

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A Fotogrametria é uma sub-área das Ciências Geodésicas e abrange grande parte de todo o processo de compilação de mapas. Atualmente, a Fotogrametria é dividida em: analógica, analítica e digital. Em tempos remotos (fase analógica), a compilação de mapas era realizada de forma árdua e morosa, e necessitava de operadores devidamente treinados.

Com o desenvolvimento computacional, a Fotogrametria ganhou impulso e agregou suas etapas, tais como a orientação interior e exterior, a modelos matemáticos (como por exemplo, a equação de colinearidade), para projetar analiticamente os pontos contidos no espaço-imagem para o espaço-objeto e vice-versa.

O rápido avanço da tecnologia projetou a Fotogrametria na era digital e possibilitou a cooptação com outras áreas do conhecimento, tais como: o Processamento Digital de Imagens (PDI), a Inteligência Artificial e a Visão Computacional. A integração de conhecimentos tornou possível a automação de algumas etapas fotogramétricas, no qual destacam-se: orientações interior e relativa, fototriangulação, a geração de MDT (Modelo Digital do Terreno) e a geração de ortofotos digitais.

No entanto, a etapa da resseção espacial de imagens ainda não possui automação completa, e aponta para um grande número de problemas a serem solucionados pela comunidade científica. Por isso, a automação da resseção espacial de imagens é de grande interesse para a comunidade fotogramétrica, principalmente porque visa diminuir o esforço operacional e restringir a intervenção direta do homem no processo de mapeamento. Além do que, apesar da automação dos processos anteriormente citados, a solução robusta ainda é objeto de pesquisa.

Do ponto de vista mais atual, a resseção espacial de imagens consiste na estimação dos parâmetros de orientação exterior da câmara e sua respectiva matriz

Variância Covariância (M.V.C.). Os parâmetros de orientação exterior da câmara são divididos em parâmetros de rotação (κ , φ , ω) e parâmetros de translação (X_0 , Y_0 , Z_0).

No processo de estimação dos parâmetros de orientação exterior de uma câmara, deve-se utilizar feições cartográficas (pontos, linhas ou curvas), correspondentes que se relacionam no espaço-imagem e no espaço-objeto. O estabelecimento automático de correlação entre feições cartográficas é um dos gargalos na automação da resseção espacial de imagens. A solução do problema de correlação é qualificado como “mal-condicionado”, isto é, não possui solução única devido a fatores numéricos e a complexidade da imagem, tal como as oclusões provocadas pela projeção de sombras e a própria projeção perspectiva da imagem.

A correlação entre feições homólogas é dividida basicamente em dois métodos, isto é, correlação baseada em áreas e correlação estrutural (relação entre feições retas). Muitos autores defendem o uso de feições retas nos processos de correlação, e apresentam vantagens, tais como (DAL POZ, 1996, p. 4):

- Feições retas apresentam-se em grande abundância em ambientes modificados pelo homem;
- Perenidade;
- A relação funcional entre as feições retas no espaço-imagem e objeto, não requer correlação ponto-a-ponto;
- Fácil extração em imagens digitais;
- Torna o processo de vetorização bastante simples; e
- Menor probabilidade de erros grosseiros no estabelecimento de suas correlações no espaço-objeto (ARTERO, 1999, p. 3).

Considerando as vantagens apresentadas acima, neste trabalho será empregado o uso de feições retas extraídas automaticamente em imagens digitais, adquiridas por câmaras não métricas (pequeno formato), e em imagens de intensidade, provenientes do sistema de varredura Laser. Por isso, será utilizado o processo de correlação estrutural, que estabelece relações geométricas entre as feições retas.

As relações geométricas entre as feições retas são realizadas por meio de estruturas de grafos definidos no espaço-imagem e no espaço-referência (projeção

das feições contidas no espaço-objeto para um espaço similar ao espaço-imagem). As feições retas extraídas automaticamente na imagem digital, após algumas transformações entre sistemas, fornecem fotocoordenadas no sistema fotogramétrico.

A imagem de intensidade utilizada neste trabalho é proveniente do sistema de varredura Laser. A técnica de varredura Laser fornece coordenadas tridimensionais sobre todos os pontos varridos na superfície física do terreno, e também nas elevações nele contidas (árvores e edificações). Os produtos gerados pelo sistema de varredura Laser são: um arquivo texto contendo dados das coordenadas tridimensionais (ENH) e valores de intensidade correspondentes a cada ponto varrido pelo sistema, bem como uma imagem de intensidade.

