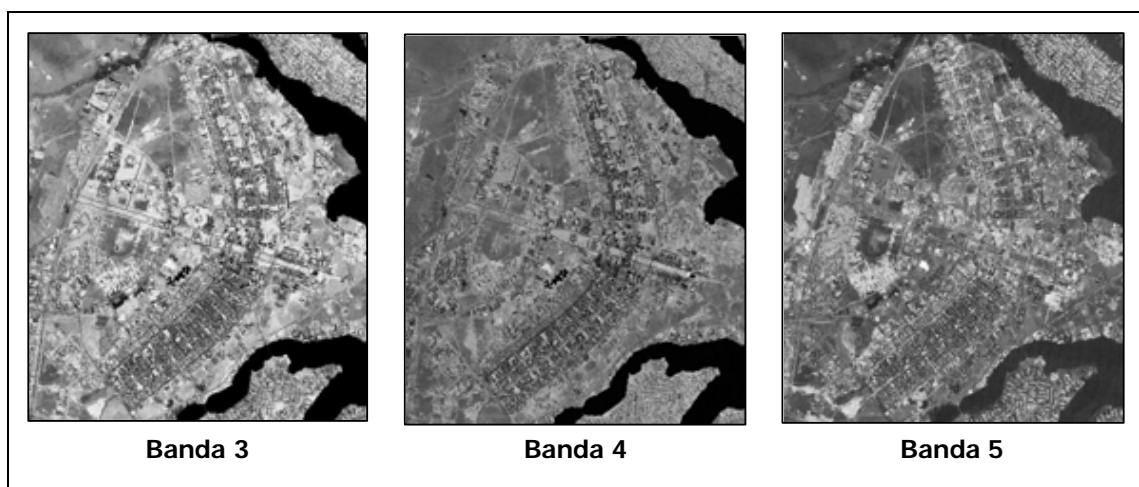


Figura 5: Três bandas (canais) de uma imagem multiespectral TM/LANDSAT 5.

Além das formas de aquisição de imagens para aplicações em coleta de informações espaciais já mencionadas, tem-se a relacionada com a Fotogrametria convencional, que utiliza câmaras fotogramétricas analógicas ou digitais posicionadas em plataformas aéreas ou terrestres, para obter imagens da superfície ou de objetos do terreno. Outra forma de obtenção de uma imagem digital é a transformação de dados numéricos do terreno (por exemplo, de um MDE) em uma imagem digital em níveis de cinza. Essa transformação será descrita em detalhes no Capítulo 3 desta dissertação.

2.4 Matrizes de rotação

A orientação do referencial tridimensional arbitrário onde as imagens aéreas são tomadas geralmente não coincide com a orientação do referencial tridimensional do espaço-objeto. Em Fotogrametria, os ângulos de rotação entre esses dois referenciais são tradicionalmente denominados de ω (rotação em X), ϕ (rotação em Y) e κ (rotação em Z). Conhecendo-se os valores destes ângulos, é possível construir matrizes cujos elementos são compostos por funções trigonométricas (seno e co-seno), conhecidas como matrizes de rotação. Essas matrizes impõem a um sistema a orientação de outro. A Figura 6 ilustra os ângulos de rotação entre o referencial tridimensional do espaço-objeto e o referencial tridimensional arbitrário do espaço-imagem.

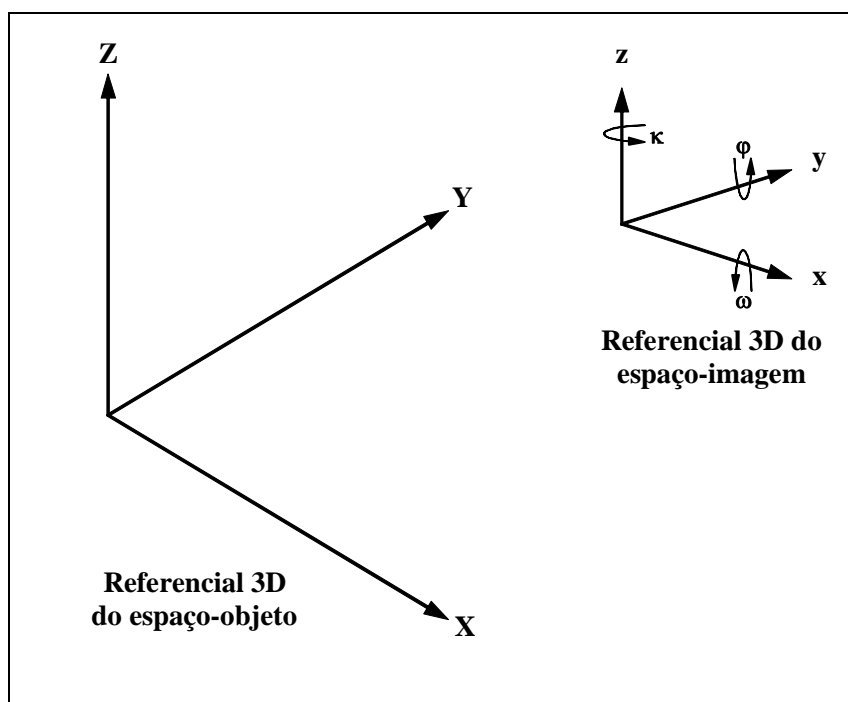


Figura 6: Ângulos de rotação entre os referenciais 3D do espaço-objeto e do espaço-imagem.

A rotação em X é definida quando o referencial 3D arbitrário da imagem gira de um ângulo ω em torno do eixo X do referencial 3D do espaço-objeto (Figura 6). A matriz que representa essa rotação é dada pela Equação (MIKHAIL *et al.*, 2001)

$$R(\omega) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega) & \text{sen}(\omega) \\ 0 & -\text{sen}(\omega) & \cos(\omega) \end{bmatrix}. \quad (1)$$

A rotação em Y é definida quando o referencial 3D arbitrário da imagem gira de um ângulo φ em torno do eixo Y do referencial 3D do espaço-objeto (Figura 6). A matriz que representa essa rotação é dada pela Equação (MIKHAIL *et al.*, 2001)

$$R(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & 0 & -\text{sen}(\varphi) \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{sen}(\varphi) & 0 & \cos(\varphi) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

A rotação em Z é definida quando o referencial 3D arbitrário da imagem gira de um ângulo κ em torno do eixo Z do referencial 3D do espaço-objeto (Figura 6). A matriz que representa essa rotação é dada pela Equação (MIKHAIL *et al.*, 2001)

$$R(\kappa) = \begin{bmatrix} \cos(\kappa) & \text{sen}(\kappa) & 0 \\ -\text{sen}(\kappa) & \cos(\kappa) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

A matriz de rotação pode ser obtida, por exemplo, multiplicando-se as matrizes $R(\omega)$, $R(\varphi)$ e $R(\kappa)$ dadas anteriormente na ordem especificada pela Equação

$$M = R(\kappa) \cdot R(\varphi) \cdot R(\omega) = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

É importante ressaltar que, em processos analíticos da Fotogrametria, é possível especificar diferentes ordens de produto das matrizes de rotação. A matriz M, assim como as matrizes $R(\omega)$, $R(\varphi)$ e $R(\kappa)$, pertence a um subconjunto das matrizes quadradas, conhecido como matrizes ortogonais. Segundo Lugnani (1987), algumas das propriedades da matriz de rotação são:

- 1) $M^T = M^{-1}$;
- 2) $\det(M) = 1$;
- 3) $\sum_{i=1}^3 m_{ij}^2 = 1$, para $j = 1, 2$ ou 3 ;
- 4) $\sum_{i=1}^3 m_{ij} \cdot m_{ik} = 0$, para $j \neq k$.

Os elementos individuais da matriz de rotação são os co-senos diretores que relacionam os eixos dos dois sistemas de coordenadas (WOLF e DEWITT, 2000) e podem ser obtidos diretamente, através da aplicação do conjunto de Equações

$$\left. \begin{aligned} m_{11} &= \cos(\varphi) \cdot \cos(\kappa) \\ m_{12} &= \cos(\omega) \cdot \text{sen}(\kappa) + \text{sen}(\omega) \cdot \text{sen}(\varphi) \cdot \cos(\kappa) \\ m_{13} &= \text{sen}(\omega) \cdot \text{sen}(\kappa) - \cos(\omega) \cdot \text{sen}(\varphi) \cdot \cos(\kappa) \\ m_{21} &= -\cos(\varphi) \cdot \text{sen}(\kappa) \\ m_{22} &= \cos(\omega) \cdot \cos(\kappa) - \text{sen}(\omega) \cdot \text{sen}(\varphi) \cdot \text{sen}(\kappa) \\ m_{23} &= \text{sen}(\omega) \cdot \cos(\kappa) + \cos(\omega) \cdot \text{sen}(\varphi) \cdot \text{sen}(\kappa) \\ m_{31} &= \text{sen}(\varphi) \\ m_{32} &= -\text{sen}(\omega) \cdot \cos(\varphi) \\ m_{33} &= \cos(\omega) \cdot \cos(\varphi) \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

que é compatível com a ordem especificada pela Equação 4.

2.5 Equações de colinearidade

A condição de colinearidade expressa que um ponto $P(X, Y, Z)$ no espaço-objeto, o ponto correspondente no espaço-imagem $p(x, y)$ e a estação de exposição (centro perspectivo) são colineares, ou seja, pertencem à mesma reta, conforme mostra a Figura 7. As equações que expressam essa condição são conhecidas na Fotogrametria como equações de colinearidade.

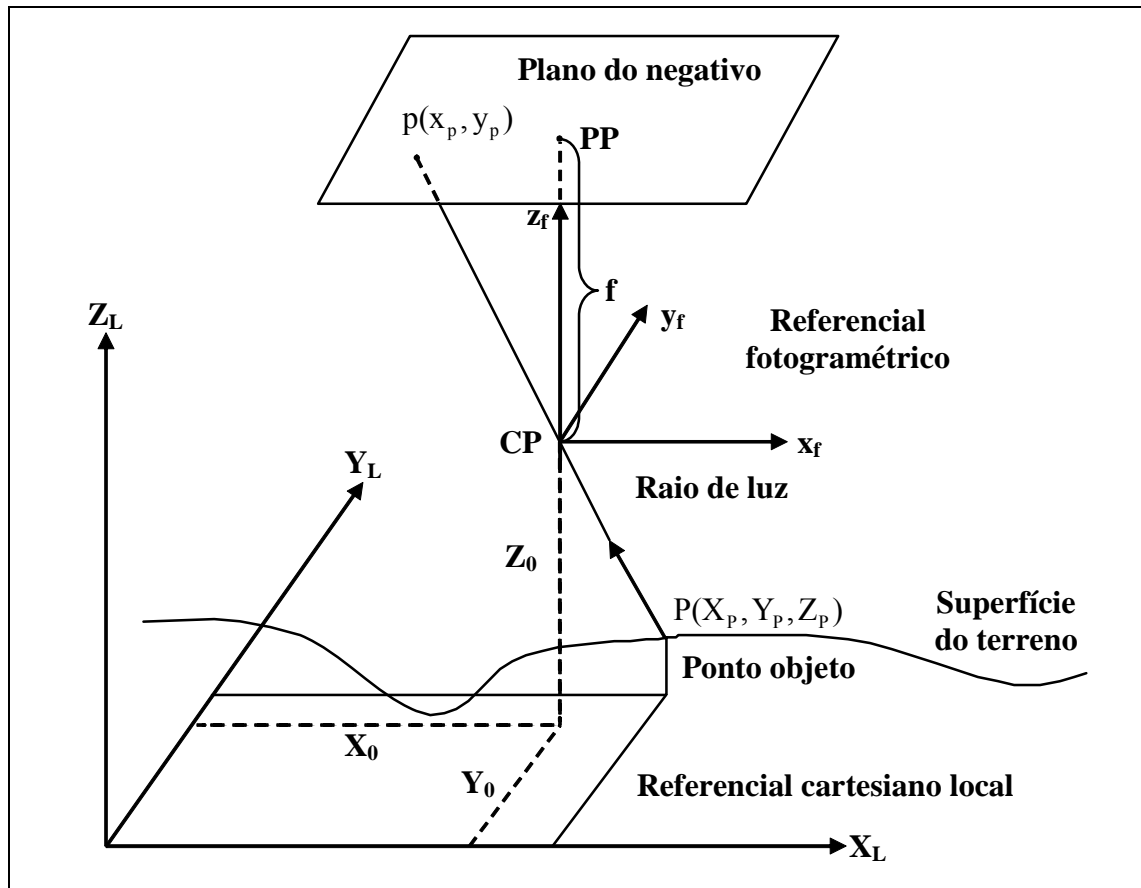


Figura 7: Condição de colinearidade ideal.

As equações de colinearidade podem ser consideradas os modelos matemáticos básicos da Fotogrametria analítica. Com base nestas equações pode-se, por exemplo, formalizar os processos de resseção espacial, fototriangulação, calibração de câmaras etc. No caso da fototriangulação, estas equações devem ser solucionadas para a obtenção das coordenadas do centro perspectivo (X_0, Y_0, Z_0) , dos ângulos de atitude $(\omega, \varphi, \kappa)$ e das coordenadas dos pontos no espaço-objeto, a partir das fotocoordenadas observadas em um bloco de imagens aéreas devidamente tomadas sobre o terreno (LUGNANI, 1987).

2.5.1 Modelo clássico

O modelo clássico das equações de colinearidade expressa coordenadas de um ponto $p(x_p, y_p)$ no espaço-imagem em função das coordenadas do ponto $P(X_p, Y_p, Z_p)$ correspondente no espaço-objeto. Essa relação é explicitada matematicamente, para um ponto no plano do negativo (Figura 7), pelas Equações (LUGNANI, 1987)

$$x_p = f \cdot \frac{m_{11} \cdot (X_p - X_0) + m_{12} \cdot (Y_p - Y_0) + m_{13} \cdot (Z_p - Z_0)}{m_{31} \cdot (X_p - X_0) + m_{32} \cdot (Y_p - Y_0) + m_{33} \cdot (Z_p - Z_0)} \quad (6)$$

e

$$y_p = f \cdot \frac{m_{21} \cdot (X_p - X_0) + m_{22} \cdot (Y_p - Y_0) + m_{23} \cdot (Z_p - Z_0)}{m_{31} \cdot (X_p - X_0) + m_{32} \cdot (Y_p - Y_0) + m_{33} \cdot (Z_p - Z_0)}, \quad (7)$$

onde:

- (x_p, y_p) são as coordenadas de um ponto P no referencial fotogramétrico;
- f é a distância focal da câmara;
- $m_{ij} : i = 1, \dots, 3; j = 1, \dots, 3$ são os elementos da matriz de rotação (Equação 4);
- (X_p, Y_p, Z_p) são as coordenadas do ponto P no referencial cartesiano local;
- (X_0, Y_0, Z_0) são as coordenadas do centro perspectivo (CP) no referencial cartesiano local.

2.5.2 Modelo inverso

De forma análoga, as equações de colinearidade podem relacionar inversamente, mas não de forma explícita, as coordenadas (X_p, Y_p) de um ponto P no espaço-objeto com as coordenadas (x_p, y_p) do ponto p correspondente no espaço-imagem. As equações que expressam essa relação são aqui denominadas de modelo inverso das equações de colinearidade. Para um ponto no plano do negativo da imagem, o modelo de colinearidade inverso é dado pelas Equações (LUGNANI, 1987)

$$X_p = X_0 + (Z_p - Z_0) \cdot \frac{m_{11} \cdot x_p + m_{21} \cdot y_p + m_{31} \cdot f}{m_{13} \cdot x_p + m_{23} \cdot y_p + m_{33} \cdot f} \quad (8)$$

e

$$Y_p = Y_0 + (Z_p - Z_0) \cdot \frac{m_{12} \cdot x_p + m_{22} \cdot y_p + m_{32} \cdot f}{m_{13} \cdot x_p + m_{23} \cdot y_p + m_{33} \cdot f}. \quad (9)$$

Os elementos constituintes destas equações já foram definidos na seção anterior. É importante notar que as equações dadas não são, a rigor, equações inversas das Equações 6 e 7. Isto porque a determinação de coordenadas planimétricas (X_p, Y_p) depende

da componente altimétrica (Z_p). Entretanto, se as informações do relevo (por exemplo, na forma de um MDT, MDE ou outra qualquer) estiverem disponíveis, as Equações 8 e 9 podem ser utilizadas em vários procedimentos fotogramétricos como a monorrestituição (DAL POZ, 1998). Essas equações são aplicadas, por exemplo, no problema de determinação de obstruções causadas por projeções perspectivas de edifícios sobre vias urbanas em imagens aéreas de alta-resolução (FAZAN *et al.*, 2006).

2.6 Modelagem e correção dos erros sistemáticos envolvidos nos processos fotogramétricos

A condição expressa pelas equações de colinearidade é baseada na hipótese fundamental de que os raios de luz provenientes dos objetos da superfície imageada atravessam parte da atmosfera e o sistema de lentes da câmara, atingindo o plano do negativo, descrevendo caminhos ópticos retilíneos. Entretanto, na prática, esses caminhos não são mantidos devido a fatores como:

- Erros provocados no instante de exposição, devido às condições atmosféricas e distorções das lentes;
- Erros ocorridos após o imageamento, devido ao trabalho do filme fotográfico, para o caso de imagens analógicas.

Assim, esses erros sistemáticos se classificam em três grandes grupos: efeitos de deformação do filme, distorções das lentes e refração fotogramétrica. Essas três categorias de erros alteram a posição dos pontos na imagem, sendo que a refração fotogramétrica e as distorções das lentes alteram a direção do raio luminoso. Vale ressaltar que a deformação do filme é inerente somente às câmaras aéreas convencionais, isto é, às câmaras analógicas. Em se tratando de câmaras digitais, outros erros ocorrem devido às características eletrônicas das mesmas e, por isso, outros parâmetros devem ser considerados em um modelo de calibração. Existem várias formulações matemáticas que representam, com maior ou menor aproximação, as condições físicas que ocasionam os erros. Desta forma, a escolha de um modelo matemático adequado é de grande importância. A decisão da correção ou não de cada erro deverá ser tomada para cada caso, considerando a precisão requerida e a magnitude do erro sistemático considerado.

2.6.1 Correção da deformação do filme

As deformações nos filmes, causadas por variações de temperatura, umidade, tração imposta e pela própria manipulação, são inevitáveis, mesmo com a utilização de materiais extremamente estáveis nos filmes e diapositivos fotográficos. Assim, estes erros sistemáticos devem ser corrigidos, pois há uma propagação para o resultado final, principalmente numa fototriangulação analítica (ANDRADE, 1998).

Existem vários modelos de transformação para a correção das deformações do filme, entre eles tem-se a transformações isogonal, a afim e a projetiva. Dentre elas, a transformação afim com seis parâmetros é a que melhor modela o trabalho do filme, para o caso típico de câmaras com quatro marcas fiduciais, produzindo melhores resultados, segundo Andrade (1998). O modelo matemático dessa transformação é dado por

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_f \\ y_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Os parâmetros a , b , c , d , Δx e Δy da transformação afim devem ser estimados através de um ajustamento de observações baseado no critério dos mínimos quadrados. Nas equações dadas em 10, (x', y') são as coordenadas das marcas fiduciais observadas na imagem e (x_f, y_f) são as coordenadas correspondentes dadas pelo certificado de calibração da câmara, sendo normalmente consideradas isentas de erros. Após a estimação desses parâmetros, a transformação inversa é aplicada nos pontos observados, a fim de corrigir (ou pelo menos minimizar) o efeito provocado pelas deformações do filme. A transformação afim inversa é dada por

$$\begin{bmatrix} x_f \\ y_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x' - \Delta x \\ y' - \Delta y \end{bmatrix}. \quad (11)$$

2.6.2 Redução ao sistema fotogramétrico

As coordenadas corrigidas da deformação do filme estão referenciadas ao sistema de coordenadas fiduciais, cuja origem é o centro fiducial (CF), determinado pelo cruzamento dos segmentos de retas definidas por duas marcas fiduciais opostas. Para obter as coordenadas correspondentes no sistema fotogramétrico, deve-se corrigi-las do deslocamento do ponto principal (PP), que é definido como sendo a projeção ortogonal do CP no plano do negativo ou do positivo da imagem. Essa correção consiste em realizar duas translações de

eixos, admitindo-se o paralelismo entre os sistemas fiducial e fotogramétrico, como mostra a Figura 8.

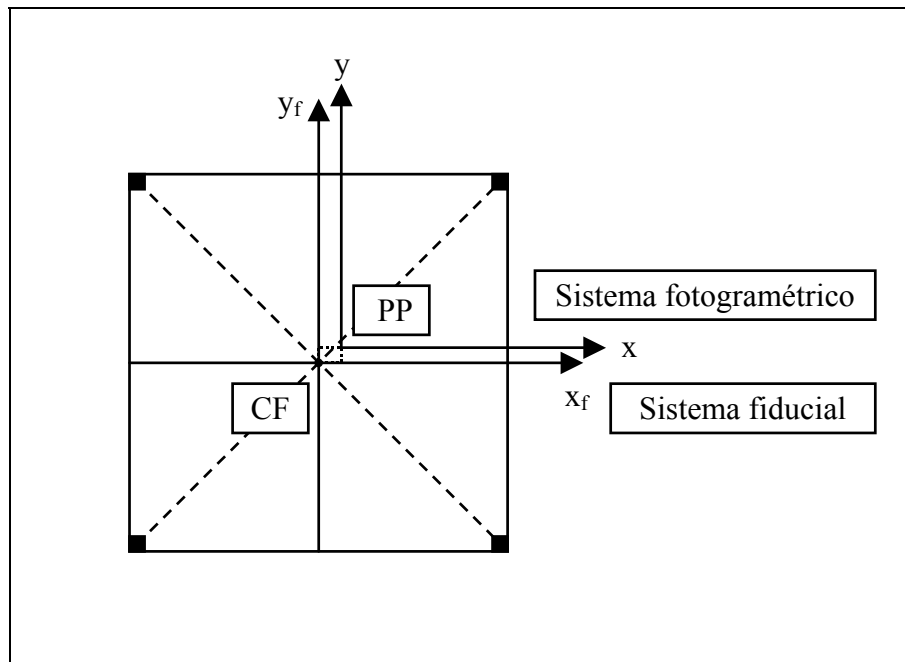


Figura 8: Translação entre o sistema fiducial e o fotogramétrico.

O modelo matemático empregado para realizar essa correção é dado por

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_f \\ y_f \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

onde:

- (x, y) são as coordenadas do ponto observado, referidas ao sistema fotogramétrico;
- (x_f, y_f) são as coordenadas do ponto observado, referidas ao sistema fiducial;
- (x_0, y_0) são as coordenadas do ponto principal, referidas ao sistema fiducial.

