

4

Análise do desempenho

4.1

Descrição dos dados

4.1.1

Imagens de satélite Ikonos

Foi utilizado nessa dissertação um par estéreo de imagens pancromáticas produzidas pelo satélite Ikonos-2 “European Space Imaging” em janeiro de 2007, cobrindo uma área do bairro do Anil em Jacarepaguá na cidade do Rio de Janeiro de 12km por 10km :

- Coordenadas geográficas: latitude: entre -22.90° e -22.99°
longitude: entre -43.31° e -43.43°
- Correção: “Level 1B Standard Geometrically Corrected” (Imagem de nível 1B com correção geométrica padrão)
- Resolução radiométrica: 11 bits/pixel
- Dimensões: Imagem 1: 12116×10104 pixels
Imagem 2: 11684×10100 pixels
- Resolução espacial: 1 metro/pixel

A figura 4.1 mostra uma das imagens do par estereoscópico estudado, cobrindo 12×10 quilômetros, praticamente sem nuvem. Na figura 4.2 foi feito um zoom em uma parte para melhor se visualizarem os detalhes da imagem agora pixelada de propósito. É possível distinguir todas as construções, as estradas, e mesmo os carros, mas com baixa exatidão.

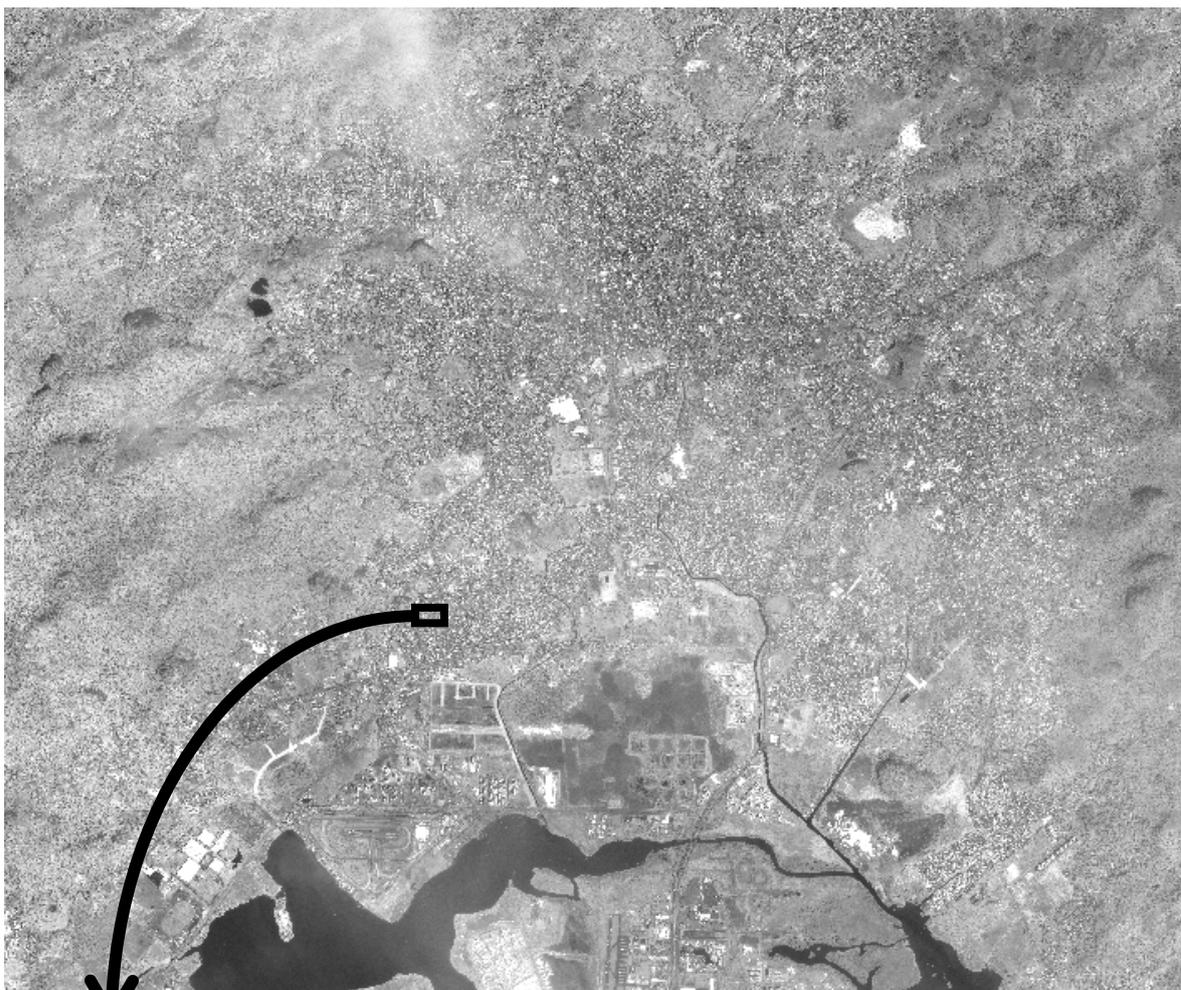


Figura 4.1: uma das imagens IKONOS da região do Rio de Janeiro utilizadas na análise

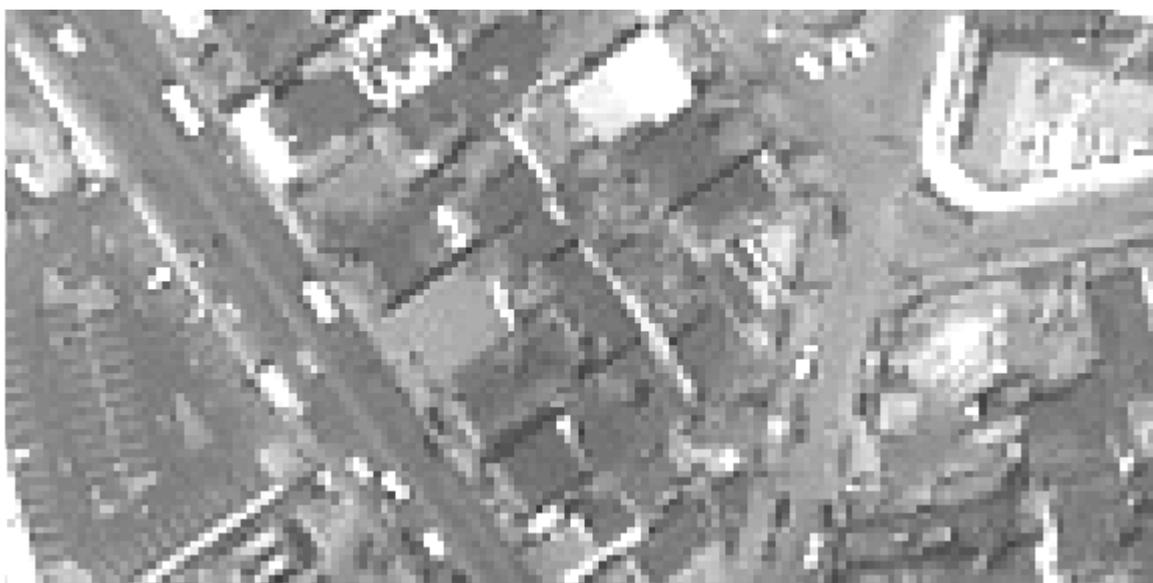


Figura 4.2: Zoom em uma das partes da imagem – resolução de 1m/pixel

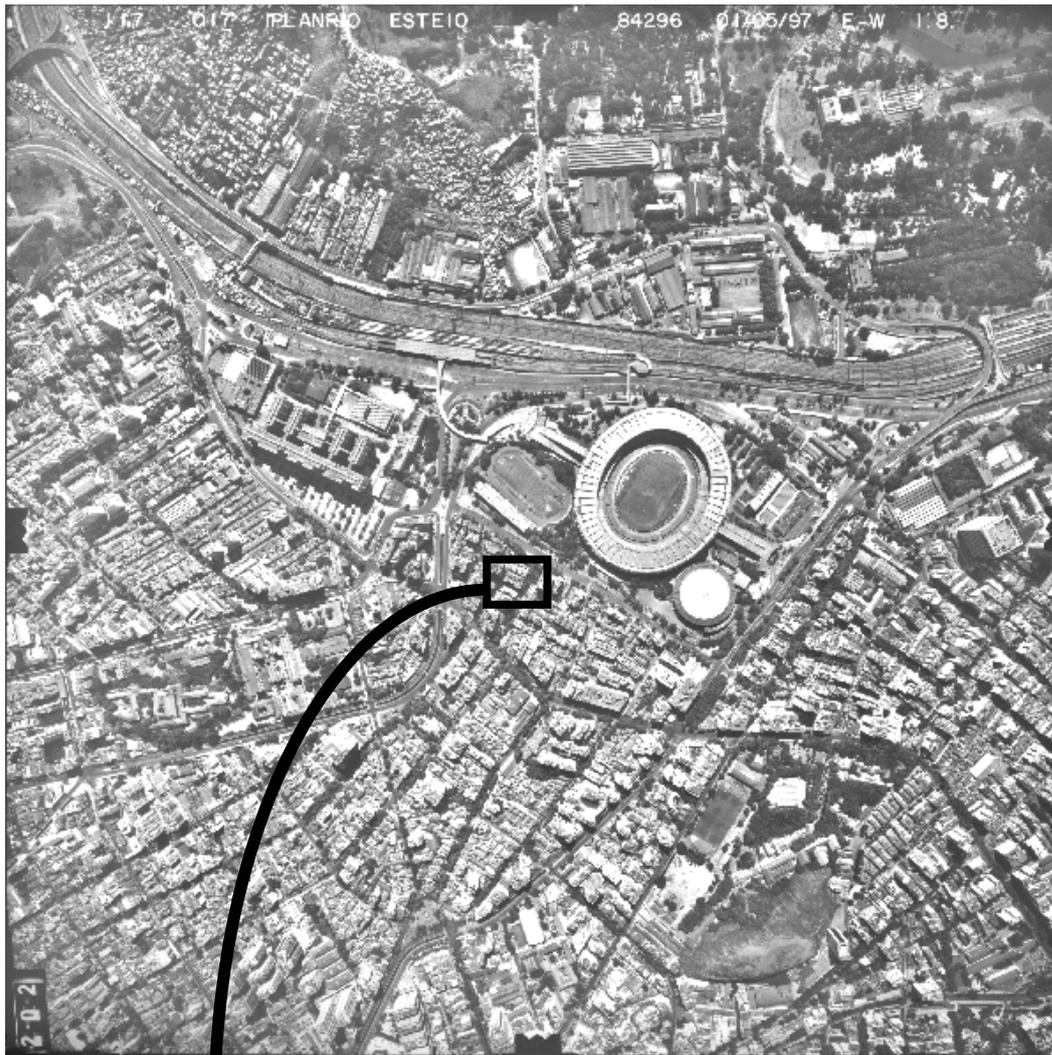


Figura 4.3 : uma das imagens aéreas da região do Rio de Janeiro utilizada nos experimentos



Figura 4.4: Zoom na imagem aérea da figura 4.3

4.1.3

Seleção de sub-regiões nas imagens

Para testar o desempenho do método proposto em diversas situações, quatro tipos de regiões foram selecionados nas imagens aérea e de satélite :

- 1) Floresta: caracterizada pela dominância de árvores altas e densas,
- 2) Rural: dominada por gramíneas e savana,
- 3) Residencial: com a predominância de feições construídas pelo homem, especialmente unidades com apenas 1 ou 2 andares,
- 4) Prédios altos: regiões urbanas com prédios que possuem vários andares.

Assim, 12 pares de sub-imagens de tamanho 500×500 pixels foram selecionados para esta avaliação. Foi escolhido um par de sub-imagem para cada tipo 1, 2, 3. Estas são denotadas por A1 a A3 e S1 a S3 respectivamente para imagens aéreas e de satélite; e foram escolhidas 3 pares para o tipo 4, aérea de e de satélite, denotadas por A4a a A4c e S4a a S4c. Tem-se desta forma um total de 12 pares de imagens, conforme mostra a tabela 4.1 abaixo. As coordenadas exatas dessas sub-imagens estão detalhadas no anexo C.