A imagem de intensidade apresenta as informações reflectivas dos objetos, captadas pelo sensor. Neste sentido, as feições retas extraídas na imagem de intensidade são definidas por coordenadas tridimensionais E, N e H ou X Y e Z, dependendo do sistema de referência adotado no trabalho.

A automação da resseção espacial de imagens exige a implementação de algoritmos para reconhecer automaticamente os objetos (características ou significados dos objetos) presentes na imagem. Este problema é demasiadamente complicado e tem agregado esforços de várias áreas do conhecimento.

A proposta deste trabalho, é implementar uma ferramenta automática para a resseção espacial de imagens digitais, onde serão integradas técnicas de PDI, Inteligência Artificial, Visão Computacional e Fotogrametria, aplicadas em imagens adquiridas por diferentes sensores (câmara digital e Laser). Para isto, foi desenvolvida uma metodologia para a construção automática de hipóteses de rodovias e/ou ruas em imagens digitais e de intensidade, uma vez que as hipóteses extraídas na imagem de intensidade serão utilizadas como apoio de campo para o processo de estimação dos parâmetros de orientação exterior das imagens digitais.

De acordo com o exposto acima, o estado da arte do problema da automação da resseção espacial de imagens será descrito com ênfase no uso de feições retas como primitiva para os processos de estabelecimento de correlação e apoio de campo para a resseção espacial de imagens.

1.2 O PROBLEMA DA AUTOMAÇÃO DA RESSEÇÃO ESPACIAL DE IMAGENS

Desde a década de 80, a comunidade científica deu início ao uso de feições retas e de formas livres (*free-form*), como apoio de campo para o processo de resseção espacial de imagens. (LUGNANI, 1981; BUCHANAN, 1992; ZIELINSKI, 1992; PETSÁ e PATIAS, 1994; FORKERT, 1996; ZALMASON, 2000, HABIB, 1999, entre outros).

Considerando as soluções manuais no estabelecimento das correlações para a determinação dos parâmetros de orientação exterior da câmara, MULAWA e MIKHAIL (1988), utilizaram feições retas como apoio de campo para determinar os parâmetros de orientação exterior da câmara, com uso de apenas 3 feições retas bem distribuídas ao longo da imagem, aplicadas a um modelo de equações de retas tridimensionais. Para cada dois pontos extraídos manualmente na imagem é formada uma feição reta e as correlações são determinadas manualmente pelo operador. A ferramenta fornecia os dados com precisão adequada, porém de forma totalmente manual.

Ainda no escopo de soluções manuais LUI, HUANG e FAUGERAS (1990), adaptaram para a solução do problema de resseção espacial de imagens, um algoritmo que estima o movimento de estruturas a partir de feições retas homólogas estabelecidas no espaço-imagem e no espaço-objeto. O processo é realizado em duas etapas, isto é, na primeira são calculados os parâmetros de rotação e na segunda são calculados os parâmetros de translação através de um modelo linear. A solução não é eficiente computacionalmente, pois os parâmetros são determinados em fases distintas.

HEUVEL (1997), desenvolveu um método com solução direta na determinação de parâmetros de orientação exterior da câmara. A metodologia demanda 2 conjuntos de feições retas paralelas e coplanares no espaço-objeto. O procedimento consiste em 2 passos, ou seja, o cálculo da distância entre o centro perspectivo da câmara e as feições retas, e a determinação dos parâmetros de orientação exterior. Neste método os pontos extremos de cada feição reta são coletados manualmente pelo operador, no entanto, a correlação entre as mesmas é realizada de forma semi-automática.

No transcorrer do tempo e com o avanço computacional, o estabelecimento das correlações passou do modo manual para o modo semi-automático, culminando com o estabelecimento de correlações automáticas, porém ainda com bastantes restrições. Desde então, a preocupação com a etapa da resseção espacial de imagens deixou de ser o desenvolvimento de modelos matemáticos e passou a ser combinações de técnicas e processos que agruparam várias ciências envolvidas com processos computacionais.