2.6.3 Distorções das lentes

As distorções das lentes podem ser idealizadas como desvios do raio de luz no espaço-imagem a partir da colinearidade ideal com o raio de luz proveniente do espaço-objeto. Ao atravessar o sistema de lentes de uma câmara, um raio luminoso sofre uma série de

desvios provocando um deslocamento indesejável nos pontos da imagem. Uma das causas das distorções das lentes tem origem nos erros inerentes a seu processo de fabricação. Imperfeições no polimento e montagem dos sistemas de lentes resultarão no imageamento geométrico imperfeito, o qual deverá ser adequadamente compensado (ANDRADE, 1998).

As distorções das lentes são geralmente divididas em dois tipos: radial e descentrada. Como o próprio nome sugere, a distorção radial afeta a posição do ponto imagem numa linha reta a partir do ponto principal da imagem no sentido radial. Esta é conhecida também como distorção simétrica, uma vez que ela é uma função somente das coordenadas polares de um ponto imagem, isto é, um ponto simétrico a outro ponto em relação ao ponto principal da imagem terá a mesma distorção radial. De acordo com Galo (1993), a distorção radial pode ser considerada como uma parcela da refração sofrida pelo raio de luz desde o ponto objeto até o ponto imagem. A distorção radial é causada pela impossibilidade de se construir, no processo de fabricação, uma superfície ideal para uma lente qualquer, que no caso é um parabolóide de revolução. A distorção descentrada, causada por imperfeições na montagem do sistema de lentes, é constituída pelas componentes radial e tangencial assimétrica.

2.6.3.1 Distorção radial

Como já foi definida anteriormente, a distorção radial simétrica pode ser encarada como sendo a componente radial indesejável da refração sofrida por um raio de luz ao atravessar uma lente ou um sistema de lentes (ANDRADE, 1998).

Assim, um raio de luz, ao atravessar um sistema de lentes com um ângulo de incidência α com o eixo ótico, refrata-se com um ângulo $\alpha + \partial\alpha$, provocando um deslocamento ∂r em um ponto imagem situado a uma distância radial r do ponto principal, conforme ilustra a Figura 9.

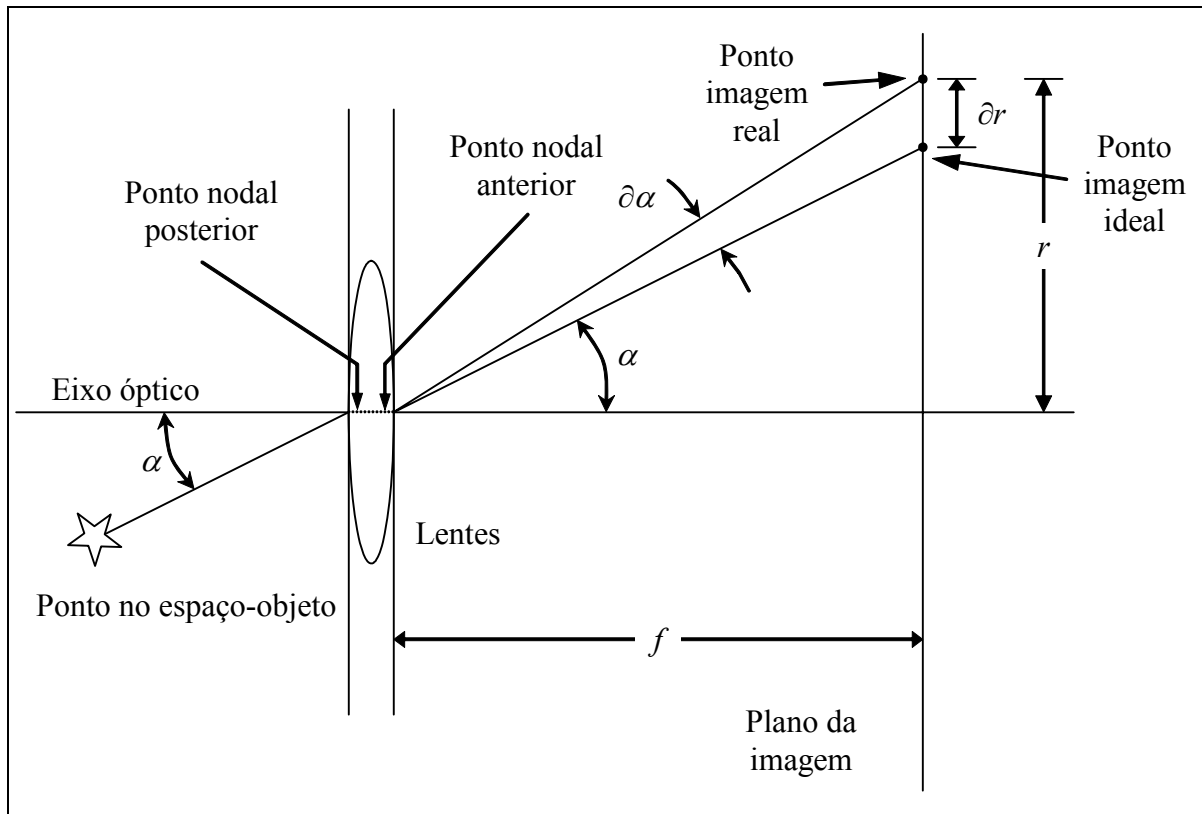


Figura 9: Representação do efeito da distorção radial.

Para eliminar esse efeito, o procedimento mais usual em Fotogrametria é aplicar correções às coordenadas dos pontos da imagem. Nesse caso, adota-se o valor da distância focal calibrada na aplicação das equações de colinearidade e coplanaridade. Para calcular as correções a serem aplicadas às coordenadas fotogramétricas, é utilizado o modelo de Conrady, baseado em algumas considerações e hipóteses descritas por um polinômio dado em função da distância radial r (ANDRADE, 1998). As coordenadas de um ponto p corrigidas do efeito da distorção radial podem ser obtidas pelas Equações

$$x_r = x - (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \cdot x \quad (13)$$

e

$$y_r = y - (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \cdot y, \quad (14)$$

onde:

- k_1 , k_2 e k_3 são os coeficientes de distorção radial da lente (ou sistema de lentes), dados no certificado de calibração da câmara;
- $r^2 = x^2 + y^2$ é o quadrado da distância radial, que é definida como sendo a distância entre o ponto principal da imagem e ponto p .

2.6.3.2 Distorção descentrada

A impossibilidade técnica de o fabricante alinhar perfeitamente os eixos óticos das lentes que compõem a objetiva de uma câmara é uma imperfeição inerente ao processo de fabricação de um sistema de lentes. Essas imperfeições provocam uma distorção (descentrada) indesejável nos pontos de uma imagem que, conforme foi dito, é constituída pelas componentes radial e tangencial assimétrica.

As coordenadas dos pontos de uma imagem afetadas pela distorção descentrada são corrigidas pelo modelo matemático de Conrady-Brown. Esse modelo é dado em função dos coeficientes de distorção descentrada da(s) lente(s) (P_1 e P_2), que constam do certificado de calibração da câmara, cujas Equações são dadas por (ANDRADE, 1998)

$$x_d = x_r - [P_1 \cdot (r^2 + 2 \cdot x^2) + 2 \cdot P_2 \cdot x \cdot y] \quad (15)$$

e

$$y_d = y_r - [2 \cdot P_1 \cdot x \cdot y + P_2 \cdot (r^2 + 2 \cdot y^2)]. \quad (16)$$

2.6.4 *Refração fotogramétrica*

Os raios de luz provenientes da superfície terrestre, ao atravessarem as diferentes camadas da atmosfera, sofrem contínuos deslocamentos devido aos diferentes índices de refração do meio. Esses deslocamentos também afetam as coordenadas dos pontos de uma imagem e devem ser corrigidos aplicando-se um modelo matemático adequado.

Com o avanço da Fotogrametria, vários modelos foram desenvolvidos com o objetivo de corrigir os efeitos da refração fotogramétrica nas coordenadas dos pontos observados em uma imagem aérea. No desenvolvimento desses modelos, geralmente se considera a atmosfera apresentando um comportamento padrão, com densidade uniforme e constante. Um modelo usual empregado em Fotogrametria para se corrigir as coordenadas fotogramétricas desse efeito é aquele desenvolvido por Saastamoinen e pode ser encontrado em Andrade (1998), sendo dado pelas Equações

$$x_f = x_d \cdot \left[1 - \left(1 + \frac{r^2}{f^2} \right) \cdot \xi_{45} \right] \quad (17)$$

e

$$y_f = y_d \cdot \left[1 - \left(1 + \frac{r^2}{f^2} \right) \cdot \xi_{45} \right], \quad (18)$$

onde:

- $\xi_{45} = \frac{1}{Z_s + Z_p} \cdot \left[\frac{A + B}{C} \right] \cdot D$;
- $A = (1 - 0,02257 \cdot Z_s)^{4,256} \cdot (Z_s - Z_p)$;
- $B = \frac{1}{0,11862792} \cdot \left[(1 - 0,02257 \cdot Z_s)^{5,256} - (1 - 0,02257 \cdot Z_p)^{5,256} \right]$;
- $C = (1 - 0,02257 \cdot Z_s)^{4,256} - (1 - 0,02257 \cdot Z_p)^{4,256}$;
- $D = \ln \left[\frac{1 + 0,0002769856 \cdot (1 - 0,02257 \cdot Z_p)^{4,256}}{1 + 0,0002769856 \cdot (1 - 0,02257 \cdot Z_s)^{4,256}} \right]$;
- Z_s e Z_p são, respectivamente, a altitude de vôo e a altitude do ponto, ambas dadas em km.

Mikhail *et al.* (2001) apresentam um modelo matemático para a correção dos efeitos provocados pela refração fotogramétrica que considera a atmosfera como uma série de camadas de densidade constante. As Equações para esse modelo são

$$x_f = \frac{r'}{r} \cdot x_d \quad (19)$$

e

$$y_f = \frac{r'}{r} \cdot y_d, \quad (20)$$

onde:

- $r = \sqrt{x_d^2 + y_d^2}$;
- $r' = f \cdot \operatorname{tg} \left[\frac{r}{f} \cdot (1 + K) \right]$;
- $K = \left[\frac{2410 \cdot H}{H^2 - 6 \cdot H + 250} - \frac{2410 \cdot h}{h^2 - 6 \cdot h + 250} \cdot \left(\frac{h}{H} \right) \right]$;
- H e h são, respectivamente, a altitude de vôo e altitude média do terreno, ambas dadas em km.

2.7 *Resseção espacial*

No instante de tomada de uma imagem aérea, a posição e a orientação do sensor (câmara fotogramétrica) geralmente não são conhecidas com grande precisão (assumindo um vôo fotogramétrico convencional). Portanto, esses valores devem ser posteriormente determinados ou refinados. A posição do sensor refere-se à posição da estação de exposição (posição espacial da câmara no instante de tomada da imagem) e a orientação refere-se aos ângulos de rotação entre os referenciais do espaço-objeto e do espaço-imagem, que foram apresentados na Seção 2.4.

Diversos métodos podem ser empregados para se determinar os (seis) elementos de orientação exterior de uma imagem aérea (WOLF e DEWITT, 2000). Em geral, todos esses métodos necessitam de um conjunto mínimo de pontos de apoio bem definidos e bem distribuídos na imagem. As coordenadas desses pontos devem ser conhecidas no referencial do espaço-imagem (observadas na imagem aérea) e no referencial do espaço-objeto, sendo estas últimas obtidas por meio de algum tipo de levantamento de campo. Além das coordenadas desses pontos, deve-se dispor dos parâmetros de orientação interior (calibrados) da câmara, bem como de valores aproximados para os parâmetros de orientação exterior a serem determinados. Um desses métodos é conhecido como resseção espacial e é utilizado para se determinar individualmente os parâmetros de orientação exterior de uma ou mais imagens.

Entre os métodos que podem ser empregados para a realização da resseção espacial, os numéricos são os mais precisos, pois permitem determinar os parâmetros de orientação exterior da imagem a partir de modelos matemáticos rigorosos, que relacionam as coordenadas de pontos de apoio conhecidos no terreno com as coordenadas dos pontos correspondentes medidas no espaço-imagem. As equações de colinearidade são geralmente empregadas na solução numérica da resseção espacial. Nesse caso, cada ponto de apoio medido na imagem gera duas equações, uma do tipo da Equação 6 e outra do tipo da Equação 7. Como existem seis parâmetros incógnitos, um conjunto mínimo de três pontos de apoio com coordenadas conhecidas em algum referencial do espaço-objeto é requerido para se obter uma solução para o problema. Geralmente, um conjunto de pontos maior que o mínimo necessário é utilizado, o que permite realizar um ajustamento de observações baseado no critério dos mínimos quadrados. Neste caso, a solução fornece os valores ajustados para os parâmetros de orientação exterior e suas respectivas precisões.

Para se obter uma solução para a resseção espacial baseada no critério dos mínimos quadrados, pode-se empregar o método paramétrico de ajustamento (GEMAEL, 1994), que relaciona explicitamente as observações aos parâmetros incógnitos através do modelo dado pela Equação

$$L_a = F(X_a), \quad (21)$$

onde:

- L_a é o vetor das observações ajustadas;
- X_a é o vetor dos parâmetros ajustados;
- F representa o modelo matemático que relaciona as observações aos parâmetros.

Como as equações de colinearidade não são lineares, as mesmas devem ser linearizadas empregando-se a série de Taylor, o que exige valores aproximados para os parâmetros de orientação exterior da imagem aérea, bem como a realização de iterações no ajustamento até a convergência da solução.

O ajustamento pode ser realizado considerando-se as coordenadas dos pontos de apoio isentas de erros (método paramétrico sem injunções) ou então levando em conta a precisão dessas coordenadas (método paramétrico com injunções de peso e/ou relativas). Os valores aproximados para os ângulos de orientação $(\omega, \varphi, \kappa)$ e para as coordenadas do centro perspectivo (X_0, Y_0, Z_0) podem ser tomados como sendo:

- $\omega = \varphi = 0$ e $X_0 = Y_0 = 0$, quando o sistema de coordenadas do espaço-objeto envolvido for um referencial cartesiano local (Seção 2.8.3);
- κ de acordo com a direção e sentido do vôo;
- Z_0 igual à altitude de vôo.

A rigor, deve-se utilizar um referencial cartesiano (a fim de evitar distorções sistemáticas) na realização de quaisquer operações fotogramétricas que envolvam coordenadas de pontos no espaço-objeto. Por conveniência, na realização da resseção espacial adota-se o referencial cartesiano local, pois é um sistema de referência paralelo ao horizonte local, o que permite obter facilmente os parâmetros aproximados de orientação exterior. Nesse caso, é comum adotar o conjunto de parâmetros descrito anteriormente.

Nessa linha, a solução empregada é bastante documentada na literatura fotogramétrica. No caso mais simples, no qual se consideram as coordenadas dos pontos de apoio isentas de erros, é obtida a solução através do conhecido método paramétrico de ajustamento, cujas Equações são dadas por

$$X_a = X_0 - (A^T P A)^{-1} (A^T P L) \quad (22)$$

e

$$\Sigma X_a = \hat{\sigma}_0^2 (A^T P A)^{-1}. \quad (23)$$

onde:

- X_a é o vetor dos parâmetros ajustados (coordenadas do CP e ângulos de rotação);
- ΣX_a é a matriz de covariância dos parâmetros ajustados;
- X_0 é o vetor dos parâmetros de orientação exterior aproximados;
- A é a matriz de ordem $2n \times 6$, cujos elementos representam as derivadas parciais das equações de colinearidade em relação aos parâmetros de orientação exterior ajustados, calculadas em função dos valores aproximados (vetor X_0), onde $n \geq 4$ é o número mínimo de pontos de apoio necessários para se obter a solução;
- P é a matriz de ordem $2n \times 2n$, cujos elementos representam os pesos das observações (coordenadas dos pontos de apoio observadas na imagem aérea) envolvidas no ajustamento;
- $L = L_0 - L_b$ é o vetor de ordem $2n \times 1$, que representa o vetor diferença entre o vetor de observações calculadas em função dos parâmetros aproximados (isto é, $L_0 = F(X_0)$) e o vetor $L_b^T = [x_1, y_1, \dots, x_n, y_n]$ contendo as coordenadas dos pontos de apoio observadas na imagem aérea;
- $\hat{\sigma}_0^2$ é a estimativa a posteriori de σ_0^2 , conhecida como variância de peso unitário a posteriori.

Se as observações forem admitidas como sendo independentes e de mesma qualidade (variância de todas as observações igual a σ^2) e também se adotando σ_0^2 (variância das observações de peso unitário) = σ^2 , tem-se $P = I$ (matriz identidade).

2.8 Referenciais do espaço-objeto

Nesta seção, serão apresentados os principais referenciais do espaço-objeto utilizados em Fotogrametria, bem como alguns modelos matemáticos que permitem realizar transformações de coordenadas entre eles.

2.8.1 Referencial geodésico

O referencial geodésico é definido por meio de um modelo geométrico que visa simplificar os cálculos e criar uma representação matemática simples do corpo terrestre. O modelo geométrico adotado é um elipsóide de revolução, o qual fica definido por dois parâmetros (geralmente o semi-eixo maior (a) e o semi-eixo menor (b) ou o achatamento (f)). O referencial geodésico utiliza a latitude geodésica, a longitude geodésica e a altitude geométrica, para definir a posição de um ponto sobre a superfície terrestre. A Figura 10 ilustra esse referencial.

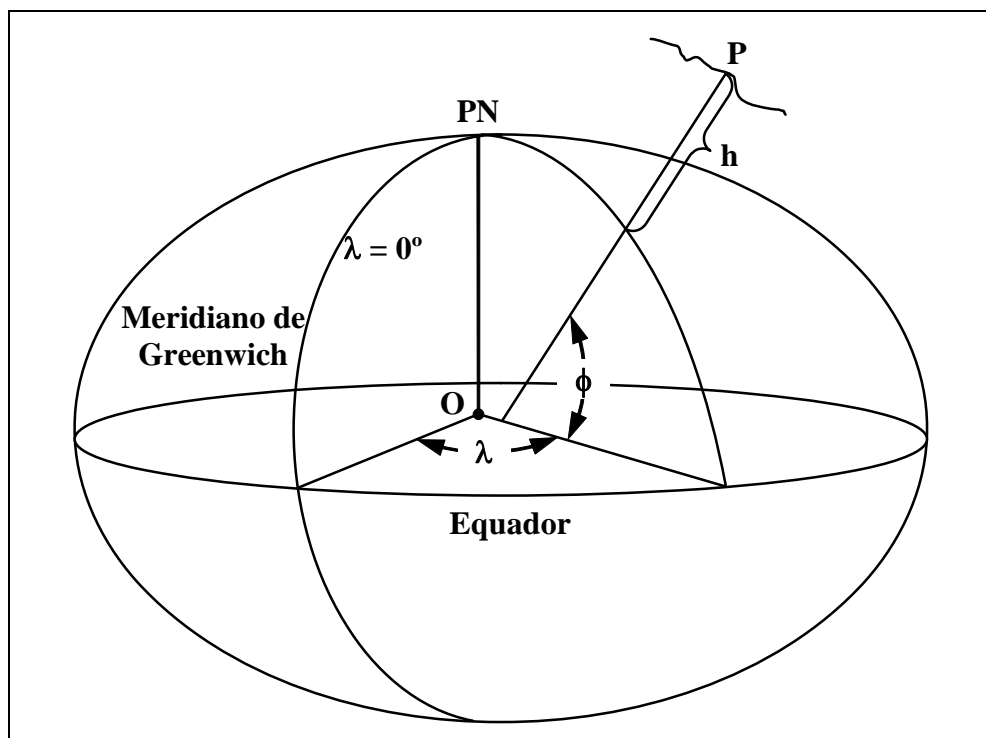


Figura 10: Referencial geodésico – Fonte: (LUGNANI, 1987).

A **latitude geodésica** (ϕ) é definida como sendo o ângulo que a reta normal ao elipsóide no referido ponto forma com sua projeção no plano equatorial. Varia positivamente no hemisfério norte (de 0° a 90°) e negativamente (de 0° a -90°) no hemisfério sul. A **longitude geodésica** (λ) é definida como sendo o ângulo diedro formado entre o plano do meridiano de origem (Meridiano de Greenwich) e o plano do meridiano que contém o referido ponto. Seu valor varia de 0° a 180° a leste e de 0° a -180° a oeste de Greenwich. A **altitude geométrica** (h) é definida como a distância contada sobre a normal ao elipsóide no referido ponto, desde a superfície do elipsóide até o ponto na superfície física da Terra.

2.8.2 Referencial geodésico cartesiano

O referencial geodésico cartesiano é um sistema de coordenadas tridimensionais cuja origem é o centro do elipsóide de revolução adotado como modelo. Esse referencial é ilustrado pela Figura 11 e definido como segue:

- **Origem O:** centro do elipsóide de revolução adotado como modelo;
- **Eixo OZ:** coincidente com o eixo de rotação do elipsóide, cujo sentido positivo aponta para o norte geodésico (PN);
- **Eixo OX:** coincidente com a intersecção do plano do Meridiano de Greenwich com o plano do Equador, cujo sentido positivo é o do Meridiano de Greenwich;
- **Eixo OY:** é definido de forma a tornar o sistema dextrogiro.

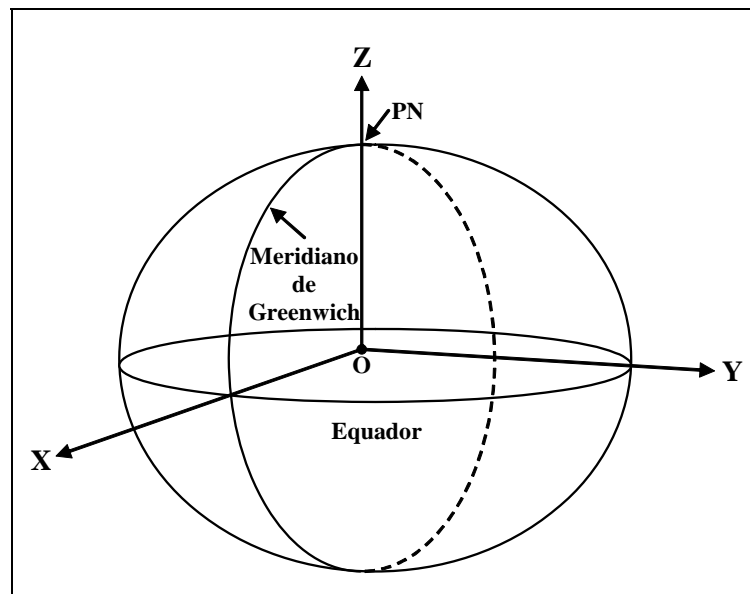


Figura 11: Referencial geodésico cartesiano – Fonte: (LUGNANI, 1987).

2.8.3 Referencial cartesiano local

O referencial cartesiano local, assim como o referencial geodésico cartesiano, é um sistema de coordenadas tridimensionais. A Figura 12 ilustra esse referencial, que é definido da seguinte forma (LUGNANI, 1987):

- **Origem O_L :** é estabelecida em um ponto sobre o elipsóide, geóide ou superfície física da Terra;
- **Eixo OZ_L :** é coincidente com a normal ao elipsóide na origem e com sentido positivo oposto ao centro do elipsóide geodésico;
- **Eixo OX_L :** é definido positivamente no mesmo sentido do norte geodésico;
- **Eixo OY_L :** é definido ortogonalmente ao eixo OX_L de maneira que torne o sistema dextrogiro.