4.2

Medida do desempenho

Nesta seção definem-se as medidas e critérios de desempenho a serem aplicados na avaliação do método híbrido.

4.2.1

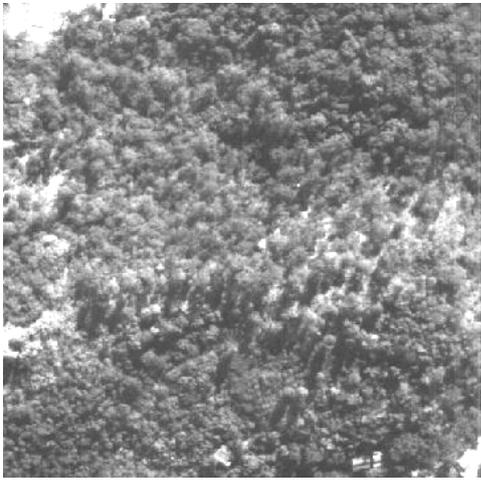
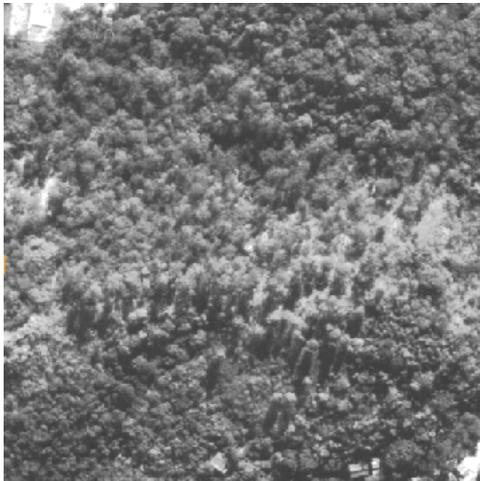
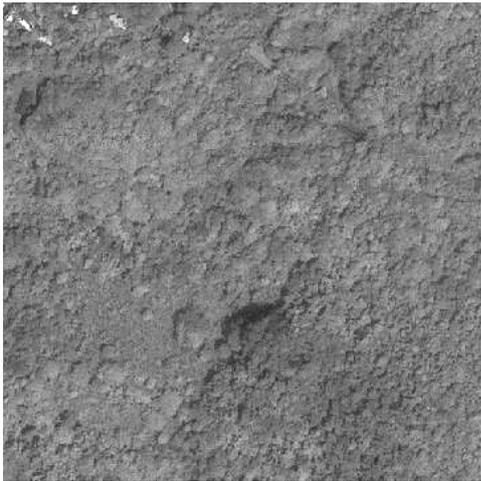
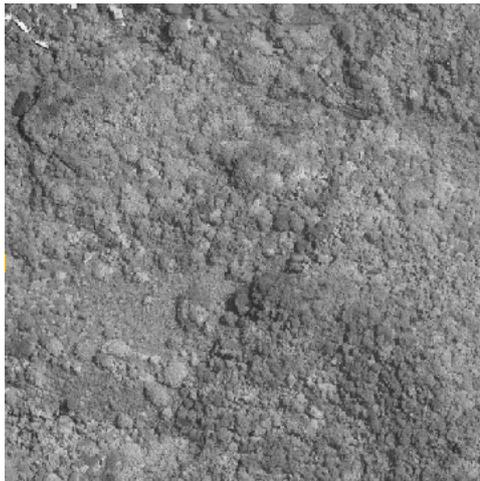
Cobertura simples

Como se pretende com esta metodologia obter um mapa denso de correspondência, é importante avaliar a área coberta pelos pares de pontos homólogos encontrados. Para isso define-se inicialmente a *superfície_coberta* como sendo a área da união de todos os pixels cujos homólogos foram encontrados pelo método e de suas vizinhanças $d \times d$, onde d é o passo horizontal, igual ao passo vertical, utilizado no algoritmo de crescimento de

região. Define-se ainda a *superfície_total* como a área total da imagem. A medida de desempenho chamada *cobertura_simples* será dada pela razão entre a *superfície_coberta* e a *superfície_total*, conforme mostra a equação 4.1:

$$cobertura_simples = \frac{superfície_coberta}{superfície_total} \quad (4.1)$$

Tabela 4.1: As 12 sub-imagens selecionadas para os testes – Parte 1

	Esquerda	Direta
Floresta - Aérea	Sub-imagem A1 esquerda 	Sub-imagem A1 direita 
Floresta - Satélite	Sub-imagem S1 esquerda 	Sub-imagem S1 direita 
Rural - Aérea	Sub-imagem A2 esquerda	Sub-imagem A2 direita

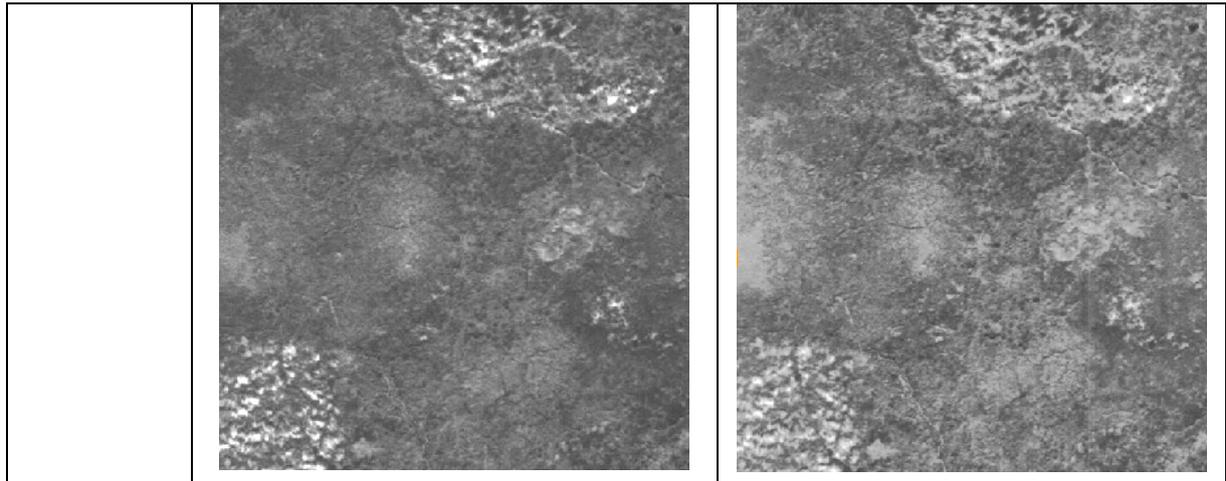
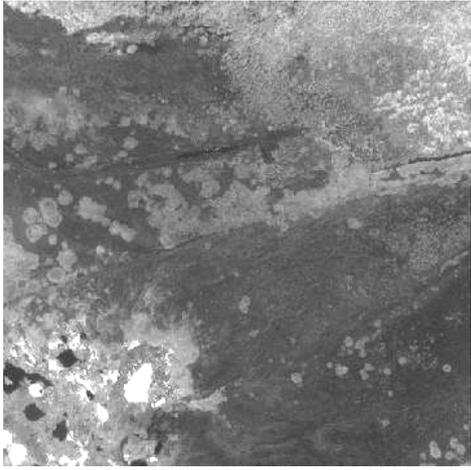
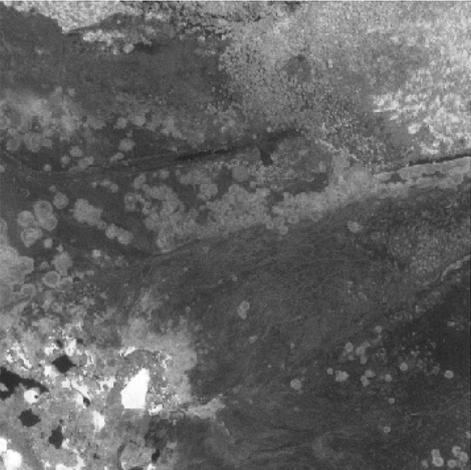


Tabela 4.1: As 12 sub-imagens selecionadas para os testes – Parte 2

	Esquerda	Direta
Rural - Satélite	Sub-imagem S2 esquerda 	Sub-imagem S2 direita 
Residencial - Aérea	Sub-imagem A3 esquerda 	Sub-imagem A3 direita 
Residencial	Sub-imagem S3 esquerda	Sub-imagem S3 direita

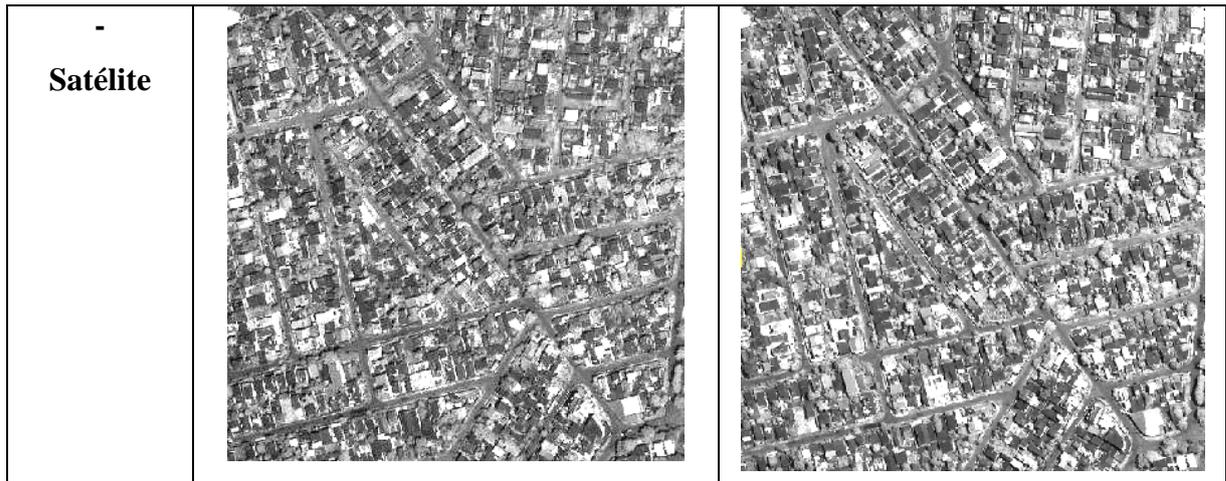


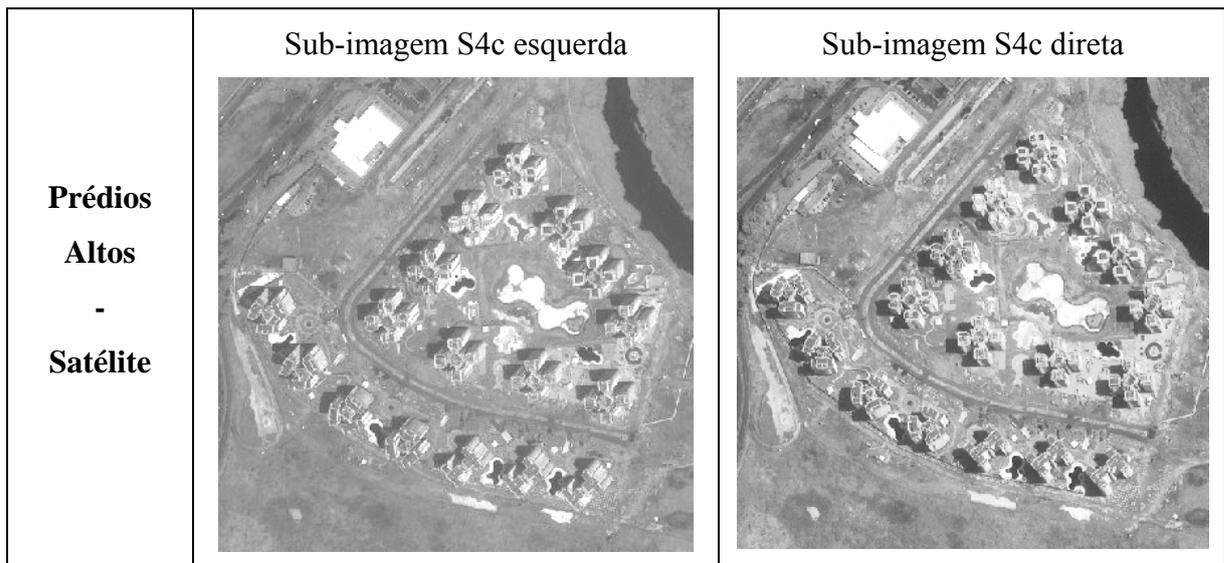
Tabela 4.1: As 12 sub-imagens selecionadas para os testes – Parte 3