Neste contexto, DAL POZ e TOMMASELLI (1998; 1999), desenvolveram uma estratégia automática para determinar os parâmetros de orientação exterior da câmara, por meio de estabelecimento de correlações entre feições retas de agrupamentos homólogos, definida em 3 etapas, isto é, a inunção de rigidez, o cálculo da distância relacional normalizada (DRN), e o auto-diagnóstico, que se baseia no teste estatístico *data-snooping* aplicado ao método de estimação de parâmetros. A eficiência do método foi comprovada, mas é necessária uma boa definição geométrica do agrupamento de feições retas utilizadas no processo, além de estudos mais aprofundados para compreender o comportamento dos parâmetros estimados.

HABIB et al. (2000), combinaram dados provenientes de cartas, sistema de mapeamento móvel e Sistema de Informações Geográficas (SIG), com imagens aéreas para permitir a correlação feição-a-feição no espaço-imagem e no espaço-objeto. A desvantagem deste método é o processo manual na coleta das feições retas utilizadas como apoio de campo. Porém, apresenta resultados confiáveis na determinação dos parâmetros de orientação exterior da câmara.

Para SHAN (2001), a estimação dos parâmetros de orientação exterior da câmara, pode ser realizada com uso de um MDT e uma ortofoto digital atualizada da região. O procedimento proposto, extrai feições retas contidas no espaço-imagem e na ortofoto, e estabelece as correlações automaticamente, mediante informações do MDT. Os experimentos revelaram que a precisão dos parâmetros de orientação exterior da câmara depende da qualidade do MDT gerado, bem como da ortofoto utilizada como referência.

ZHANG (2004), desenvolveram uma metodologia para extração automática de feições retas (por exemplo, rios e rodovias), para a determinação dos parâmetros de orientação de imagens orbitais. As feições retas são extraídas automaticamente

na imagem digital e sua correlação determinada automaticamente por meio de algoritmos de correlação baseada em atributos. Os resultados obtidos apresentaram-se confiáveis, porém a falta de um apoio de campo com distribuição homogênea é uma das deficiências da metodologia desenvolvida.

Para CHEN et al. (2004), o uso de técnicas de correlação estrutural é uma possível solução para a automação eficiente da resseção espacial de imagens. O algoritmo de correlação é avaliado com uso de uma imagem de satélite de alta resolução e um mapa cadastral atualizado. Os polígonos existentes no mapa cadastral são utilizados como estruturas geométricas. Os resultados mostraram que, existe a possibilidade de desenvolvimento de um sistema autônomo, desde que os erros estabelecidos no processo de correlação sejam minimizados.

DALMOLIN et al. (2005), utilizaram feições retas extraídas automaticamente da imagem digital e imagem de intensidade, para o cálculo da resseção espacial da imagem. Entretanto, o estabelecimento das correlações é realizado manualmente pelo operador e os resultados apresentados mostraram que, a metodologia possui um grande potencial, comparado com a metodologia convencional por pontos, e os desvios-padrão dos parâmetros determinados dependem da eficiência do algoritmo de extração de feições retas e da resolução geométrica da imagem de intensidade e digital, além de apresentar a potencialidade na combinação entre imagens adquiridas por diferentes sensores.

O uso da imagem de intensidade tem apresentado sua potencialidade como informação para a construção de um banco de dados de apoio de campo, bem como a possibilidade de auxiliar no desenvolvimento de ferramentas automáticas para a resseção espacial de imagens. Uma vez que, cada ponto varrido no terreno fornece coordenadas tridimensionais, bem como o valor de intensidade desses pontos, e também possibilita a extração de pontos, linhas, curvas e formas livres em geral por meio de um algoritmo de extração das feições de interesse.

O interesse pelas feições retas é dado pelo fato que, os modelos matemáticos desenvolvidos não apresentam necessidade de correlação ponto-a-ponto, e possibilita o uso de agrupamentos bem definidos geometricamente, devido a sua estrutura complexa, quando comparada com as feições pontuais.

Uma outra vantagem do uso da imagem de intensidade é a restrição da coleta manual do apoio de campo, uma vez que os métodos anteriormente descritos não apresentavam em suas soluções.