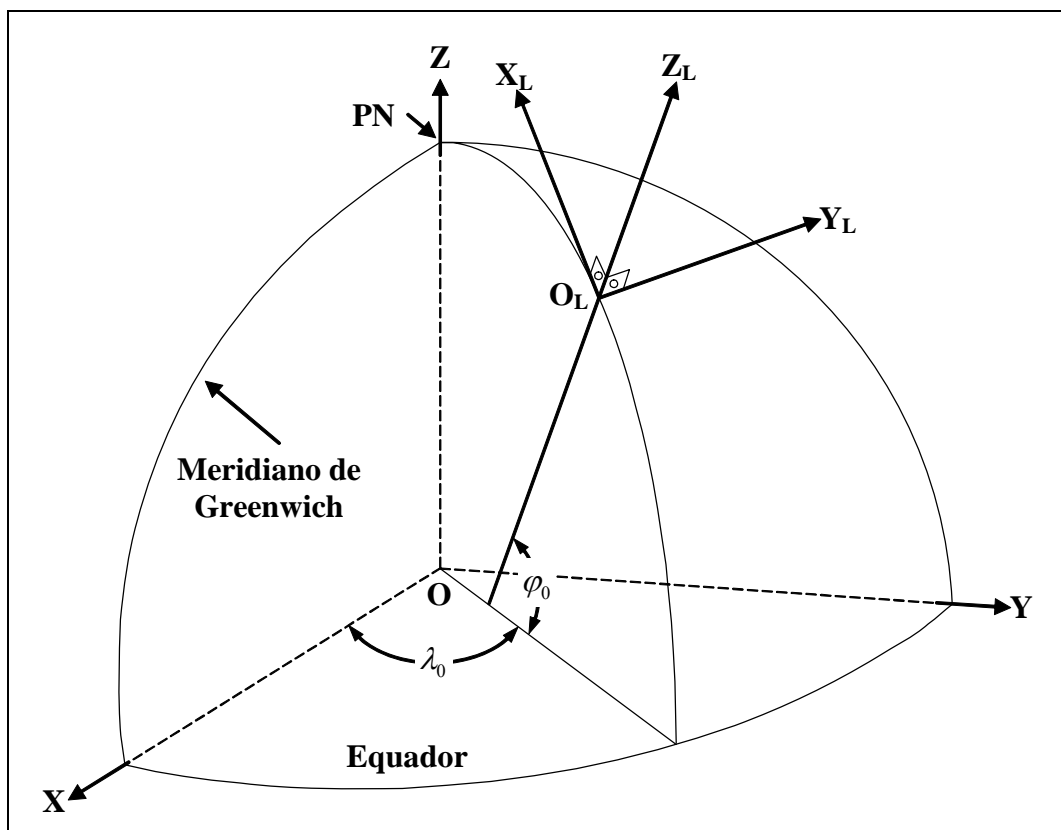


Figura 12: Referencial cartesiano local – Fonte: (LUGNANI, 1987).

2.8.4 Referencial híbrido

O referencial UTM é um sistema de coordenadas comumente utilizado em Cartografia e derivado da projeção TM (*Transversa de Mercator*). Em Fotogrametria, as coordenadas no referencial UTM com altitude geométrica (E, N, h) são utilizadas freqüentemente na definição de pontos de apoio fotogramétrico. Entretanto, essas coordenadas constituem um referencial híbrido, pois (E, N) são referidas ao plano UTM e h é referida ao elipsóide geodésico de referência, que é uma superfície curva. No caso de grandes áreas, os efeitos sistemáticos provocados por esta incompatibilidade não podem ser desprezados. Assim, o procedimento correto é transformar essas coordenadas para um referencial do espaço-objeto que seja cartesiano, como por exemplo, o referencial cartesiano local.

2.9 Transformação de coordenadas entre referenciais do espaço-objeto

Na Seção 2.8 foram tratados os principais referenciais do espaço-objeto utilizados em Fotogrametria. Na seqüência serão apresentados alguns modelos matemáticos utilizados para realizar transformações de coordenadas entre esses sistemas. A Figura 13 mostra a ordem que deve ser seguida ao se transformar coordenadas no referencial híbrido para coordenadas no referencial cartesiano local e vice-versa.

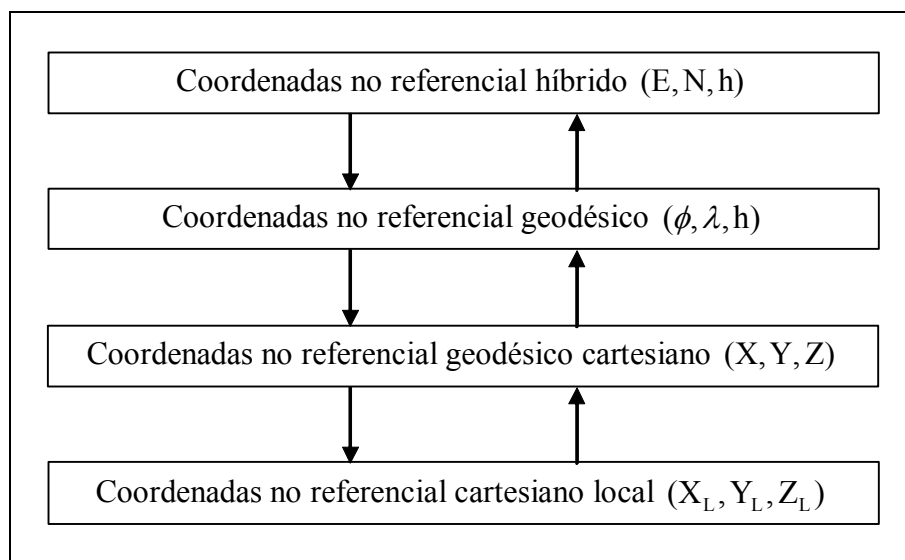


Figura 13: Transformações de coordenadas entre referenciais do espaço-objeto.

2.9.1 Transformações de coordenadas entre o referencial híbrido e o referencial geodésico

Para transformar coordenadas geodésicas (ϕ, λ, h) para o referencial híbrido (E, N, h) , primeiramente é necessário transformar as coordenadas geodésicas (ϕ, λ) em coordenadas no sistema de projeção TM (x, y) . Para tanto, podem ser empregados os modelos matemáticos definidos pelas Equações (YANG *et al.*, 2000)

$$x = S + \frac{NL^2t}{2} \left[1 + \frac{L^2}{12}u_2 + \frac{L^4}{360}u_4 + \frac{L^6}{40320}u_6 \right] \quad (24)$$

e

$$y = NL \left[1 + \frac{L^2}{6}v_2 + \frac{L^4}{120}v_4 + \frac{L^6}{5040}v_6 \right], \quad (25)$$

onde S é o comprimento do arco de meridiano de latitude ϕ , calculando através da Equação

$$S = a(1 - e^2) \left[A\phi - \frac{B}{2}\sin(2\phi) + \frac{C}{4}\sin(4\phi) - \frac{D}{6}\sin(6\phi) + \frac{E}{8}\sin(8\phi) \right], \quad (26)$$

cujos coeficientes são dados pelo conjunto de Equações

$$\left. \begin{aligned} A &= 1 + \frac{3}{4}e^2 + \frac{45}{64}e^4 + \frac{175}{256}e^6 + \frac{11025}{16384}e^8 \\ B &= \frac{3}{4}e^2 + \frac{15}{16}e^4 + \frac{525}{512}e^6 + \frac{2205}{2048}e^8 \\ C &= \frac{15}{64}e^4 + \frac{105}{256}e^6 + \frac{2205}{4096}e^8 \\ D &= \frac{35}{512}e^6 + \frac{315}{2048}e^8 \\ E &= \frac{315}{16384}e^8 \end{aligned} \right\}, \quad (27)$$

onde e^2 é o quadrado da primeira excentricidade do elipsóide geodésico de referência adotado, dado por

$$e^2 = 2 \cdot f - f^2, \quad (28)$$

sendo que f é o achatamento do elipsóide geodésico de referência adotado.

Os demais elementos constituintes das Equações 24 e 25 são definidos como segue:

- $L = \Delta\lambda \cos(\phi)$, onde $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$ (em radianos), sendo λ_0 a longitude do meridiano central do fuso UTM;
- $t = \tan(\phi)$;
- $\eta^2 = e'^2 \cos^2(\phi)$, onde e'^2 é o quadrado da segunda excentricidade do elipsóide geodésico de referência adotado, sendo dado por

$$e'^2 = \frac{e^2}{1 - e^2}; \quad (29)$$

- u_2, u_4, u_6, v_2, v_4 e v_6 são os coeficientes para obtenção de x e y , calculados em função de t e η , sendo dados pelas Equações

$$u_2 = 5 - t^2 + 9\eta^2 + 4\eta^4, \quad (30)$$

$$u_4 = 61 - 58t^2 + t^4 + 270\eta^2 - 330t^2\eta^2, \quad (31)$$

$$u_6 = 1385 - 3111t^2 + 543t^4 - t^6, \quad (32)$$

$$v_2 = 1 - t^2 + \eta^2, \quad (33)$$

$$v_4 = 5 - 18t^2 + t^4 + 14\eta^2 - 58t^2\eta^2, \quad (34)$$

e

$$v_6 = 61 - 479t^2 + 179t^4 - t^6. \quad (35)$$

Após transformar as coordenadas geodésicas em TM, transforma-se para o sistema UTM utilizando-se as Equações

$$E = 500000 + 0,9996 \cdot y \quad (36)$$

e

$$N = \begin{cases} 0,9996 \cdot x \\ 0,9996 \cdot x + 10000000 \end{cases}, \quad (37)$$

onde a primeira Equação de 37 é utilizada para pontos localizados no hemisfério norte e a segunda para pontos localizados no hemisfério sul.

Para transformar as coordenadas no sistema de projeção UTM para o sistema de projeção TM, devem ser utilizadas as inversas das equações dadas anteriormente, ou seja,

$$y = (E - 500000)/0,9996 \quad (38)$$

$$e \quad x = \begin{cases} N/0,9996 \\ (N - 10000000)/0,9996 \end{cases}, \quad (39)$$

onde a primeira Equação de 39 é utilizada para pontos localizados no hemisfério norte e a segunda para pontos localizados no hemisfério sul.

A transformação de coordenadas TM em geodésicas é realizada, segundo Yang *et al.* (2000), aplicando-se as Equações

$$\phi = B_f + t_f \frac{y^2}{2N_f^2} \left[u'_0 + \frac{y^2}{12N_f^2} u'_2 + \frac{y^4}{360N_f^4} u'_4 \right], \quad (40)$$

$$e \quad \lambda = \lambda_0 + \frac{y}{N_f \cos(B_f)} \left[1 + \frac{y^2}{6N_f^2} v'_2 + \frac{y^4}{120N_f^4} v'_4 \right]. \quad (41)$$

onde:

- $t_f = \tan(B_f)$;
- $\eta_f^2 = e'^2 \cos^2(B_f)$;
- B_f é a latitude inicial calculada em função da coordenada x e dos parâmetros do elipsóide geodésico de referência;
- u'_0, u'_2, u'_4, v'_2 e v'_4 são os coeficientes para obtenção de ϕ e λ calculados em função de t e η , sendo dados pelas Equações

$$u'_0 = -1 - \eta_f^2, \quad (42)$$

$$u'_2 = 5 + 3t_f^2 + 6\eta_f^2 - 6t_f^2\eta_f^2 - 3\eta_f^4 - 9t_f^2\eta_f^4, \quad (43)$$

$$u'_4 = -61 - 90t_f^2 - 45t_f^4 - 107\eta_f^2 + 162t_f^2\eta_f^2 + 45t_f^4\eta_f^2, \quad (44)$$

$$v'_2 = -1 - 2t_f^2 - \eta_f^2, \quad (45)$$

$$e \quad v'_4 = 5 + 28t_f^2 + 24t_f^4 + 6\eta_f^2 + 8t_f^2\eta_f^2. \quad (46)$$

Para o cálculo de B_f utiliza-se a fórmula inicial dada por

$$B_f^{(i=0)} = \frac{x}{A}. \quad (47)$$

A partir desse valor, calcula-se o valor do arco de meridiano ($S^{(i)}$) correspondente, dado pela Equação 26. Um valor melhorado pode ser calculado por

$$B_f^{(i+1)} = B_f^{(i)} + \frac{x - S^{(i)}}{A}. \quad (48)$$

Após esse procedimento calcula-se novamente o valor do arco de meridiano correspondente e um valor melhorado para B_f . O processo termina quando o valor absoluto do termo $(x - S^{(i)})$ for menor que uma tolerância pré-estabelecida.

2.9.2 Transformações de coordenadas entre o referencial geodésico e o referencial geodésico cartesiano

Para realizar a transformação de coordenadas no referencial geodésico para coordenadas no referencial geodésico cartesiano, utilizam-se as Equações

$$X = (N + h) \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(\lambda), \quad (49)$$

$$Y = (N + h) \cdot \cos(\phi) \cdot \text{sen}(\lambda), \quad (50)$$

e

$$Z = [N \cdot (1 - e^2) + h] \cdot \text{sen}(\phi), \quad (51)$$

onde:

- N é a grande normal do elipsóide passando pelo ponto de coordenadas geodésicas (ϕ, λ) e dada pela Equação

$$N = \frac{a}{(1 - e^2 \text{sen}^2 \phi)^{1/2}}; \quad (52)$$

- a é o comprimento do semi-eixo maior do elipsóide geodésico de referência adotado.

De acordo com IBGE (1989), para transformar coordenadas no referencial geodésico cartesiano para o referencial geodésico, é possível aplicar diretamente, sem a necessidade de se realizar iterações, as Equações

$$\phi = \arctg \left(\frac{Z + e^2 \cdot a \cdot [(1 - f)(1 - e^2)]^1 \cdot \text{sen}^3(u)}{\sqrt{X^2 + Y^2 - e^2 \cdot a \cdot \cos^3(u)}} \right), \quad (53)$$

$$\lambda = \text{arc tg}\left(\frac{Y}{X}\right), \quad (54)$$

e

$$h = \frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{\cos \phi} - N, \quad (55)$$

nas quais

$$\text{sen}(u) = \frac{\text{tg}(u)}{\sqrt{1 + \text{tg}^2(u)}}, \quad (56)$$

$$\text{cos}(u) = \frac{1}{\sqrt{1 + \text{tg}^2(u)}}, \quad (57)$$

e

$$\text{tg}(u) = \frac{Z}{\sqrt{(X^2 + Y^2)}} \frac{1}{1 - f}. \quad (58)$$

2.9.3 Transformações de coordenadas entre o referencial geodésico cartesiano e o referencial cartesiano local

Na transformação de coordenadas no referencial geodésico cartesiano para o referencial cartesiano local, utiliza-se um modelo baseado em rotações e translações, dado por (WOLF e DEWITT, 2000)

$$\begin{bmatrix} X_L \\ Y_L \\ Z_L \end{bmatrix} = R_1(90^\circ - \phi_0) \cdot R_3(90^\circ + \lambda_0) \cdot \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix}, \quad (59)$$

onde:

- (X, Y, Z) são as coordenadas de um ponto P no referencial geodésico cartesiano;
- (X_L, Y_L, Z_L) são as coordenadas do ponto correspondente ao ponto P no referencial cartesiano local;
- (ϕ_0, λ_0) são as coordenadas geodésicas da origem do referencial cartesiano local;

- (X_0, Y_0, Z_0) são as coordenadas geodésicas cartesianas da origem do referencial cartesiano local, calculadas em função das coordenadas geodésicas (ϕ_0, λ_0, h_0) ;
- R_1 e R_3 são matrizes de rotação (já definidas anteriormente) dadas pelas Equações

$$R_1(90^\circ - \phi_0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(90^\circ - \phi_0) & \sin(90^\circ - \phi_0) \\ 0 & -\sin(90^\circ - \phi_0) & \cos(90^\circ - \phi_0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin(\phi_0) & \cos(\phi_0) \\ 0 & -\cos(\phi_0) & \sin(\phi_0) \end{bmatrix} \quad (60)$$

e

$$R_3(90^\circ + \lambda_0) = \begin{bmatrix} \cos(90^\circ + \lambda_0) & \sin(90^\circ + \lambda_0) & 0 \\ -\sin(90^\circ + \lambda_0) & \cos(90^\circ + \lambda_0) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(\lambda_0) & \cos(\lambda_0) & 0 \\ -\cos(\lambda_0) & -\sin(\lambda_0) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (61)$$

Para realizar a transformação de coordenadas inversa, ou seja, do referencial cartesiano local para o referencial geodésico cartesiano, aplica-se a Equação (WOLF e DEWITT, 2000)

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + R_3^T(90^\circ + \lambda_0) \cdot R_1^T(90^\circ - \phi_0) \cdot \begin{bmatrix} X_L \\ Y_L \\ Z_L \end{bmatrix}. \quad (62)$$

2.10 Sistemas de coordenadas astronômicas

2.10.1 A esfera celeste

Praticamente todos os corpos celestes estão situados a enormes distâncias da Terra, a partir da qual são feitas as observações astronômicas. Por esse motivo, a impressão causada a um observador situado na superfície terrestre é a de que esses corpos estão localizados sobre uma esfera de raio infinito, conhecida como esfera celeste. Nessa esfera, um par de coordenadas escolhido de forma adequada é suficiente para definir uma posição (MUELLER, 1977).

O eixo de rotação da Terra intercepta a esfera celeste nos pólos celestes norte e sul. O plano perpendicular ao eixo de rotação e contendo o centro da esfera celeste é denominado Equador celeste. Um grande círculo perpendicular ao Equador celeste e contendo

os pólos celestes é chamado de círculo horário. Um pequeno círculo paralelo ao Equador celeste é chamado de paralelo celeste (de declinação). Os pólos celestes, o Equador, os paralelos e os círculos horários podem ser considerados fixos à esfera celeste (MUELLER, 1977).

A vertical do observador intercepta a esfera celeste em dois pontos. O ponto acima do observador é o zênite e o ponto abaixo é o nadir. O plano perpendicular à vertical do observador (contendo o observador e o centro da Terra) é o horizonte celeste. O plano contendo o zênite e perpendicular ao horizonte é chamado de plano vertical. Um pequeno círculo paralelo ao horizonte celeste é denominado de almicantarado (MUELLER, 1977).

O plano vertical contendo os pólos é o meridiano celeste. Ele contém o círculo horário através do zênite. Os pontos sobre a esfera celeste onde os meridianos celestes interceptam o horizonte celeste são denominados de norte e sul. O plano vertical perpendicular ao meridiano celeste é designado de primeiro vertical. Seus pontos de intersecção na esfera celeste com o horizonte celeste são denominados de leste e oeste. Eles estão situados sobre a linha de intersecção entre o Equador e o horizonte celeste. O zênite, nadir, planos verticais, almicantarados, o horizonte e os meridianos celestes, o primeiro vertical e suas quantidades associadas são considerados fixos em relação ao observador situado na superfície terrestre. Desta maneira, devido à rotação da Terra, elas mudam continuamente de posição na esfera celeste (MUELLER, 1977).

O movimento de rotação da Terra de oeste para leste faz um observador ver a esfera celeste (com seus astros, Equador celeste, paralelos e círculos horários) como se ela estivesse girando de leste para oeste. Ele também observa como os astros mudam continuamente suas posições em relação às quantidades relativas fixas à Terra (zênite, meridiano celeste, horizonte, primeiro vertical etc.). As quantidades previamente descritas são todas relacionadas ao observador (vertical, horizonte, planos verticais etc.) ou à rotação da Terra (eixo de rotação, Equador, círculo horário etc.). Há também algumas outras características importantes a respeito da esfera celeste, que são relacionadas ao movimento de rotação da Terra em torno do Sol, ou em um conceito inverso, ao movimento anual aparente do Sol em torno da Terra. A mais importante destas é a eclíptica, que é definida em termos do plano contendo o centro do Sol, o baricentro do sistema Terra-Lua e o vetor velocidade heliocêntrica inercial do baricentro do sistema Terra-Lua (sem levar em consideração as perturbações causadas por Vênus e Júpiter). A linha perpendicular à eclíptica e contendo o

centro da Terra intercepta a esfera celeste nos pólos da eclíptica (é comum distingui-los dos pólos norte e sul). Um plano paralelo à eclíptica intercepta a esfera celeste no paralelo (de latitude) da eclíptica, enquanto um plano perpendicular à eclíptica e contendo seus pólos intercepta a esfera celeste em um meridiano (de longitude) da eclíptica (MUELLER, 1977).

A eclíptica intercepta o Equador celeste numa linha contendo os equinócios. O equinócio vernal é o ponto onde o Sol aparente cruza o Equador celeste do sul em direção ao norte (início da primavera no hemisfério norte e do outono no hemisfério sul). O Sol aparente cruza o Equador celeste do norte em direção ao sul no equinócio de outono (início do outono no hemisfério norte e da primavera no hemisfério sul). O ângulo agudo entre o Equador celeste e a eclíptica é denominado obliquidade da eclíptica. Os dois pontos sobre a eclíptica situados cada um a 90° dos equinócios da primavera e de outono são chamados de solstícios e são os pontos onde o Sol alcança sua máxima distância angular do Equador celeste. O solstício posicionado no hemisfério norte da esfera celeste é chamado de solstício de verão e o situado no hemisfério sul de solstício de inverno. O círculo horário passando através dos equinócios e dos pólos da eclíptica é denominado de coluro equinocial e o círculo horário perpendicular a este (passando pelos solstícios e pelos pólos) é o coluro solsticial (MUELLER, 1977).

2.10.2 Sistema de coordenadas horizontais

Para caracterizar a posição de um astro qualquer na esfera celeste com relação a um observador, define-se o sistema de coordenadas astronômico horizontal, que é ilustrado pela Figura 14. Os planos fundamentais de referência deste sistema são o horizonte celeste e o meridiano celeste do observador. As coordenadas que definem a posição de um astro nesse sistema são o azimute e a altura, conforme ilustra a Figura 14 (MUELLER, 1977).