	Esquerda	Direta
<p>Prédios Altos - Aérea</p>	<p>Sub-imagem A4a esquerda</p> 	<p>Sub-imagem A4a direita</p> 
<p>Prédios Altos - Aérea</p>	<p>Sub-imagem A4b esquerda</p> 	<p>Sub-imagem A4b direita</p> 

<p>Prédios Altos - Aérea</p>	<p>Sub-imagem A4c esquerda</p> 	<p>Sub-imagem A4c direita</p> 
--	--	--

Tabela 4.1: As 12 sub-imagens selecionadas para os testes – Parte 4

	<p>Esquerda</p>	<p>Direta</p>
<p>Prédios Altos - Satélite</p>	<p>Sub-imagem S4a esquerda</p> 	<p>Sub-imagem S4a direita</p> 
<p>Prédios Altos - Satélite</p>	<p>Sub-imagem S4b esquerda</p> 	<p>Sub-imagem S4b direita</p> 



4.2.2

Cobertura nos topos

Vê-se que o algoritmo do crescimento de região tem dificuldades para encontrar correspondências em áreas com grandes variações de altura, como as fachadas ou os topos dos prédios altos. De um modo geral as fachadas são diferentes em cada imagem, e é então impossível encontrar seus correspondentes. Ao contrário, os topos são aproximadamente iguais nas duas vistas, sendo possível e essencial encontrar seus correspondentes, pois se trata de criar modelos de elevação ou modelos de superfície da área urbana. Espera-se, portanto, que o método baseado em feições seja capaz de encontrar pontos em cima dos prédios. Define-se então uma máscara com polígonos cobrindo os tetos dos prédios da imagem, como mostrado em branco na figura 4.5, para poder restringir a avaliação especificamente a essas áreas de muito interesse. Essa máscara é definida manualmente numa nova janela do protótipo construído para este trabalho (ver figura 4.11).



Figura 4.5: Máscara dos topos aparecendo em branco

Assim, a medida de desempenho chamada *cobertura_topos* diz respeito somente à cobertura nos topos, e será dada pela razão entre a *superfície_coberta_nos_topos* e a *superfície_total_dos_topos* (a soma de todas as áreas de todos os topos da imagem), conforme mostra a equação (4.2):

$$cobertura_topos = \frac{superfície_coberta_nos_topos}{superfície_total_dos_topos} \quad (4.2)$$

4.2.3

Porcentagem de topos atingidos

Com a mesma máscara da seção precedente, é possível contar o número de topos de prédios que foram atingidos, denotado por “*núm_topos_atingidos*”. Um topo não será considerado atingido se poucos pontos encontrarem seus pares sobre ele, como ilustra a figura 4.6, onde o topo é representado por um retângulo delimitado em preto. Nesta figura os pontos com homólogos encontrados pelo crescimento de região são indicados pelas cruzes brancas. Em cada uma dessas imagens, um ponto no centro de uma circunferência branca foi encontrado no topo. Nota-se claramente que se trata de um pareamento falso. É razoável admitir que, uma vez atingido um topo, o crescimento de região será capaz de cobrir o topo todo, já que há poucas diferenças entre os topos nas duas imagens do par.

Ilustra-se essa afirmação (que também foi verificada aqui) na figura 4.7, onde há exemplos do comportamento usual do crescimento de região nos topos dos prédios:

- ou o topo fica completamente coberto,
- ou o topo não é atingido por nenhum ponto,
- ou o topo é atingido por um ou alguns pontos, caso em que o pareamento é falso. Esses erros ocorrem na maioria das vezes por causa de sombras muito grandes em torno dos topos, ou por causa de um contraste insuficiente.

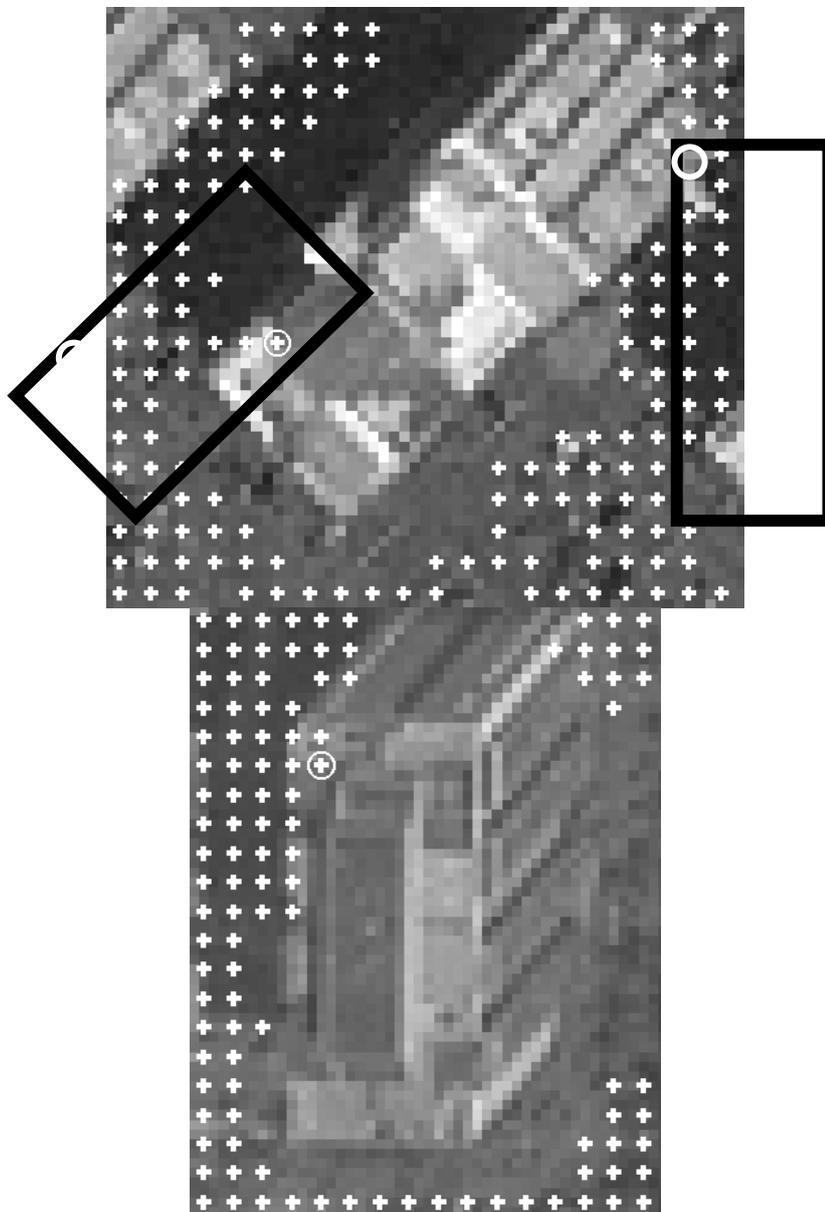


Figura 4.6: Exemplo de topo atingido somente por um ponto

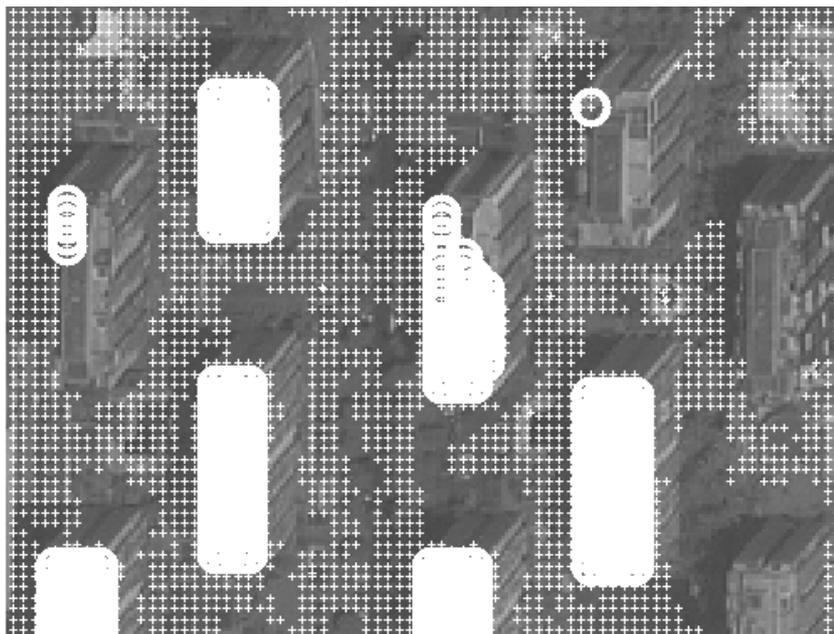


Figura 4.7: Acima: imagem original sem cobertura, Abaixo : Os topos são totalmente cobertos, não atingidos ou somente por poucos pontos

Foi decidido então considerar um topo atingido se o crescimento de região cobriu pelo menos 25% da sua superfície. Decidiu-se definir a métrica “%_topos_atingidos” na equação 4.3 como sendo a razão entre esse número de topos atingidos e o número total de topos presentes na máscara (“núm_total_topos”).

$$\%_topos_atingidos = \frac{núm_topos_atingidos}{núm_total_topos} \times 100\% \quad (4.3)$$

4.3

O protótipo

Para avaliar o funcionamento e o desempenho do método híbrido proposto nessa dissertação, foi desenvolvido um protótipo no MATLAB para realizar todas as operações. São descritas rapidamente nessa seção, e detalhadas no anexo B.

4.3.1

Seqüência das operações

Esta seção apresenta de modo sucinto a seqüência típica de operações prevista neste trabalho para se obter um mapa denso de pares de pontos homólogos, e consiste das seguintes etapas principais:

- a) Inicialmente leem-se as imagens e os metadados contidos no arquivo de imagens, e selecionam-se as regiões de interesse das imagens.
- b) Aplica-se o SIFT (primeiro passo) para construir o primeiro repositório de sementes.
- c) Aplica-se a correlação por mínimos quadrados e crescimento de região a partir das sementes encontradas na etapa anterior.
- d) Reunem-se as informações, ou seja a lista de pontos para a restrição da homogeneidade dos deslocamentos, assim como as máscaras dos buracos do crescimento de região.
- e) Aplica-se a o SIFT (segundo passo) novamente utilizando as informações coletadas no passo anterior.
- f) Finalmente aplica-se a correlação por mínimos quadrados e crescimento de região ao o novo conjunto de sementes encontrado na etapa anterior.

A organização dessas operações no protótipo é ilustrada na figura 4.8. As operações a), b), c) e d) são executadas diretamente, para voltar em seguida a executar às etapas e) e f) do algoritmo.

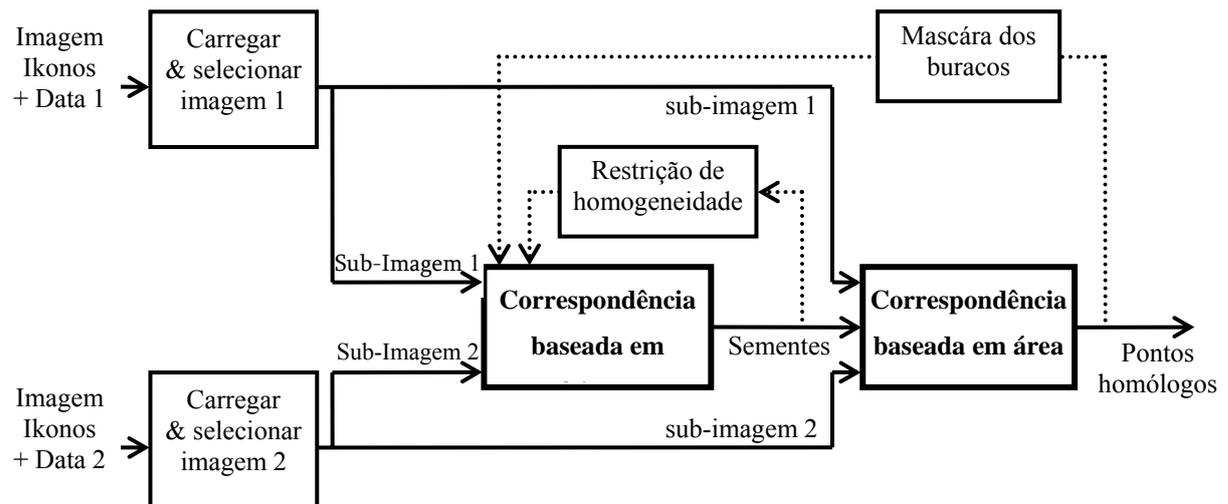


Figura 4.8: Organização das operações no protótipo

4.3.2

Janelas da interface

Cada uma das operações apontadas na seção anterior está acessível através de uma interface gráfica do protótipo desenvolvida no ambiente Matlab. O funcionamento simplificado de cada uma das janelas que compõem a interface gráfica é descrito nas sub-seções que se seguem, todos as opções são detalhadas no anexo B.