Atualmente, existem dois caminhos para a determinação automática dos parâmetros de orientação exterior da câmara, ou seja, utilizar a tecnologia de integração GPS/Sistema de Medida Inercial/Câmara métrica, e/ou a automatização de todo o processo de resseção espacial de imagens via implementação de algoritmos robustos e eficientes.

A primeira opção é de alto custo e os resultados obtidos com a autonomia do sistema ainda não atingem a precisão requerida, mas possui um futuro bastante promissor. Outro aspecto é a prática inexequível de trabalhos de cunho científico, devido à falta de possibilidade de acesso às informações fornecidas pelo sistema inercial, que provêm da chamada “caixa preta”.

A segunda alternativa é mais viável financeiramente e envolve a adaptação e o desenvolvimento de heurísticas. No entanto, a automação do processo de resseção espacial de imagens exige algoritmos totalmente estruturados, bem como uma base de dados de apoio muito bem coletada e definida geometricamente. Por isso, o problema torna-se complexo, pois a implementação de algoritmos eficientes e robustos é um desafio que envolve a combinação de muitas técnicas de PDI, Visão Computacional, Inteligência Artificial e Fotogrametria, além de uma fundamentação matemática consistente.

Uma terceira alternativa seria o uso do sistema de integração GPS/Inercial de baixo custo (menos precisos), e câmara não métrica combinado com o desenvolvimento de uma ferramenta automática para determinação dos parâmetros de orientação exterior da câmara. De uma forma geral, a implementação de algoritmos e heurísticas para a solução do problema é irrefragável para o tema proposto.

O problema da automação da resseção espacial de imagens é de grande interesse à comunidade fotogramétrica em função das complexidades que envolvem o desenvolvimento de ferramentas automáticas. As soluções mais complexas advêm dos problemas de estabelecimento automático de correlação estrutural ou correspondência baseada em área, a implementação de algoritmos eficientes, robustos e sofisticados de extração de feições retas, bem como do reconhecimento

automático dos objetos presentes na imagem, além de uma base de dados de apoio de campo com agrupamentos geometricamente bem definidos e com constante atualização.

No entanto, o avanço tecnológico vem aprimorando e suprindo essas necessidades, possibilitando uma nova marcha para o tema de interesse deste trabalho, como por exemplo, a utilização de informações geradas pelo sistema de varredura Laser. A emergência do sistema de varredura Laser abriu novas expectativas em relação à construção de uma base de dados com constante atualização e boa definição geométrica das feições que poderão ser utilizadas como apoio de campo, além da possibilidade do reconhecimento automático das feições no espaço-objeto.

Neste contexto apresenta-se a motivação pelo tema proposto no que tange o reconhecimento automático dos objetos presentes na imagem. De forma que, o significado do objeto extraído em ambos os espaços possibilite melhores definições geométricas para o agrupamento que será utilizado no processo de estabelecimento de correlação.

Na literatura, encontra-se vários autores que desenvolveram procedimentos para reconhecimento semi-automático e automático de objetos presentes em imagens digitais. BAUMGARTNER et al. (1997), combinaram imagens de alta e baixa resolução delineando automaticamente linhas em imagens de resolução reduzida e usaram marcas no eixo das rodovias (zebras) como informações para verificação de hipóteses.

Em BAUMGARTNER et al. (1999), as informações contextuais (relação entre os objetos) foram utilizadas para verificar hipóteses geradas após a conexão entre os segmentos de rodovia. As hipóteses foram geradas considerando uma rede de vértices com atributos (distância da rede, distância ótima e distância entre os vértices) e calcularam um fator para cada hipótese gerada que relaciona potencialmente as hipóteses, fornecendo-lhes pesos. Nesta metodologia utilizou-se uma versão da imagem com resolução reduzida apenas para delinear grosseiramente as rodovias.

LAPTEV et al. (2000), utilizaram imagens de alta resolução para a extração automática de rodovias. A largura da rodovia é uma informação dada a priori para eliminar objetos irrelevantes no processo. São geradas hipóteses de objetos que provavelmente pertencem à rodovia, por meio de atributos geométricos (paralelismo,

distância etc) de retas extraídas. Para a verificação das hipóteses geradas, é utilizada a informação radiométrica da imagem, considerando a homogeneidade dos objetos semânticos. Um dos grandes problemas encontrados advém das oclusões causadas por sombras, edificações e veículos.