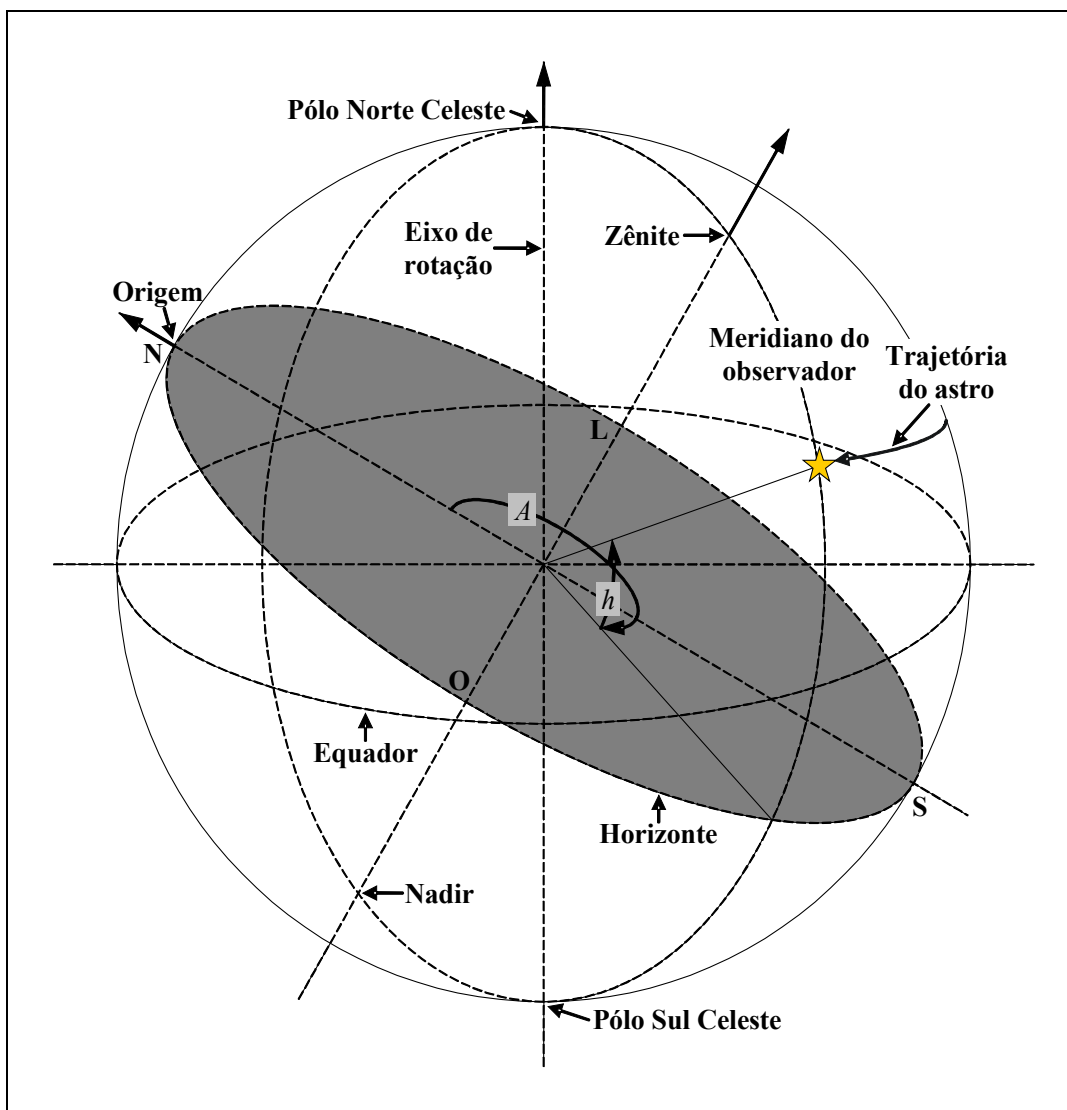


Figura 14: Sistema de coordenadas horizontais.

O **azimute (A)** é o ângulo entre o plano vertical do astro e o meridiano celeste do observador, contado no plano do horizonte celeste a partir da direção norte para leste e varia no intervalo $0^\circ \leq A \leq 360^\circ$. Alternativamente, o azimute também pode ser contado a partir da direção sul para oeste.

A **altura (h)** é o ângulo entre a direção do astro e o horizonte celeste, medido no plano do círculo vertical do astro. Por convenção, é considerada positiva acima (astro visível) e negativa abaixo do horizonte celeste (astro invisível). O zênite tem, por definição, uma altura de 90° e o nadir de -90° . Isso significa que a altura de um astro pode variar no intervalo $-90^\circ \leq h \leq 90^\circ$. O complemento da altura de um astro é denominado de **distância zenital (z)**, sendo definida como o ângulo contado a partir do zênite do observador até o astro. Assim, vale a relação dada na Equação

$$z = 90^\circ - h. \quad (63)$$

2.10.3 Sistema de coordenadas equatoriais

O sistema de coordenadas equatoriais é ilustrado pela Figura 15. A origem desse sistema é o equinócio vernal (representado pelo símbolo γ) e os planos principais de referência são o Equador celeste e o coluro equinocial. A posição de um astro qualquer no sistema equatorial é dada pelas coordenadas ascensão reta e declinação (MUELLER, 1977)

A **ascensão reta** (α) é o ângulo entre o círculo horário do astro e o coluro equinocial, contado a partir do equinócio vernal a leste sobre o plano do Equador celeste. Por convenção, a ascensão reta é medida em horas, minutos e segundos de arco e varia no intervalo $0^h \leq \alpha \leq 24^h$.

A **declinação** (δ) é o ângulo entre a direção do astro e o Equador celeste, contado sobre o plano do círculo horário do astro. Convencionalmente, a declinação é considerada positiva para os astros do hemisfério norte na esfera celeste e negativa para os do sul e seu intervalo de variação é $-90^\circ \leq \delta \leq 90^\circ$. O complemento da declinação é denominado de distância polar (p), sendo contada a partir do pólo norte celeste até o astro, podendo variar entre 0° e 180° . Assim, vale a relação dada pela Equação

$$\delta + p = 90^\circ. \quad (64)$$

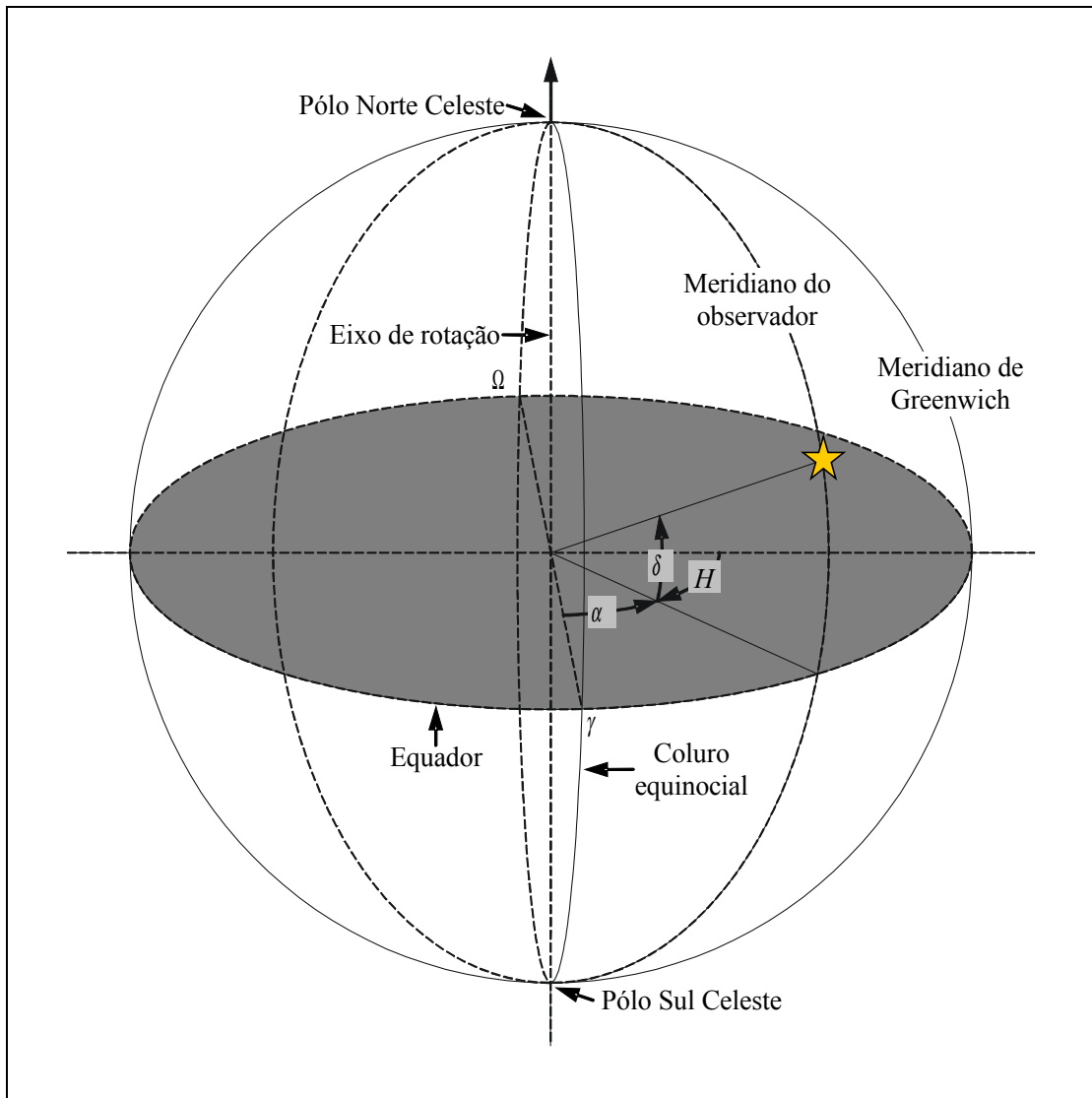


Figura 15: Sistema astronômico equatorial e sistema astronômico horário.

2.10.4 Sistema de coordenadas horárias

O sistema de coordenadas horárias, também ilustrado na Figura 15, apresenta algumas semelhanças com o sistema equatorial. Um de seus planos fundamentais de referência também é o Equador celeste. O outro é o círculo horário contendo o zênite, ou seja, é o meridiano celeste do observador. A posição de um astro qualquer nesse sistema é dada pelas coordenadas declinação e ângulo horário. A declinação é definida exatamente da mesma forma que para o sistema equatorial.

O **ângulo horário (H)** é o ângulo entre o círculo horário do astro e o meridiano celeste do observador, contado a oeste (na direção do movimento diurno aparente dos astros) sobre o plano do Equador celeste a partir do semi-meridiano que contém o zênite do observador. O ângulo horário de um astro, assim como a ascensão reta, é contado sobre o

plano do Equador celeste e medido em horas, minutos e segundos de arco, variando ao longo do dia entre 0^h e 24^h . A relação dessas duas coordenadas é dada por (MUELLER, 1977)

$$S = \alpha + H, \quad (65)$$

onde S é o tempo sideral local, definido como sendo o ângulo horário do equinócio vernal.

2.11 Transformações de coordenadas entre sistemas astronômicos

Nesta seção serão apresentadas algumas transformações de coordenadas entre os sistemas astronômicos tratados na Seção 2.10.

2.11.1 Triângulo de posição

O triângulo de posição é o triângulo esférico formado na esfera celeste pela intersecção do plano do meridiano celeste, do círculo vertical e do meridiano do astro. Seus vértices são, conforme ilustra a Figura 16, o pólo celeste P, o zênite Z e o astro E.

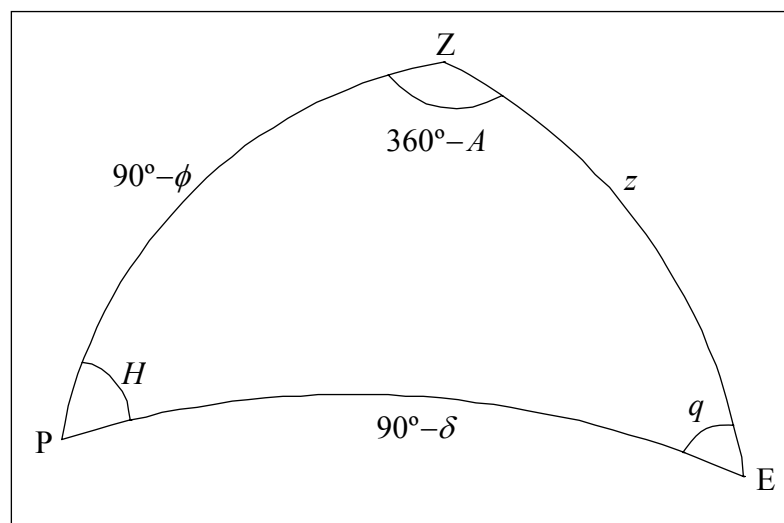


Figura 16: Triângulo de posição.

O lado ZP do triângulo de posição é igual à $90^\circ - \phi$, onde ϕ é a latitude do observador; o lado ZE é igual à distância zenital do astro $z = 90^\circ - h$, onde h é a altura do astro; o lado PE é igual à distância polar do astro $p = 90^\circ - \delta$, onde δ é a declinação do astro; o ângulo $PZE = 360^\circ - A$, onde A é o azimute do astro; o ângulo $ZPE = H$ é o ângulo horário do astro; o ângulo $PEZ = q$ denomina-se ângulo paralático.

2.11.2 Transformação do sistema equatorial para o sistema horário

Para obter a ascensão reta e a declinação de um astro para um instante qualquer de observação, primeiramente é necessário calcular a variação horária da ascensão reta ($\Delta\alpha$) e da declinação ($\Delta\delta$), a partir das Equações (GEMAEL, 1974)

$$\Delta\alpha = \frac{\alpha_{i+1} - \alpha_i}{24^h} \quad (66)$$

e

$$\Delta\delta = \frac{\delta_{i+1} - \delta_i}{24^h}, \quad (67)$$

onde:

- α_i e α_{i+1} são as ascensões retas (tabeladas nas efemérides astronômicas), respectivamente, para o dia da observação e para o dia seguinte;
- δ_i e δ_{i+1} são as declinações (tabeladas nas efemérides astronômicas), respectivamente, para o dia da observação e para o dia seguinte.

Depois de calcular as variações horárias para a ascensão reta e para a declinação, é possível calcular os valores atualizados dessas coordenadas para o instante de observação. Para tanto, empregam-se as Equações (GEMAEL, 1974)

$$\alpha = \alpha_0 + (H_l + F)\Delta\alpha = \alpha_0 + (M - \lambda)\Delta\alpha \quad (68)$$

e

$$\delta = \delta_0 + (H_l + F)\Delta\delta = \delta_0 + (M - \lambda)\Delta\delta, \quad (69)$$

onde:

- α e δ são os valores da ascensão reta e da declinação para o instante de observação;
- α_0 e δ_0 são os valores da ascensão reta e da declinação tabelados nas efemérides astronômicas para as 0h do tempo universal (do dia da observação);
- H_l é a hora legal do observador;
- F é o fuso do observador;
- M é a hora média do observador;
- λ é a longitude do observador.

Conforme pode ser visto nas Equações 68 e 69, para calcular os valores atualizados de α e δ para o instante de observação, deve-se conhecer a hora legal de observação e o fuso onde se encontra o observador ou, opcionalmente, a hora média e a longitude do local de observação. A **hora média** é definida como sendo a fração 1/24 do **dia solar médio**. Este, por sua vez, é definido como o intervalo de tempo decorrido entre duas passagens consecutivas do **Sol médio**¹ pelo semi-meridiano inferior do observador. A hora média não é conveniente para ser adotada na vida prática, uma vez que somente relógios situados no mesmo meridiano acusariam a mesma hora. Por exemplo, se uma pessoa se deslocasse em longitude, seu relógio estaria a todo instante atrasado ou adiantado, conforme o deslocamento fosse para leste ou para oeste. Para sanar esse problema, foi idealizado um sistema de fusos horários, no qual a superfície da Terra foi dividida em 24 fusos com amplitude de 15° (ou 1h) cada. Esses fusos horários foram numerados de 0 a +12h para aqueles localizados a oeste do Meridiano de Greenwich e de 0 a -12 para os fusos a leste desse meridiano. Assim, surgiu o conceito de hora legal, que é a hora média do meridiano central do fuso a que pertence o lugar de observação. Neste sistema, é adotada a hora média do meridiano central em todos os lugares compreendidos dentro de um fuso horário. Para transformar a hora legal em média e vice-versa, utiliza-se a Equação (GEMAEL, 1974)

$$H_l + F = M - \lambda . \quad (70)$$

Apenas para efeito de esclarecimento, o fuso zero (origem) é limitado pelas longitudes 07°30'W e 07°30'L e contem o meridiano astronômico médio do Observatório de Greenwich, que é o meridiano de origem para a contagem das horas. Desta forma, a hora média de Greenwich coincide com sua hora legal e é chamada de Tempo Universal (TU) ou GMT (do inglês *Greenwich Mean Time*).

Conforme foi visto na Seção 2.10.4, a coordenada α do sistema astronômico equatorial se relaciona diretamente com a coordenada H do sistema astronômico horário através da Equação 65. Essa equação pode ser aplicada para se calcular o ângulo horário de qualquer astro em um instante qualquer de tempo sideral. Para tanto, é necessário transformar a hora legal do instante de observação em hora sideral, a partir da Equação

¹ Sol médio é um Sol fictício que percorre o Equador celeste, tendo como origem o equinócio vernal, no mesmo intervalo de tempo em que o Sol verdadeiro percorre a eclíptica.

$$S = S_0 + M + (H_l + F) \cdot 0,0027378508, \quad (71)$$

onde S_0 é o tempo sideral (ângulo horário do equinócio vernal) para as 0h do TU (fornecido pelas efemérides astronômicas) e M é a hora média do instante de observação, que pode ser calculada através da Equação 70.

2.11.3 Transformação do sistema horário para o sistema horizontal

Para obter as coordenadas horizontais de um astro a partir das coordenadas horárias (para o instante de observação), empregam-se as fórmulas fundamentais da trigonometria esférica sobre o triângulo de posição (Seção 2.11.1). Iniciando pelo lado $ZE = z$ e pelo ângulo $360^\circ - A$, tem-se

$$\begin{aligned} \cos(z) &= \cos(90^\circ - \phi) \cos(90^\circ - \delta) + \sin(90^\circ - \phi) \sin(90^\circ - \delta) \cos(H) \\ \sin(z) \sin(360^\circ - A) &= \sin(90^\circ - \delta) \sin(H) \\ \sin(z) \cos(360^\circ - A) &= \sin(90^\circ - \phi) \cos(90^\circ - \delta) - \cos(90^\circ - \phi) \sin(90^\circ - \delta) \cos(H) \end{aligned}, \quad (72)$$

ou, de forma simplificada,

$$\begin{aligned} \cos(z) &= \sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) \cos(H) \\ \sin(z) \sin(A) &= -\cos(\delta) \sin(H) \\ \sin(z) \cos(A) &= \cos(\phi) \sin(\delta) - \sin(\phi) \cos(\delta) \cos(H) \end{aligned}. \quad (73)$$

O conjunto de Equações 73 permite calcular a **distância zenital** (z) e o **azimute** (A) de um astro (para qualquer instante de tempo sideral S e para qualquer latitude ϕ), conhecendo-se sua declinação δ e seu ângulo horário H . A distância zenital é obtida a partir da primeira equação do conjunto, ou seja,

$$z = \arccos[\sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) \cos(H)], \quad (74)$$

sendo a altura (h) do astro obtida a partir da Equação 63.

O azimute se obtém dividindo-se a segunda pela terceira equação do conjunto (e tomando-se o arco-tangente), o que resulta em

$$A = \arctg \left[\frac{-\cos(\delta) \sin(H)}{\cos(\phi) \sin(\delta) - \sin(\phi) \cos(\delta) \cos(H)} \right]. \quad (75)$$

Na aplicação da Equação 75 é necessário considerar os sinais do numerador e do denominador, a fim de selecionar o quadrante correto do azimute.

3 METODOLOGIA PARA A PREDIÇÃO DE REGIÕES AFETADAS POR SOMBRAS DE EDIFÍCIOS SOBRE VIAS URBANAS

3.1 Introdução

Neste capítulo é apresentada a metodologia desenvolvida para a predição de regiões de sombras de edifícios sobre vias urbanas em imagens aéreas de alta-resolução. Este é um problema geométrico de determinação de obstruções causadas pela projeção de sombras de edifícios sobre vias urbanas, como aquelas exemplificadas pela Figura 17. Os recortes de imagem mostrados na Figura 17 foram obtidos a partir de imagens aéreas tomadas sobre o município de Presidente Prudente – SP, em um voo realizado pela empresa *MULTISPECTRAL*, onde foi utilizada uma câmara digital KODAK 14N. Essas imagens foram obtidas na página da UPTF (*Unesp Photogrammetric Toolkit*) na Internet.



Figura 17: Exemplos de sombras provocadas por edifícios obstruindo vias urbanas.

3.2 *Principais etapas da metodologia para a predição de sombras de edifícios sobre vias urbanas*

A metodologia proposta neste trabalho para a predição de regiões de sombras de edifícios sobre vias urbanas presentes em imagens aéreas de alta-resolução (elementos de resolução menores que 0,7m no terreno, conforme Baumgartner *et al.* (1999)) não faz uso de métodos convencionais de análise de imagem. O método proposto é baseado em uma modelagem geométrica das sombras no referencial cartesiano local e divide-se em três etapas principais:

- **Extração dos contornos de telhados e limites das vias urbanas:** Esta etapa consiste na identificação visual e na extração manual de contornos de telhados de edifícios em uma imagem altimétrica obtida a partir de um MDE, e dos limites de vias urbanas adjacentes, a partir da imagem de intensidade de retorno do pulso laser correspondente ao MDE;
- **Predição das sombras dos edifícios em um referencial cartesiano local:** Nesta etapa são obtidos polígonos representando as partes visíveis das sombras projetadas pelos edifícios sobre as vias urbanas na imagem aérea. Inicialmente, os contornos de telhados são projetados diretamente no plano médio horizontal local da via adjacente ao edifício (PMHLV), através de retas de projeção paralela, modeladas em função dos ângulos de orientação dos raios solares (azimute e altura do Sol). Em seguida, considerando-se os edifícios como sólidos regulares, as intersecções destes com o PMHLV definem polígonos representando as bases dos edifícios. Uma combinação apropriada entre os vértices de cada par de polígonos obtidos conforme descrito acima para cada edifício permite obter os polígonos de sombra sobre o PMHLV. No final desta etapa, são determinadas as regiões das sombras que se projetam sobre as vias e, finalmente, as partes das sombras visíveis na imagem aérea, através da eliminação de eventuais obstruções perspectivas ocultando partes das sombras preditas;
- **Registro das sombras preditas na imagem aérea:** Esta etapa consiste em registrar na imagem aérea correspondente os polígonos de sombra obtidos na etapa anterior, implicando na necessidade de se dispor dos parâmetros de orientação interior e exterior da imagem aérea.

3.3 *Extração dos contornos de telhados e limites de vias*

3.3.1 *Transformação do MDE em uma imagem altimétrica*

Para determinar visualmente e medir manualmente os contornos de telhados de edifícios e limites de vias urbanas, primeiramente é necessário transformar o MDE da área correspondente em uma imagem altimétrica em níveis de cinza. Esse procedimento envolve duas transformações geométricas, que compreendem a aplicação de um fator de escala nas componentes planimétricas e outro na componente altimétrica do MDE, produzindo como resultado uma imagem digital, na qual os valores de brilho são proporcionais às altitudes dos pontos do MDE.