4.3.2.1

Janela principal

A figura 4.9 mostra a janela principal da interface gráfica com todas as operações acessíveis diretamente. Abaixo à esquerda e à direita aparece a visualização da imagem inteira sobre a qual se pode selecionar uma sub-imagem (delimitada como um quadrado branco). Essas sub-imagens são mostradas ampliadas acima à direita e à esquerda (o par estéreo). Na coluna central aparecem todas as operações principais e os campos para regular os parâmetros dessas operações :

- Leitura das imagens (“Overview Creation”) e dos metadados,
- Seleção das sub-imagens (“Select Sub-Image”),

- Pré-processamento (“Pre-Processing”), opcional, que solicita a abertura de uma nova janela da interface, mas que não foi utilizado nessa dissertação,
- Definição da grade de avaliação (“Evaluation Grid”),
- Cálculo das correspondências baseadas em feições (“Features Match Computing”), que solicita a abertura de uma nova janela da interface detalhada na sub-seção seguinte. Aparecem todas as operações disponíveis com as várias listas separadas de feições que o programa pode calcular (visualização das listas de coordenadas, visualização das feições nas imagens, armazenamento pelo cálculo da homogeneidade, pelo cálculo da correlação, pelo cálculo do modelo 3D, pela avaliação ou pela exportação em arquivos de texto)

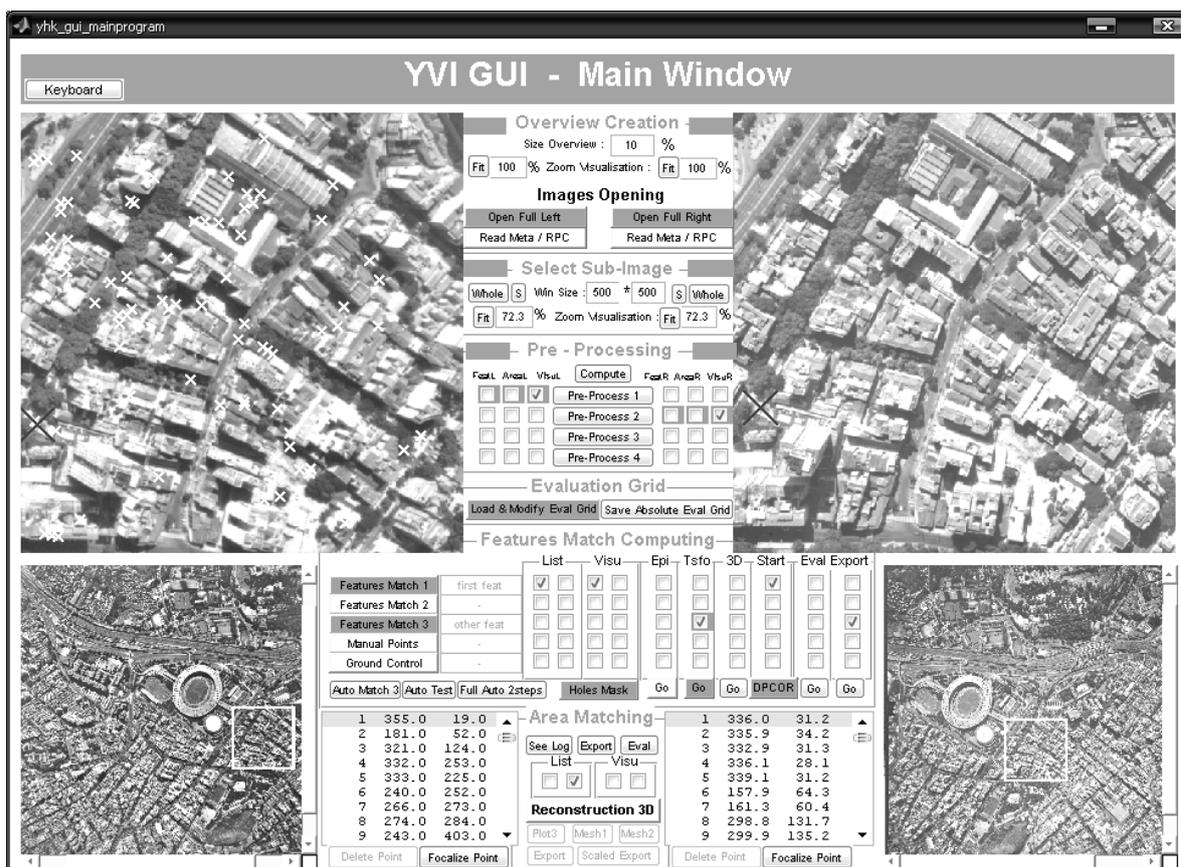


Figura 4.9: Janela Principal da interface gráfica

- Cálculo das correspondências baseada em área (“Area Matching”), com algumas das mesmas operações disponíveis (visualização das listas de coordenadas, visualização nas imagens, armazenamento pela avaliação

ou pela exportação). A correlação não é calculada diretamente no Matlab, mas por um programa externo detalhado no anexo A.

- Cálculo e visualização do modelo 3D, que não faz parte dessa dissertação.

4.3.2.2

Janela da correspondência de feições

A figura 4.10 mostra a janela da correspondência das feições com todas as operações acessíveis na coluna da esquerda, e no meio entre as duas sub-imagens, assim como todos os parâmetros do cálculo das feições. A vista da esquerda do par estéreo fica acima, enquanto a outra fica abaixo. Na coluna esquerda são acessíveis os campos para :

- Carregar e salvar as configurações, (“Load”)
- Procurar os pontos chaves com todos os parâmetros (“Compute Keypoints”)
- Refinar esses pontos (“Refine Keypoints”)
- Calcular os descritores (“Compute Descriptors”)
- Buscar a correspondência entre os pontos (“Match Keys”)
- Salvar, modificar as correspondências

e no meio das duas imagens aparecem as opções de visualização. Assim, pode-se :

- fazer um zoom positivo ou negativo,
- visualizar ou não as imagens,
- visualizar os pontos chave sem ou com refinamento, ou
- escolher a forma como são representados esses pontos chave

Mais detalhes são explicados no anexo B : Detalhes da interface Matlab.

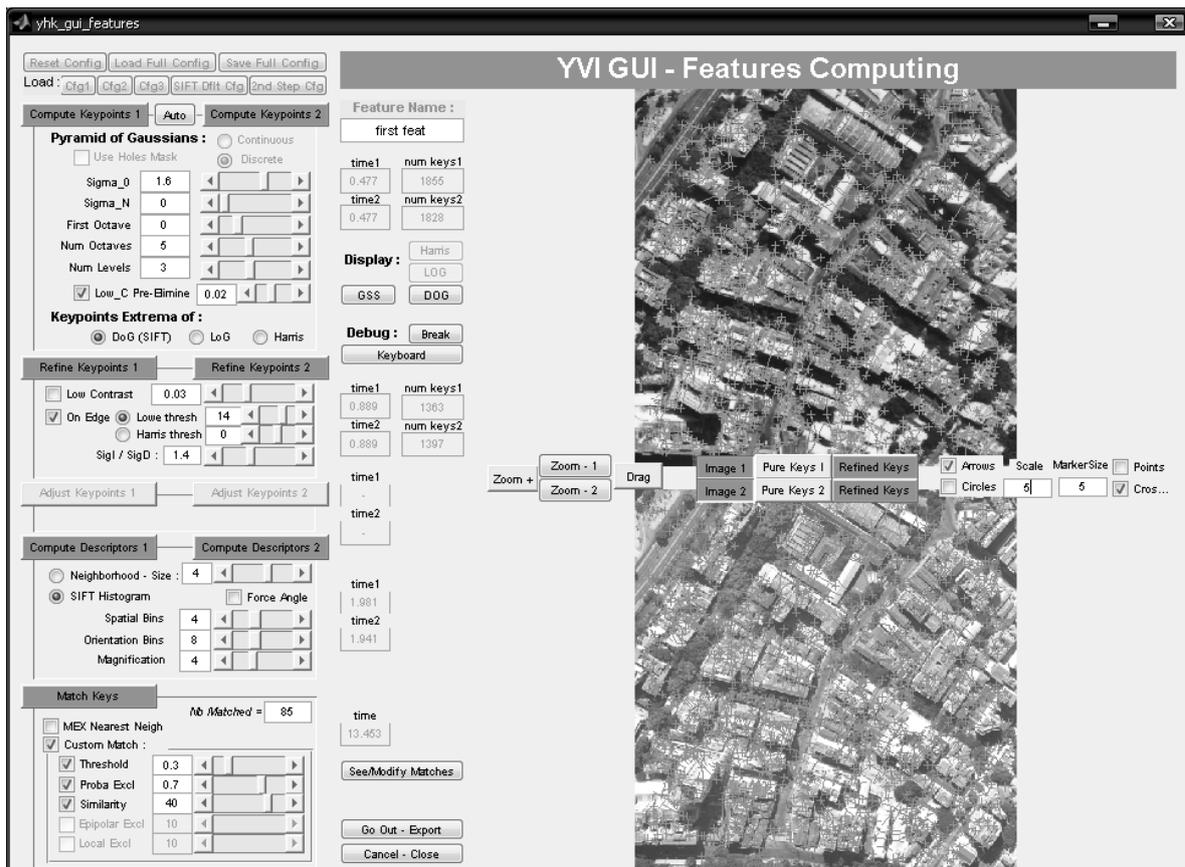


Figura 4.10: Janela da correspondência de feições

4.3.2.3

Janela de definição das grades de avaliação

Para definir os topos de prédios (vide seção 4.2.2), cria-se uma máscara com polígonos. A figura 4.11 mostra um exemplo da janela da interface que permite a um operador definir essa máscara. Em branco aparecem os topos que já foram definidos pelo operador. As operações disponíveis são:

- Definir novo topo (“New Building Top”)
- Definir nova floresta (“New Florest”) - uma opção que não é utilizada nessa dissertação mas que foi implementada na interface.
- Apagar um polígono já definido (“Delete Element”)
- Reinicializar a máscara (“Clear All”)
- Carregar uma máscara já definida (“Add Grid File”)
- Salvar a máscara atual (“Write Rel Grid”)
- Sair salvando a máscara (“Exit & Save”)

- Sair sem salvar a máscara, fica com a máscara precedente (“Exit No Save”)