HINZ e BAUMGARTNER (2000), modelaram rodovias urbanas baseando-se na relação de contexto de objetos, ou seja, relação entre rodovia e carros, sombras e edificações. A presença de carros e edificações adjacentes é um grande indicador de objetos rodovia. Em PRICE (2000), múltiplas imagens de alta resolução e MNE (Modelo Numérico de Elevações) foram combinadas para extrair rodovias em cenas urbanas. Após um início manual o processo é expandido e o conhecimento contextual é utilizado na verificação de hipóteses.

ZHANG et al. (2001), desenvolveram um modelo geral que, a partir de um modelo específico deriva informações do segmento de interesse. Este modelo fornece informação bidimensional da localização e dos atributos da rodovia. Uma classificação não-supervisionada separa a imagem RGB em diferentes espaços de cores e a análise do MNE é utilizada para separar os objetos na imagem, por exemplo, rodovias de edificações. Posteriormente, as hipóteses são geradas e verificadas.

HINZ et al. (2001) utilizaram o MNE para fornecer posição e direção de uma rodovia em potencial e combinaram objetos contextuais para a verificação mais eficiente das hipóteses geradas. HINZ e BAUMGARTNER (2002), utilizaram a influência e relações dos objetos de fundo (carros, árvores, casas, sombras etc) com o objeto rodovia em diferentes escalas para eliminar falsas hipóteses e distúrbios isolados, para facilitar a verificação de hipóteses.

DAL POZ (2003), desenvolveu uma metodologia para o reconhecimento e delineamento automático de segmentos de rodovia com base num conjunto de quatro objetos semânticos e num outro conjunto de regras de conexão entre os mesmos. ZHANG (2004), considerou a integração da informação obtida por meio de SIG (Sistema de Informação Geográfica), com dados de imagens coloridas como estratégia para extração de rodovias. Utilizou também a análise do MNE e das marcas no eixo da rodovia (zebras) para a verificação e validação de hipóteses.

Como pode ser notada, a reconstrução automática de objetos rodovia em imagens digitais, exige a integração de vários dados de informações, além de relações contextuais e imagens em diferentes níveis e escalas.

Todo este conjunto de informações vem possibilitando melhoras no desenvolvimento de algoritmos que complementam todo o processo de automação da resseção espacial de imagens, inclusive apontando para uma significativa diminuição da intervenção direta do operador com a máquina. Isto é factível diante da possibilidade de combinação de técnicas, dados e heurísticas que tem sido implementada pela comunidade científica no interstício dos acontecimentos.

Recentemente, imagens de intensidade provenientes do sistema de varredura Laser integradas com imagens digitais, adquiridas com câmaras não métricas, estão sendo utilizadas para auxiliar na determinação de parâmetros de orientação exterior de imagens. Os resultados apresentados por vários autores mostram a potencialidade apresentada pela integração dos dados provenientes de diferentes sensores, bem como a versatilidade do uso de feições retas como apoio de campo derivadas do sistema de varredura Laser.

De acordo com os aspectos mencionados, detecta-se a motivação na acepção da automação do processo de resseção espacial de imagens, com o uso de dados gerados pelo sistema de varredura Laser combinado com imagens digitais, possibilitando uma abordagem totalmente automática. Por isso, torna-se incontestável a pesquisa sobre o tema exposto.

1.3 OBJETIVOS

Muitos dos métodos apresentados na literatura curvam-se à necessidade de uma base de dados vetorialmente definida, por meio de cartas digitalizadas, SIG, ou até mesmo pontos tridimensionais obtidos por tecnologia GPS, e outros tipos de levantamentos. O fato da coleta manual das feições retas ou pontuais, os métodos de estabelecimento de correlação feição-a-feição, utilizados pela grande maioria das metodologias apresentadas na literatura são importantes. Porém, atualmente o objetivo é automatizar a coleta dos dados e desenvolver metodologias que utilizam figuras geométricas mais complexas, possibilitando maior diversidade de relações topológicas.

Portanto, os objetivos deste trabalho são divididos em objetivo geral e objetivos específicos.

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver uma ferramenta automática para o processo de resseção espacial de imagens e combinar dados provenientes de diferentes sensores, bem como implementar heurísticas para reconhecer automaticamente os objetos rodovia presentes na imagem digital e na imagem de intensidade para serem utilizados como observações e apoio de campo.