Para transformar o MDE em uma imagem altimétrica, é necessário definir inicialmente a resolução espacial da imagem no terreno (GSD). Em seguida, calcula-se a variação espacial (dE,dN) das componentes planimétricas (E,N) do MDE, através das Equações

$$dE = E_{\max} - E_{\min} \quad (76)$$

e

$$dN = N_{\max} - N_{\min} \quad (77)$$

onde:

- E_{\min} e E_{\max} são, respectivamente, os valores mínimo e máximo da componente E do MDE;
- N_{\min} e N_{\max} são, respectivamente, os valores mínimo e máximo da componente N do MDE.

Esse procedimento corresponde a estabelecer os limites da imagem a ser gerada e é ilustrado pela Figura 18.

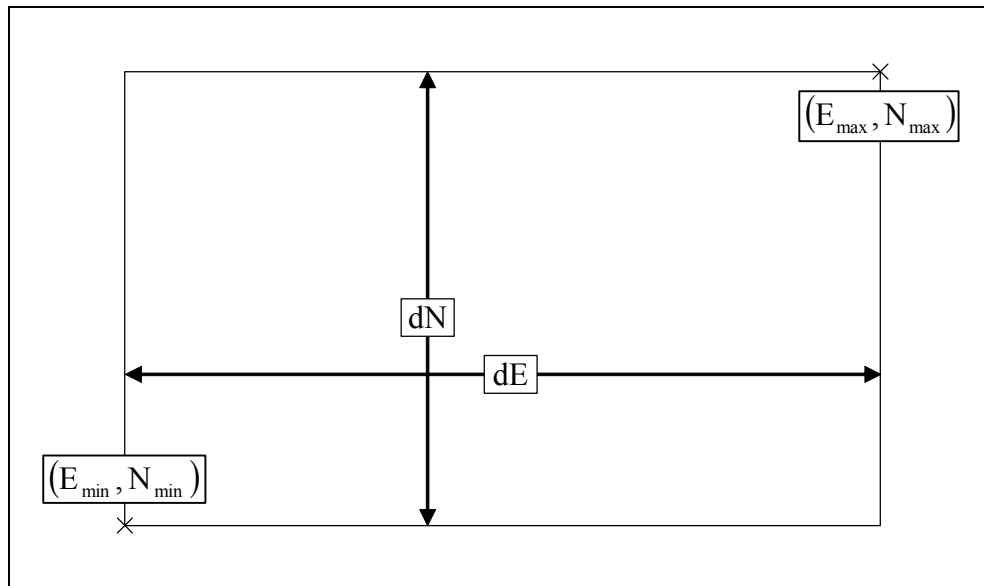


Figura 18: Limites da imagem altimétrica a ser gerada.

Após estabelecer os limites da imagem, calculam-se suas dimensões (altura e largura), ou seja, o número de linhas (h) e colunas (w), respectivamente através das Equações

$$h = dN / GSD \quad (78)$$

e

$$w = dE / GSD . \quad (79)$$

O próximo passo é o estabelecimento de uma relação matemática entre a posição (C,L) de um elemento da imagem altimétrica e sua respectiva posição planimétrica no MDE, representada pelas coordenadas (E,N) . Esse procedimento é realizado refletindo-se o eixo N e transladando o MDE de tal forma que o canto superior esquerdo do retângulo que o delimita corresponda ao *pixel* de coordenadas $(0,0)$ na imagem. Além disso, deve-se aplicar o fator de escala estabelecido pela resolução espacial da imagem. Para calcular as coordenadas (C,L) de um ponto na imagem altimétrica correspondente ao ponto de coordenadas planimétricas (E,N) no MDE, empregam-se as Equações

$$C = (E - E_{\min}) / GSD \quad (80)$$

e

$$L = (N_{\max} - N) / GSD , \quad (81)$$

onde:

- (C,L) são as coordenadas de um elemento da imagem;
- (E,N) são as coordenadas planimétricas de um ponto no MDE;

- (E_{\min}, N_{\max}) são as coordenadas do canto superior esquerdo do retângulo envolvendo o MDE.

Tendo em vista a geração de uma imagem em 256 níveis de cinza, onde os possíveis valores de brilho que os elementos da imagem podem assumir estão no intervalo $[0;255]$, as componentes altimétricas dos pontos do MDE são escaladas de tal forma que a altitude mínima corresponda ao valor de brilho zero e a altitude máxima corresponda ao valor de brilho 255. Essa operação consiste em determinar o valor de brilho ND que será atribuído na posição (C,L) da imagem calculada anteriormente, através da Equação

$$ND = \frac{255}{h_{\max} - h_{\min}} \cdot (h - h_{\min}), \quad (82)$$

onde:

- h_{\max} é o valor da cota do ponto de maior altitude no MDE;
- h_{\min} é o valor da cota do ponto de menor altitude no MDE;
- h é a altitude geométrica do ponto de coordenadas (E,N) no MDE corresponde ao elemento de coordenadas (C,L) na imagem.

Uma vantagem do procedimento descrito anteriormente, conforme ilustra a Figura 19, é que as transformações geométricas dadas pelas Equações 80, 81 e 82 são inversíveis, o que permite calcular as coordenadas (E,N,h) de um ponto no MDE a partir de um *pixel* com coordenadas (C,L,ND) observado na imagem gerada.

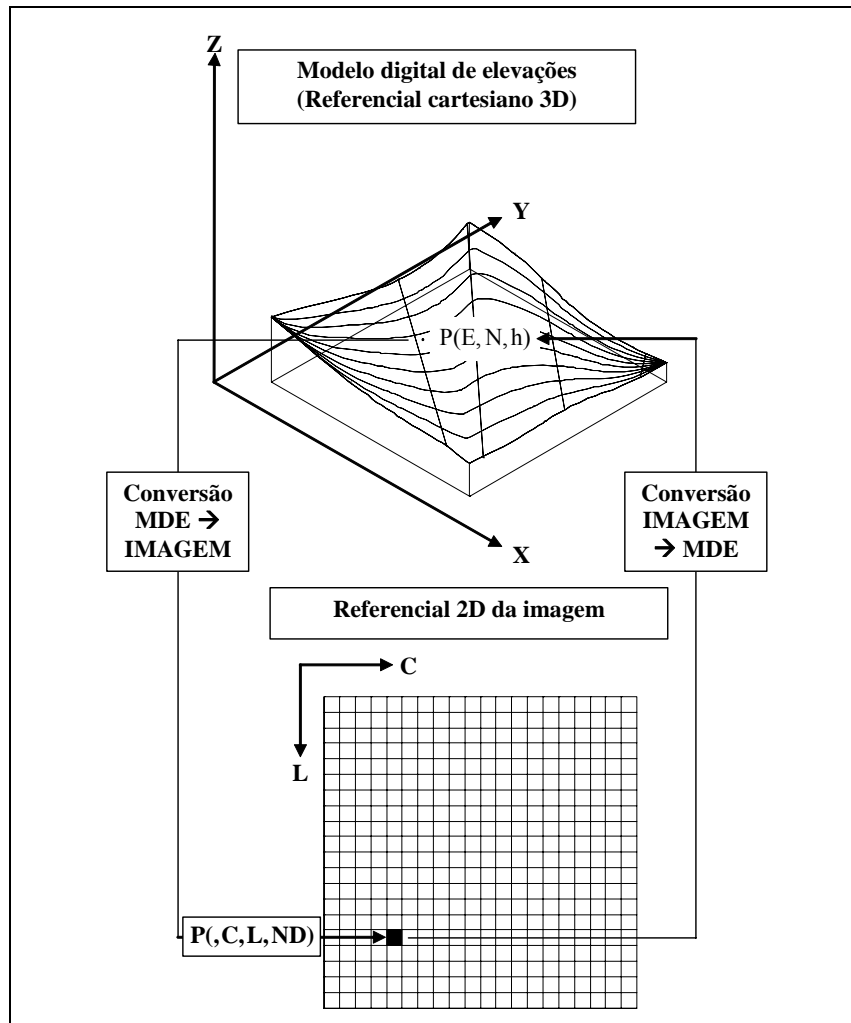


Figura 19: Transformação de um MDE em uma imagem altimétrica digital.

3.3.2 Delimitação dos contornos de telhados de edifícios e limites de vias urbanas

Após a transformação do MDE em imagem altimétrica, os contornos dos telhados dos edifícios podem ser obtidos a partir da mesma, bastando para isso identificar visualmente e medir as coordenadas dos pontos que os definem. Para medir as coordenadas dos pontos que definem os limites das vias urbanas, é utilizada a imagem de intensidade de retorno do pulso laser, previamente registrada com a imagem altimétrica obtida a partir do MDE. A principal razão para isso é que os limites das vias urbanas geralmente não aparecem bem definidos na imagem altimétrica obtida a partir da transformação do MDE. Para o caso da imagem de intensidade de retorno do pulso laser, ocorre justamente o contrário, uma vez que essa imagem contém a informação de resposta espectral dos alvos presentes na cena. Como o material asfalto reflete pouco nos comprimentos de onda utilizados pelos sistemas aerotransportados de varredura a laser, as vias geralmente aparecem como regiões escuras e bem definidas na imagem de intensidade de retorno do pulso laser.

Os procedimentos de medição manual de coordenadas dos pontos que definem os contornos de telhados e limites de vias podem ser implementados computacionalmente por meio de interfaces gráficas, o que facilita bastante o processo de medição dessas feições a partir de ambas as imagens (altimétrica e de intensidade de retorno do pulso laser). A Figura 20 ilustra exemplos de delimitação manual de contornos de telhados de edifícios e limites de vias urbanas.

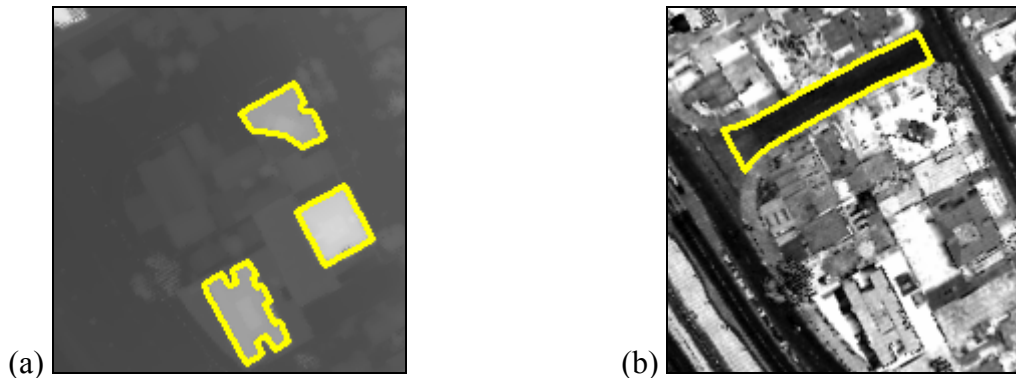


Figura 20: Delimitação (a) de contornos de telhados de edifícios em uma imagem altimétrica obtida a partir de um MDE e (b) de limites de uma via urbana em uma imagem de intensidade de retorno do pulso laser.

3.3.3 *Transformação dos telhados de edifícios e limites de vias urbanas para o referencial cartesiano local*

As coordenadas dos pontos que definem os contornos de telhados de edifícios e limites de vias urbanas estão no referencial digital (C,L,ND). Como as coordenadas do MDE geralmente estão associadas ao referencial UTM com altitude geométrica, essas coordenadas devem ser transformadas para (E,N,h) para serem posteriormente transformadas para o referencial cartesiano local, onde é realizada a predição das sombras de edifícios. Para obter as coordenadas (E,N,h) dos pontos que definem os contornos de telhados de edifícios e limites de vias urbanas, aplicam-se as Equações

$$E = E_{\min} + C \cdot \text{GSD}, \quad (83)$$

$$N = N_{\max} - L \cdot \text{GSD}, \quad (84)$$

e

$$h = h_{\min} + \text{ND} \cdot \left[\frac{h_{\max} - h_{\min}}{255} \right], \quad (85)$$

que são as inversas das Equações 80, 81 e 82.

As coordenadas resultantes são, então, submetidas à seqüência de transformações ilustrada pela Figura 21, para obter as coordenadas dos pontos correspondentes no referencial cartesiano local, onde é realizada a predição das sombras produzidas pelos edifícios. Os referenciais envolvidos e as transformações de coordenadas ilustradas pela Figura 21 foram apresentados no Capítulo 2 desta dissertação.

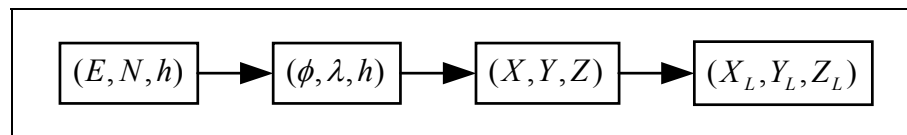


Figura 21: Transformações de coordenadas aplicadas aos pontos medidos na imagem de altimétrica obtida a partir do MDE.

O principal resultado desta etapa é uma lista contendo as coordenadas dos pontos representativos de contornos dos telhados dos edifícios e limites das vias urbanas no referencial cartesiano local.

3.4 Obtenção das sombras de edifícios visíveis no espaço-imagem

3.4.1 Obtenção das projeções de sombra dos edifícios sobre o PMHLV

Nesta etapa são obtidas as projeções de sombra dos edifícios sobre o PMHLV. Para tanto, o primeiro passo consiste em projetar ortogonalmente os pontos que definem os contornos de telhados de edifícios no PMHLV, a fim de obter os polígonos que definem as bases dos edifícios. Para isso é necessário conhecer a altura para cada edifício, que é obtida pela diferença entre a altitude média de cada telhado e a altitude do PMHLV. Vale ressaltar que, como a topografia do terreno pode variar bastante, é conveniente utilizar um plano médio local para cada edifício. A altitude média desse plano é calculada com base nas altitudes dos pontos que definem os limites da via adjacente ao edifício considerado. Em seguida, os pontos representando o contorno de telhado de cada edifício são projetados no PMHLV através da projeção paralela, cujo princípio é ilustrado pela Figura 22. Neste tipo de projeção, as retas de projeção são paralelas entre si, visto que o centro de projeção (CP) está localizado no infinito (ROS, 2001).

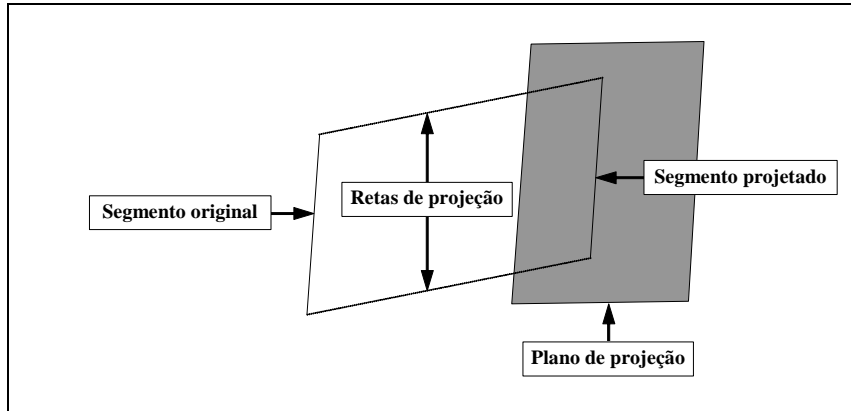


Figura 22: Princípio da projeção paralela.

A razão para o uso da projeção paralela é o fato de que o CP, para o caso de sombras, relaciona-se com a fonte de iluminação (Sol), que se encontra muito distante da superfície terrestre e pode ser considerado, desta forma, como sendo posicionado no infinito. Para obter as retas de projeção paralela é necessária, além da altura dos edifícios, a posição (orientação) do Sol no instante de tomada da imagem aérea, em um sistema de referência compatível com o cartesiano local. As coordenadas que definem a posição do Sol nesse sistema são o azimute (A) e altura (h), ou seja, a posição do Sol em relação ao sistema astronômico horizontal. Os valores dessas coordenadas são estimados a partir de dados de efemérides astronômicas do Sol e do instante de tomada da imagem aérea, através de transformações entre sistemas de coordenadas astronômicos, como aquelas apresentadas na Seção 2.11.

Após a obtenção das coordenadas horizontais do Sol, são definidas as equações de projeção paralela (equações de retas paralelas em um referencial cartesiano tridimensional) utilizadas para projetar os pontos dos contornos de telhados de edifícios no PMHLV. Essas equações são definidas na forma paramétrica, conforme é detalhadamente explicado a seguir.

Uma reta no espaço 3D pode ser escrita na forma paramétrica, através da Equação (MIKHAIL *et al.*, 2001)

$$\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \end{bmatrix} + \lambda \cdot \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \end{bmatrix}, \quad (86)$$

onde:

- (X_p, Y_p, Z_p) são as coordenadas de um ponto que se deseja determinar;
- (X_T, Y_T, Z_T) são as coordenadas de um ponto conhecido na reta;
- (K_1, K_2, K_3) é o vetor diretor da reta;
- λ é o parâmetro da reta e varia no intervalo $]-\infty, +\infty[$.

Para determinar as componentes planimétricas dos pontos que definem o contorno de um telhado projetado no PMHLV, obtém-se o valor do parâmetro λ a partir da terceira equação e substitui-se na primeira e na segunda equação de 86, resultando em

$$X_p = X_T + (Z_p - Z_T) \frac{K_1}{K_3} \quad (87)$$

e

$$Y_p = Y_T + (Z_p - Z_T) \frac{K_2}{K_3}, \quad (88)$$

onde:

- (X_p, Y_p) são as componentes planimétricas dos vértices de um contorno de telhado projetado no PMHLV (no referencial cartesiano local);
- (X_T, Y_T, Z_T) são as coordenadas dos pontos representativos dos contornos de telhados de edifícios (no referencial cartesiano local);
- Z_p é a altitude do PMHLV;
- (K_1, K_2, K_3) são as componentes do vetor diretor da reta que definem a posição (orientação) do Sol, sendo dadas por

$$\begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(A) \\ \text{sen}(A) \\ \text{tg}(h) \end{bmatrix}. \quad (89)$$

Substituindo os valores da Equação 89 nas Equações 87 e 88, têm-se os modelos finais para as equações de projeção paralela, dados por

$$X_p = X_T + (Z_p - Z_T) \frac{\cos(A)}{\text{tg}(h)} \quad (90)$$

e

$$Y_p = Y_T + (Z_p - Z_T) \frac{\text{sen}(A)}{\text{tg}(h)}. \quad (91)$$

Para obter as componentes planimétricas dos vértices representativos dos contornos de telhados projetados no PMHLV a partir da posição (orientação) espacial do Sol, da altitude do PMHLV e das coordenadas dos pontos que definem o contorno dos telhados dos edifícios, aplicam-se diretamente as Equações 90 e 91. É interessante notar que essas equações não são definidas para $h = 0^\circ$ (nascer e ocaso do Sol) nem para $h = 90^\circ$ (passagem meridiana superior do Sol). De fato, é esperado que nos referidos instantes não haja projeções de sombras de edificações.

No estágio final dessa etapa, os polígonos representando as bases dos edifícios são combinados com os respectivos polígonos projetados paralelamente no PMHLV, de modo a obter uma representação no referencial cartesiano local para a sombra projetada por cada edifício. Um exemplo ilustrativo é dado pela Figura 23, onde é possível notar que o polígono de sombra projetado no PMHLV pelo edifício é definido pelos vértices a, b, c, d, e, f.

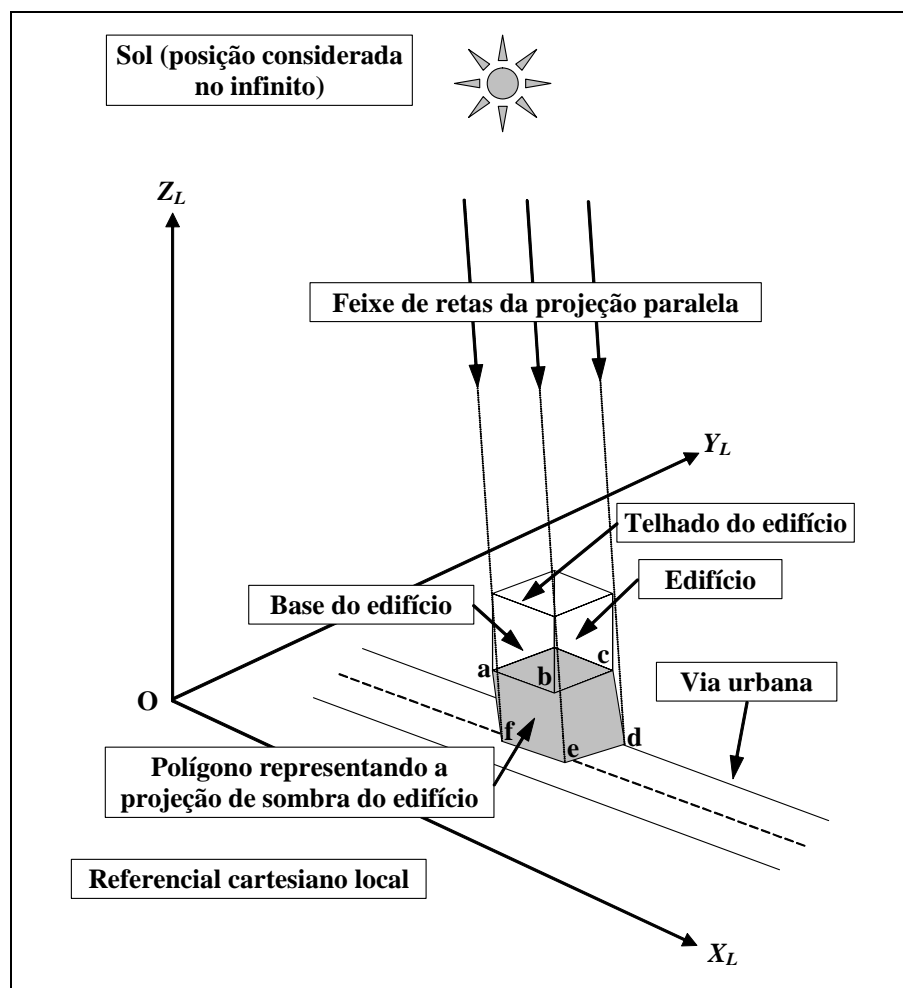


Figura 23: Projeção da sombra de um edifício para o PMHLV.

3.4.2 Determinação das regiões de sombra sobre as vias urbanas

Depois da obtenção das projeções de sombras dos edifícios sobre o PMHLV, são determinadas as regiões dessas projeções compreendidas entre os limites das vias urbanas adjacentes aos edifícios considerados. A Figura 24 ilustra uma situação onde foi obtido um contorno delimitando a região da sombra do edifício projetada sobre o PMHLV. Para determinar a região de uma sombra produzida por um edifício que afeta os limites de uma via urbana, a solução a ser empregada é verificar se os segmentos de reta do polígono que representa a sombra de um determinado edifício interceptam os segmentos de retas que definem os limites da via (v_1 e v_2 exemplificados pela Figura 24). Depois de concluída esta etapa, deve-se então verificar a parte do polígono que está contida na região delimitada pelos segmentos v_1 e v_2 . Os pontos do polígono que estiverem contidos nessa região, bem como os trechos dos segmentos de reta de v_1 e/ou v_2 , em comum com o polígono da sombra, são os pontos que definem a obstrução causada pela projeção da sombra do edifício sobre a via urbana.