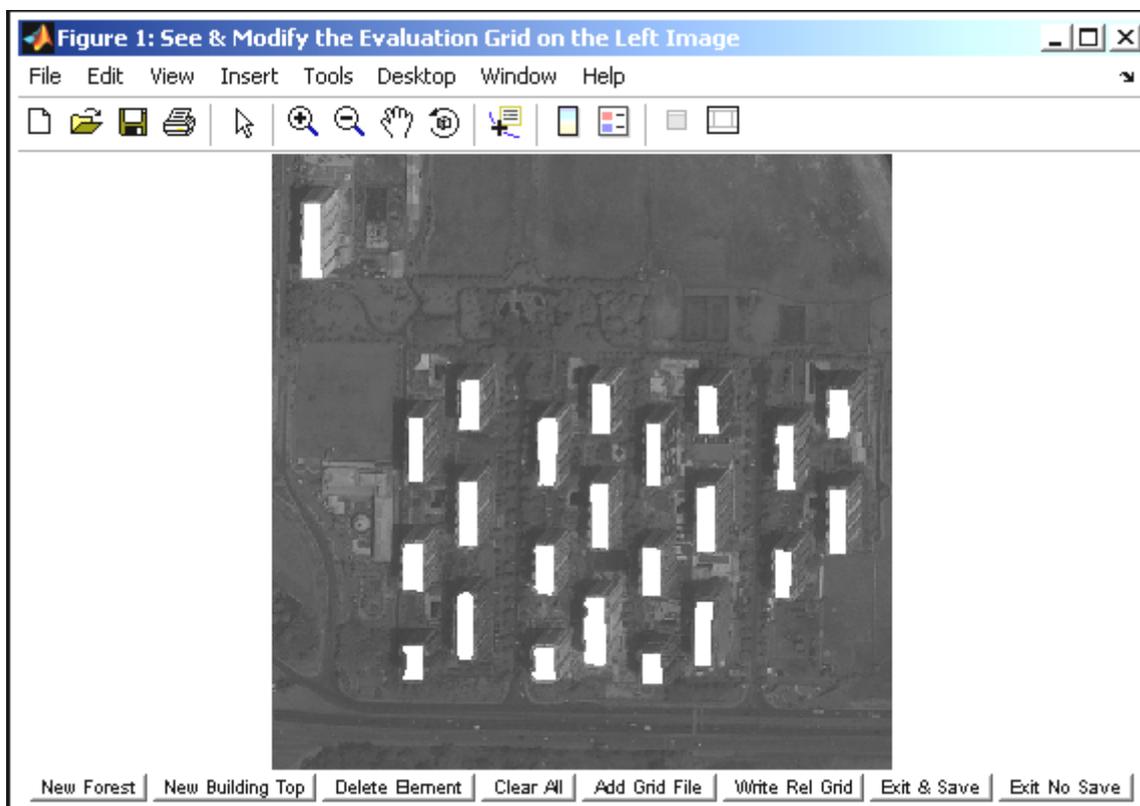


Figura 4.11: Janela de definição da grade de avaliação

4.3.2.4

Janela dos resultados

Finalmente, a figura 4.12 mostra a janela dos resultados, que mostra ao usuário todos os resultados calculados sobre a correspondência. Aparecem aqui as medidas definidas na seção 4.2:

- Cobertura simples (em %, “Total Density”),
- Cobertura nos topos (em %, “On Top Density”),
- Porcentagem de topos selecionados (“% Tops Selected”),

além de outras medidas que não serão utilizadas diretamente pela avaliação do desempenho nessa dissertação:

- Número total de pontos (“Nb Points Total”),
- Número de pontos nos topos (“Nb of Tops”),

- Número total de topos (“Nb Points On Top”),
- Número de topos atingidos (cobertos a mais do que 25% - “Touched Tops”),
- Número de topos cobertos a menos do que 25% (“Touched Tops”),
- Histograma do número de pontos por topo (“Histogram – Nb Points / Top”).

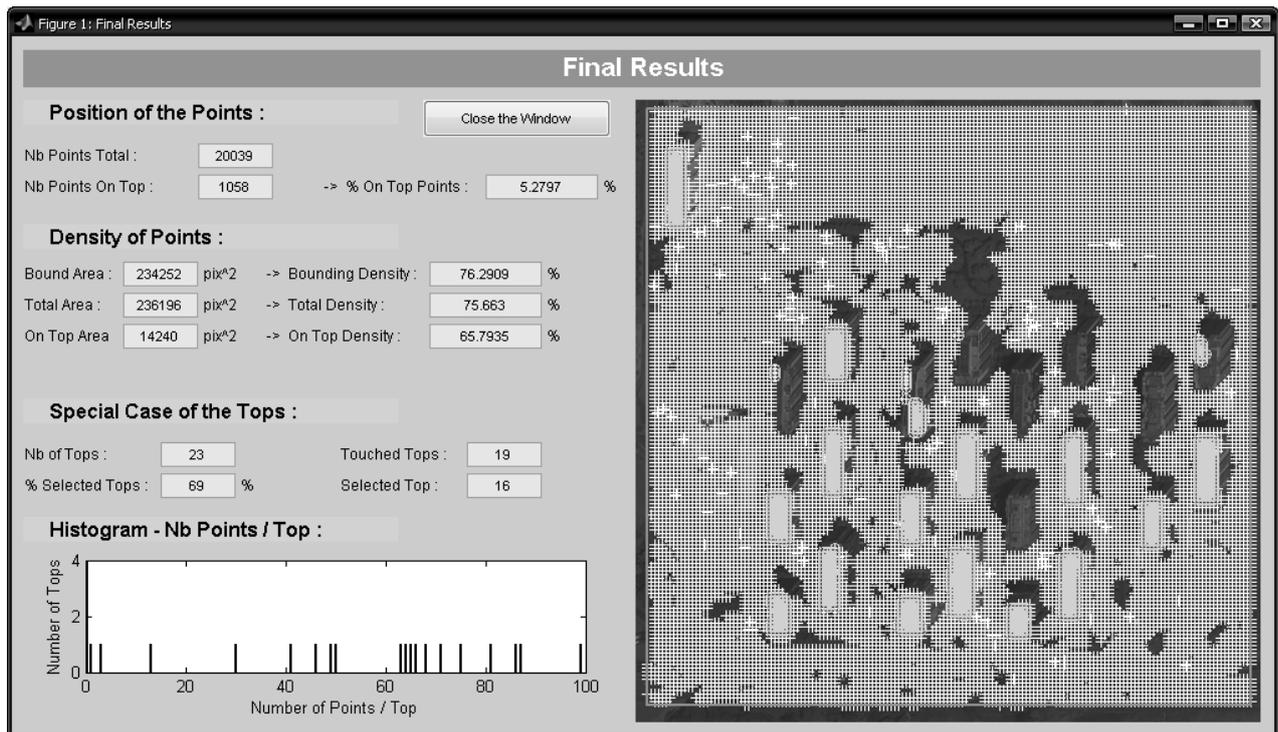


Figura 4.12: Janela dos resultados

4.4

Experimentos

São apresentados nesta seção os experimentos realizados, especificamente os procedimentos, os resultados e as correspondentes discussões. Deve-se responder à pergunta seguinte : Quando, como e de quanto o método híbrido melhora o desempenho? As três medidas disponíveis para esse estudo foram definidas na seção 4.2 (*cobertura_simples*, *cobertura_topos* e *%_topos_atingidos*). Para ter uma avaliação adequada é importante analisar diretamente as imagens e os pontos correspondentes encontrados.

4.4.1

Experimento 1: As coberturas manuais – As referências

4.4.1.1

Objetivo e procedimento

Essa seção tem por objetivo medir as coberturas que o método manual pode conseguir, o que será utilizado como referência para avaliar a melhora obtida pelos métodos híbridos propostos.

Para cada sub-imagem escolhida (de A1 até A4c e de S1 até S4c, conforme seção 4.1.3), um par de sementes foi inserido manualmente por um operador humano e, a partir destas, executou-se a correlação por mínimos quadrados com o crescimento de região. Este procedimento foi repetido 5 vezes para cada sub-imagem; as sementes iniciais foram escolhidas de pontos distintos em cada execução, de maneira a obter uma medida menos dependente da localização das sementes escolhidas.

4.4.1.2

Resultados

Os resultados para todas as sub-imagens estão reunidos na tabela 4.2. Para os três primeiros tipos de imagens (floresta, rural e residencial), somente a medida de cobertura simples é considerada, pois não existem topos de prédios nestas imagens.

4.4.1.3

Análise

Um resumo das coberturas obtidas com esse primeiro método com uma semente manual segundo o tipo de região é dado na figura 4.13. As coberturas de mais do que 95% são consideradas como muito satisfatórias, pois raramente se atinge os 100% por causa de objetos que se movem entre os instantes em que as imagens do par são capturadas (p.ex. automóveis e sombras).

Tabela 4.2: Resultados da primeira experiência – o método manual com uma semente

	Imagem	Cobertura_simples	Cobertura_topos	%_topos_atingidos (topos atingidos / total)	
Floresta	A1	97.8 %	X	X	
	S1	0.6 %			
Rural	A2	100 %			
	S2	96.7 %			
Residencial	A3	98.9 %			
	S3	53.0 %			
Prédios Altos	A4a	16.8 %	0.9 %	1.8 %	≈ 0 / 22
	A4b	9.9 %	4.9 %	10.0 %	≈ 0 / 2
	A4c	6.7 %	3.9 %	1.5 %	≈ 1 / 39
	Média A4a/b/c	11.1 %	3.2 %	4.4 %	X
	S4a	73.7 %	8.3 %	8.0 %	2 / 25
	S4b	68.2 %	6.8 %	4.4 %	1 / 23
	S4c	75.7 %	3.5 %	0.0 %	0 / 17
	Média S4a/b/c	72.5 %	6.2 %	4.1 %	X

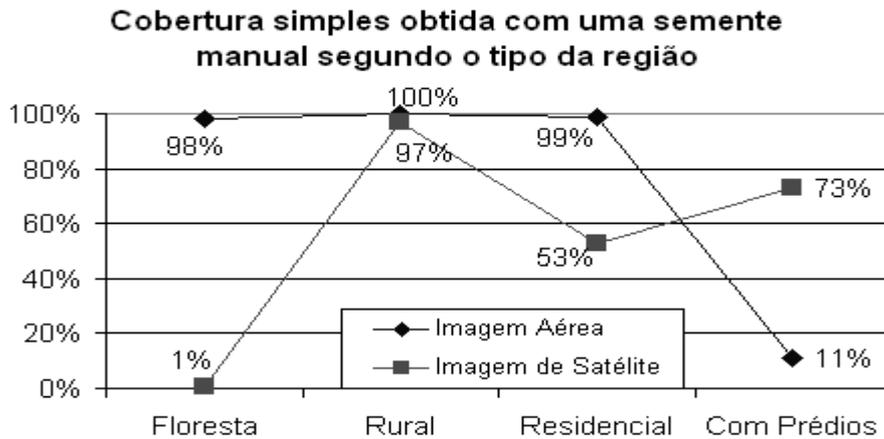


Figura 4.13: Coberturas simples obtidas com uma semente manual segundo o tipo de região

Encontram-se então três problemas:

- Florestas nas imagens de satélite : é impossível estabelecer uma correspondência entre as duas imagens do par estéreo, mesmo para um operador humano, porque não há detalhes suficientes entre as árvores que podem ser distinguidos com segurança, especialmente devido à mudança do ponto de vista. Então não pode se esperar muito mais do que uma cobertura baixa, mesmo com os outros métodos propostos neste trabalho. Já nas imagens aéreas, consegue-se quase 100%, porque a resolução é bem maior e revelam mais detalhes.
- Áreas residenciais nas imagens de satélite : obteve-se uma cobertura de 53%, o que é muito baixo para tais áreas, considerando os detalhes que aparecem nas imagens. A figura 4.14 ilustra alguns dos problemas encontrados num par desse tipo de imagem. Trata-se na maioria dos casos de sombras ou objetos homogêneos , sem pontos claramente localizáveis (árvores, estradas, jardins, ...) ou com baixo contraste. Na figura 4.14, o crescimento de região encontrou uma barreira que o impediu de se espalhar em toda a superfície. O método automático a seguir resolverá esse problema, fornecendo sementes do outro lado dessa barreira, melhorando assim a cobertura total.