1.3.2 Objetivos específicos

Em vista do objetivo geral do trabalho, os objetivos específicos são os que seguem:

- Integrar técnicas de PDI para a classificação automática de objetos rodovia nas imagens digitais e de intensidade;
- Implementar regras de topologia geométrica e apresentar uma nova regra de topologia radiométrica na classificação de objetos rodovia, para a geração de hipóteses de rodovia em imagens digitais;
- Desenvolver um novo filtro para identificar os objetos rodovia;
- Desenvolver uma nova estrutura em árvore de busca;
- Implementar a janela de restrição baseada na figura plana;
- Desenvolver uma nova métrica para a solução do problema de correlação estrutural;
- Implementar o auto-diagnóstico baseado na técnica estatística *data-snooping* aplicado ao filtro de Kalman iterativo e estendido;
- Verificar a eficiência e robustez do método, realizar experimentos com dados simulados e reais, além de discutir os resultados obtidos.

1.4 CONTRIBUIÇÃO DA TESE

Como contribuição imediata para a comunidade fotogramétrica pode-se considerar o desenvolvimento de uma ferramenta automática para a determinação de parâmetros de orientação exterior da câmara. Este aspecto caminha para a diminuição do esforço operacional e também para a restrição do operador no processo de mapeamento.

Com o uso de hipóteses de rodovias extraídas automaticamente e reconhecidas em ambos os espaços imagem e objeto, apresenta um quadro no avanço da automação da resseção espacial em relação aos métodos desenvolvidos anteriormente, no que tange a automação completa da ferramenta principalmente no que diz respeito à coleta do apoio de campo totalmente automática.

As contribuições mais específicas do trabalho estão em relação ao desenvolvimento de uma nova métrica para a solução do problema de correlação estrutural, ao desenvolvimento de um novo filtro de detecção de objetos de baixa intensidade, aplicado em imagens de intensidade e ao uso de apoio de campo, baseado na construção automática de hipóteses de rodovias extraídas em imagens digitais e na imagem de intensidade.

É importante ressaltar que apresentar soluções automáticas para as etapas da Fotogrametria vincula essa ciência a um quadro do avanço tecnológico com perspectivas voltadas ao desenvolvimento do ser humano com vãos para a intuição (pensamento), tirando-o da condição de operário e lançando-o para um futuro intelectual mais promissor.

A idealização deste trabalho apresenta uma condição utópica para o presente momento em que se encontra a situação dos países subdesenvolvidos, mas que num futuro próximo terá espaço para a sua realização plena.

O uso de uma base de dados completa e em constante atualização torna ainda mais difícil a prática do presente trabalho, no entanto, o vislumbre de um banco de dados de imagens de varredura Laser recobrimdo todo o território nacional, condicionará a coleta de pontos de apoio de campo à resolução de pontos medidos pelo sistema de varredura Laser, tendo-se uma grande quantidade de apoio de campo disponível para o processo de resseção espacial de imagens digitais.

1.5 ESTRUTURA E CONTEÚDO DO TRABALHO

No primeiro capítulo foi introduzido o problema a ser tratado, a motivação de estudo do problema e seus objetivos. No segundo capítulo, é revisada a fundamentação teórica que abrange todo o conteúdo metodológico tratado no trabalho. No terceiro capítulo são apresentadas as principais contribuições deste trabalho, bem como a metodologia proposta e desenvolvida para sua execução, trazendo o desenvolvimento teórico e matemático adequado para a execução dos experimentos e posterior análise dos resultados.

No quarto capítulo são mostrados os experimentos realizados com dados simulados e dados reais. Por meio dos dados simulados, é analisada a eficiência do método de correlação proposto, sua capacidade em identificar falsas e verdadeiras correlações, sua capacidade de descartar falsas correlações e sua potencialidade na estimação dos parâmetros de orientação exterior de imagens. Por meio dos dados reais, são considerados os testes executados com a automação completa do sistema desenvolvido, bem como investigado sua eficiência em situações reais. Os resultados obtidos são analisados e o potencial do método é avaliado.

Finalmente, o quinto capítulo apresenta as principais conclusões e sugestões para trabalhos futuros, de acordo com as análises realizadas.