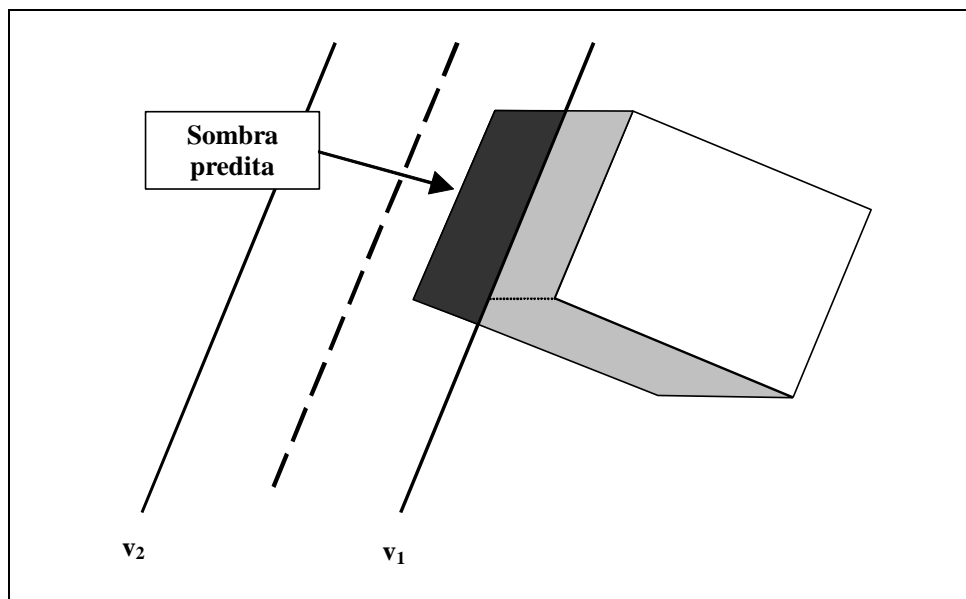


Figura 24: Obtenção da região da sombra projetada por um edifício sobre uma via urbana.

3.4.3 Seleção das partes das sombras visíveis na imagem aérea

Para selecionar as partes das sombras preditas na etapa anterior que estarão visíveis na imagem aérea, é necessário conhecer a posição espacial (X_0, Y_0, Z_0) do centro perspectivo (CP) e os ângulos de atitude (ω, φ, κ) do sensor no instante de tomada da imagem aérea, que são os parâmetros de orientação exterior da mesma. Com base nestes parâmetros,

são determinadas as obstruções causadas pela projeção perspectiva dos edifícios sobre as vias urbanas. Esse procedimento difere daquele descrito na seção 3.4.1 apenas pelo tipo de projeção utilizada, que nesse caso é a perspectiva, tratando-se de um feixe de retas concorrentes no CP e com orientação no espaço dada pelos ângulos de atitude do sensor. As projeções resultantes são denominadas obstruções perspectivas de edifícios. Maiores detalhes a respeito desse assunto podem ser encontrados em Fazan *et al.* (2006). As partes das sombras de edifícios que não estão ocultas por obstruções perspectivas (do edifício considerado ou de outros), estarão visíveis na imagem aérea. Um exemplo ilustrando como as obstruções perspectivas afetam as projeções de sombra de edifícios pode ser visto na imagem mostrada pela Figura 25.



Figura 25: Obstrução perspectiva de um edifício ocultando parte da sombra produzida por outro edifício.

Na Figura 26 é mostrado um esquema ilustrando um caso particular onde ocorrem obstruções provocadas pela sombra e pela projeção perspectiva do mesmo edifício sobre a via urbana. Deve-se notar que, nesse caso, existe uma região em comum entre a sombra e a obstrução perspectiva. Essa região deve ser determinada através da intersecção entre o polígono de sombra e o correspondente à obstrução perspectiva, antes de se registrar a parte visível da sombra predita na imagem aérea. Para o caso onde ocorrem obstruções perspectivas de outros edifícios, deve-se realizar o mesmo procedimento antes do registro das partes visíveis das sombras preditas na imagem aérea.

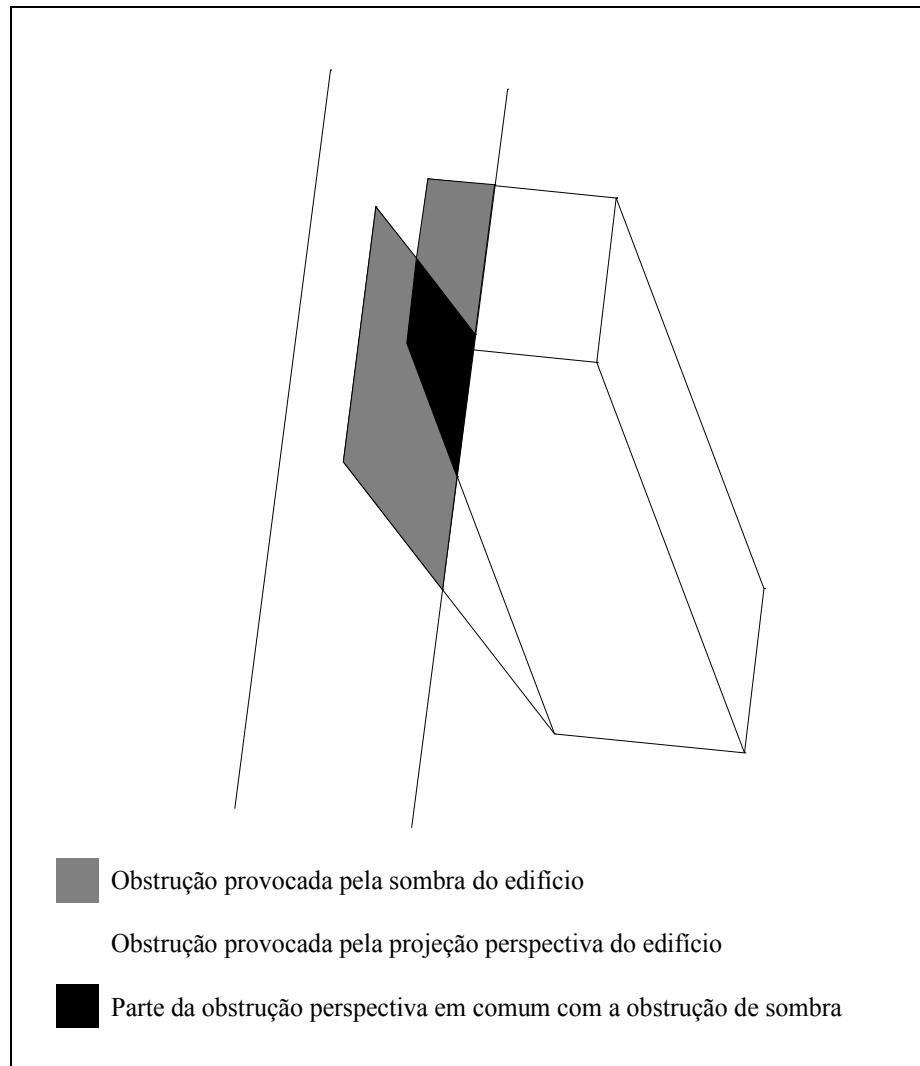


Figura 26: Esquema representando um caso particular de obstruções causadas por edifícios (sombras e obstruções perspectivas).

3.5 Registro das sombras visíveis na imagem aérea

Ao final do processo de obtenção das regiões de sombra visíveis, os contornos que as representam são registrados na imagem aérea correspondente. Para tanto, é necessário conhecer seus parâmetros de orientação interior e exterior.

Os parâmetros de orientação interior podem ser obtidos através do certificado de calibração da câmara utilizada na tomada da imagem. Já os parâmetros de orientação exterior podem ser estimados, por exemplo, pelo tradicional processo fotogramétrico de resseção espacial, que foi tratado na Seção 2.7. O registro na imagem aérea dos pontos que representam os polígonos das sombras preditas no referencial cartesiano local é realizado empregando-se as equações de colinearidade, através das quais são calculadas as

fotocoordenadas (no referencial fotogramétrico) desses pontos. Como a imagem aérea real é afetada por erros sistemáticos (como aqueles vistos no Capítulo 2), é empregado um procedimento adicional de orientação interior “inversa”, que consiste em introduzir os erros sistemáticos nas coordenadas que representem os polígonos de sombra projetados via equações de colinearidade, a fim de obter as coordenadas desses pontos no referencial digital da imagem aérea. Em seguida, os contornos dos polígonos registrados na imagem aérea são delineados através da conexão dos pontos que os definem. Esse procedimento é exemplificado pela Figura 27.

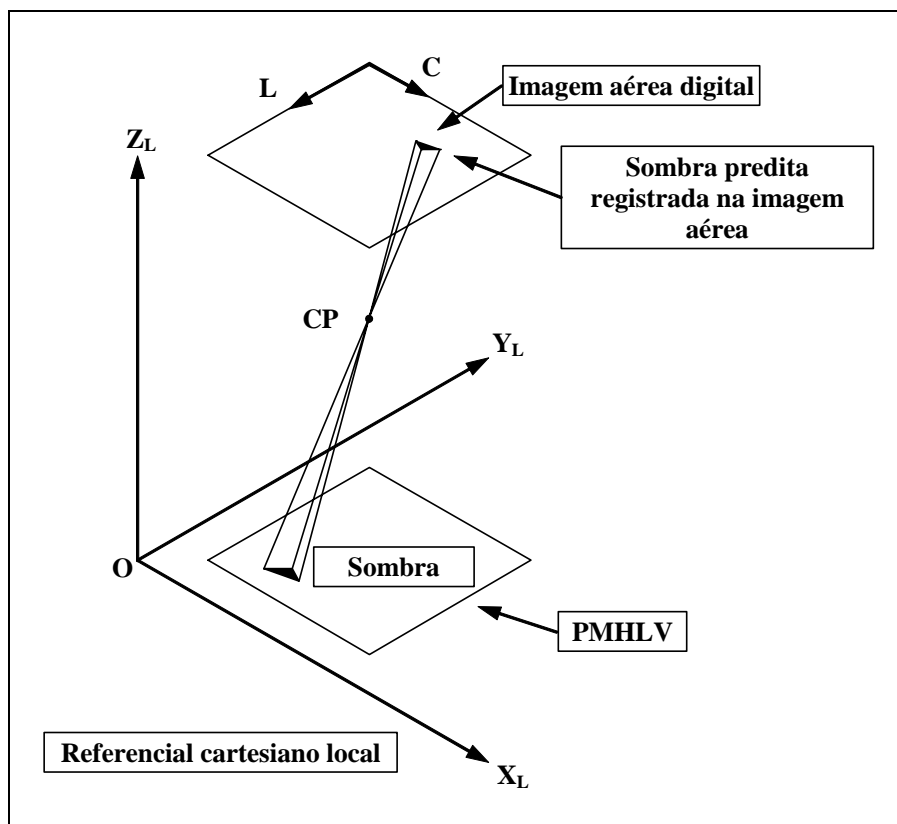


Figura 27: Exemplo de registro na imagem aérea de uma sombra predita no referencial cartesiano local.

É importante lembrar que o registro das sombras na imagem aérea é particularmente útil, pois no referencial digital (C,L) são realizadas as tarefas de análise de imagem. Assim, a futura modelagem de informações contextuais poderá ser realizada com base nos elementos obtidos nesse referencial.

4 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA METODOLOGIA DE PREDIÇÃO DE SOMBRAS

4.1 Introdução

Este capítulo é dedicado à apresentação e discussão dos resultados obtidos na avaliação experimental da metodologia de predição de sombras desenvolvida. Inicialmente são descritos os procedimentos metodológicos adotados no desenvolvimento deste trabalho. Em seguida é apresentada a descrição e análise de cada experimento realizado. Por fim, é apresentada uma discussão dos principais fatores que interferem na qualidade dos resultados fornecidos pelo método proposto neste trabalho.

4.2 Procedimentos metodológicos

4.2.1 Características dos dados utilizados

Para a execução deste trabalho foram utilizados dados de imagens aéreas de alta-resolução na escala 1:10.000 da área urbana do município de Curitiba - PR, bem como os parâmetros de orientação interior associados a elas. Também foi utilizado um conjunto de pontos de apoio com coordenadas (E,N,h) para a estimação dos parâmetros de orientação exterior das imagens aéreas através do procedimento fotogramétrico de resseção espacial, além de dados de efemérides solares obtidos a partir do Anuário Astronômico do Observatório Nacional. Os dados referentes às imagens aéreas de alta-resolução foram fornecidos pelo Prof. Dr. Edson A. Mitishita, da UFPR – Universidade Federal do Paraná. Os dados obtidos por varredura a laser utilizados neste trabalho compreenderam uma malha irregular de pontos com coordenadas (E,N,h) contendo um total de 8.593.331 pontos e uma imagem de intensidade de retorno do pulso laser, correspondente à região coberta pelas imagens aéreas. Esses dados foram cedidos pelo LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento.

4.2.2 Desenvolvimento algorítmico e implementação computacional

Esta etapa consistiu no desenvolvimento algorítmico e implementação computacional da metodologia de predição de regiões afetadas pela projeção de sombras de

edifícios sobre vias urbanas em imagens aéreas de alta-resolução. Foram desenvolvidos diversos programas computacionais para a realização específica de tarefas necessárias à metodologia descrita no Capítulo 3. Os principais programas desenvolvidos e implementados durante a execução deste trabalho de pesquisa foram:

- **DEM Imager:** Transforma modelos digitais de elevações em imagens altimétricas em níveis de cinza e possui ferramentas para extração manual de contornos de telhados de edifícios e limites de vias urbanas;
- **Image Register:** Executa o registro entre duas imagens. Implementado por meio de uma interface gráfica que possibilita a medição manual de coordenadas de pontos de controle utilizados no registro das imagens. Possibilita a escolha de modelos de interpolação e de transformação para o processamento do registro;
- **Shadows Extractor:** Realiza a predição das sombras de edifícios sobre as vias urbanas a partir dos dados coletados com o uso do aplicativo *DEM Imager*, além de outros dados inseridos diretamente nele. Implementado por meio de uma interface gráfica que possibilita a visualização dos resultados obtidos na predição das sombras. Agrega as ferramentas de extração de sombras de referência a partir de uma imagem aérea e de um MDE, além de realizar a comparação numérica entre sombras de referência e sombras preditas;
- **DEM Utilities:** Consiste de um grupo de programas específicos para seleção de regiões de interesse em um MDE. Um desses programas permite converter um arquivo de MDE em formato texto para formato binário;
- **Space Photo:** Calcula a resseção espacial de uma imagem aérea.

Todos os programas desenvolvidos foram implementados em linguagem C++, no ambiente de desenvolvimento integrado *Borland C++ Builder 4*, que combina a abordagem orientada a objetos da linguagem C++ e os recursos gráficos do *Borland C++ Builder 4*, bastante adequados para a realização de tarefas de análise de imagem.

4.2.3 *Geração do MDE a partir dos dados de varredura a laser*

Para gerar o MDE a partir da malha irregular de pontos coletada pelo sistema de varredura a laser, primeiramente foi selecionada a área de interesse da malha correspondente às regiões da imagem aérea utilizada nos experimentos onde há uma maior ocorrência de sombras de edifícios. Para tanto, foi utilizado um programa específico implementado em linguagem C++, capaz de realizar essa tarefa. Em seguida, foi utilizado o aplicativo *Surfer* para a geração do MDE. O modelo de interpolação escolhido no *Surfer* foi o inverso do quadrado da distância e a resolução (espaçamento entre os pontos) utilizada para produzir a grade regular do MDE foi de 0,7m. Dessa forma, a grade foi gerada com dimensão de 2090×3031 pontos, o que implicou na interpolação de 6.334.790 valores de altitude, consumindo um grande tempo de processamento em um computador com 1 GB de memória RAM e processador de 2,8 GHz.

O modelo de interpolação adequado para produzir o MDE seria o vizinho mais próximo, uma vez que ele não altera os valores originais de altitude dos pontos do modelo produzido. Entretanto, este método de interpolação causa alguns efeitos indesejados no MDE gerado. O primeiro deles é uma distorção dos limites dos objetos mais altos, como no caso dos edifícios, prejudicando sua posterior identificação na imagem altimétrica produzida a partir desse MDE. O segundo é o efeito indesejável de serrilhamento nas bordas dos edifícios. Por essas razões, foi utilizado o método de interpolação pelo inverso do quadrado da distância, que apresentou melhores resultados na geração do MDE derivado dos dados de varredura a laser.

4.2.4 *Transformação do MDE gerado em imagem altimétrica*

Para transformar o MDE em uma imagem altimétrica em níveis de cinza, foi utilizado um programa desenvolvido em linguagem C++ baseado em uma interface gráfica. No mesmo aplicativo foram implementadas as ferramentas necessárias para a delimitação manual dos contornos dos telhados de edifícios e limites das vias urbanas, que são tarefas que dependem da intervenção do operador. Um exemplo de delimitação do contorno de um telhado e limites de uma via urbana já foi mostrado na Figura 20 (Capítulo 3).

4.2.5 *Registro da imagem de intensidade de retorno do pulso laser*

Para delimitar os contornos das vias urbanas, foi utilizada a imagem de intensidade de retorno do pulso laser, uma vez que esses elementos se encontram melhor definidos nessa imagem do que na imagem altimétrica em níveis de cinza produzida a partir do MDE. Isto se deve principalmente ao fato de que a imagem de intensidade de retorno do pulso laser contém a informação da resposta espectral dos diversos alvos presentes na cena levantada e, em particular, o material asfalto apresenta baixas respostas na região do infravermelho (faixa do espectro geralmente utilizada pelos sistemas aerotransportados de varredura a laser). Isso faz com que as vias urbanas se apresentem como regiões bastante homogêneas e com valores de brilho próximos de zero nessa imagem.

O motivo básico para a necessidade de registro da imagem de intensidade de retorno do pulso laser é que as informações posicionais e de altitude dos pontos que definem os limites de uma via extraída são obtidas a partir da imagem altimétrica produzida pela transformação do MDE. Isso significa que os elementos da imagem de intensidade de retorno do pulso laser (a partir da qual são identificados e medidos os pontos que definem os limites das vias) devem ser correspondentes aos elementos da imagem altimétrica.

Para realizar o registro da imagem de intensidade de retorno do pulso laser, foi utilizado um programa implementado em linguagem C++ baseado em uma interface gráfica, para possibilitar a identificação e a medição de pontos de controle (em ambas as imagens). As coordenadas desses pontos são utilizadas na estimação, através de um ajustamento baseado no critério dos mínimos quadrados, dos parâmetros de uma função de transformação cuja inversa é utilizada para produzir a imagem registrada. Nesse caso, primeiramente foram medidas as coordenadas (C,L) de 14 pontos bem definidos sobre as duas imagens. Em seguida, essas coordenadas foram utilizadas na estimação dos parâmetros da transformação isogonal 2D, que é bastante adequada para o registro de imagens digitais. Para obter os valores de brilho da imagem registrada foi utilizada a interpolação bilinear, que produz uma aparência mais uniforme e evita o indesejado efeito de serrilhamento nas bordas das feições da imagem registrada.

4.2.6 Formas de análise dos resultados

As formas visual e numérica foram utilizadas para analisar os resultados obtidos nos experimentos realizados. A análise visual consistiu em comparar, na imagem aérea, as projeções dos polígonos de sombra obtidos através do método com os respectivos polígonos de sombra de referência extraídos manualmente a partir da imagem aérea e do MDE/laser.

Para avaliar a qualidade dos resultados obtidos pelo uso do método de predição de sombras proposto, os polígonos de sombra preditos foram comparados numericamente com seus respectivos polígonos de sombra de referência. Para tanto, foram utilizados dois indicadores de qualidade, calculados em função das áreas e dos perímetros dos polígonos de sombra preditos e de referência. Esses indicadores mostram, respectivamente, a porcentagem da área e do perímetro de um polígono de sombra predito em relação ao polígono de referência, e são dados por

$$A_e(\%) = \left(\frac{A_e}{A_r} \right) \cdot 100 \quad (92)$$

e

$$P_e(\%) = \left(\frac{P_e}{P_r} \right) \cdot 100, \quad (93)$$

onde:

- A_r e P_r são a área e o perímetro, respectivamente, de um polígono de sombra de referência;
- A_e e P_e são a área e o perímetro, respectivamente, de um polígono de sombra predito.

A área de um polígono é calculada com base na fórmula de Gauss, dada por

$$A = \frac{\left| \sum_{i=0}^{n-1} (X_i \cdot Y_{i+1}) - \sum_{i=0}^{n-1} (X_{i+1} \cdot Y_i) \right|}{2}. \quad (94)$$

O perímetro de um polígono é obtido pela somatória dos comprimentos dos segmentos de reta que o definem, ou seja,

$$P = \sum_{i=0}^{n-1} \sqrt{(X_i - X_{i+1})^2 + (Y_i - Y_{i+1})^2} . \quad (95)$$

Nas equações 94 e 95, X e Y são as coordenadas planimétricas de um ponto em um sistema de referência compatível com o cartesiano local (referencial híbrido ou mesmo o cartesiano local), onde é realizada a predição das sombras.

4.3 Resultados experimentais

Nesta seção são descritos os resultados obtidos pela avaliação experimental da metodologia desenvolvida utilizando dados reais de imagem aérea e MDE/laser. Para demonstrar a eficácia do método foram realizados seis experimentos que apresentaram diferentes níveis de complexidade. A seguir é apresentada uma descrição detalhada, bem como a análise visual e numérica para cada experimento realizado.

4.3.1 Experimento 1

A Figura 28 ilustra os resultados obtidos no primeiro experimento realizado. Na Figura 28(a) é mostrada a projeção dos limites da via urbana e da parte da sombra projetada pelo edifício que obstrui a via. Analisando visualmente a projeção na imagem do polígono de sombra predito, verifica-se que este possui uma área maior que a do polígono de sombra de referência, ilustrado pela Figura 28(b), o que pode ser comprovado pelos valores de área e perímetro apresentados na Tabela 1, calculados para ambos os polígonos. Também é possível notar que o contorno da sombra predita difere do contorno real, o que indica que o contorno do telhado do edifício extraído na imagem altimétrica produzida a partir do MDE/laser difere do contorno real apresentado na imagem aérea.