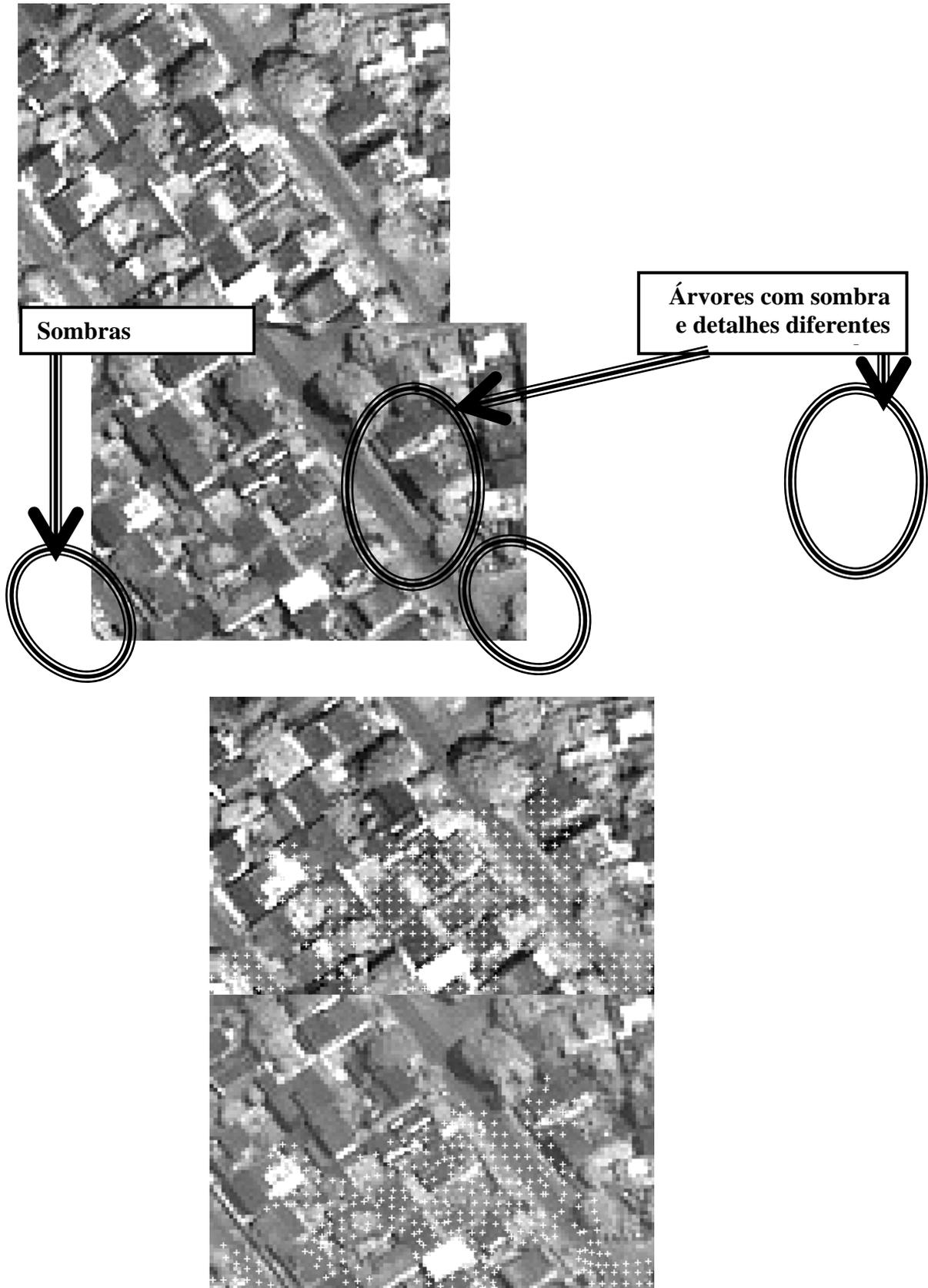


Figura 4.14: Exemplo de problemas encontrados em áreas residenciais com imagens de satélite.
Acima: par de imagens originais, abaixo : imagens com a cobertura obtida em branco.

- Áreas com prédios altos : sempre que há uma mudança abrupta de altura nas construções (tetos de prédios), o crescimento de região não avança, como já foi abordado na seção 2.1.3. É possível medir esse problema a partir do número de topos atingidos, ou da cobertura dos topos, como ilustrado na figura 4.15. O resultado é claramente insatisfatório.

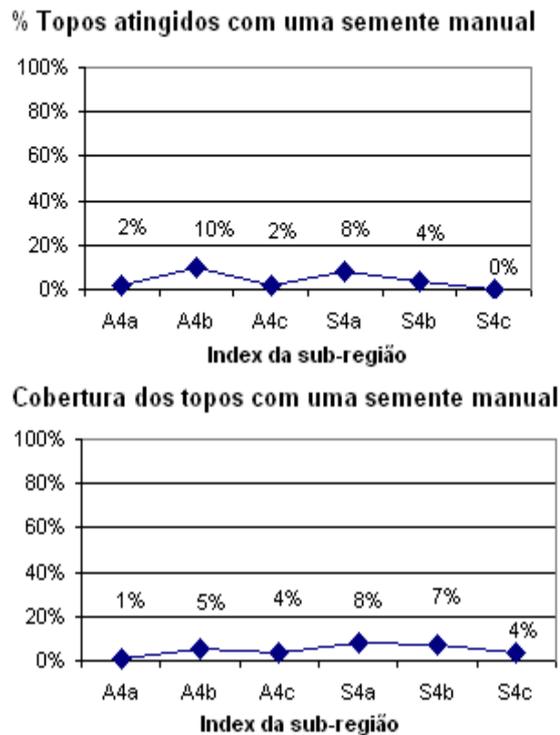


Figura 4.15: Porcentagem de topos atingidos e cobertura nos topos com uma semente manual

4.4.2

Experimento 2: Desempenho do método híbrido em 1 passo

4.4.2.1

Objetivo e procedimento

Mede-se aqui o desempenho do método híbrido em um passo. Para cada sub-imagem, o método híbrido em um passo é utilizado, como descrito na seção 3.1.1. : uma primeira correspondência baseada em feições SIFT, seguido por uma correlação por mínimos quadrados junto com o crescimento de região.

Tabela 4.3: Parâmetros utilizados no método híbrido em 1 passo

		Aérea	Satélite
Seleção dos pontos chave	Número de oitavas da pirâmide de gaussianas	5	5
	Primeira oitava da pirâmide (-1 → a imagem é reamostrada ao dobro do tamanho inicial para criar uma oitava abaixo)	-1	-1
	Número de níveis per oitava na pirâmide	3	3
	Desvio padrão da gaussiana aplicada ao primeiro nível da pirâmide	1.6	1.4
	Desvio padrão suposto da imagem de entrada	0.5	0.2
Refinamento	Limiar de aceitação dos pontos de pouco contraste	0.03	0.005
	Limiar de rejeição dos pontos em linhas retas (CRIT Lowe)	20	15
Descritor	Número de sub-regiões do descritor	4 × 4	
	Número de pixels per sub-região	3 × 3	
	Número de direções no histograma SIFT	4	
Correspondência	Limiar da condição sobre a distância ao mais próximo	0.3	
	Limiar da razão mais próximo / segundo mais próximo	0.7	
	Limiar de aceitação da homogeneidade a posteriori	50 pixels	
	Uso das máscaras dos buracos	Não	
	Uso da homogeneidade a priori	Não	

Foram testadas várias combinações de valores dos parâmetros para as correspondências, e selecionadas aquelas que geraram os melhores resultados. Nota-se que são um pouco diferentes para as imagens de satélite e para as imagens aéreas, devido às diferenças de contraste e de detalhes das imagens. Os valores dos parâmetros são detalhados na tabela 4.3 aqui.

4.4.2.2

Resultados

Na mesma forma que para o primeiro experimento, todos os resultados para todas as sub-imagens são reunidos na tabela 4.4 abaixo.

Tabela 4.4: Resultados da segunda experiência – método híbrido em 1 passo

	Imagem	Cobertura_simples	Cobertura_topos	%_topos_atingidos (topos atingidos / total)	
Floresta	A1	97.8 %	X	X	
	S1	6.5 %			
Rural	A2	100 %			
	S2	96.7 %			
Residencial	A3	98.9 %			
	S3	69.5 %			
Prédios Altos	A4a	51.1 %	21.9 %	27.3 %	6 / 22
	A4b	67.7 %	76.8 %	50.0 %	1 / 2
	A4c	40.9 %	48.9 %	38.5 %	15 / 39
	Média A4a/b/c	53.2 %	49.2 %	38.6 %	X
	S4a	77.1 %	50.5 %	64.0 %	16 / 25
	S4b	78.8 %	88.6 %	95.7 %	22 / 23
	S4c	81.2 %	36.2 %	35.3 %	6 / 17
	Média S4a/b/c	79.0 %	58.4 %	65.0 %	X

4.4.2.3

Análise

É pequeno o ganho obtido pelo o método híbrido em 1 passo em termos de “cobertura simples”, como mostra a figura 4.16. Semelhantemente é reduzido o ganho produzido, em termos de “topos atingidos” e “cobertura nos topos” para áreas com prédios, como apresentado na figura 4.17. Há alguma melhoria, mas ainda insuficiente. De fato, a correspondência simples, sem nenhuma informação, como foi calculada nesse passo, não é capaz de gerar as sementes necessárias para conseguir boas coberturas e para atingir todos os topos. Este resultado deixa clara a necessidade do segundo passo para completar o repositório de sementes, como será avaliado no próximo experimento. Uma comparação mais detalhada dos métodos entre si, assim com uma análise mais profunda é feita depois do próximo experimento (método híbrido em dois passos).

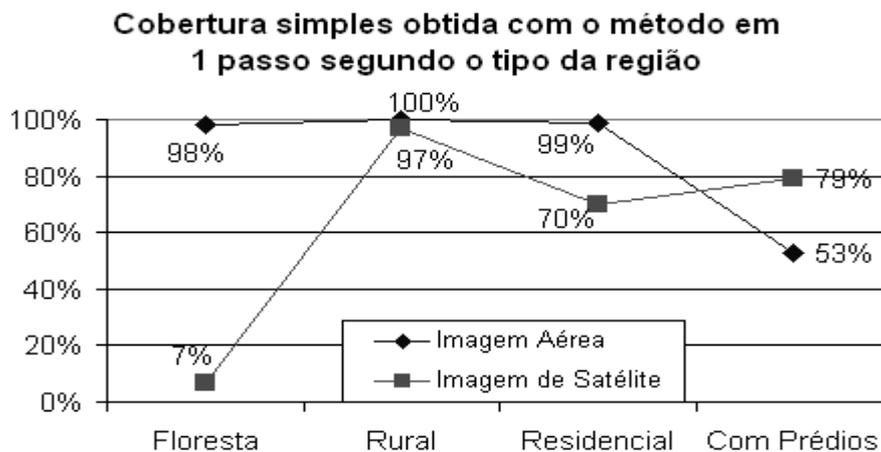


Figura 4.16: Coberturas simples obtidas com o método híbrido em 1 passo segundo o tipo de região

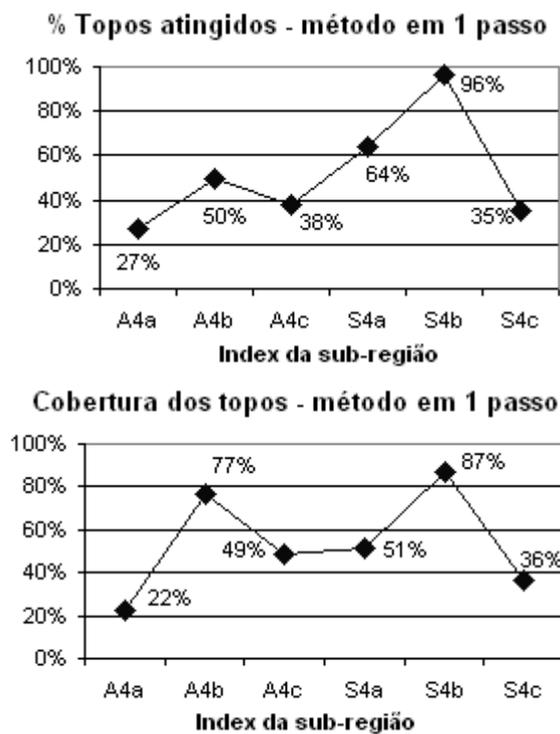


Figura 4.17: Porcentagem de topos atingidos e cobertura nos topos com uma semente manual

4.4.3

Experimento 3: Desempenho do método híbrido em 2 passos

4.4.3.1

Objetivo e procedimento

Mede-se aqui o desempenho do método híbrido em dois passos. Para cada sub-imagem, o método híbrido em dois passos é utilizado, exatamente como descrito na seção 3.1.2.