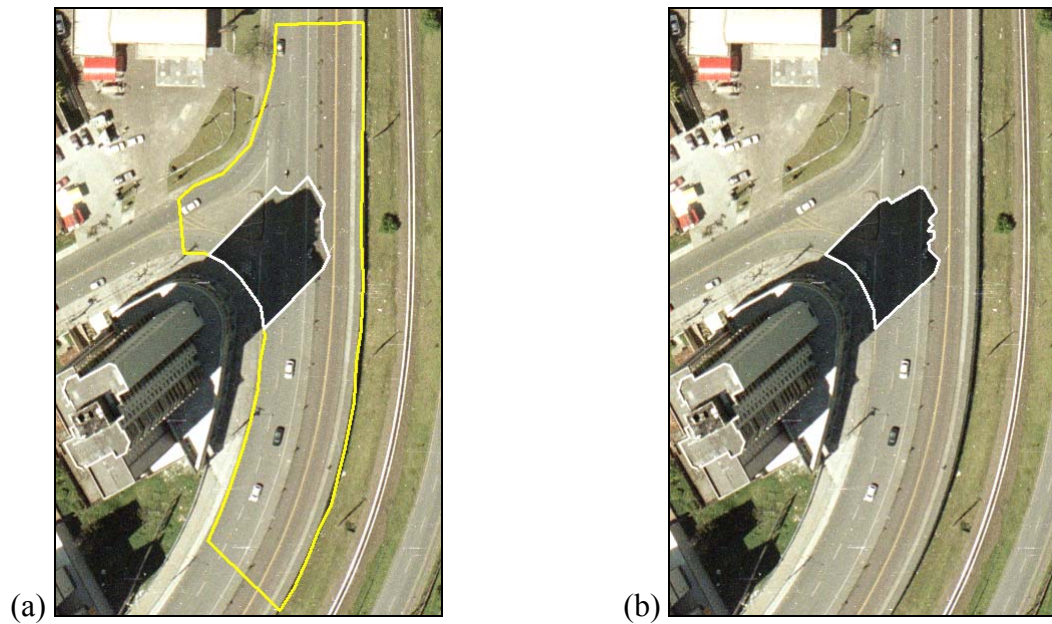


Figura 28: Visualização dos resultados obtidos no experimento 1:
(a) Polígono de sombra predito; (b) Polígono de sombra de referência.

Tabela 1: Resultados numéricos obtidos no experimento 1.

Objeto sombra	Área (m²)	Perímetro (m)
Polígono predito	496,163	96,060
Polígono de referência	443,804	95,332
Indicadores de qualidade	$A_e(\%) = 111,8 \%$	$P_e(\%) = 100,8 \%$

Na Tabela 1 também são apresentados os resultados obtidos na análise numérica do experimento 1. Os indicadores de qualidade calculados para este experimento mostram que a área de sombra predita foi 11,8% maior que a área da sombra realmente projetada pelo edifício sobre a via urbana. Já o valor do perímetro do polígono de sombra predito é praticamente idêntico ao polígono de referência.

4.3.2 Experimento 2

A Figura 29 ilustra os resultados obtidos no segundo experimento. A Figura 29(a) mostra as projeções na imagem aérea dos limites da via adjacente ao edifício e do polígono de sombra predito. Já na Figura 29(b) é ilustrada a projeção do polígono de sombra de referência, utilizado na comparação dos resultados. O polígono predito corresponde à região da sombra projetada pelo edifício que obstrui a via.

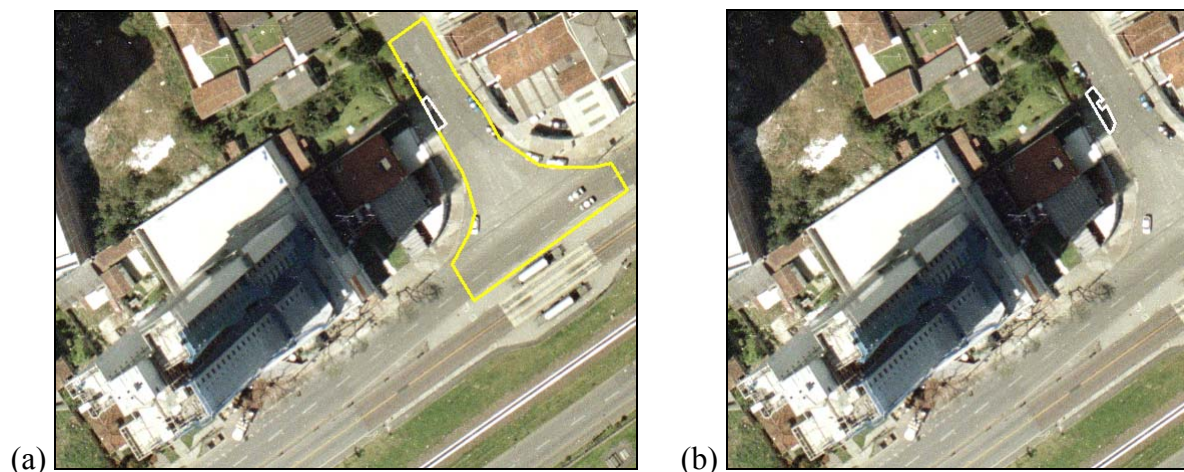


Figura 29: Visualização dos resultados obtidos no experimento 2:
(a) Polígono de sombra predito; (b) Polígono de sombra de referência.

Analisando visualmente o resultado obtido, verifica-se que a área e o perímetro do polígono de sombra predito são menores que os valores do polígono de sombra de referência, conforme pode ser observado a partir da Tabela 2, que mostra os valores dos atributos calculados para os polígonos de sombra obtidos de forma manual (polígono de referência) e computacional (polígono predito).

Tabela 2: Resultados numéricos obtidos no experimento 2.

Objeto sombra	Área (m²)	Perímetro (m)
Polígono predito	13,994	18,853
Polígono de referência	23,331	29,635
Indicadores de qualidade	$A_e(\%) = 60,0\%$	$P_e(\%) = 63,6\%$

Na Tabela 2 também são apresentados os indicadores de qualidade obtidos na análise numérica desse experimento. Analisando esses valores, conclui-se que somente uma pequena parte da área da sombra projetada pelo edifício sobre a via foi obtida, uma vez que ambos os indicadores de qualidade são pouco maiores que 50%.

4.3.3 Experimento 3

A Figura 30 ilustra os resultados obtidos no terceiro experimento realizado. Neste experimento são obtidos simultaneamente os contornos das regiões de sombra projetadas sobre a via causadas pelos edifícios identificados pelos números 1 e 2 na Figura 30(a), que mostra também as projeções na imagem aérea dos polígonos de sombra preditos

pelo método proposto. Analisando visualmente essas projeções, verifica-se que ambos os polígonos preditos possuem áreas e perímetros maiores que os polígonos de sombra de referência, cujas projeções (na imagem aérea) são mostradas na Figura 30(b).

Esse resultado é comprovado pelos valores desses atributos, apresentados nas Tabelas 3 e 4, onde também são mostrados os indicadores de qualidade obtidos na avaliação numérica deste experimento. Esses valores indicam que as áreas dos dois polígonos de sombra preditos é cerca de 50% maior que as áreas reais de sombra projetadas pelos edifícios sobre a via.

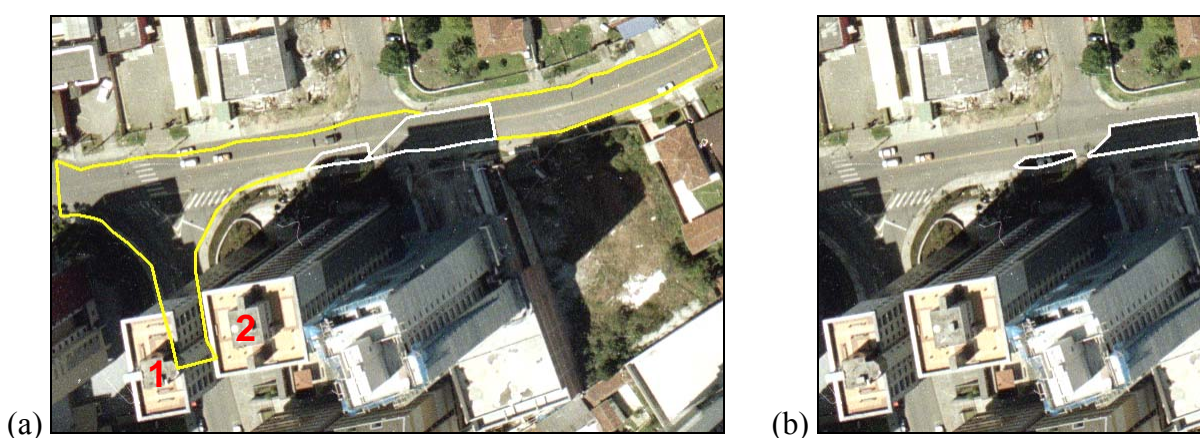


Figura 30: Visualização dos resultados obtidos no experimento 3:
 (a) Polígonos de sombra preditos; (b) Polígonos de sombra de referência.

Tabela 3: Resultados numéricos obtidos no experimento 3 para a sombra produzida pelo edifício 1.

Objeto sombra 1	Área (m ²)	Perímetro (m)
Polígono predito	28,852	35,599
Polígono de referência	42,781	30,902
Indicadores de qualidade	$A_e(\%) = 148,3 \%$	$P_e(\%) = 115,2 \%$

Tabela 4: Resultados numéricos obtidos no experimento 3 para a sombra produzida pelo edifício 2.

Objeto sombra 2	Área (m ²)	Perímetro (m)
Polígono predito	203,873	73,669
Polígono de referência	140,008	62,661
Indicadores de qualidade	$A_e(\%) = 145,6 \%$	$P_e(\%) = 117,6 \%$

Considerando os resultados obtidos neste experimento, conclui-se que o método funcionou adequadamente, uma vez que obteve com sucesso os polígonos representando as sombras projetadas pelos dois edifícios avaliados.

4.3.4 Experimento 4

A Figura 31 ilustra o resultado obtido no quarto experimento realizado. Este experimento é similar ao anterior, pois envolveu a predição das regiões de sombra projetadas sobre a via urbana por mais de um edifício (também 2 nesse caso, identificados pelos números 1 e 2 na Figura 31(a)). Entretanto, este experimento é um pouco mais complexo que o anterior, pois há a ocorrência de uma obstrução sobre a via urbana, causada pela projeção perspectiva do edifício identificado pelo número 3 na Figura 31(a). Esta obstrução está ocultando algumas partes das sombras projetadas pelos edifícios 1 e 2, conforme pode ser visto ainda nessa mesma figura. Nesses casos, antes da obtenção dos polígonos finais representando as sombras projetadas pelos edifícios no PMHLV, é necessário também obter as regiões de obstruções perspectivas que estão ocultando partes das sombras. Esses elementos são utilizados para determinar as partes das sombras projetadas pelos edifícios que estarão visíveis na imagem aérea.

A Figura 31(a) ilustra as projeções dos polígonos preditos que representam as partes das sombras projetadas pelos edifícios 1 e 2 sobre o PMHLV que estão visíveis na imagem aérea e a Figura 31(b) mostra as projeções dos polígonos de sombra utilizados como referência na comparação numérica dos resultados.

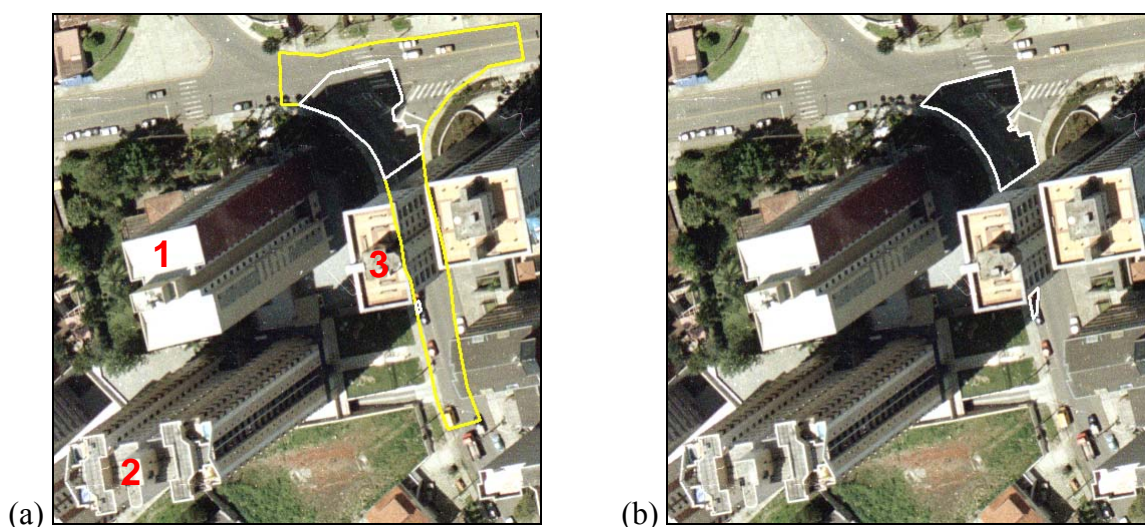


Figura 31: Visualização dos resultados obtidos no experimento 4:
(a) Polígonos de sombra preditos; (b) Polígonos de sombra de referência.

Analisando visualmente os resultados obtidos neste experimento, verifica-se que o método apresentou desempenho satisfatório, conseguindo obter as partes de sombra visíveis na imagem aérea. Para o caso do edifício 1, o polígono de sombra predito é bastante próximo ao polígono de sombra de referência correspondente, inclusive no que diz respeito aos valores numéricos dos atributos (área e perímetro) apresentados na Tabela 5, fato comprovado pelos indicadores de qualidade calculados para a comparação numérica do resultado. Esses valores indicam que a área da sombra predita é 6,9% maior que a área da sombra real projetada pelo edifício, ocorrendo aproximadamente o inverso no caso do perímetro.

Tabela 5: Resultados numéricos obtidos no experimento 4 para a sombra produzida pelo edifício 1.

Objeto sombra 1	Área (m²)	Perímetro (m)
Polígono predito	368,679	91,387
Polígono de referência	344,983	95,079
Indicadores de qualidade	$A_e(\%) = 106,9\%$	$P_e(\%) = 96,1\%$

No que se refere à sombra projetada pelo edifício 2 sobre o PMHLV, a área e o perímetro do polígono predito, cujos valores são apresentados na Tabela 6, diferem bastante dos valores de referência. Os indicadores de qualidade mostram que a sombra projetada sobre a via pelo edifício 2 compreende uma área 79,7% maior que a do polígono predito pelo método proposto. Já o perímetro do polígono em questão corresponde a 40% do contorno da sombra real visível na imagem aérea.

Tabela 6: Resultados numéricos obtidos no experimento 4 para a sombra produzida pelo edifício 2.

Objeto sombra 2	Área (m²)	Perímetro (m)
Polígono predito	1,969	6,466
Polígono de referência	9,692	15,848
Indicadores de qualidade	$A_e(\%) = 20,3\%$	$P_e(\%) = 40,8\%$

4.3.5 Experimento 5

A Figura 32(a) mostra o resultado obtido no quinto experimento realizado. Nesse caso, existe uma sombra projetada sobre o PMHLV pelo edifício identificado pelo número 1 com uma parte obstruída pela projeção perspectiva do edifício identificado pelo número 2. A Figura 32(b) ilustra a projeção do polígono de sombra de referência utilizado na comparação numérica do resultado.

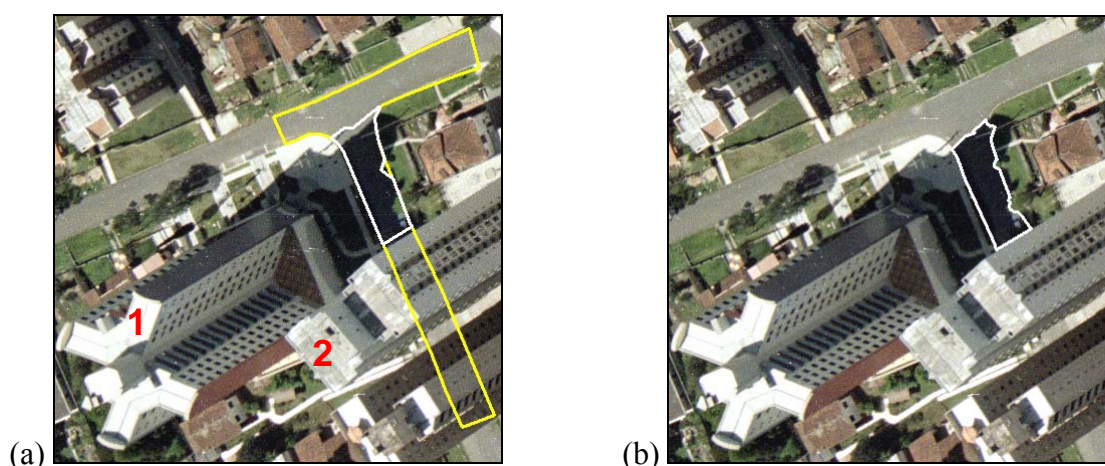


Figura 32: Visualização dos resultados obtidos no experimento 5:
(a) Polígono de sombra predito; (b) Polígono de sombra de referência.

Analisando visualmente as projeções na imagem aérea, é possível verificar que o método apresentou um desempenho satisfatório, conseguindo obter um polígono bastante coerente com a parte da sombra real visível na imagem. Os valores dos atributos área e perímetro do polígono predito apresentados na Tabela 7 reforçam essa conclusão, uma vez que diferem muito pouco dos valores de referência. Os valores dos indicadores de qualidade, também apresentados na Tabela 7, indicam que o polígono de sombra predito é bastante próximo à sombra real visível na imagem aérea, uma vez que seus valores de área e perímetro são apenas 2% maiores que os respectivos valores obtidos para o polígono de sombra de referência.

Tabela 7: Resultados numéricos obtidos no experimento 5.

Objeto sombra	Área (m²)	Perímetro (m)
Polígono predito	234,529	81,015
Polígono de referência	229,736	79,084
Indicadores de qualidade	$A_e(\%) = 102,1\%$	$P_e(\%) = 102,4\%$

4.3.6 Experimento 6

Os resultados obtidos no último experimento são mostrados na Figura 33. Este experimento é semelhante ao anterior, uma vez que parte da sombra projetada pelo edifício 1 está obstruída pela projeção perspectiva produzida pelo edifício 2, ambos identificados na Figura 33(a). As projeções na imagem aérea da via adjacente aos edifícios e do polígono predito que representa a sombra projetada pelo edifício 1 sobre o PMHLV também são apresentadas pela Figura 33(a). A Figura 33(b) mostra a projeção do polígono de sombra de referência, utilizado na comparação do resultado.

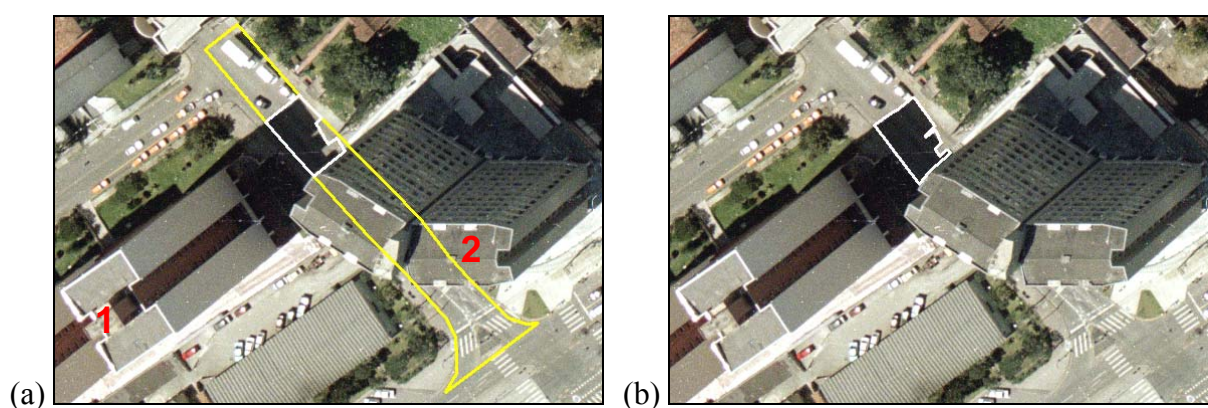


Figura 33: Visualização dos resultados obtidos no experimento 6:
(a) Polígono de sombra predito; (b) Polígono de sombra de referência.

Analisando visualmente o resultado obtido, verifica-se que o método apresentou novamente um bom desempenho, uma vez que o polígono de sombra predito é muito próximo ao de referência, o que é comprovado através dos dados apresentados na Tabela 8, que contém os valores dos atributos área e perímetro para o polígono predito e para o polígono de sombra de referência. Os indicadores de qualidade calculados na análise numérica do experimento mostram que a sombra predita corresponde a 95,3% da área e equivale a 89,5% do perímetro da sombra real projetada pelo edifício sobre a via.

Tabela 8: Resultados numéricos obtidos no experimento 6.

Objeto sombra	Área (m²)	Perímetro (m)
Polígono predito	159,879	57,734
Polígono de referência	167,774	64,511
Indicadores de qualidade	$A_e(\%) = 95,3 \%$	$P_e(\%) = 89,5 \%$

4.4 *Discussão dos principais fatores que afetaram a qualidade dos resultados*

Existem cinco fatores principais que interferem na qualidade das sombras de edifícios obtidas pelo método proposto neste trabalho. O primeiro deles é o que mais influencia o resultado final de um contorno de sombra predito e está relacionado à baixa definição dos limites dos telhados dos edifícios, principalmente dos mais altos, em um MDE derivado de dados de varredura a laser. Isso em geral dificulta o delineamento dos contornos dos telhados dos edifícios a partir da imagem altimétrica obtida pela transformação do MDE/laser. Esse fato está diretamente relacionado ao modelo de varredura, que depende principalmente do tipo de espelho empregado pelo sistema utilizado. Dependendo do modelo de varredura do sistema, podem ocorrer perdas durante a aquisição dos dados, resultando em regiões sem pontos sobre a superfície sendo levantada. De fato, isso pode ser visualizado na Figura 34(a), que mostra um recorte de uma imagem altimétrica gerada diretamente a partir da malha irregular de pontos utilizada na obtenção do MDE/laser utilizado neste trabalho. Essa malha foi coletada por um sistema cujo espelho utiliza o modelo de varredura zigue-zague.

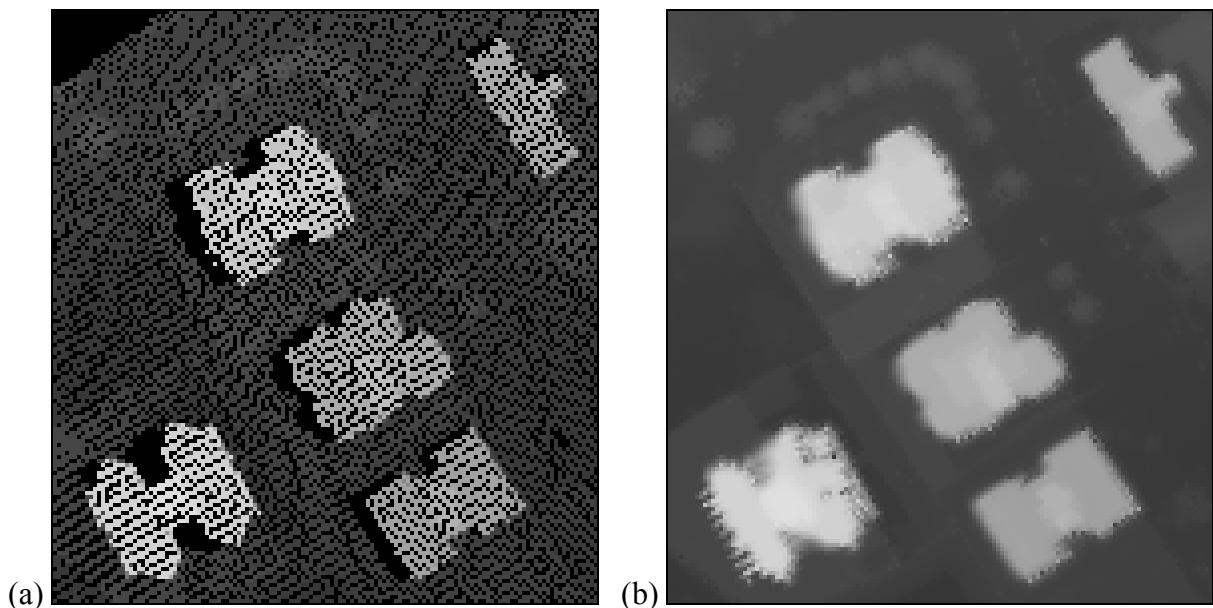


Figura 34: Região de uma imagem altimétrica gerada a partir de: (a) malha irregular de pontos obtidos por varredura a laser; (b) MDE produzido por interpolação da malha irregular.

Na imagem mostrada na Figura 34(a) é possível notar algumas regiões da superfície adjacentes aos edifícios onde ocorreram perdas de dados durante a varredura. Para a produção do MDE, a malha irregular de pontos passa por um processo de interpolação para gerar uma grade regular, o que introduz erros (de interpolação) no modelo produzido e, além disso, insere informações nas regiões onde originalmente não existem dados. Isso pode ser

observado na Figura 34(b), onde é mostrada a região correspondente a da imagem mostrada na Figura 34(a), agora obtida a partir do MDE/laser. Na Figura 34(b) é possível verificar que o processo de interpolação introduziu informações na região onde não existiam dados na superfície original, degradando a acurácia dos limites dos contornos dos telhados de edifícios ilustrados nesse exemplo.

A seguir são apresentadas as projeções na imagem aérea dos contornos obtidos a partir da imagem altimétrica do MDE/laser representando os telhados dos edifícios avaliados nos experimentos realizados. Estas figuras mostram que, em geral, os contornos de telhados provenientes do MDE/laser não se sobrepõem de forma acurada com os contornos dos respectivos edifícios apresentados na imagem aérea.



Figura 35: Projeção na imagem aérea do contorno obtido a partir do MDE/laser representado o telhado do edifício avaliado no experimento 1.



Figura 36: Projeção na imagem aérea do contorno obtido a partir do MDE/laser representado o telhado do edifício avaliado no experimento 2.



Figura 37: Projeções na imagem aérea dos contornos obtidos a partir do MDE/laser representado os telhados dos edifícios avaliados no experimento 3.

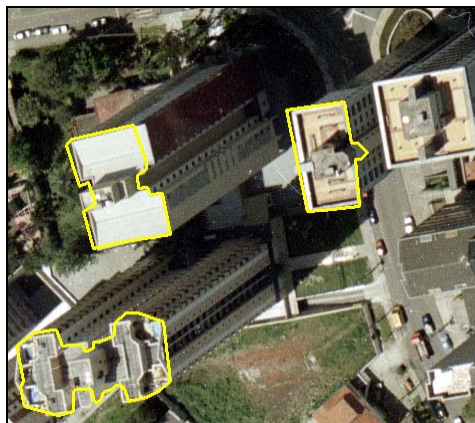


Figura 38: Projeções na imagem aérea dos contornos obtidos a partir do MDE/laser representado os telhados dos edifícios avaliados no experimento 4.



Figura 39: Projeções na imagem aérea dos contornos obtidos a partir do MDE/laser representado os telhados dos edifícios avaliados no experimento 5.

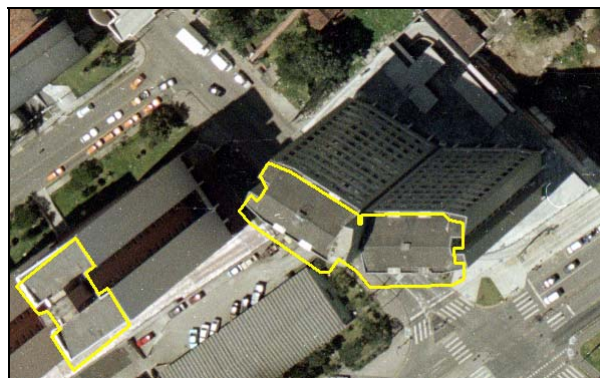


Figura 40: Projeções na imagem aérea dos contornos obtidos a partir do MDE/laser representado os telhados dos edifícios avaliados no experimento 6.

O segundo fator que interfere na qualidade (principalmente na área e no perímetro) de um contorno de sombra obtido pelo método proposto neste trabalho está relacionado ao valor de altura tomada para cada edifício. Na delimitação do contorno do telhado de um edifício, a altura do mesmo é calculada em função da diferença entre a altitude média do telhado, estimada com base em alguns valores de brilho observados sobre o telhado, e da altitude média do plano médio da via adjacente ao edifício.

A imagem altimétrica obtida com base no MDE, a partir da qual são obtidos os contornos dos telhados e as altitudes médias dos edifícios, é afetada pelos erros de interpolação do MDE, que são propagados para a imagem altimétrica no procedimento de transformação descrito na Seção 3.3.1. No referido procedimento, os valores de brilho da imagem são calculados em função das altitudes dos pontos da superfície do MDE, através da Equação 82, desprezando-se a parte decimal do resultado. Isso implica em dizer que a altura estimada para um edifício é sempre um valor aproximado. Em termos práticos, isso significa que se o valor médio de altura de um edifício for maior que o valor real, o polígono de sombra predito possuirá uma área maior que a sombra real projetada pelo edifício sobre a via (sombra de referência) e vice-versa.

O terceiro fator que influencia a qualidade de uma sombra predita é a acurácia da definição dos limites da via adjacente ao edifício considerado, uma vez que o polígono predito corresponde à parte da sombra do edifício que se projeta sobre a via. A delimitação das vias é realizada na imagem de intensidade de retorno do pulso laser registrada com base na imagem altimétrica obtida pela transformação do MDE/laser. Como as vias geralmente se apresentam bem definidas nessa imagem, os polígonos que as representam são, na maioria das vezes, bastante acurados.

O quarto fator que interfere na qualidade das sombras preditas com o uso do método proposto está relacionado à qualidade dos parâmetros de orientação exterior da imagem aérea. A explicação para isso é que eventuais obstruções perspectivas podem ocultar partes das sombras visíveis na imagem aérea, conforme foi dito no Capítulo 3 desta dissertação. Como as obstruções perspectivas são obtidas com base nos parâmetros de orientação exterior, a qualidade desses afeta diretamente a predição de ocorrências dessas obstruções e, conseqüentemente, afeta a qualidade das sombras preditas que possuem partes ocultas por obstruções perspectivas.

O último fator que interfere na qualidade das sombras preditas está relacionado à posição (orientação) do Sol, que é estimada com base no instante (hora local) de tomada da imagem, uma vez que a projeção das sombras depende do azimute e da altura solar. O azimute solar interfere na orientação da projeção de sombra e a altura solar interfere na área total da sombra projetada.

Uma grande dificuldade encontrada neste trabalho é que não se dispunha do valor exato do instante de aquisição da imagem utilizada na avaliação experimental da metodologia, cujo valor é fundamental para a determinação da posição do Sol. Como a data de aquisição era conhecida (12 de Março de 2002), esse problema foi contornado fazendo-se uma estimativa da hora local de aquisição da imagem testada (a partir de valores aproximados para o azimute solar e de altura de alguns edifícios) e chegou-se a conclusão de que a imagem aérea utilizada nos experimentos foi adquirida entre as 13h40min e 13h50min locais. Dessa forma, foi utilizado o valor médio (13h45min) como hora local de tomada da imagem. Mesmo com esse problema, os resultados obtidos na avaliação experimental se mostraram bons, mas poderiam ter sido melhores se fosse conhecido o valor exato do instante de imageamento.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

Considerando-se as atividades desenvolvidas no decorrer deste trabalho, bem como os resultados obtidos pela avaliação experimental da metodologia desenvolvida, pode-se concluir que os objetivos do trabalho foram alcançados. A metodologia desenvolvida visa determinar obstruções causadas pela projeção de sombras de edifícios sobre vias urbanas em cenas de imagens aéreas de alta-resolução. No total, foram realizados seis experimentos com dados reais de MDE derivados de dados de varredura a laser e imagem aérea de alta-resolução, com diferentes níveis de complexidade, nos quais o método proposto apresentou bom desempenho, conseguindo obter polígonos representando as sombras projetadas pelos edifícios sobre suas vias adjacentes bastante próximos da realidade apresentada na imagem aérea. Os principais fatores que afetaram a qualidade dos resultados foram apresentados na Seção 4.4. Apresenta-se a seguir um sumário das principais características e conclusões relacionadas com cada experimento realizado.

O experimento 1 mostra uma sombra produzida por um edifício se projetando sobre uma via adjacente a ele. O resultado obtido pelo uso do método foi satisfatório, uma vez que foi predito um polígono representando a sombra projetada pelo edifício sobre a via bastante próximo da realidade. A qualidade do resultado foi influenciada principalmente pelo contorno aproximado do telhado do edifício extraído com base no MDE/laser, cuja projeção na imagem aérea é mostrada na Figura 35.

O experimento 2 é similar ao experimento 1, uma vez que mostra a sombra projetada por um edifício sobre uma via adjacente a ele. Nesse caso, o método obteve um polígono de sombra que representa apenas parte da sombra total produzida pelo edifício. A qualidade final do resultado foi influenciada principalmente pela acurácia obtida na delimitação do contorno do telhado do edifício a partir do MDE/laser. A projeção desse contorno na imagem aérea pode ser visto na Figura 36, sendo bastante diferente do contorno real visto nessa mesma imagem.

No experimento 3 são simultaneamente preditas as sombras projetadas por dois edifícios sobre uma mesma via. Os polígonos de sombra obtidos pelo método nesse caso possuem áreas cerca de 50% maiores que as partes das sombras projetadas sobre a via. Provavelmente, a qualidade dos polígonos finais foi afetada pelo valor de altura tomado para cada edifício, uma vez que nesse experimento os contornos obtidos a partir do MDE/laser representando os telhados dos edifícios foram bem próximos aos contornos reais apresentados na imagem aérea. A projeção desses contornos nessa imagem é apresentada pela Figura 37.

O experimento 4 apresenta uma situação em que a projeção perspectiva de um edifício está obstruindo partes das sombras projetadas por outros dois edifícios sobre uma via. Para o primeiro edifício considerado nesse experimento, o método conseguiu obter um polígono bastante próximo da realidade apresentada na imagem aérea, inclusive no que diz respeito à área afetada pela sombra. Nesse caso o contorno de telhado extraído a partir do MDE/laser foi bem próximo do contorno real apresentado na imagem aérea, o que contribuiu para obter um bom resultado. Entretanto, para o segundo edifício considerado no experimento 3, o método obteve um polígono representando menos de 50% da sombra projetada pelo edifício sobre a via. Esse fato pode ser atribuído mais uma vez à qualidade do contorno do telhado obtido a partir do MDE/laser, que difere consideravelmente do contorno apresentado na imagem aérea. Em se tratando do edifício que obstrui perspectivamente as sombras produzidas pelos outros dois edifícios avaliados nesse experimento, seu contorno de telhado obtido a partir do MDE/laser é bastante próximo do contorno real visto a partir da imagem aérea, interferindo pouco na qualidade do resultado final. As projeções dos contornos desses telhados na imagem aérea são mostradas na Figura 38.

Os experimentos 5 e 6 foram similares ao experimento 4. Em ambos os casos, existe uma projeção perspectiva de um edifício obstruindo parte da sombra produzida por outro edifício. No experimento 5 foi predito um polígono representando a sombra projetada pelo edifício bem próximo à realidade apresentada na imagem aérea. O principal fator que interferiu na qualidade do resultado final foram os contornos extraídos a partir do MDE/laser representando os telhados dos edifícios avaliados nesse experimento. A projeção desses contornos na imagem aérea é apresentada na Figura 39.

Em se tratando do experimento 6, também foi obtido um bom resultado na predição da sombra projetada pelo edifício sobre a via. No caso desse experimento, a exatidão dos contornos obtidos a partir do MDE/laser representando os telhados interferiu pouco na

qualidade do resultado final, uma vez que são bem próximos aos contornos reais apresentados na imagem aérea. A projeção desses contornos nesta imagem é mostrada na Figura 40.

De maneira geral, os resultados alcançados nos experimentos realizados evidenciam a potencialidade do método e o qualificam para ser utilizado para a obtenção de elementos contextuais de sombra de edifícios, para futuras aplicações em processos de análise de imagem de alto nível, como a modelagem contextual referente a obstruções provocadas pela projeção de sombras de edifícios sobre vias urbanas. A modelagem contextual obtida através dos elementos fornecidos por essa metodologia poderá ser aplicada, por exemplo, em novos métodos para a extração automática de edifícios e da malha viária em ambientes urbanos complexos.

5.2 *Recomendações para trabalhos futuros*

Um dos objetivos em trabalhos futuros será o uso das informações fornecidas por esta metodologia em processos automáticos de análise de imagem. Desse modo, esforços deverão ser feitos no sentido de automatizar algumas tarefas relacionadas com o método que atualmente são realizadas pelo operador humano, como por exemplo, a extração direta no MDE/laser dos limites de vias urbanas e dos contornos dos telhados dos edifícios, de modo a tornar o método proposto totalmente automático. Outra solução a ser futuramente analisada será a utilização de algum método para extrair automaticamente os limites das vias urbanas a partir da imagem de intensidade de retorno do pulso laser (que é atualmente empregada na extração manual dos limites das vias), sendo esses limites de vias necessários aos métodos de predição de sombras e obstruções perspectivas de edifícios. De modo geral, algumas sugestões para trabalhos a serem realizados futuramente são:

- Automatizar as tarefas necessárias ao método que dependem da intervenção do operador humano, de modo a torná-lo completamente automático;
- Realizar um estudo aprofundado, de modo a quantificar os fatores que interferem na qualidade dos resultados fornecidos pela metodologia proposta neste trabalho;
- Utilizar algoritmos de processamento de imagem para refinar os resultados obtidos pela metodologia proposta;

- Utilizar futuramente os elementos de contexto fornecidos pela metodologia em processos automáticos de análise de imagem, como por exemplo, a aplicação de informação contextual modelada a partir desses elementos em metodologias para a extração automática de edifícios e da malha viária em ambientes urbanos complexos.

6 REFERÊNCIAS

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

BAUMGARTNER, A. *et al.* Automatic road extraction based on multi-scale, grouping, and context. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. v. 66, n. 7, p. 777-785, 1999.

DAL POZ, A. P. Um modelo fotogramétrico inverso: Aplicações na Cartografia. **Revista Brasileira de Engenharia e Ciências Aplicadas**, São Paulo, v. 4, p. 98-116, 1998.

DALMOLIN, Q.; SANTOS, D. R. **Sistema Laserscanner**: conceitos e princípios de funcionamento. Curitiba: Editora UFPR, 2004, 97 p.

ECKSTEIN, W.; STEGER, C. Fusion of digital terrain models and texture for object extraction. In: Second International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, 1996, Michigan – EUA. Proceedings... Michigan – EUA, p. 1-10.

FAZAN, A. J.; DAL POZ, A. P.; GALVANIN, E. A. S. Extração de obstruções perspectivas de edifícios ao longo de vias urbanas. **Revista Pesquisa em Geociências**, Porto Alegre, 2006.

GALO, M. **Calibração e aplicação de câmaras digitais**. 1993. 151 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1993.

GEMAEL, C. **Formulário e tabelas de Astronomia de campo e Geodésia**. Curitiba, 1974.

GEMAEL, C. **Introdução ao ajustamento de observações**: aplicações geodésicas. Curitiba: Editora UFPR, 1994, 319 p.

GWINNER, K.; SCHAAL, M. A case study on the influence of shadows and shading on multispectral airborne imaging data. In: Third International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, 1997, Copenhagen – Denmark. **Proceedings...** Copenhagen – Denmark.

HINZ, S. *et al.* Road extraction focussing on urban areas. In: Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images, 2001, Rotterdam. **Proceedings...** Rotterdam, p. 255-265.

HINZ, S.; BAUMGARTNER, A. Road extraction in urban areas supported by context objects. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 33, 2000, Amsterdã. **Proceedings...** Amsterdã, p. 163-168.

HINZ, S.; BAUMGARTNER, A. Urban road net extraction integrating internal evaluation models. In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Science, 2002, Graz. **Proceedings...** Graz, v. 1, p. 163-168.

IBGE. Resolução nº 23, de 21 de Fevereiro de 1989. Altera o Apêndice II da R. PR-22/83. **Parâmetros para Transformação de Sistemas Geodésicos**, Rio de Janeiro, p. 2-4, Fev. 1984.

KRAUS, K. **Photogrammetry**: fundamentals and standard processes. Bonn: Dümmler, 1993, 397 p.

LI, Y.; SASAGAWA, T.; GONG, P. A system of the shadow detection and shadow removal for high resolution city aerial photo. In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. 35 (B3), 2004, Istambul. **Proceedings...** Istambul, p. 802-807.

LUGNANI, J. B. **Introdução à fototriangulação**. Curitiba: Imprensa da Universidade Federal do Paraná, 1987, 134 p.

MADHAVAN, B. B. *et al.* Automatic extraction of shadow regions in high-resolution ADS40 images - By robust approach of feature spaces analysis. In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. 35 (B3), 2004, Istambul. **Proceedings...** Istambul, p. 808-810.

MASSALABI, A.; HE, D. -C.; BÉNIÉ et ÉRIC BEAUDRY, G. B. Restitution of information under shadow in remote sensing high space resolution images: Application to IKONOS data of Sherbrooke City. In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. 35 (B3), 2004, Istambul. **Proceedings...** Istambul, p. 173-178.

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

MUELLER, I. I. **Spherical and practical Astronomy**: as applied to Geodesy. 2ª ed. New York: Frederick Ungar, 1977. 615 p.

PRICE, K. Urban street grid description and verification. In: IEEE Workshop on Computer Vision, 2000, Palm Springs. **Proceedings...** Palm Springs, p. 148-154.

ROS, G. A. **Visualização 3D de uma imagem digital**. 2001. 84 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2001.

SALVADOR, E.; CAVALLARO, A.; EBRAHIMI, T. Shadow identification and classification using invariant color models. In: IEEE Signal Processing Society International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2001, Salt Lake City - EUA. Proceedings... Salt Lake City - EUA, p. 1545-1548.

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

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

YANG, Q.; SNYDER, J. P.; TOBLER, W. R. **Map projection transformations**: principles and applications. Hong Kong: Taylor and Francis, 2000, 367 p.

7 BIBLIOGRAFIAS

ABDULLATIF, A.; BETHEL, J. Heuristic filtering and 3D feature extraction from LIDAR Data. **ISPRS Symposium Photogrammetric Computer Vision**, 2002, Graz – Austria, p. 29-34.

BALTSAVIAS, E. P. Airborne laser scanning: basic relations and formulas. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 54, n. 2-3, p. 199-214, jul. 1999.

DAL POZ, A. P. Semi-automatic road extraction based on edge and correlation analysis. In: *ASPRS 2001 Annual Conference*, 2001b, Saint Louis-EUA. **Proceedings...** Saint Louis-EUA, CD-ROM.

DAL POZ, A. P. Semi-automatic road extraction methods by dynamic programming optimization and a cooperative road follower. **The Photogrammetric Journal of Finland**, Finlândia, v. 17, n. 2, p. 13-22, 2001.

DAL POZ, A. P.; AGOURIS, P. Georeferenced road extraction and formulation of hypotheses for new road segments. In: *SPIE'S 14th Annual International Symposium on Aerospace/Defense Sensing, Simulation, and Controls – Conference Automated Geo-Spatial Image and Data Exploitation*, 2000, Orlando-FL. **Proceedings...** Orlando-FL, p. 56-65.

DAL POZ, A. P.; SILVA, M. A. O. Active testing and edge analysis for road centreline extraction. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2002, Graz. **Proceedings...** Graz, p. 44-47.

ELAKSHER, A. F.; BETHEL, J. Reconstructing 3D buildings from LIDAR data. **ISPRS Symposium Photogrammetric Computer Vision**, 2002, Graz – Austria, p. 102-107.

GEMAN, D.; JEDYNAK, B. An active testing model for tracking roads in satellite images. **IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence**. v. 18, n. 1, p. 1-14, 1996.

GRUEN, A.; LI, H. Semi-automatic linear feature extraction by dynamic programming and LSB-Snakes. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. v. 63, n. 8, p. 985-995, 1997.

HAALA, N.; WALTER, V. Automatic classification of urban environments for database revision using LIDAR and color aerial imagery. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1999, Valladolid. **Proceedings...** Valladolid, p. 76-82.

JAIN, R.; KASTURI, R.; SCHUNCK, B. G. **Machine vision**. New York, MIT Press and McGraw-Hill, Inc., 1995, 549 p.

LAPTEV, I. *et al.* Automatic extraction of roads from aerial images based on scale space and snakes. **Machine Vision and Applications**. v. 12, n. 1, p. 22-31, 2000.

MCKEOWN, D. M.; DENLINGER, J. L. Cooperative methods for road tracking in aerial imagery. *Computer Vision and Pattern Recognition*, 1988, Ann Arbor – MI. **Proceedings...** Ann Arbor – MI, p. 662-672.

POLIDORIO, A. M. *et al.* Detecção automática de sombras e nuvens em imagens CBERS e Landsat 7 ETM. In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2005, Goiânia. **Anais...** Goiânia, p. 4233-4240.

TRINDER, J. C.; MAULIK, U.; BANDYOPADHYAY, S. Semi-automated feature extraction using simulated annealing. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 33, 2000, Amsterdã. **Proceedings...** Amsterdã, p. 905-911.

VOSSelman, G.; KNECHT, J. Road tracing by profile matching and Kalman filtering. In: *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images*, 1995. **Proceedings...** p. 265-274.

WANG, Y.; TRINDER, J. Automatic road network extraction by hierarchical grouping. In: *ASPRS 2000 Annual Conference*, 2000, Washington. **Proceedings...** Washington, CD-ROM.

WIEDMANN, C.; HINZ, S. Automatic extraction and evaluation of road networks from satellite imagery. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 32, 1999, Munique. **Proceedings...** Munique, p. 95-100.

ZHAN, Q.; SHI, W.; XIAO, Y. Quantitative analysis of shadow effects in high-resolution images of urban areas. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. v. 36, 2005, Tempe – EUA. **Proceedings...** Tempe – EUA.