De novo, foram testadas todas as combinações de valores de parâmetros para as correspondências, e foram escolhidas as que produziram os melhores resultados. Nota-se que são um pouco diferentes para os dois passos e para as imagens de satélite ou aéreas.

Tabela 4.5: Parâmetros utilizados no método híbrido em 2 passos para imagens de satélite

		SATELITE	
		Passo 1	Passo 2
Seleção dos pontos chave	Número de oitavas da pirâmide de gaussianas	5	5
	Primeira oitava da pirâmide (-1 → a imagem é reamostrada ao dobro do tamanho inicial para criar uma oitava abaixo)	-1	-1
	Número de níveis per oitava na pirâmide	3	3
	Desvio padrão da gaussiana aplicada ao primeiro nível da pirâmide	1.6	1.2
	Desvio padrão suposto da imagem de entrada	0.5	0.2
Refinamento	Limiar de aceitação dos pontos de pouco contraste	0.005	0.001
	Limiar de rejeição dos pontos em linhas retas (CRIT Lowe)	15	Não
Descritor	Número de sub-regiões do descritor	4 × 4	2 × 2
	Número de pixels per sub-região	3 × 3	3 × 3
	Número de direções no histograma SIFT	4	4
Correspondência	Limiar da condição sobre a distância ao mais próximo	0.3	0.3
	Limiar da razão mais próximo / segundo mais próximo	0.7	0.7
	Limiar de aceitação da homogeneidade a posteriori	50 pix	Não
	Uso das máscaras dos buracos	Não	Sim
	Limiar de aceitação da homogeneidade a priori	Não	50 pix

Tabela 4.6: Parâmetros utilizados no método híbrido em 2 passos para imagens aéreas

		AVIAO	
		Passo 1	Passo 2
Seleção dos pontos chave	Número de oitavas da pirâmide de gaussianas	5	5
	Primeira oitava da pirâmide (-1 → a imagem é reamostrada ao dobro do tamanho inicial para criar uma oitava abaixo)	-1	-1
	Número de níveis per oitava na pirâmide	3	3
	Desvio padrão da gaussiana aplicada ao primeiro nível da pirâmide	1.6	1.3
	Desvio padrão suposto da imagem de entrada	0.5	0.2
Refinamento	Limiar de aceitação dos pontos de pouco contraste	0.03	0.02
	Limiar de rejeição dos pontos em linhas retas (CRIT Lowe)	20	Não
Descritor	Número de sub-regiões do descritor	4 × 4	2 × 2
	Número de pixels per sub-região	3 × 3	2 × 2
	Número de direções no histograma SIFT	4	4
Correspondência	Limiar da condição sobre a distância ao mais próximo	0.3	0.3
	Limiar da razão mais próximo / segundo mais próximo	0.7	0.7
	Limiar de aceitação da homogeneidade a posteriori	50 pix	Não
	Uso das máscaras dos buracos	Não	Sim
	Limiar de aceitação da homogeneidade a priori	Não	50 pix

Eles são detalhados na tabela 4.5 para as imagens de satélite, e na tabela 4.6 para as imagens aéreas. É possível destacar 3 tipos de diferenças entre o primeiro e o segundo passo :

- O segundo passo trabalha mais com os detalhes da imagem : a filtragem é menos importante (desvio padrão das gaussianas menor) e o descritor utilizado descreve uma região menor do que no primeiro passo (2 × 2 sub-regiões de 3 × 3 pixels cada uma para a imagem de satélite e de 2 × 2 pixels cada uma para a imagem aérea, ao invés de 4 × 4 sub-regiões de 3 × 3 pixels no primeiro passo)
- Focaliza-se a busca, como descrito na seção 3.1.2, com a máscara dos buracos, e prevê-se onde encontrar os correspondentes dos pontos com a homogeneidade a priori. Isto torna o algoritmo mais eficiente.
- Menos pontos chave são eliminados nas áreas de baixo contraste, e não se eliminam os pontos sobre arestas. O algoritmo trabalha com mais pontos e arrisca mais, implicitamente confiando que a correlação por mínimos quadrados eliminará depois as sementes erradas, assim como melhorará a exatidão de sua posição.

4.4.3.2

Resultados

Todos os resultados para todas as sub-imagens são reunidos na tabela 4.7 abaixo.

Tabela 4.7: Resultados da terceira experiência – método híbrido em 2 passos

	Imagem	Cobertura_simples	Cobertura_topos	%_topos_atingidos (topos atingidos / total)				
Floresta	A1	97.8 %	X	X				
	S1	16.7 %						
Rural	A2	100 %						
	S2	96.9 %						
Residencial	A3	98.9 %						
	S3	73.5 %						
Prédios Altos	A4a	66.5 %				70.7 %	95.5 %	21 / 22
	A4b	75.6 %				81.8 %	100 %	2 / 2
	A4c	65.3 %				72.1 %	100 %	39 / 39
	Média A4a/b/c	69.1 %	74.9 %	98.5 %	X			
	S4a	81.8 %	79.7 %	92 %	23 / 25			
	S4b	81.8 %	98.0 %	100 %	23 / 23			
	S4c	85.6 %	64.9 %	94 %	16 / 17			
	Média S4a/b/c	83.1 %	80.9 %	95 %	X			

4.4.3.3

Análise geral

O método em dois passos é comparado diretamente com os dois outros métodos segundo os tipos de regiões estudados para imagens aéreas na figura 4.18, e para imagens de satélite na figura 4.19. Vê-se que ele sempre fornece uma cobertura igual ou maior às dos outros métodos.

- Nos casos onde o método manual já fornecia uma cobertura maior do que 95%, os métodos híbridos trazem evidentemente pouco benefício adicional (floresta, rural e residencial em imagens aéreas, e rural em imagens de satélite).
- No caso da floresta em imagens de satélite, o método híbrido melhorou um pouco a cobertura, mas como foi mencionado na análise do primeiro experimento, é impossível para a correlação por mínimos quadrados

estabelecer o mapa de correspondência por causa da falta de detalhes nestas florestas.

- A grande melhora obtida no método híbrido aparece nos três outros casos : áreas residenciais em imagens de satélite, e áreas com prédios altos nas imagens de ambos os sensores. O comportamento do método nesses casos é discutido em mais detalhes na próxima sub-seção.

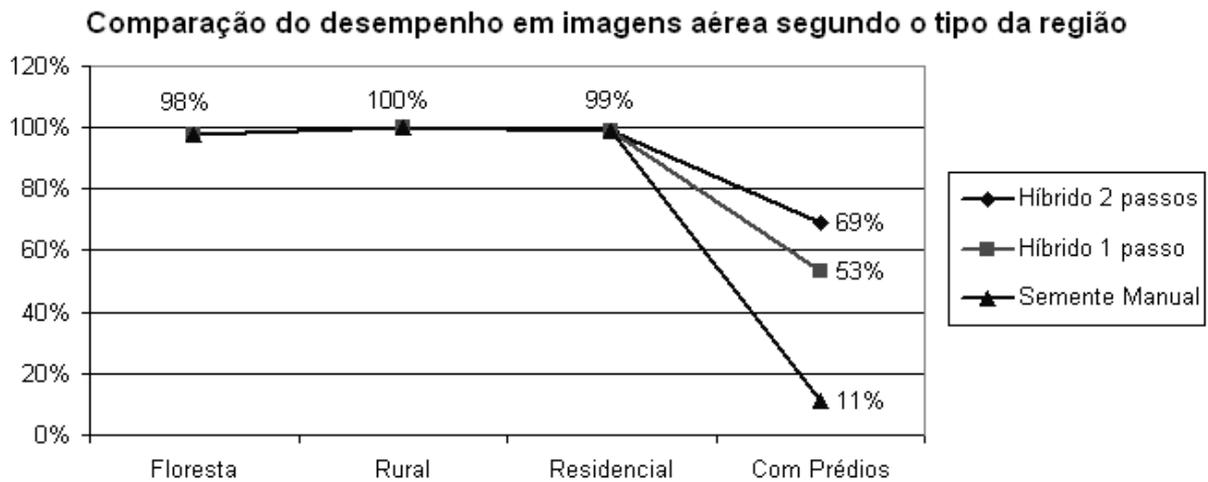


Figura 4.18: Comparação do desempenho em imagens aérea segundo o tipo de região

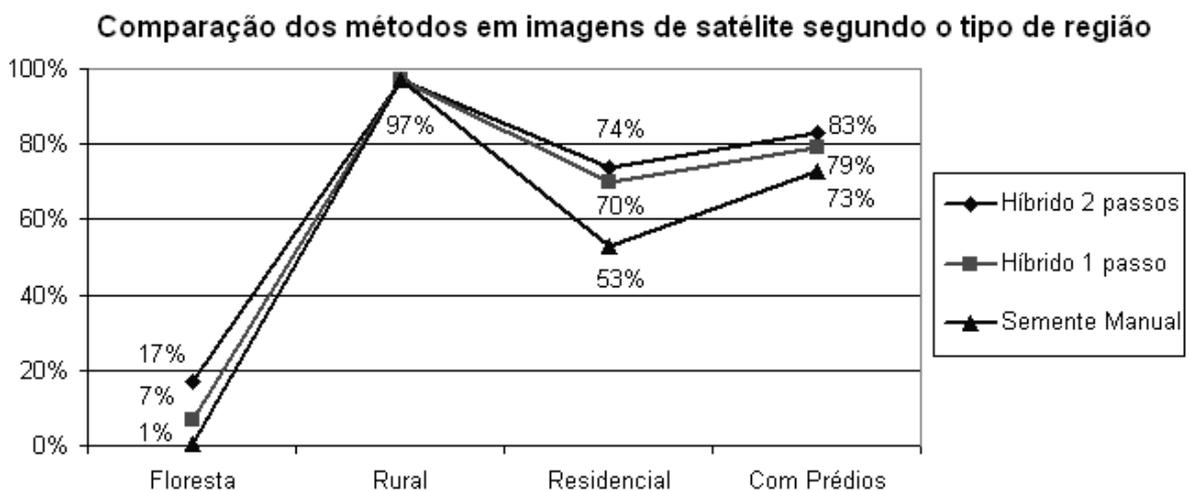


Figura 4.19: Comparação dos métodos em imagens de satélite segundo o tipo de região

4.4.3.4

Análise específica das áreas residenciais em imagens de satélite

As figuras 4.20 e 4.21 mostram a vantagem do método híbrido para as áreas residenciais. São apresentadas as duas imagens do par estéreo em cada figura, e os pontos cujos homólogos foram encontrados estão indicados com um “+” branco. A figura 4.20 mostra a cobertura obtida a partir de uma única semente manual (o × preto em baixo da imagem). Podemos adivinhar as correspondências entre os pontos, já que as áreas cobertas na direita e na esquerda têm as mesmas formas globais. Todos os pontos cobertos proveem de uma mesma semente, logo são vizinhos. Não há áreas separadas. No meio das imagens aparece um quarteirão, que não foi atingido : o crescimento de região não conseguiu atravessar a rua, certamente por causa das árvores ao longo dela, ou por falta de marcações na estrada.



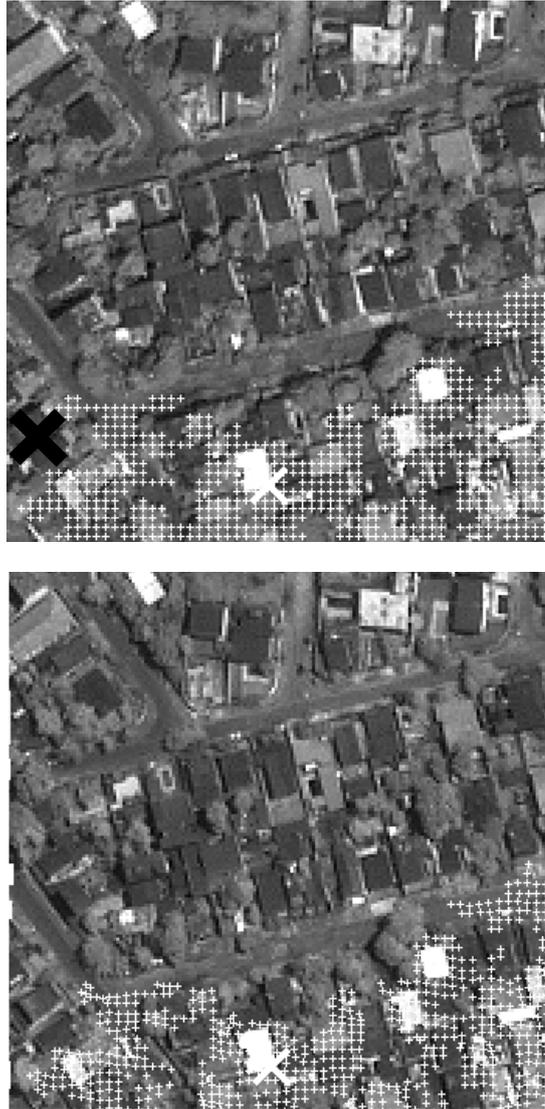


Figura 4.20: Cobertura obtida com uma semente manual numa área residencial (acima: par de imagens originais sem cobertura, abaixo : as imagens com a primeira cobertura obtida)

O método híbrido propõe uma alternativa a esse problema, fornecendo sementes do outro lado das barreiras encontradas pelo crescimento de região. Como ilustrado na figura 4.21 com a mesma área residencial, sementes foram encontradas dentro do quarteirão, e de novo as áreas correspondentes podem ser alcançadas. Aparecem alguns grupos de pontos separados dos outros, que cresceram a partir de sementes isoladas nas imagens. São essas áreas que levaram a cobertura a subir dos 53% do método manual aos 70% e 74% dos métodos híbridos. Mas muitas áreas ainda ficaram sem correspondentes, e parece difícil obter resultados melhores com os problemas de sombras e as faltas de detalhes em imagens dessa resolução. A cobertura de 74% pode então ser considerada satisfatória.

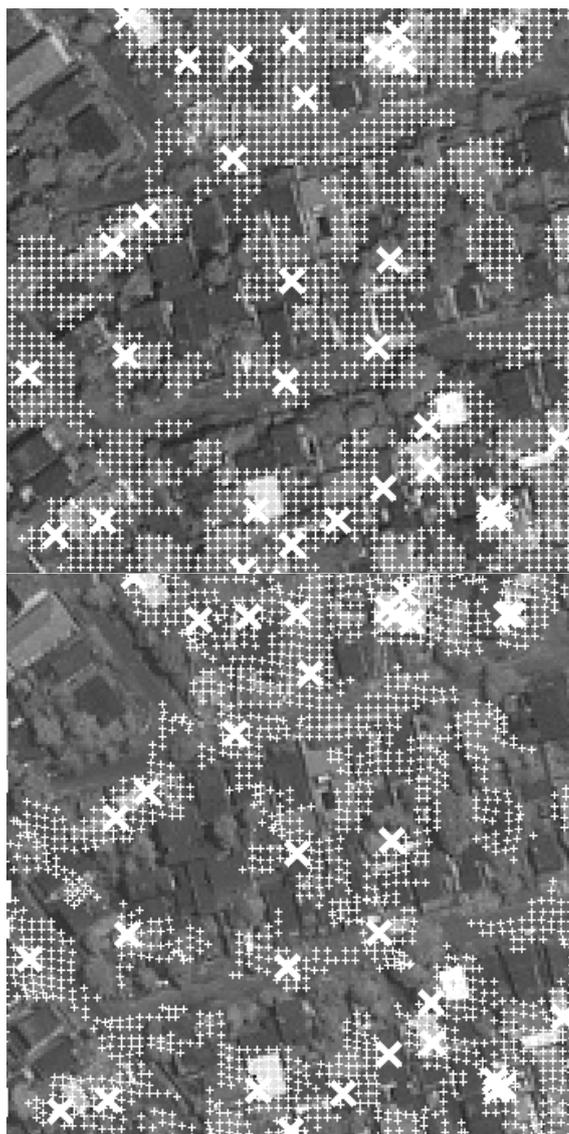


Figura 4.21: Cobertura obtida com o método híbrido na mesma área residencial

4.4.3.5

Análise específica das áreas com prédios altos

O maior ganho do método híbrido é obtido em áreas com prédios altos, pois como foi ilustrado na seção 2.1.3, o método manual com uma semente não consegue atingir praticamente nenhum dos topos de prédios. A figura 4.22 mostra a cobertura obtida com o método manual nas duas vistas do par estéreo em torno de um prédio alto. Vê-se o simples deslocamento do topo do prédio, enquanto as imagens das fachadas são totalmente diferentes de uma imagem para a outra. O

crescimento de região se espalhou perfeitamente em toda a vizinhança que o prédio não cobriu nas imagens, mas não atingiu o topo. Já na figura 4.23, sementes (\times pretos) foram geradas pelo método híbrido em cima do topo do prédio, e a correlação por mínimos quadrados conseguiu encontrar os correspondentes da maioria dos pontos em cima desse topo. Assim, um dos objetivos importantes do método, ou seja, fornecer sementes em cima de todos os prédios, foi alcançado neste caso da imagem, o que pode ser medido de duas maneiras: pelo número de topos atingidos, ou pela cobertura específica dos topos.



Figura 4.22: Cobertura obtida com o método manual em torno de um prédio alto



Figura 4.23: Cobertura obtida com o método híbrido em torno de um prédio alto

É apresentada a seguir uma comparação do desempenho dos três métodos em áreas com prédios altos nas imagens de satélite (figura 4.24) e nas imagens aéreas (figura 4.25). Comparam-se as três medidas propostas na seção 4.2. A mais relevante é a última (porcentagem de topos atingidos), que leva às observações seguintes:

- O método manual atinge poucos topos (4% de topos atingidos em média nos dois tipos de imagens, com uma cobertura nos topos também muito baixa).
- O método híbrido em 1 passo consegue fornecer algumas das sementes para cobrir uma parte dos topos, mas não é suficiente.

- Finalmente, o método híbrido em 2 passos atinge quase todos os topos das imagens com 95% nas imagens de satélite e 98% nas imagens aéreas. A cobertura desses topos é também muito elevada, o que significa que eles foram de fato cobertos, e não somente tocados em somente alguns pontos. O método híbrido em dois passos cumpriu, portanto, o objetivo neste caso.

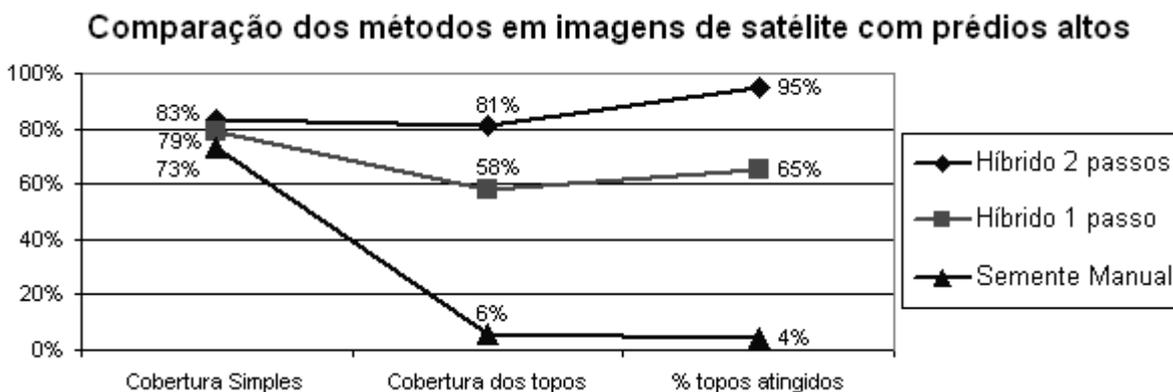


Figura 4.24: Comparação do desempenho dos três métodos em imagens de satélite com prédios altos

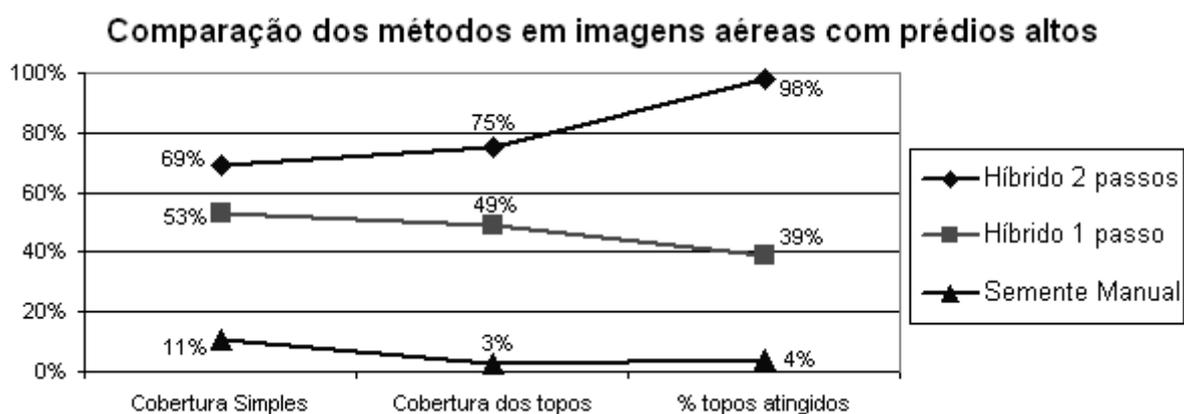


Figura 4.25: Comparação do desempenho dos três métodos em imagens aéreas com prédios altos

Os detalhes dos topos atingidos pelos três métodos e nos dois tipos de imagens são dados na tabela 4.8, e na figura 4.26 correspondente. O desempenho do método foi muito homogêneo: ficou acima de 92% em todas as imagens (um máximo de 2 topos não atingidos em um total de 23), e com uma média de 95% para as imagens de satélite, e de 99% para as imagens aéreas. O método proposto demonstrou-se, portanto, muito eficiente para fornecer uma cobertura densa na presença de fortes mudanças de elevação.

Tabela 4.8: Topos de edifícios atingidos por cada método

Sub-Imagem	Número de topos e edifícios			
	Total	Alcançados a partir de uma única semente	Alcançados com o método híbrido em 1 passo	Alcançados com o método híbrido em 2 passos
Imagens IKONOS				
S4a	25	2	16	23
S4b	23	1	22	23
S4c	17	0	6	16
Média	100 %	4 %	65 %	95 %
Imagens Aérea				
A4a	22	0	6	21
A4b	2	0	1	2
A4c	39	1	15	39
Média	100 %	4 %	39 %	99 %

Comparação dos topos atingidos pelos 3 métodos

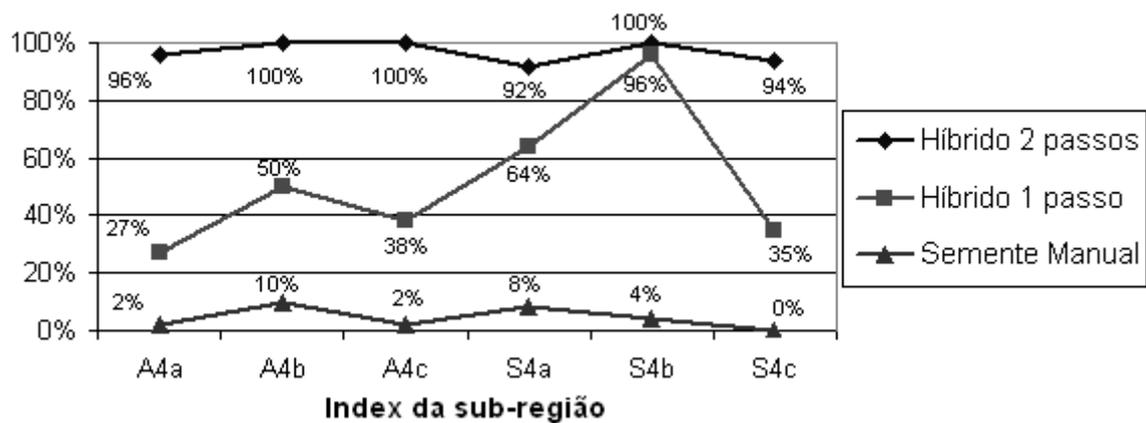


Figura 4.26: Detalhe dos topos atingidos pelos três métodos em todas as imagens com prédios altos